

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Música

Lucas Vilas Boas Teixeira de Carvalho Filho

**As paredes e os sons: explorando diferentes espaços
da escuta musical**

Belo Horizonte

2017

Lucas Vilas Boas Teixeira de Carvalho Filho

**As paredes e os sons: explorando diferentes espaços
da escuta musical**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Música da Escola de Música da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Música.

Linha de pesquisa: Sonologia

Orientador: Prof. Sérgio Freire

Co-orientador: Prof. Marco Antônio Vecci

Belo Horizonte

2017

C331p

Carvalho Filho, Lucas Vilas Boas Teixeira de

As paredes e os sons [manuscrito]: explorando diferentes espaços da escuta musical / Lucas Vilas Boas Teixeira de Carvalho Filho. – 2017.
155 f., enc.; il. + 1 CD

Orientador: Sérgio Freire.

Linha de pesquisa: Sonologia.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Música.

Inclui bibliografia.

1. Música - Teses. 2. Música - Acústica e física. 3. Auditórios. I. Freire, Sérgio . II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Música. III. Título.

CDD: 781.11

À Daniela
e nossa grande aventura

Agradecimentos

Ao Sérgio, por sua orientação inspiradora e por mostrar-me um novo mundo de sons.

Ao Vecci, por explicar as questões complexas da Acústica de forma cativante.

À banca examinadora, Maurício e Maurílio, por não somente avaliar, mas debater e fomentar ideias.

A meus pais, Maria Eugênia e Lucas, por terem me dado a possibilidade de chegar até aqui.

À minha família: Daniela, Francisco e João, por seu amor e apoio incondicionais.

Aos amigos da Engenharia, Calebe e Frederico, por sua ajuda durante esta pesquisa.

Ao Jalver, pelo empréstimo de parte do equipamento e por sua disponibilidade para a medição acústica do auditório.

Resumo

As conexões entre o som e a ideia de espaço na música podem existir tanto no âmbito estético – em seus conceitos, estilos e na aproximação entre os seus elementos constitutivos – quanto no técnico, em sua interseção física na acústica dos ambientes. A partir dessa questão, esta pesquisa buscou orientar-se através de relações concretas entre Música e Arquitetura, para explorar diferentes espaços na escuta musical. Sem o intuito de encerrar as suas possíveis associações abstratas, o trabalho mantém seu foco em elementos tangíveis nos dois campos de investigação, com vistas a estruturar parte do seu caráter subjetivo. Baseia-se na forma e no material, que estão presentes em construções arquitetônicas e musicais.

A abordagem apresentada inicia-se a partir das diferentes interseções das duas artes, com um breve histórico de alguns espaços importantes para a performance musical. Em seguida, é desenvolvido um estudo de caso sobre o auditório da Escola de Música da UFMG, através da sua medição e simulação acústicas; esta última por meio um modelo virtual do auditório. São comparados os parâmetros acústicos obtidos com as duas técnicas.

Além disso, é proposta uma abordagem complementar para a análise das respostas sonoras advindas da medição e da simulação, a partir de uma seleção variada de amostras de música. Ao final, a pesquisa aponta, conceitualmente, para o potencial criativo da tecnologia de simulação acústica de salas, antevendo a sua inserção como uma possível ferramenta na prática musical contemporânea.

Abstract

The connections between sounds and the idea of space in music may exist either in the aesthetic realm – within their concepts, styles and in the approximation of their constitutive elements – or in the technical realm, at their physical intersection in room acoustics. From this notion, this research aimed at concrete, non-abstract, relations between Music and Architecture, to explore different spaces in musical listening. Without the purpose of closing possible abstract associations, this work focus on the tangible elements of these two fields of investigation, hoping to give structure to some of their subjective character. It is based on form and materials, both present in architectural and musical constructions.

The present work sets off from different intersections of these two arts, with a brief historical review of some spaces that were important to musical performances. Then, it is developed a case study about the auditorium of the UFMG School of Music (Federal University of Minas Gerais), through acoustic measurements and simulations - the latter by means of a virtual model. The acoustical parameters calculated with these two techniques are compared.

In addition, it is proposed a complementary approach for the analysis of measured and simulated sound responses, with the help of a varied selection of music samples. In the end, the research addresses, in a conceptual manner, the creative potential of room acoustics simulation technology, foreseeing its insertion as a possible tool for contemporary music practices.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplos da evolução da representação escultórica grega.....	7
Figura 2 – Fragmento da escultura do friso do Partenon e a Deusa da Vitória	7
Figura 3 – Partenon	9
Figura 4 – Efeitos ópticos nas estruturas do templo.....	10
Figura 5 – Planta de um anfiteatro grego.....	13
Figura 6 – Inclinação da <i>cavea</i> e detalhe da <i>echea</i>	15
Figura 7 – Periodicidade e inclinação das fileiras de assento em anfiteatros.....	16
Figura 8 – Teto da Catedral de Beauvais - abóbadas em cruzaria.....	17
Figura 9 – Detalhe da estrutura da Catedral de Reims.....	18
Figura 10 – Exemplos da variação do estilo românico na Arquitetura.....	19
Figura 11 – Exemplos do estilo gótico na Arquitetura	20
Figura 12 – Série evolucionária do estilo do Alto-Gótico na Arquitetura	22
Figura 13 – Gradual: <i>Viderunt Omnes</i> – canto gregoriano	22
Figura 14 – Pérotin - <i>Viderunt Omnes</i> – <i>Organum Quadruplum</i>	23
Figura 15 – Tempos de reverberação em salas de ópera históricas	26
Figura 16 – Corte e Planta da Festpielhaus, Bayreuth.....	28
Figura 17 – Tempos de Reverberação em salas de concerto históricas	30
Figura 18 – Tempos de Reverberação em salas de concerto anteriores a 1940.....	31
Figura 19 – Campo de difusão sonora em diferentes salas de concerto.....	32
Figura 20 – Pavilhão Barcelona.....	37
Figura 21 – Pavilhão Philips	39
Figura 22 – Pavilhão Philips	40
Figura 23 – Edgard Varèse nos estúdios da Philips.....	41
Figura 24 – Imagem interna do Pavilhão durante a performance	42
Figura 25 – Distribuição de alto-falantes no interior do ambiente.....	42
Figura 26 – Placas de concreto pré-moldadas do Pavilhão Philips	44
Figura 27 – <i>Metastaseis</i> – representação gráfica dos glissandos	45
Figura 28 – Pavilhão Philips	46
Figura 29 – Diagramação em traçado de raios em ambientes com teto curvo.....	55
Figura 30 – Imagem da reflexão sonora - métodos das fontes virtuais	56
Figura 31 – Comparação entre fotografias de dois modelos de uma mesma sala.....	58
Figura 32 – Modelo de uma sala de ópera na escala 1:20.....	61
Figura 33 – Traçado de raios digital (<i>ray tracing</i>).	62
Figura 34 – Teste de audibilidade das fontes virtuais.....	66

Figura 35 – Resposta ao impulso de uma sala - método das fontes virtuais	67
Figura 36 – Distribuição temporal da energia no método <i>ray tracing</i>	68
Figura 37 – <i>Vector Based Scattering</i> – média resultante entre a reflexão especular e aleatória (<i>scattered</i>) de um raio sonoro	69
Figura 38 – Setup de auralização do ODEON (versão 7.0).....	71
Figura 39 – Convolução no domínio do tempo.....	73
Figura 40 – Resposta em frequência do sistema e construção do sinal de saída através da resposta em frequência do sistema.....	75
Figura 41 – Imagens do modelo tridimensional do auditório da Escola de Música criado com o <i>SketchUp</i>	78
Figura 42 – Imagem do modelo tridimensional do auditório da Escola de Música criado com o <i>SketchUp</i>	79
Figura 43 – Modelo híbrido do ODEON.....	80
Figura 44 – <i>Room setup</i> do ODEON.....	81
Figura 45 – Decaimentos com o ruído interrompido e com a integração do quadrado da resposta ao impulso.	88
Figura 46 – Diagrama da deconvolução direta do método da varredura senoidal.....	89
Figura 47 – Sinais utilizados na medição do auditório da Escola de Música.....	90
Figura 48 – Disposição de fontes e receptores de som no auditório	93
Figura 49 – Fotos da medição acústica do auditório.....	94
Figura 50 – Curva de resposta de energia de um impulso da medição.....	96
Figura 51 – Parâmetros acústicos e seus limiares subjetivos	97
Figura 52 – Média dos Tempos de Reverberação – áreas da audiência e do palco	101
Figura 53 – Média total dos Tempos de Reverberação no auditório.	101
Figura 54 – Erro relativo do Tempo de Reverberação no auditório	102
Figura 55 – Tempos de Reverberação recomendados para salas ocupadas.....	103
Figura 56 – Tempos de Reverberação de salas de concerto ocupadas	104
Figura 57 – Estimativa da mudança no Tempo de Reverberação com a sala ocupada.....	104
Figura 58 – Tempos de Reverberação mínimo e máximo para salas de concerto de acordo com seu volume.....	107
Figura 59 – Média dos <i>Early Decay Time</i> (EDT) nas áreas da audiência e do palco	108
Figura 60 – Média total do <i>Early Decay Time</i> (EDT) no auditório.....	109
Figura 61 – Erro relativo do <i>Early Decay Time</i> (EDT) no auditório.....	109
Figura 62 – Média da Clareza (C80) na área da audiência.....	112
Figura 63 – Média da Clareza (C80) na área do palco	113
Figura 64 – Erro relativo da Clareza (C80) no auditório.....	113
Figura 65 – Média da Clareza (C80) na posição do regente.....	114
Figura 66 – Média do Tempo Central (Ts) áreas da audiência e do palco	115

Figura 67 – Erro relativo do Tempo Central (Ts) no auditório.....	116
Figura 68 – Média do <i>Interaural Cross-Correlation (early)</i> - IACCe – na área da audiência ..	119
Figura 69 – Erro relativo do <i>Interaural Cross-Correlation (early)</i> - IACCe - na área da audiência	120
Figura 70 – <i>Binaural Quality Index</i> (BQI) na área da audiência.....	120
Figura 71 – Resposta em <i>Grid</i> da <i>Lateral Energy Fraction</i> (LF80) na área na audiência a partir de F1. Bandas de frequência de 500 Hz e 2 kHz.	123
Figura 72 – Resposta em <i>Grid</i> da <i>Late Lateral Energy</i> (LG80) na área na audiência a partir de F1. Média das bandas de frequência de 125 Hz a 1 kHz.....	125
Figura 73 – <i>Initial Time Delay Gap</i> (ITDG) medido no auditório	126
Figura 74 – Resposta em <i>Grid</i> do Nível Sonoro (<i>Strength</i> - G) nas áreas da audiência e do palco	129
Figura 75 – Curvas de valores RMS em 10 oitavas - voz masculina solo.....	132
Figura 76 – Curvas de valores RMS em 10 oitavas - duo de clarinete e fagote.....	133
Figura 77 – Curvas de valores RMS em 10 oitavas - tuba solo.....	134
Figura 78 – Curvas de valores RMS em 10 oitavas - tímpano solo.....	134
Figura 79 – Curvas de valores RMS em 10 oitavas - flauta solo	135
Figura 80 – Curvas de valores RMS em 10 oitavas - flauta piccolo.....	136
Figura 81 – Curvas de valores RMS em 10 oitavas - voz feminina solo	136
Figura 82 – Curvas de valores RMS em 10 oitavas - bateria.....	137
Figura 83 – Resposta em frequência por terço de oitava do alto-falante B&K <i>OmniPower Sound Source Type 4292-L</i>	138
Figura 84 – Especificações técnicas do alto-falante B&K <i>OmniPower Sound Source Type 4292-L</i>	138
Figura 85 – Resposta direcional no plano horizontal do alto-falante B&K <i>OmniPower Sound Source Type 4292-L</i>	139
Figura 86 – Resposta em frequência em campo difuso do microfone binaural <i>dummy head</i> Neumann KU-100.....	139
Figura 87 – Resposta em frequência e direcional do microfone Behringer ECM 8000.....	139
Figura 88 - Tempo de Reverberação – posição F1R5	143
Figura 89 - <i>Early Decay Time</i> (EDT) – posição F1R5.....	143
Figura 90 - Clareza (C80) – posição F1R5.....	144
Figura 91 - Espectro da resposta ao impulso da posição F1R5, medição acústica.	145
Figura 92 - Espectro da resposta ao impulso virtual da posição F1R5, simulação acústica.	146

Lista de tabelas

Tabela 1 – Lista de materiais utilizados no modelo do auditório da Escola de Música – biblioteca de materiais do ODEON.....	84
Tabela 2 – Desvio padrão do Tempo de Reverberação para todas as posições no auditório – medição e simulação.....	101
Tabela 3 - Estimativa do Tempo de Reverberação do auditório ocupado, a partir dos dados da medição.	105
Tabela 4 - Estimativa do Tempo de Reverberação do auditório ocupado – simulação no ODEON..	105
Tabela 5 – Materiais modificados no ODEON para a estimativa da sala ocupada.....	106
Tabela 6 - Desvio padrão do <i>Early Decay Time</i> (EDT) para todas as posições no auditório – medição e simulação.....	109
Tabela 7 – EDT/T – Média total do auditório nas bandas de frequência de 500 Hz e 1 kHz.	110
Tabela 8 - Desvio padrão da Clareza (C80) para todas as posições no auditório – medição e simulação.....	113
Tabela 9 - Desvio padrão do Tempo Central (Ts) para todas as posições no auditório – medição e simulação.....	115
Tabela 10 - Desvio padrão do <i>Interaural Cross-Correlation (early)</i> - IACCe - área da audiência (fontes F1 a F3 e receptores R1 a R4) - medição e simulação.	119
Tabela 11– <i>Initial Time Delay Gap</i> (ITDG) em algumas posições na área da audiência.....	126

Sumário

Introdução.....	1
1a. Parte: Espaços que dialogam com a Música.....	4
1. Espaços da performance musical	5
1.1 O templo grego	5
1.2 O anfiteatro grego	13
1.3 As catedrais da Idade Média	17
1.4 As salas de ópera	25
1.5 As primeiras salas de concerto.....	29
1.6 As salas de concerto do período romântico ao século XX.....	31
2. A construção sonora e arquitetônica	33
2.1 Pierre Schaeffer e a música concreta.....	33
2.2 A concretude da arquitetura moderna.....	36
2.3 O Pavilhão Philips.....	38
2.4 <i>I Am Sitting in a Room</i>	47
2.5 O espaço acusmático.....	50
2a. Parte: Estudo de caso: o auditório da Escola de Música da UFMG.....	53
3. Métodos para previsão e avaliação acústica de salas.....	54
3.1 Histórico da simulação acústica.....	58
3.1.1 Simulação acústica digital.....	62
3.2 Ferramentas para a simulação acústica	64
3.2.1 Geometria acústica digital.....	64
3.2.2 Auralização.....	70
3.2.3 Resposta ao impulso - convolução.....	71
4. A simulação acústica do auditório da Escola de Música	76
4.1 A criação do modelo	76
4.2 Parametrização da simulação acústica	79
4.3 A escolha dos materiais de revestimento	82
5. Medição acústica do auditório da Escola de Música	87
5.1 Metodologia da medição acústica	87
5.1.1 Relatório da medição.....	91
5.1.2 Software utilizado na medição.....	95

6. Resultados I: parâmetros acústicos.....	96
6.1 Tempo de Reverberação (T).....	100
6.2 <i>Early Decay Time</i> (EDT).....	108
6.3 Clareza (C80).....	111
6.4 Tempo central (Ts).....	115
6.5 <i>Interaural Cross-Correlation</i> (IACC).....	117
6.6 Nível de Som (L, G) e outros parâmetros espaciais.....	121
6.6.1 <i>Lateral Energy Fraction</i> (LF80).....	121
6.6.2 <i>Late Lateral Energy</i> (LG80).....	124
6.6.3 <i>Initial Time Delay Gap</i> (ITDG).....	125
6.6.4 Nível Sonoro (<i>Strength - G</i>).....	127
7. Resultados II: auralização de diferentes excertos musicais	130
8. Discussão	141
Considerações finais: em busca de novas interseções.....	147
Referências.....	150

Introdução

Som, espaço e arquitetura. A ampla interseção que é possível criar entre a música e o conceito de espaço na escuta, desde a fundamental comparação entre o preenchimento e o vazio - a presença e a ausência do som com pausas e notas - até na distância e na sobreposição de intervalos; ou mesmo na densidade de orquestração e no quanto ocupa a aglomeração de sons em suas relações harmônicas na cena auditiva, pode remeter a uma noção interssensorial de um ambiente vivido e experimentado na arquitetura.

Com a amplificação por alto-falantes, essa noção ainda pode ser modificada, transportada de um lugar a outro. Por fim, transforma-se completamente com a inclusão desse equipamento na performance, através de mudanças de planos e intensidades. A gravação acabou por tornar mais evidente a possível manipulação do espaço sonoro e mudou o paradigma da escuta musical para a maior parte das pessoas, extrapolando ainda o conceito de ambiente da performance.

É certo que a Arquitetura costuma envolver a Música, tanto acústica quanto socialmente. Ao mesmo tempo que a serve como palco, busca refletir o seu propósito, como acontece em templos, anfiteatros e salas de concerto. Entretanto, há paralelos que se retroalimentam, que por vezes podem parecer abstratos ou metafóricos. Não seria o caso da famosa citação de Goethe: “arquitetura é música petrificada” (VON GOETHE, 1852:282)¹? Na verdade, nada poderia ser mais correlato nas duas artes do que a diferença entre o que é vivenciado pelo usuário e a técnica de sua construção. Enquanto se baseiam em princípios matemáticos e lógicos, também propiciam a síntese do que é belo: em uma melodia ou em uma estrutura arquitetônica, na textura de uma harmonia e dos materiais de construção e, em ambas, na criatividade de suas ornamentações. Nos dois casos, apesar da relação muito estreita com a técnica, existe a transformação dos mecanismos compositivos ou construtivos em uma unidade artística consolidada, que, idealmente, transcende ao tecnicismo.

O propósito deste trabalho não é posicionar-se contra possíveis relações

¹ “Eu encontrei nas minhas anotações”, disse Goethe, “uma página, na qual eu chamo arquitetura de música petrificada (*frozen music*). Existe algo nessa observação; a influência que nos atinge a partir da arquitetura é parecida com a que vem da música” (tradução nossa).

subjetivas entre música e arquitetura, pois elas inspiram novos conceitos e conexões estéticas. Todavia, esta pesquisa buscou um norte em suas relações concretas, a fim de explorar os diferentes espaços na escuta musical.

A ideia parte da forma e da matéria, presentes em construções tanto arquitetônicas quanto musicais. Ela se define no âmbito da estrutura, da engenharia que envolve a relação do som com as paredes que cerram os espaços onde ele se manifesta. Também, na microestrutura, nos materiais sonoros e na conformação dos ambientes, estes que influenciam a sua acústica.

Desta forma, este trabalho se divide em duas partes principais. A primeira é conceitual e trata das diferentes interseções entre música e arquitetura. O primeiro capítulo aborda a influência mútua entre a arquitetura e a prática musical, com um breve histórico de algumas tipologias arquitetônicas importantes no decurso da música ocidental². Encontram-se aqui o anfiteatro grego, as catedrais e as salas de ópera e de concerto.

Ainda na primeira parte, em um segundo capítulo, são retratadas as relações entre a arquitetura e a música com um foco principal em seus materiais constituintes. Há paralelos entre as formas utilizadas mas, principalmente, é abordada a proximidade com a música concreta. Dialogam o material arquitetônico e o objeto sonoro de Pierre Schaeffer. Por sua ligação a essa ideia, são revisitados alguns espaços conceituais relacionados à música, como o Pavilhão Philips e a primeira sala virtual criada por Alvin Lucier (na obra *I Am Sitting in a Room*). Ainda, há uma reflexão sobre os espaços criados pela gravação, o espaço acusmático, que também é um assunto pertinente na estética schaefferiana, pois o objeto sonoro depende da decupagem³ e seleção do material sonoro.

A segunda parte da dissertação se dirige às técnicas aplicadas em acústica. Inicia-se com um histórico dos métodos para a previsão e avaliação acústica de salas e aborda o desenvolvimento de tecnologias de medição e simulação acústicas. O objetivo foi utilizar o auditório da Escola de Música da UFMG como um estudo de caso para diferentes aplicações. Uma delas é a realização da medição acústica do ambiente em diferentes pontos de emissão e recepção de som no auditório. A medição fornece

² Embora a musicologia atual questione a abordagem da história da música ocidental como a "legítima" história da música (ver, p. ex., J. KERMAN, 1985), sua tradicional divisão em períodos históricos é uma ferramenta bastante adequada para os paralelos entre arquitetura e música aqui propostos.

³ Edição por corte.

parâmetros objetivos que demonstram qualidades e particularidades acústicas desse espaço.

Além da medição, foi criado um modelo virtual tridimensional do auditório, visando a sua análise através da tecnologia de simulação acústica de salas. Um outro software calculou os parâmetros acústicos de forma similar a uma medição e, com isso, foi possível comparar os resultados. Potencialmente, esse estudo pode ser um insumo para futuras investigações ou intervenções acústicas nesse espaço.

Ainda na segunda parte, uma segunda análise compara os resultados entre simulação e medição do auditório, a partir da convolução de respostas ao impulso reais e virtuais com uma seleção variada de trechos musicais. O uso de filtragens programadas em Max-Msp, no domínio da frequência, possibilitaram uma investigação quantitativa das auralizações. Além disso, apontaram vantagens e limitações nos dois métodos de previsão e avaliação acústica de salas.

De certo modo, as duas partes da dissertação podem ser vistas de forma independente, já que a leitura individual de uma delas não prejudica o entendimento da outra. A primeira aborda os espaços da escuta musical de forma ampla (como sugerido pelo título), em um sentido plural. Na segunda parte, a noção de espaço é trazida ao singular, para o estudo de caso. Mesmo assim, o auditório é analisado a partir de duas perspectivas: a real e a simulada.

Entretanto, as considerações finais buscam convergir conceitualmente as duas vertentes abordadas na dissertação: a progressão dos espaços tradicionais da performance musical até a sua transformação ao virtual; e os mecanismos de análise técnica da acústica envolvidos nesse processo. São esboçadas possibilidades para a exploração da simulação acústica de salas como uma potencial ferramenta nas práticas musicais contemporâneas.

1ª Parte – Espaços que dialogam com a Música

A 1ª Parte tem um caráter conceitual e compõe uma análise estética entre Música e Arquitetura. Entretanto, aborda aspectos da acústica arquitetônica de maneira concisa. Divide-se em dois capítulos, sendo que o primeiro aborda, em um breve histórico, alguns dos tradicionais espaços destinados à performance musical, como o anfiteatro grego, as catedrais e as salas de ópera e de concerto.

Já o segundo capítulo tem um foco no material constituinte dos espaços relacionados à música, tanto o material arquitetônico quanto o musical. Assim, o objeto sonoro de Pierre Schaeffer e a música concreta ocupam seu lugar pertinente na comparação com a arquitetura moderna, no espaço conceitual do Pavilhão Philips e nos espaços virtuais de Alvin Lucier e da música acusmática.

1. Espaços da performance musical

1.1 O templo grego

... era um tipo de edifício concebido ao redor de uma performance musical, onde a forma perfeita de suas pedras literalmente refletiam os sons da dança, das flautas e dos cantos em procissão. Suas colunas e os vãos entre elas criavam uma pulsação constante que particularmente conformavam um staccato quando vistas de frente. A,B. (...). Quando vistas de forma oblíqua, a ornamentação da colunata se tornava uma parede sólida de ritmos verticais, o que era acelerado ainda mais com um ângulo mais agudo. Quão diferente é esta experiência a de ouvir uma sinfonia, que não pode ser acelerada ou ralentada pelo espectador; ou lida de trás para frente como a arquitetura a partir da saída de um edifício; ou de cima para baixo como em um arranha-céus (JENCKS, 2013: 4, tradução nossa)⁴.

Em Arquitetura, o templo grego figura como um arquétipo da estrutura perfeita. Essa percepção deriva de alguns preceitos fundamentais presentes nesses monumentos. Um deles é o estudo criterioso da simetria e das proporções. Os gregos baseavam-se na relação das dimensões do corpo humano para alcançar a harmonia do edifício (ROWLAND, 1999: 47). Dessa forma, os edifícios mantinham uma escala proporcional à humana que, ainda que monumental, se referenciava no espectador, na sua percepção e vivência do edifício. O exemplo utilizado por Jencks na citação acima, o Templo de Concordia, construído entre 440 e 430 a.C., coincide com o ápice do desenvolvimento da arte grega, quando tais características se mostravam de forma bastante expressiva.

A busca desse novo sentido da arte grega se inicia a partir do séc. VI a.C., quando os escultores e pintores começaram a buscar novas formas de representação do

⁴ Na música tradicional pode ser difícil separar ritmo e tempo. O ritmo pode ser percebido como uma organização do tempo (métrica) no espaço sonoro. A percepção de Jencks parece mais próxima à da música eletroacústica, onde, segundo Smalley, os elementos são organizados pela sua hierarquia no espaço sonoro. Para ele, este conceito é mais importante que o tempo – “o tempo pode ser colocado a serviço do espaço (...) tempo torna-se espaço” (SMALLEY, 2007: 38).

corpo humano. A fórmula consolidada pelos egípcios, embasada na necessidade de demonstrar todos os elementos de uma situação, não mais atenderia aos seus anseios artísticos. As imagens deixariam de ser simplesmente descritivas, uma vez que os artistas começaram a utilizar técnicas que reduziam ou ampliavam partes específicas de uma figura e a considerar o ângulo a partir do qual viam o objeto (escorço). O que acontecia naquele momento era uma revolução da arte, contemporânea ao avanço da ciência e da filosofia, que se desenvolveria rapidamente. A representatividade da arte, ao menos no ocidente, sofreu uma evolução sem precedentes (GOMBRICH, 1999: 81-82). É impressionante a sua transição, em menos de dois séculos, conforme as figuras a seguir.



Polímedes de Argos
Os irmãos Cleóbis e Biton
(615-590 a.C.)



Myron
Discóbolo
(450 a.C.)

Figura 1 - Exemplos da evolução da representação escultórica grega. À esquerda, a aproximação, já investigativa, ao estilo egípcio (GOMBRICH, 1999: 79, 91).



Figura 2 - à esq.: fragmento da escultura talhada do friso do Partenon (440 a.C.); à dir.: a Deusa da Vitória (408 a.C.) - acrópole de Atenas. (GOMBRICH, 1999: 92, 101).

Da mesma forma, a arquitetura desse período sofreria mudanças significativas, visto que a maior parte dos templos gregos de pedra foram construídos entre os séculos VI e IV a.C. Anteriormente, as colunas e a superestrutura da cobertura desses edifícios eram feitas de madeira. Todavia, apesar do uso de um material mais rígido, as construções incorporaram os elementos de proporção e de flexibilização da forma que eram semelhantes às técnicas da escultura.

Se os construtores tivessem usado simples pilares quadrados ou cilíndricos, os templos poderiam eventualmente parecer pesados e feios. Entretanto, pelo contrário, eles preferiram modelar as colunas de modo que houvesse uma leve protuberância na parte central e um afuselamento em direção ao topo. O resultado é que as colunas dóricas ganham uma aparência quase elástica, como se o peso do telhado as estivesse comprimindo ligeiramente sem, no entanto, chegar a deformá-las. Transmitem remotamente a ideia de criaturas viventes sustentando suas cargas sem esforço. Embora alguns desses templos sejam vastos e imponentes, não atingem as colossais dimensões das construções egípcias. Sente-se que foram edificadas por seres humanos, e para seres humanos (GOMBRICH, 1999: 77).

Dentre os templo gregos que sobreviveram até os dias de hoje, o mais conhecido é o Partenon, de Atenas (fig. 3). Construído entre 447 e 432 a.C., o edifício fazia parte de um projeto de reconstrução da acrópole, após a guerra contra os Persas em 480 a.C. Naquele momento, Atenas encontrava-se sob a liderança de Péricles, que designara o arquiteto Iktinos para a planificação dos edifícios e Fídias, o célebre escultor grego, para elaboração e supervisão das esculturas e decoração dos templos. É impossível afirmar se Fídias teve alguma influência sobre a arquitetura do edifício que abrigaria a sua escultura de Palas Atena, esta que proporcionava “ao povo da Grécia uma nova concepção do divino” (Idem: 87). Entretanto, é relevante o fato do edifício contar com correções de óptica em sua concepção, tais como as esculturas do artista.

Os atenienses encomendaram uma cabeça de Palas Atena a Fídias e a Alcmene para ser colocada num lugar alto. Quando as peças foram submetidas aos juízes, todos riram muito da de Fídias, que parecia

apenas grosseiramente esboçada, e muito admiraram a de Alcmena, que mostrava todas as linhas diligentemente definidas. Mas Fídias, escreve Tesouro, tinha o engenho mais agudo que o escalpelo e pediu que as cabeças fossem colocadas longe, sobre duas colunas elevadas. Então a sua, reduzida pela distância à proporção adequada, apareceu belíssima e a de Alcmena, tosca e mal formada (TESAURO apud HANSEN, 1997).

A perfeição do Partenon não reside em sua rigidez formal. De acordo com Vitrúvio⁵, além da conformação das colunas, mais largas ao meio (*entasis*), a estilóbata dos templos gregos (base da colunata) era construída de forma arqueada para cima em seu centro, para dar a impressão de que era perfeitamente plana quando vista de longe. Além disso, as colunas externas tendiam para o centro, para proporcionar maior solidez e beleza ao edifício. As colunas dos cantos eram mais grossas que as demais, pois eram melhor definidas na percepção do espectador, ao estarem delineadas pela luz da paisagem de fundo. Sem o ajuste óptico, elas pareceriam finas demais. Os elementos horizontais no alto das fachadas, logo abaixo do frontão, eram inclinados para fora, em direção à visada do espectador, de forma que as colunas parecessem exatamente perpendiculares à base, conforme a figura 4 (ROWLAND, 1999: 50, 52, 53).



Figura 3 - Partenon, Acrópole de Atenas, Grécia (447- 432 a.C.) (GOMBRICH, 1999: 83).

⁵ Os Dez Livros de Arquitetura de Marcus Vitruvius Pollio (séc. I a.C.) é o único tratado de arquitetura da antiguidade clássica que sobreviveu até os dias de hoje.

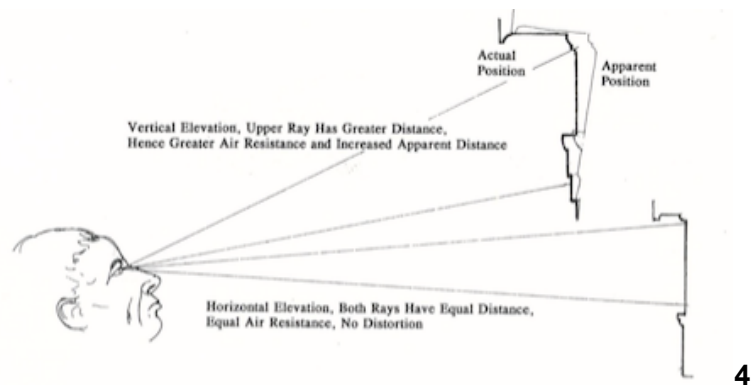
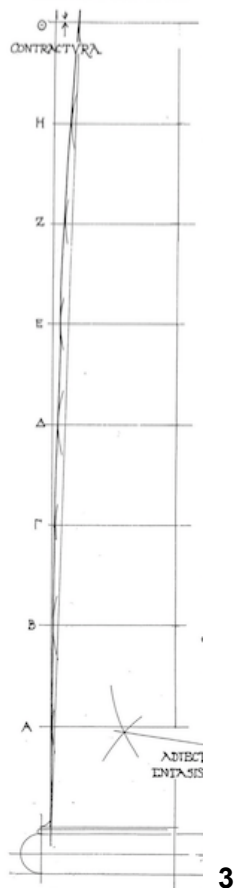
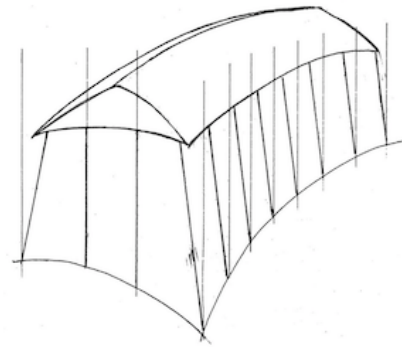
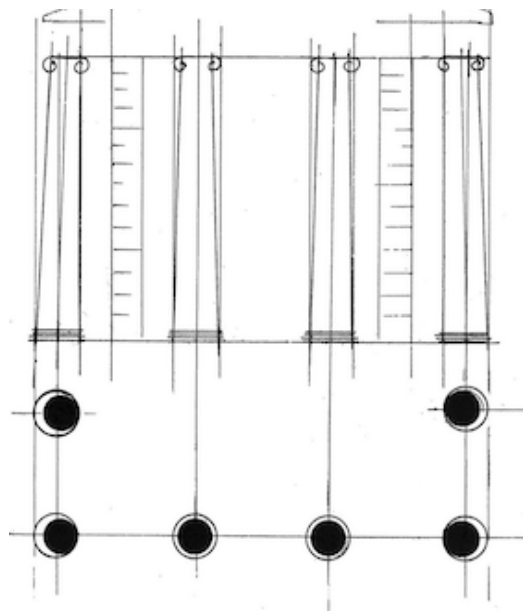


Figura 4 - Efeitos ópticos causados por distorções controladas nas estruturas do templo: 1- inclinação e *entasis* das colunas; 2- curvatura da estilóbata (base da colunata); 3- inclinação dos elementos horizontais; e 4- detalhe da curvatura da *entasis*. (ROWLAND, 1999: 204, 228, 199).

A tipologia dos templos gregos, com suas colunas ordenadas proporcionalmente para sustentar o entablamento⁶, fornece material para comparações com a música. Com base na repetição vertical, Jencks desenvolve paralelos com ritmos e articulações musicais, mas principalmente aponta o seu caráter performático, revelando a organicidade de um edifício que se modifica com a posição e a percepção do espectador. Ele sugere que os princípios de flexibilização da forma aproximavam a arquitetura do templo da fluidez de uma peça musical.

O alcance desses conceitos foi bastante amplo. De certo modo, os princípios gregos venceram o teste do tempo e inspiraram a arte e a arquitetura romana e a da renascença. No séc. XVIII, influenciaram o classicismo alemão⁷, que teve grande repercussão na música. Ao final desse século, Schiller e Goethe também voltariam o seu olhar para os padrões estéticos clássicos, no movimento literário e cultural denominado Classicismo de Weimar. O movimento abriria o caminho para o período romântico na arte alemã. Essa transição teve um forte impacto na música de Beethoven, onde é possível identificar uma modificação de atitude e liberdade, ainda dentro da lógica formal da música do período clássico. O ideal apolíneo da fase inicial do compositor gradativamente cederia espaço para aspectos dionisíacos da antiguidade grega (SELFRIDGE-FIELD, 1972: 592-594). De fato:

É esse equilíbrio entre a adesão às regras e a liberdade de criação apesar delas que faz com que a arte grega continue tão admirada em séculos subsequentes. E é essa a razão pela qual os artistas retornam sistematicamente às obras primas da arte grega, em busca de orientação e inspiração (GOMBRICH, 1999: 87).

O progressivo contraste temático na forma da música do período clássico sugere mais um paralelo. Ele reflete a convivência entre a austeridade do edifício e de suas esculturas e o drama do seu teatro e a simbologia de seus ritos e festividades.

⁶ O entablamento é o elemento horizontal que sustenta o frontão e a cobertura. É composto por arquitrave, friso e cornija. O friso continha as esculturas em relevo.

⁷ O interesse dos alemães sobre o classicismo grego sofreu um novo despertar em 1755, com a publicação do livro de Johann Joachim Winckelmann: *Thoughts on the Imitation of Greek Work Painting and Sculpture* (SELFRIDGE-FIELD, 1972:581).

A música de Apolo era arquitetura dórica⁸ em sons, mas apenas em sons insinuados, como os que são próprios da cítara. Mantinha-se cautelosamente à distância daquele preciso elemento que, não sendo apolíneo, constitui o caráter da música dionisíaca e, portanto, da música em geral: a comovedora violência do som, a torrente unitária da melodia e o mundo absolutamente incomparável da harmonia. No ditirambo dionisíaco⁹ o homem é incitado à máxima intensificação de todas as suas capacidades simbólicas (...) (NIETZSCHE, 1992:34).

Ao considerarmos a música do classicismo sob a óptica grega, a partir da forma, é possível observar muitos dos conceitos utilizados na arquitetura. A fixação de regras, como a distância e a quantidade de colunas nos diferentes tipos de templo, em sua relação com as dimensões, ou a proporção do número de compassos na construção de uma ideia musical, coexistem com a liberdade e a expressão em seu interior.

⁸ O Partenon, em Atenas, é um templo do estilo dórico.

⁹ Canto em homenagem ao deus Dionísio (Baco).

1.2 O anfiteatro grego

A tipologia do templo objetivava convergir os ritos ao seu interior e integrar os símbolos sagrados com o mundano, ao projetar perspectivas das suas magníficas fachadas em todas as direções. O teatro, com um diferente propósito, agregava o público convergindo a sua visada ao ponto focal da performance. Sua simples conformação em semicírculo sem dúvida tinha beleza, sobretudo no modo em que dialogava com o entorno, ao aproveitar o caimento de uma encosta. Porém, a atenção com a simetria e as proporções era menor se comparada com a construção do templo, segundo Vitruvius (fig. 5). O que havia era uma grande preocupação com sua capacidade de distribuição sonora e clareza acústica.

A ciência envolvida na construção do teatro grego parecia ser basicamente empírica. Seu traçado geométrico, a partir dos vértices de três quadrados inscritos no círculo da orquestra (área do palco), que determinava as divisões para o acesso à área de assentos (cavea), não tinha relação com a acústica. Para isso, Vitruvius recomendava uma observação atenta à escolha do local, de forma que o ambiente natural não abafasse ou prejudicasse o som (ROWLAND, 1999: 66). O fato de existir naquela época uma classificação da qualidade acústica dos sítios para a construção dos anfiteatros sugere uma tradição de avaliação subjetiva desses espaços.

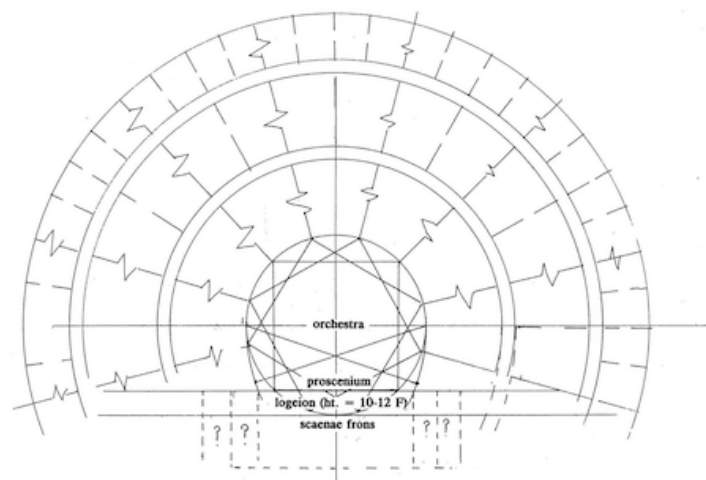


Figura 5 - Planta de um anfiteatro grego (Idem: 248).

Essa avaliação, baseada na percepção qualitativa do som da voz, dividia os sítios em: dissonantes, onde a voz encontrava resistência em superfícies, impedindo outros sons de se elevarem; dispersivos: onde não era possível ouvir completamente o fim das palavras; ressonantes: onde o som da voz, em contato com uma superfície sólida, ecoava, criando cópias dos sons e duplicando o fim das palavras; e consonantes: aqueles em que a voz, reforçada desde baixo, sobe com esse reforço e atinge os ouvidos com “clareza precisa” (Idem: 70).

Segundo Vitruvius, na construção do anfiteatro era preciso observar o alinhamento das fileiras de assentos e a sua distância, de forma que o som não encontrasse barreiras em seu percurso. Assim, uma linha traçada do degrau mais baixo ao mais alto deveria tangenciar todos os outros entre eles (fig. 6). Ele sugere medidas para o espaçamento e tamanho dos degraus da área da audiência, mas não menciona se a escolha dessas dimensões estaria relacionada à questões de acústica ou de ergonomia. Os degraus não deveriam ter uma “altura inferior a um pé e um palmo, nem superior a um pé e seis dedos, e sua base não deve(ria) ser superior a 2 pés e meio nem inferior a dois”¹⁰ (RUA, 1998: 171). O autor pondera que os arquitetos da antiguidade, seguindo o exemplo da natureza, aperfeiçoaram as dimensões das arquibancadas dos anfiteatros, através da investigação sobre a elevação da voz nesses espaços (ROWLAND, 1999: 66).

Vitruvius ainda cita a utilização de vasos ressonantes para a amplificação da voz dos atores. As *echea* eram dispostas ao longo de determinadas fileiras de audiência, em câmaras abaixo dos assentos, e seguiam padrões de afinação da escala do tetracorde baseados nos escritos de Aristóxenes (séc. IV a.C.)¹¹. Entretanto, são raros os exemplos de teatros da antiguidade que empregavam esse acessório, sendo que não há indícios de sua utilização na maioria dos teatros gregos. Ademais, estudos com o uso de simulações acústicas questionam a eficácia desse equipamento (RINDEL, 2011b: 8).

¹⁰ altura (h) = 36 cm e base (b) = 75 cm (aproximadamente).

¹¹ Foi discípulo de Aristóteles. Sua teoria musical se opunha a de Pitágoras, pois ele acreditava que as notas da escala deveriam ser julgadas pelo ouvido e não através de proporções matemáticas (WINNINGTON-INGRAM, 1932).

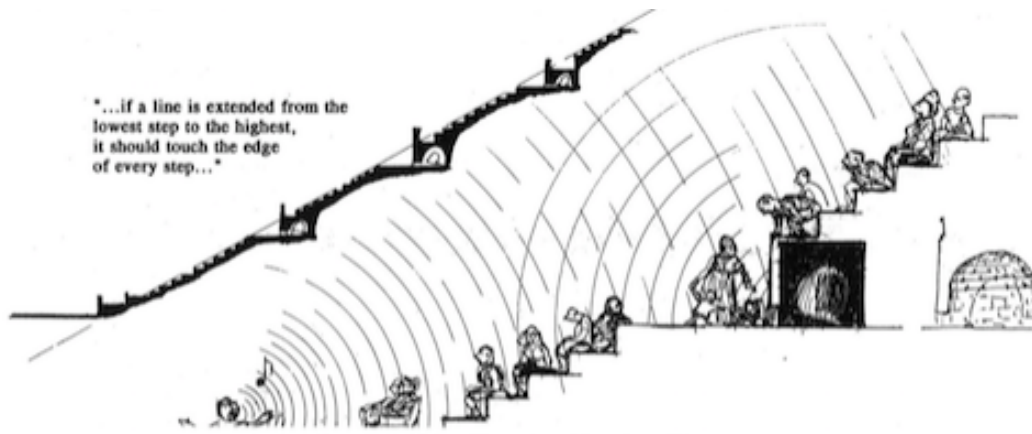


Figura 6 - Inclinação da *cavea* (área da audiência) e detalhe para a câmara da *echea* (ROWLAND, 1999: 246).

Todavia, estudos mostram que em geral, mesmo sem tal acessório, a inteligibilidade da voz e a clareza do som nos teatros gregos são impressionantes. É o caso do anfiteatro de Epidauro (séc. IV a.C.), que possui capacidade para 14.000 espectadores¹².

Segundo um estudo sobre a acústica desse anfiteatro, a declividade precisa das fileiras de sua arquibancada (*cavea*) e sua forma semicircular certamente contribuem para a excelente acústica daquele espaço, pois as reflexões iniciais na superfície do palco se distribuem de maneira eficiente e homogênea na *cavea*. Entretanto, o que torna a acústica do teatro tão especial não são essas características somente, ou mesmo a ação do vento, que em geral parte do palco em direção à audiência, como já foi cogitado. A sua diferenciação vem da disposição de suas fileiras de assentos e dos materiais empregados em sua construção, pois as pedras calcárias utilizadas na arquibancada auxiliam no rebatimento das reflexões iniciais de volta para o palco (*backscattering*). Ainda, pondera-se que a periodicidade das fileiras tem relação com a redução de frequências abaixo de 500 Hz (DECLERCQ; DEKEYSER, 2007: 2012).

A medição realizada em Epidauro está de acordo com a ideia do rebatimento das reflexões iniciais, sendo que essa interferência causa uma redução na região de 170-200 Hz e uma sensação de amplificação para audiência nas frequências acima de 500 Hz. De forma eficiente, o teatro preserva as regiões de 80-150 Hz, cruciais para a voz masculina de discurso, e a região em torno de 1000 Hz, importante para a

¹² Essa lotação máxima foi alcançada em uma posterior intervenção romana, que incluiu 21 fileiras de arquibancada além das 34 originais.

inteligibilidade da fala. Além disso, os excelentes resultados de clareza e distribuição sonora independem da temperatura e da ação do vento. Tampouco da presença ou da ausência do público, visto que o tempo de reverberação¹³ é basicamente mantido nas duas situações. Com o público presente, há uma redução das reflexões laterais e da sensação de espacialização do ambiente, mas a inteligibilidade permanece próxima à do teatro vazio (PSARRAS et al, 2013: 8).

A integração desses fatores, advindos da forma e dos materiais utilizados no teatro, é determinante para a inteligibilidade do discurso e a potência sonora em Epidauro. Muitos teatros da antiguidade seguem a mesma dimensão das suas fileiras de assentos, que se aproxima da mencionada por Vitruvius, conforme a figura abaixo. É também o caso do Teatro de Dionísio, na acrópole de Atenas.

Theater	Dated	Location	Style	Λ (m)	α (deg)
Epidaurus ^a	300 B.C.	Greece	Hellenistic	0.831	26.6
Aphrodisias ^b	300 B.C.	Turkey	Hellenistic	0.736	31.1
Aspendos ^b	161–180 A.D.	Turkey	Roman	0.788	33.1
Dionysus ^c (Athens)	400–300 B.C.	Greece	Greek	0.829	23.5
Ostia Antica ^b	19–12 B.C.	Italy	Roman	0.762	22.1
Pergamon ^b	197–159 B.C.	Turkey	Roman	1.657	62.7
Pompeii ^d (Odium)	80 B.C.	Italy	Roman	0.805	32.3
Priene ^b	330 B.C.	Turkey	Hellenistic	0.772	31.2
Side ^b	?	Turkey	Greek	0.749	34.1

Figura 7 - Periodicidade (Λ)^{14,15} e inclinação (α) das fileiras de assento em alguns exemplos de teatros da antiguidade (DECLERCQ; DEKEYSER, 2007: 2021).

¹³ Tempo necessário para o decaimento do som no interior de um ambiente, após a interrupção do som, até que fique inaudível. A queda de amplitude equivale a 1/1000 do som original, ou 60 dB (ver p. 57).

¹⁴ Periodicidade: $\Lambda = \sqrt{b^2 + h^2}$; onde b é base e h é a altura das fileiras de assentos.

¹⁵ A maior parte das referências e todos os softwares utilizados para neste trabalho utilizam o ponto, ao invés da vírgula, como divisor decimal. Dessa forma, os dados da literatura e os resultados dos cálculos acústicos apresentados na dissertação seguem o mesmo padrão.

1.3 As catedrais da Idade Média

Este breve histórico avança para um momento chave no paralelo proposto neste capítulo, ao abordar a evolução em ambas as artes a partir do séc. XII. Nesse período, o grande desenvolvimento tecnológico e artístico da arquitetura gótica seria o palco de uma revolução na Música, com o surgimento das primeiras polifonias da *École de Notre Dame*. Revolução esta que, mais uma vez, partia da forma.

A arquitetura gótica era bem diferente do estilo que a precedeu. Ao contrário da estética robusta e contida do estilo românico, as formas dos edifícios religiosos tornaram-se cada vez mais leves e ao mesmo tempo mais vultosos. A sua verticalização significou um enorme desenvolvimento das técnicas construtivas para o campo da engenharia, substituindo as massudas paredes de sustentação das catedrais românicas pelos arcos em ogiva e abóbadas em cruzaria, como elementos estruturais na arquitetura gótica. Era uma forma mais esbelta e ao mesmo tempo mais eficiente. Na medida em que a cobertura da catedral podia se apoiar em feixes de arcos, seguros por contrafortes e arcobotantes, aos construtores era possível explorar a sua criatividade, abrindo as fachadas das catedrais com grandes vitrais e rosáceas (HEYMAN, 1966: 250). Exemplos nas figuras a seguir:



Figura 8: Teto da Catedral de Beauvais (iniciada em 1284). Detalhe das abóbadas em cruzaria (PRINA; DEMARTINI, 2005: 81).

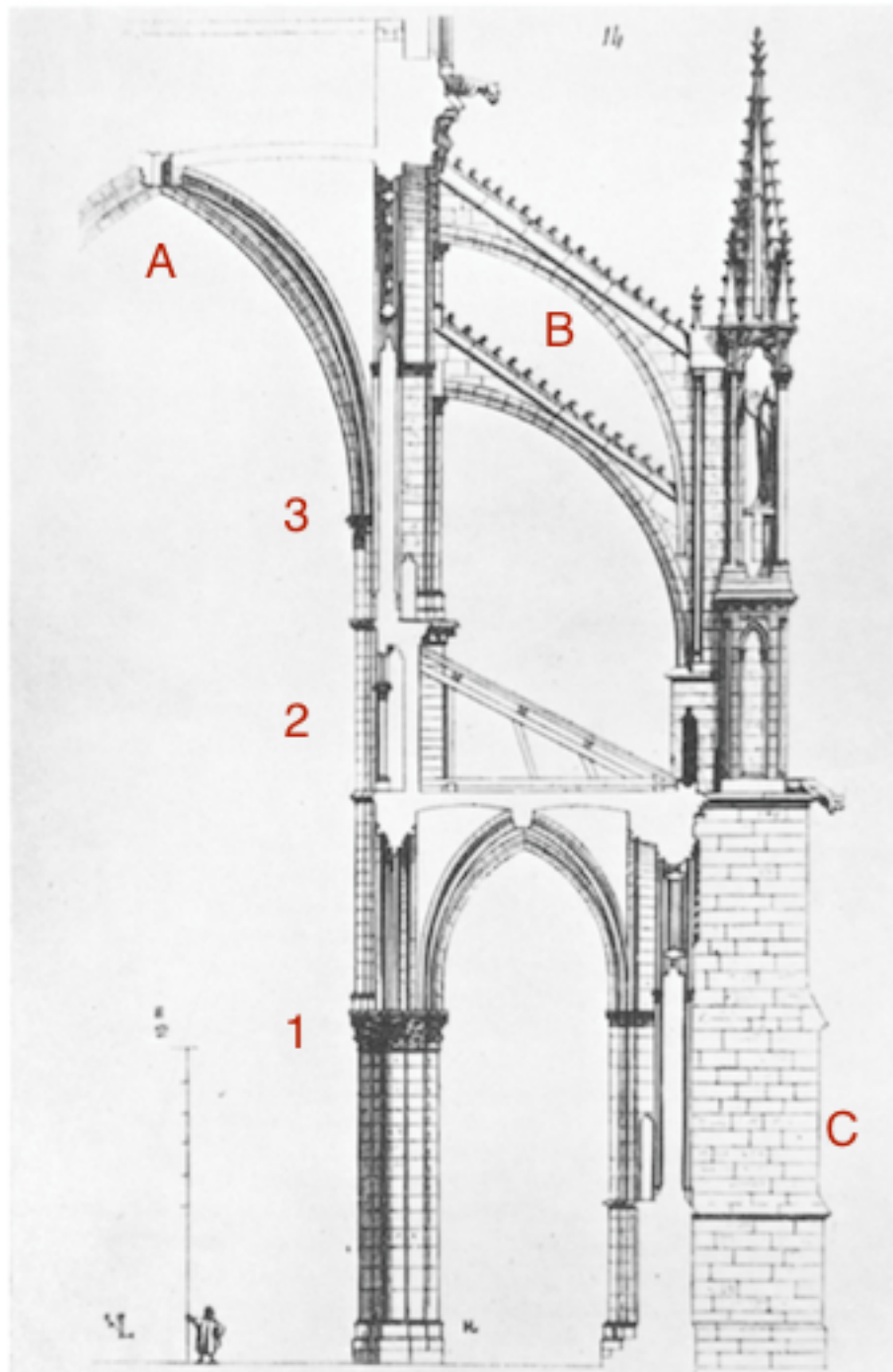
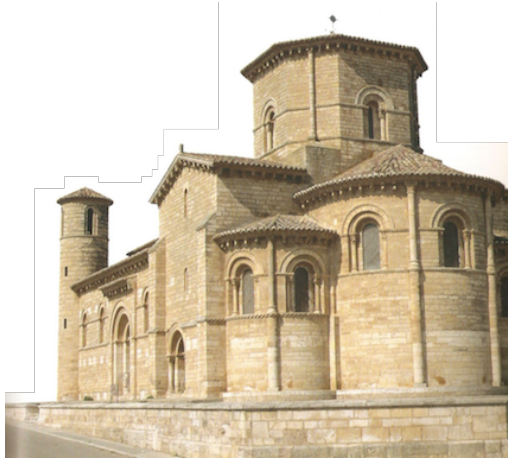


Figura 9 - Detalhe da estrutura da Catedral de Reims (1211 - França) por de Viollet-Le-Duc (HEYMAN, 1966: 264). Níveis: 1 - arcada; 2- trifório; 3- clerestório. Estruturas: A- Arco em ogiva; B - arcobotante; C - contraforte. Por vezes, incluía-se um nível entre o trifório e o clerestório - a galeria.



1



2



3



4

Figura 10 - Exemplos da variação do estilo românico na Arquitetura. 1: Igreja de San Martín de Tours de Frómista (1066 - Espanha) (PRINA; DEMARTINI, 2005: 45, 55); 2: Catedral de Módena (iniciada em 1099 - Itália) (PRYCE, 2008: 100); 3: Catedral de Worms (iniciada em 1016 - Alemanha) (NUTTGENS, 1997: 139); 4: Sta. Maria la Mayor de Toro (iniciada em 1160 - Espanha) (PRINA; DEMARTINI, 2005: 63).

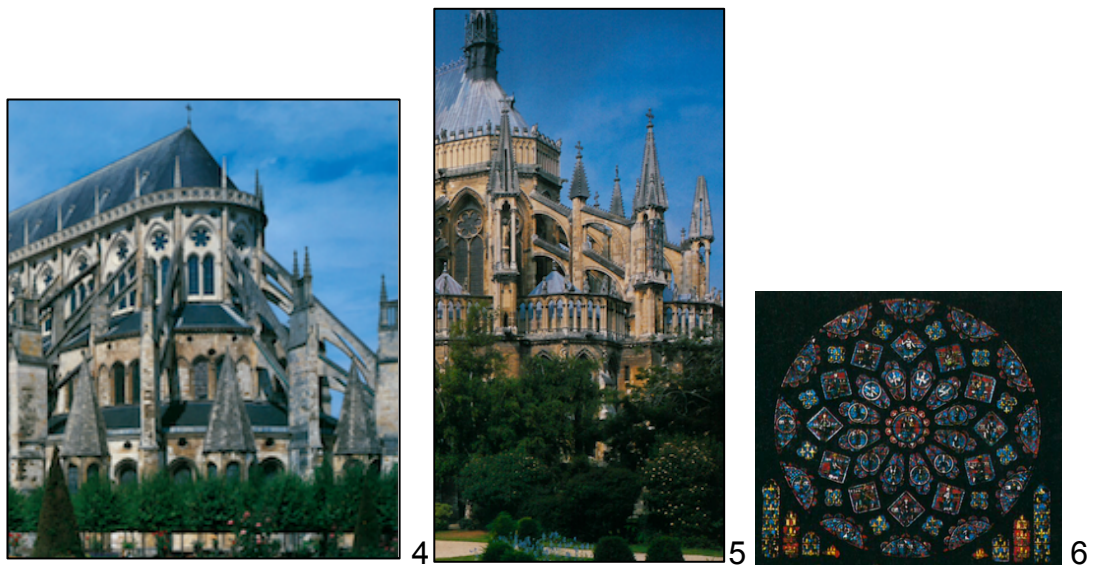
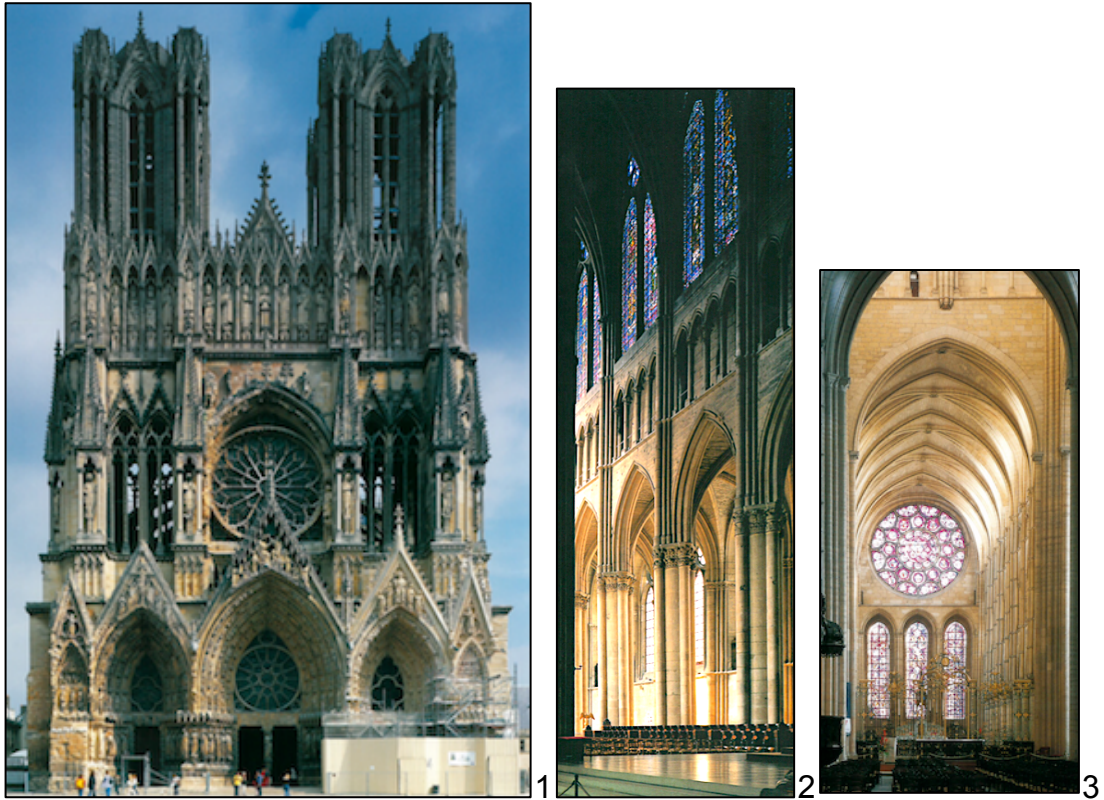


Figura 11 - Exemplos do estilo Gótico na Arquitetura. 1: Catedral de Reims (1211 a 1300 - França); 2: interior da Catedral de Reims, três níveis da nave central (arcada, trifório e clerestório); 3: Rosácea da fachada posterior da Catedral de Laon (iniciada em 1166 - França); 4: sistema de arcobotantes e contrafortes da Catedral de Burges (1196 a 1266 - França); mesmo sistema na Catedral de Reims (PRYCE, 2008: 132, 133, 112, 125, 131); Rosácea da Catedral de Chartres (1194 a 1221 - França) (NUTTGENS, 1997: 165).

É interessante a semelhança entre a evolução do modo de construir e a música religiosa da Idade Média. De certa forma, a arquitetura românica se assemelha ao canto gregoriano e, mesmo quando grandiosa, em geral mantém um ar de simplicidade, quase monástico. Em ambos, as possibilidades de variação eram restritas. Por exemplo, no canto não era permitido um salto melódico sem um retorno imediato na direção contrária que o precedeu. À catedral românica também não eram concedidas grandes ousadias construtivas. Em contrapartida, o *organum*¹⁶ das primeiras polifonias proporcionava o uso de diferentes texturas sonoras. O seu desenvolvimento em direção a um maior número de vozes e ritmos seria consoante à aventura estrutural da catedral gótica.

Na arquitetura, o desafio partia de um processo de investigação sobre o real funcionamento da estrutura do edifício, o que dependia de uma nova percepção do arquiteto, ainda que empírica, sobre a distribuição de forças em suas fachadas (fig. 12). De forma similar, a experimentação na música dependia do modo em que o material sonoro se sobrepunha. No momento em que as linhas melódicas desenvolviam-se paralelamente, os intervalos entre as vozes deveriam se apoiar, temporariamente, de forma harmônica em estruturas verticais (figs. 13 e 14).

Jencks novamente nos dá uma visão de que as artes estão relacionadas, não de maneira abstrata, mas concretamente, se compararmos as formas:

Nessa época, enquanto Pérotin e seus músicos sobrepunham três ou quatro melodias, criando sons harmônicos aos ouvidos, os construtores de Notre Dame também sobrepunham três ou quatro níveis (arcada, trifório, galeria e clerestório) em acordes agradáveis aos olhos (JENCKS, 2013: 7, tradução nossa).

¹⁶ Inclusão de uma voz paralela ao canto gregoriano, abaixo da voz principal, em um intervalo constante, geralmente de quarta ou quinta justas.

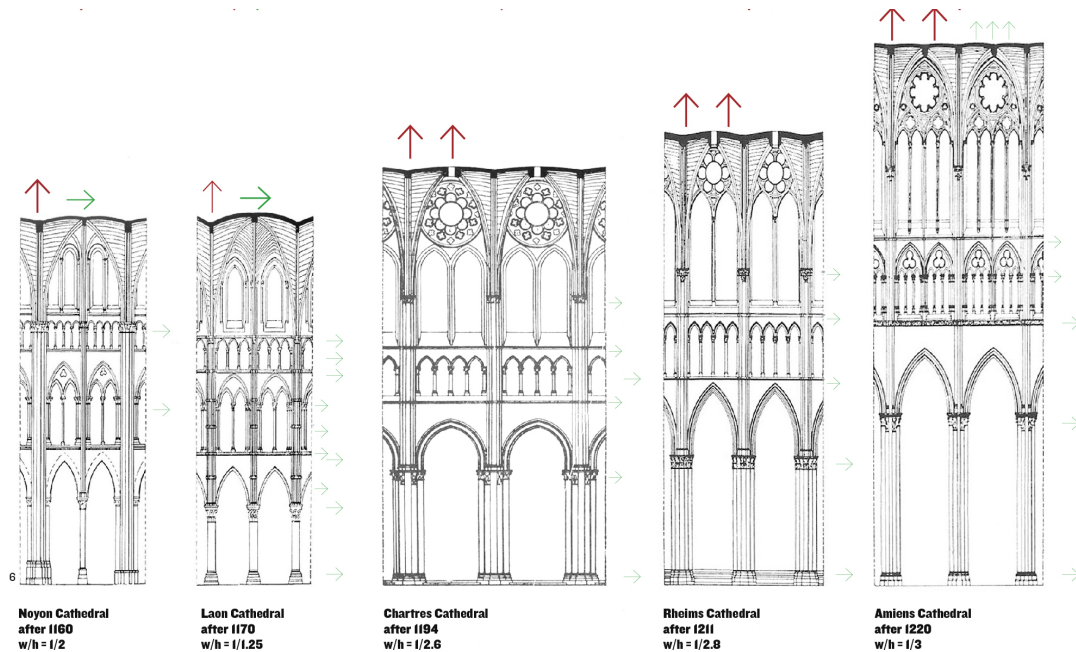


Figura 12 - Série evolucionária do estilo do Alto-Gótico na Arquitetura em 60 anos, a partir de 1160. Catedrais de Noyon, Laon, Chartres, Reims, Amiens (França). Da esq. para a dir. - direção da estrutura, com predominância: vertical; horizontal; paridade; vertical; vertical (JENCKS, 2013).

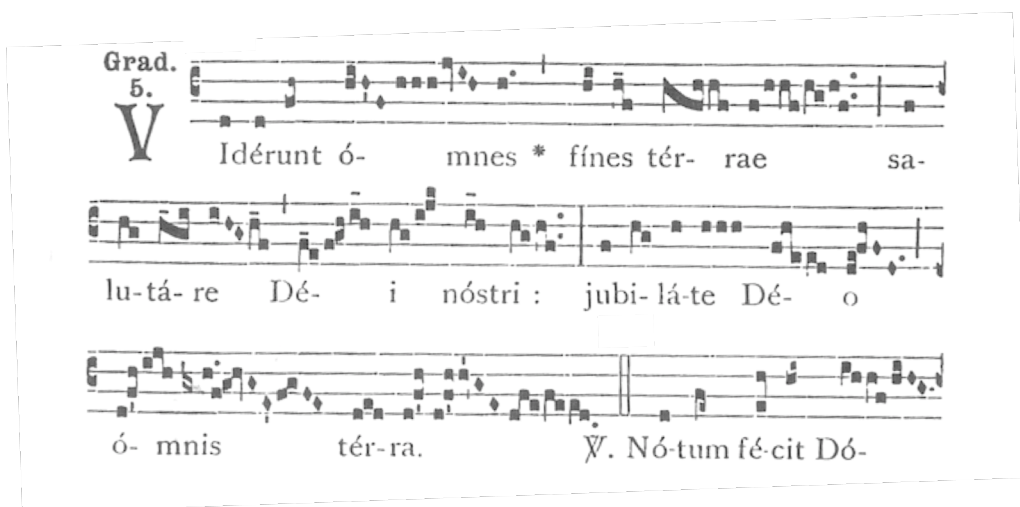


Figura 13 - Gradual: *Viderunt Omnes* - canto gregoriano (séc. XI) - trecho. Missa do Dia de Natal. Compositor anônimo (BURKHOLDER; PALISCA, 2006: 14).

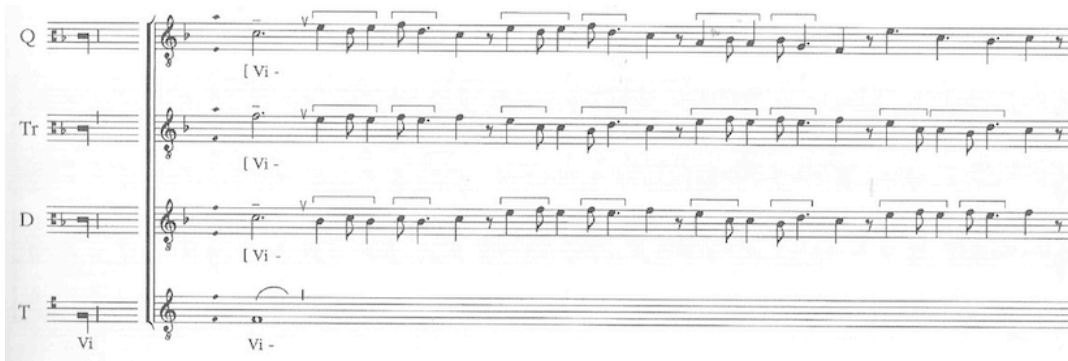


Figura 14 - Pérotin - *Viderunt Omnes* - *Organum Quadruplum* - trecho (final do séc. XII, ou início do séc. XII). Sobreposição de 4 vozes¹⁷ (BURKHOLDER; PALISCA, 2006: 79).

Porém, existe o risco de o paralelismo apontado por Jencks parecer exagerado, por se tratar de uma época em que a racionalidade na arte ainda era muito próxima da simbologia medieval. Por isso, é difícil afirmar que uma arte influenciou a outra de forma deliberada ou que elas seguiam princípios matemáticos similares, sendo mais plausível falar de uma essência comum (PIRROTTA, 1968: 252). Esta última noção seria mais clara no período da Renascença¹⁸.

No entanto, a sobreposição de materiais indica que o paralelo tangível encontrava-se na necessidade, presente tanto na arquitetura quanto na música, de se elevar. Para a construção musical do *organum*, é possível imaginar a influência da acústica da catedral gótica, com sua longa reverberação, na permanência dos intervalos melódicos e na composição vertical da harmonia. Para um ouvinte do século XIII, o efeito da polifonia a ecoar no interior da catedral não deveria ser somente uma sobreposição de melodias, e sim uma sinestesia de formas, sons e símbolos.

Ainda, vale relembrar um caso posterior, sobre a influência da acústica de um espaço sobre a forma e, conseqüentemente, o gênero musical. Em um período de transição da Renascença ao Barroco, Giovanni Gabrieli foi organista da Basílica de São

¹⁷ A voz do tenor (a inferior, indicada pela letra T na figura 14) segue os mesmos intervalos melódicos principais do canto gregoriano (fig. 13), em notas longas. As vozes superiores se desenvolvem em melismas até o encontro da próxima estrutura vertical, em geral apoiada em uma sílaba de inflexão do texto. Na peça, o organum é elaborado a partir da parte do solista no canto gregoriano original (até a indicação com asterisco): *Viderunt omnes*; ele alterna com o canto monódico, na parte originalmente do coro: *fnēs tērrae salutare Dēi nōstri: jubilate Dēo omnis tērra*. Em *nótum fécit*... retorna ao organum até a próxima indicação de alteração do canto original.

¹⁸ Os arquitetos da Renascença não tentavam “construir” música, ao invés disso utilizavam, conscientemente, as mesmas regras matemáticas da música; as proporções de sons e de espaços não se encontravam diretamente relacionadas, mas se comunicavam através da validade universal de um sistema harmônico comum, baseado na ordem divina (WITTKOWER apud TRACHTENBERG, 2001: 772, tradução nossa).

Marcos, em Veneza. Ele iniciou seus trabalhos em 1585 e permaneceu até 1612, ano de sua morte. O início da construção da basílica foi em 1064. Com forte influência da arquitetura bizantina, ela apresenta um estilo diferente das catedrais românicas desse período. Dessa forma, a conformação do seu espaço interno possui domos individuais em suas extremidades e ao centro, o que produz campos de reverberação localizados. Muitas das obras de Gabrieli seguiam a tradição do estilo policoral veneziano (*cori spezzati*), e nesse espaço era possível explorar ainda mais a condição acústica em suas performances, acentuando os efeitos espaciais e explorando os contrastes (BRYANT, 2017). O compositor costumava dispor instrumentos e cantores em conjuntos de dois ou mais grupos nesses campos de reverberação, o que gerava efeitos de eco e proporcionava a distribuição de sequências de perguntas e respostas musicais no ambiente. Essa técnica foi uma das bases de desenvolvimento do concerto grosso. (BURKAT apud LONG, 2006:17).

1.4 As salas de ópera

A seção anterior abordou de forma breve as mudanças ocorridas nas duas artes, utilizando como ponto chave a transição para a polifonia na música. Parte-se agora para um outro período de transição, da polifonia à melodia acompanhada, quando surge a grande novidade do período barroco na música - a ópera.

A inserção da música no teatro existe desde a antiguidade grega, quando empregava-se as canções do coro durante as danças e nos interlúdios. Além disso, é provável que parte das peças teatrais fossem declamadas musicalmente. Séculos mais tarde, a música também foi incluída nos dramas medievais em toda a Europa. Na Itália da renascença, os madrigais eram utilizados como *intermezzo* nas comédias, o que posteriormente transformou-se no gênero da comédia madrigalesca. No mesmo período, a *commedia dell'arte* incluía canções relacionadas ao seu enredo. Entretanto, na visão tradicional, a ópera surge como gênero a partir dos debates e preceitos de um grupo acadêmico informal denominado Camerata. Em Florença, no último quarto do séc. XVI, o grupo reunia parte da nobreza, músicos, poetas e filósofos. Estava entre os seus princípios, lançados em dois manifestos, que “uma única melodia deveria ser cantada de cada vez e o contraponto deveria ser usado somente para assegurar a presença da harmonia no acompanhamento da voz” (BROWN, 2017; PALISCA, 2017, tradução nossa).

No início do séc. XVII, as primeiras óperas ainda eram um entretenimento para o ambiente da corte, nos palácios de Florença, Mântua e Roma. A primeira sala pública de ópera foi construída em Veneza, em 1637, onde o gênero se estabeleceu antes de alcançar toda a Itália e os países do norte (BROWN, 2017). O interior do teatro de SS. Giovanni e Paolo fora inspirado na disposição do teatro Farnese, construído em 1628, em Parma. De forma similar, a sala de Veneza contava com uma audiência distribuída em vários níveis, no formato de “U” e com a presença de nichos (*boxes*), ao invés de fileiras de assentos. Posteriormente, esse formato se desenvolveria ao de ferradura. Nessa sala, a posição da orquestra também foi alterada. Antes era colocada no fundo do palco, ou em um balcão lateral, mas agora contava com um local específico ao centro do teatro, rebaixado e disposto entre o público e a performance – o fosso orquestral (LONG, 2006: 17).

A sobreposição de nichos da audiência demonstra uma preocupação quanto ao aproveitamento máximo do espaço interno. A sala de ópera tinha um caráter social e,

apesar de sua segregação interna, era aberta a um público heterogêneo. Tudo indica que essa tipologia foi bem aceita pelos usuários, pois foi utilizada na Europa por mais dois séculos (Idem: 18). O Teatro La Scala de Milão, por exemplo, foi construído em 1778 e permaneceu sem alterações significativas¹⁹ até a sua reconstrução, após um bombardeio em 1943. Seu formato de ferradura conta com cinco níveis de audiência, em nichos. Esse formato propicia um maior foco da energia sonora ao fundo da plateia (IANNACE; IANNIELLO, 2008). Além disso, os nichos absorvem somente cerca de 40% do som e, assim, fornecem um eficiente retorno para a sala e os músicos (BERANEK apud LONG, 2006:23).

Na verdade, a acústica da sala de ópera é ainda mais complexa do que a de concerto. É necessário equilibrar a reverberação do ambiente de forma a contribuir para a sustentação da voz, mas ao mesmo tempo ela não pode ser excessiva a ponto de mascarar as nuances das árias, as inflexões do recitativo e a inteligibilidade do texto. Ainda, esses fatores podem variar de acordo com o estilo desse gênero tão diverso, em questões como orquestração e articulação melódica. Em geral, o seu tempo de reverberação deve ser menor que o dos espaços de concerto (MEYER, 2009: 234). Segue abaixo uma figura com os tempos de reverberação de algumas importantes salas de ópera:

Opera house	Year	Volume (m ³)	Number of seats/standing places	T _m (s)	T ₄ (s)
1. GroBe Oper Paris	1875	9960	2131/ 200	1,1	0,9
2. Festspielhaus Bayreuth	1976	10300	1800	1,55	1,3
3. Scala Milano	1946	11250	2289/ 400	1,2	1,0
4. Staatsoper Wien	1955	10660	1658/ 580	1,3	1,1
5. Festspielhaus Salzburg	1960	14000	2158	1,5	1,3
6. Metropolitan Opera New York	1966	30500	5000	1,8	1,3*
7. Semper-Oper Dresden	1985	12500	1290	1,85	1,3
8. Opéra National de Paris	1989	21000	2700	1,55	1,25*

Figura 15 - Tempos de Reverberação (com a sala totalmente ocupada) nas frequências médias (T_m) e na banda de oitava de 4 kHz (T₄). Esta região contribui para os formantes da voz do cantor. O ano indicado representa a data da última renovação do teatro. A de no. 8 refere-se à antiga Ópera da Bastilha. (Idem:235).

¹⁹ O teatro foi remobiliado em 1830 e recebeu luz elétrica em 1883 (AZEVEDO, 1994:121).

De acordo com a figura anterior, a Festpielhaus de Bayreuth (5) tem um tempo de reverberação longo, se comparada a outras salas de ópera mais antigas, como a de Paris (1). Outros fatores importantes em Bayreuth são a coloração da sala nas frequências graves, que propiciam um som mais cheio, e o seu fosso de orquestra que é bem específico. O fosso é profundo, seguindo a inclinação da plateia, e parcialmente coberto (fig.16). A disposição dos músicos nesse espaço favorece as cordas, que ficam na parte de cima, mais próximas ao regente. A percussão e os metais ficam em um plano mais distante, ao fundo. Já a cobertura serve tanto para direcionar uma parte do som de volta para o palco, quanto para diminuir a intensidade sonora da orquestra em relação aos cantores, na distribuição do som aos ouvintes. Todavia, tende a homogeneizar os grupos de instrumentos. Em geral, todos esses elementos formam um conceito ideal para a música de Wagner. Inclusive, como era de se esperar, o compositor teve um papel decisivo no design desse espaço. Entretanto, mesmo que a sala “beneficie o clássico som wagneriano, proeminentes no ciclo do “Anel” e em “Parsifal”, as sutilezas do “Meistersinger” são difíceis de realizar” (MEYER, 2009:240).

As salas de Paris (1), Milão (3) e Viena (4), com um tempo de reverberação de pouco mais de 1 segundo, atendem bem a um repertório típico do séc. XIX, com maior sonoridade orquestral e *legato*. Porém, ao contrário de Bayreuth, há uma maior preocupação com a inteligibilidade do discurso. Mesmo assim, estão longe do ideal para as óperas de Mozart, por exemplo. O *Burgtheater* de Viena, que estreou o Rapto do Serralho, *Così fan Tutte* e as Bodas de Fígaro, era um teatro bem menor, com um tempo médio de reverberação próximo a 1 segundo. Ademais, para esse estilo de ópera era desejada uma atmosfera mais leve, sem uma ênfase nas frequências graves (Idem:237).

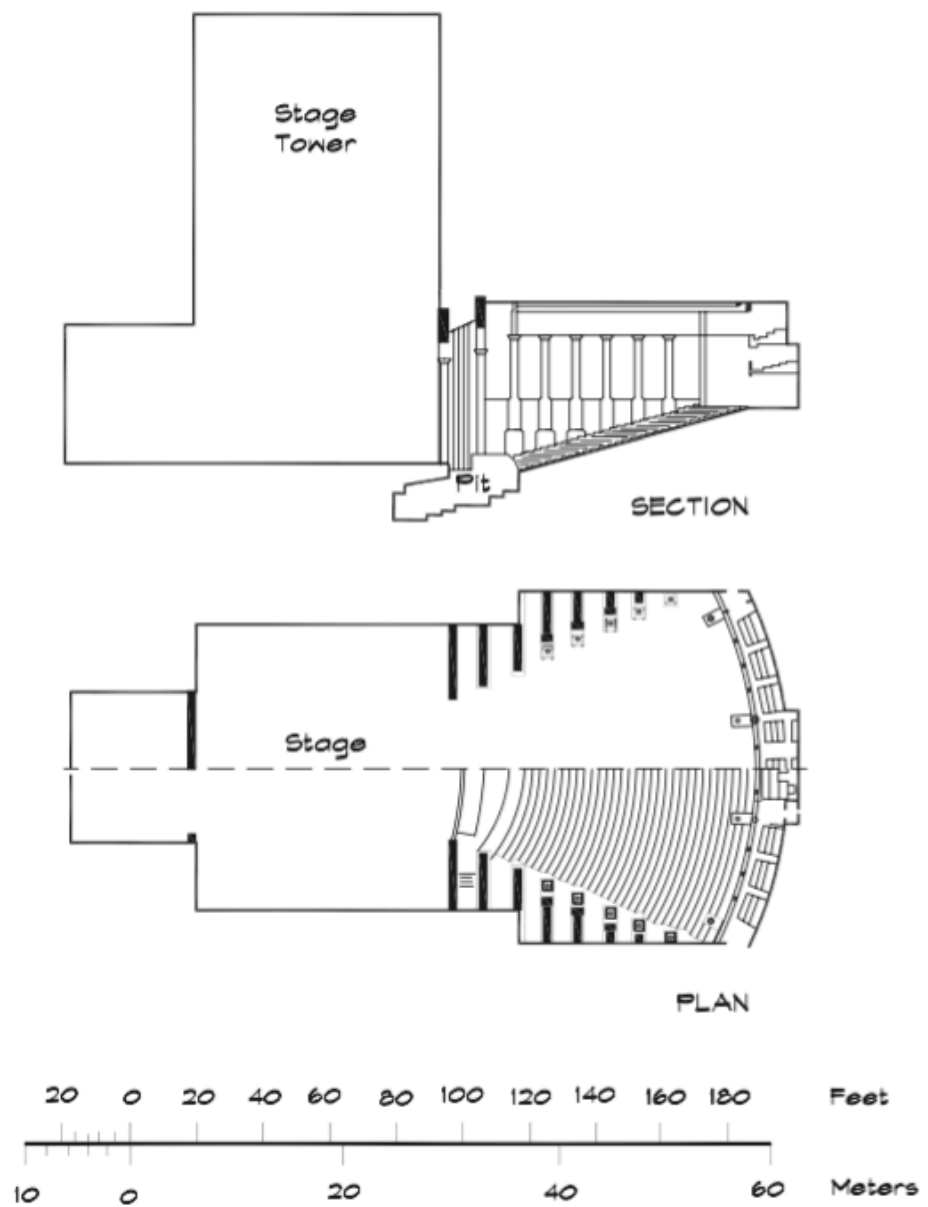


Figura 16 - Corte e Planta da Festpielhaus, Bayreuth, Alemanha (LONG, 2006:26).

1.5 As primeiras salas de concerto

As primeiras salas construídas especificamente para a performance musical, sem preocupações com a encenação ou com a representação da ópera ou do teatro, começaram a surgir no final do século XVII. Contudo, a sala mais antiga da Europa ainda em utilização é a *Holywell Music Room*, em Oxford, na Inglaterra, inaugurada em 1748 (LEWCOCK, et al., 2017).

Desde meados do séc. XVIII, a música instrumental vinha ganhando espaço com o aumento da produção camerística. O estilo clássico substituíra o baixo contínuo barroco, com estruturas composicionais mais evidentes e mudanças harmônicas relativamente lentas. E, de forma progressiva, os compositores reduziram seus laços com a nobreza, ao mesmo tempo que o interesse da classe média em consumir música impressa e adquirir instrumentos aumentou. Assim, criou-se uma demanda por ingressos e assinaturas de espetáculos, com o desenvolvimento da vida social de concerto (BASHFORD, 2017).

Dentro dessa nova perspectiva, pela primeira vez os compositores tinham em mente a apresentação de suas obras em um espaço formal de concerto. Na Inglaterra, por exemplo, foi construída a *Hannover Square Room* em 1775, em um projeto fomentado por Carl Fredrick Abel e Johann Christian Bach. Por mais de um século, foi a sala de concertos mais popular no país, que acolheu as performances conduzidas por Haydn em suas Sinfonias de Londres (LONG, 2006: 21). Essas obras foram compostas especificamente para aquela sala e a instrumentação designada por Haydn era bem maior que a usual (MEYER, 2009:348).

Entretanto, na Áustria e na Alemanha não existia uma tradição de performances abertas ao público como na Inglaterra. Os concertos normalmente aconteciam em ambientes nobres, como é o caso dos salões dos Palácios *Esterháza (Eisenstadt e Fertöd)*, para os quais Haydn compôs a maior das suas sinfonias. Mesmo no caso de Viena, os dois principais salões utilizados para as performances eram o *Redoutensaal at Hofburg* e o Palácio da família *Habsburg*, construídos em 1740. Os ambientes mantinham o mesmo nível de piso em seu interior e serviam tanto para os bailes quanto para os concertos. Suas capacidades máximas eram de 1500 e 400 pessoas, respectivamente. Estima-se que, em ambas, o tempo de reverberação médio era de 1,6 segundos, com lotação máxima (LONG, 2006: 23).

A primeira sala pública de concertos da Alemanha foi construída em 1761, *Konzertsaal auf dem Kamp*, em Hamburgo. Em 1781, foi a vez da *Gewandhaus* (posteriormente *Altes Gewandhaus*), de Leipzig, que fora adaptada a partir de um edifício comercial. Nenhum dos espaços existe mais. Entretanto, estima-se que o tempo de reverberação na *Gewandhaus* era de aproximadamente 1,3 segundos. Além disso, a sala contava com painéis de madeira na decoração que reduziam a presença de graves em excesso. Esse espaço foi reconhecido por sua excelente acústica para a música do período e a do Romantismo, quando Félix Mendelssohn era seu diretor (de 1835 a 1847). Nesse espaço, aconteceram as estreias do 5º Concerto para piano de Beethoven, a Sinfonia em Dó Maior “A Grande” de Schubert e o Concerto para Violino de Mendelssohn²⁰ (FORSYTH, 1985:57,61).

As primeiras salas eram variações da forma dos salões, geralmente retangulares, que permitiam reflexões laterais, e com dimensões moderadas. O tempo de reverberação de 1,7 segundos, nas frequências médias, é considerado ideal para o repertório sinfônico clássico, enquanto o valor de 1 segundo é mais apropriado para performances de câmara, como a sala de Hannover. Todavia, em ambos os casos, os espaços apresentam uma diferença considerável no tempo de reverberação nas frequências graves, conforme a figura abaixo. Essa característica pode ser demasiada para um repertório romântico, cuja escrita dá mais destaque a este registro orquestral.

Concert hall	Volume (m ³)	Reverberation time (s)	
		Mid freq	Low freq
Schloß Eisenstadt	6,800	1.7	2.8
Schloß Esterháza	1,530	1.2	2.3
Hanover Square Rooms London	1,875	0.95	1.6
King's Theatre London	4,550	1.55	2.4
Festsaal der Alten Universität Vienna	5,250	1.7	2.6

Figura 17 - Tempos de Reverberação em salas de concerto históricas (MEYER, 2009:213).

²⁰ <https://www.gewandhausorchester.de/en/gewandhaus/history/>. Acesso em 11 jul. 2017.

1.6 As salas de concerto do período romântico ao século XX

As salas de concerto do período romântico, no séc. XIX, podiam receber um grande número de espectadores. Os espaços tinham que comportar orquestras e um repertório mais denso. Foi também a época em que o piano chegou, praticamente, à sua conformação atual, com um mecanismo que permitia uma maior velocidade de repetição, dinâmica e volume de som. Instrumentos de corda, mesmo os históricos, e de sopro também sofreriam modificações pelo mesmo objetivo, substituindo muitas de suas possibilidades de nuance em prol do *legato*.

Paralelamente, as salas de concerto tinham tempos de reverberação próximos a 2 segundos nas frequências médias e um aumento significativo do volume interno, como é possível observar na figura 18. Uma tipologia usual era o *shoebox hall*, que tinha um formato retangular e proporcionalmente estreito, grande dimensão do pé-direito (aproximadamente 15 metros), várias superfícies de difusão sonora (p.e. órgão, balcão de audiência, janelas recuadas) e a plataforma da orquestra mais elevada. Essa tipologia conta com ótimos exemplos, como a *Große Musikvereinsaal*, de Viena. Esta sala tem excelente reflexão lateral, o que envolve os espectadores, com graves presentes e uma combinação de clareza com um longo tempo de reverberação, o que é muito difícil de alcançar (LONG, 2006:29). Bruno Walter a considerava a melhor sala de concertos do mundo e, de acordo com Karajan, era uma sala com um som muito cheio, rica nos graves e muito boa para os violinos. Entretanto, ele julgava que as notas sucessivas se sobrepunham facilmente e que havia muita diferença entre os ensaios e o concerto. É uma sala com muita potência sonora, em que as madeiras e cordas soam muito bem, mais são facilmente sobrepujadas pelos metais e a percussão (BERANEK, 2004: 173-176).

Concert hall	Constr. year	Volume (m ³)	Seats	Reverberation time (s)	
				Mid	Low-frequency
1. Large Musikvereinsaal Vienna	1870	14,600	1,680	2.05	2.4
2. Teatro Colon Buenos Aires	1908	20,550	2,487	1.8	–
3. Concertgebouw Amsterdam	1887	18,700	2,206	2.0	2.2
4. Symphony Hall Boston	1900	18,740	2,631	1.8	2.2
5. Konzerthus Göteborg	1935	11,900	1,371	1.7	1.9

Figura 18 - Tempos de Reverberação em salas de concerto anteriores a 1940. (MEYER, 2009:206).

Em 1898, W.C. Sabine²¹ participou do projeto da sala de concertos de Boston, que é considerada uma das melhores do mundo. Esse espaço segue a tipologia da *shoebox hall*, porém com balcões mais estreitos e um palco menos profundo, que conta com superfícies em ângulo para direcionar o som à plateia (Idem:31).

Nas salas mais modernas, existe ainda uma maior preocupação com a forma, visto que o aumento da dimensão desses espaços traz desafios para a distribuição sonora, como no exemplo da figura 19. Em vários exemplos, a orquestra ocupa uma posição mais centralizada, com espaços para o público ao redor da orquestra como na Berlin Philharmonie. Isso pode dificultar a equalização de alguns grupos de instrumentos dentro da orquestra, devido à direcionalidade de sua projeção. Essa questão reflete a tendência dos projetos atuais em reaproximar a orquestra ao fundo do sala, mantendo-se somente o espaço do coral ao fundo (MEYER, 2009:216).

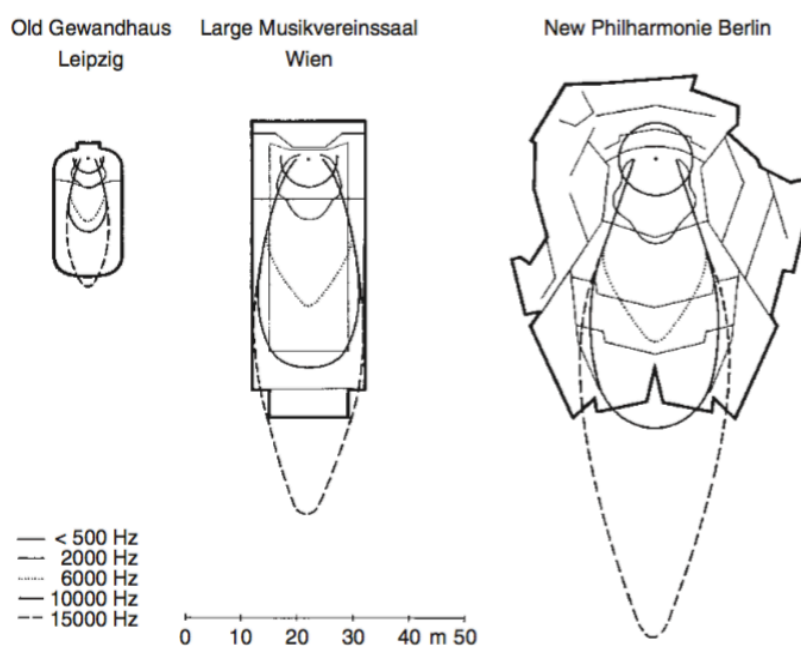


Figura 19 – Campo de difusão sonora em diferentes salas de concerto (Idem).

²¹ Sabine foi responsável pelos primeiros estudos científicos em acústica arquitetônica, considerando a absorção dos materiais e o decaimento do som, determinando o T60, fórmula para o tempo de reverberação.

2. A construção sonora e arquitetônica

2.1 Pierre Schaeffer e a música concreta

A base de uma classificação do objeto sonoro, lançada por Pierre Schaeffer em seu *Traité des Objets Musicaux* (1966), traz o foco da escuta para o material sonoro que compõe cada tipo de som. Em um método que envolve um processo de decupagem, possível graças ao desenvolvimento da tecnologia de gravação na primeira metade do séc. XX, é possível chegar ao cerne do material sonoro, isolando-o de suas relações causais. Nesse estado, denominado escuta reduzida, que coexiste com o objeto sonoro como atividade de percepção, parte-se para a classificação tipológica e morfológica do som, através de pares de critérios baseados em articulação/apoio do som para determinar a sua tipologia; e de matéria/forma para caracterizar a morfologia. Os critérios tipo-morfológicos são descritos por Schaeffer (1966: 62, 75, tradução de Dias).

Schaeffer iniciou seus experimentos sonoros enquanto trabalhava no *Office de Radiodiffusion Télévision Française* (ORTF). O trabalho técnico ligado às apresentações de radiodifusão, iniciado em 1936, logo abriria caminho às suas manipulações sonoras e ao desenvolvimento de uma nova estética. Em 1948, ele compôs os *Cinq Études de Bruits*, que utilizavam a edição e criação a partir de sons gravados. Dentre as peças eletroacústicas estava a *Étude aux Chemins de Fer*, criada a partir dos sons de trens em locomoção. Esses seriam os primeiros exemplos de “uma música autocontida a qual ele chamou de música concreta” (CHION, 1983:12, tradução nossa).

Sobre o termo, Schaeffer explicou:

Quando em 1948 eu sugeri o termo “música concreta”, a minha intenção era, com esse adjetivo, sinalizar uma volta de 180 graus na prática musical. Ao invés de escrever as ideias musicais com os símbolos da teoria musical tradicional, e confiar a sua realização a instrumentos musicais conhecidos, eu queria juntar sons materiais concretos, sem me importar de onde viessem, e extrair deles os valores musicais sonoros que potencialmente continham. (Idem: 38, tradução nossa).

Com novos sons à disposição, era imprescindível uma descrição pormenorizada de suas características. A abstração necessária para se entender a notação musical tradicional era insuficiente. Quando observamos uma partitura de orquestra, há em cada pentagrama, além de altura e duração de cada nota, a exigência de uma abstração de um timbre, como o “som de clarinete”, por exemplo. Entretanto, não era um intuito de Schaeffer ir contra essa noção, mas de construir até ela a partir do concreto (Idem:76). Tanto que as duas últimas fases do PROGEMU (*Programme de la Recherche Musicale*), após a classificação tipológica e morfológica que foram mais desenvolvidas, miram nessa direção. Eram Análise e Síntese. A primeira buscaria explorar possibilidades de abstração do som a partir de uma calibragem diferente e da utilização de critérios variados além da sua altura (correlato perceptivo da frequência fundamental de uma vibração), que estariam mais próximos às capacidades naturais da audição. A segunda seria o estágio utópico, onde os resultados das etapas anteriores levariam a diretrizes para a criação de objetos sonoros que pudessem ser utilizados na música em geral, em uma teoria completa (Idem: 100).

As aplicações previstas por Schaeffer para uma teoria dos objetos musicais se voltavam tanto à música tradicional, no intuito de dar uma opção além dos símbolos da notação ocidental à etnomusicologia, quanto à música contemporânea:

(para a música contemporânea), essa “teoria musical realista” é colocada como uma maneira autêntica de repensar a música, e de construir novas estruturas musicais que consideram nossas estruturas perceptivas, e almeja criar um consenso coletivo sobre a sua linguagem e os seus sistemas de referência. A sua ambição é tornar possível a esses sistemas emergentes corresponder a uma certa ordem perceptiva. Todavia, a teoria não a predeterminaria (Idem, tradução nossa).

Após séculos de desenvolvimento das estruturas musicais da música ocidental, com base em modos e escalas construídas a partir de uma divisão mínima de 1 semitom, Schaeffer mostrou opções para a criação de signos referentes à microestrutura dos sons, sobretudo para a sua compreensão. A questão sobre como a música, o som, ou mais profundamente, os objetos sonoros são feitos mantém sua relação com dois níveis de percepção. Sobre isso, Schaeffer ainda faz um paralelo com as construções arquetônicas:

No máximo, nós podemos esperar que, como na arquitetura, deve existir uma afinidade entre o material e a construção, então nessa nova música haverá uma afinidade entre o objeto como uma microestrutura, e a frase musical, a macroestrutura, da qual torna-se um elemento. Assim, para ser bem-sucedida a síntese de objetos musicais pressupõe alguma ideia preliminar sobre a natureza da linguagem musical que esperamos encontrar articulando esses objetos (Idem: 59, tradução nossa).

2.2 A concretude da arquitetura moderna

O *Zeitgeist* do início do séc. XX buscou uma estética de rompimento com o passado, de novas estruturas visuais e, ao menos na arquitetura modernista, da demonstração clara dessa estrutura. Nesse período, um paralelo interessante é o da pintura de Kandinsky com a fase atonal de Schoenberg, considerada como expressionista (ADORNO apud DE ALMEIDA, 2007:71). Entretanto, Schaeffer se oporia à fase seguinte do Serialismo, onde o material sonoro era definido a cada nova composição, quebrando a linguagem pré-estabelecida da tonalidade e da escala. Para ele essa definição era mais ideal que sonora, visto que ela ainda tratava o som como nota, duração e intensidade, em combinações matemáticas abstratas (CHION, 1983:55).

A rejeição ao estilo eclético da arquitetura do séc. XIX pelos modernistas era embasada no conceito de “menos é mais”. O termo empregado por Mies van de Rohe²² se referia à crítica direta ao excesso de ornamentação e à sobreposição de estilos no período eclético, advogando por uma arquitetura que deveria transparecer os materiais empregados, os seus elementos estruturais, a funcionalidade e a racionalidade dos edifícios. Le Corbusier chegaria a sugerir que todos os edifícios (do novo estilo) fossem brancos. A verdade estrutural empregada pelos modernistas exaltaria o caráter formal dos edifícios e seus materiais:

Mies oferece uma espécie de demonstração teórica do método moderno de composição arquitetônica. Decompondo a construção em seus elementos primários, desmoronam todos os ecos e sedimentos dos antigos hábitos de construção, e o espaço torna-se novamente limpo, uniforme, indiferente, como a tela vazia de que fala Kandinsky; nele os prismas geométricos simples e os materiais puros adquirem uma ressonância extraordinária, tal como as formas e as cores elementares que povoam a tela do pintor russo; as separações em mármore, as pilastras luzidias, a faixa de cobertura equilibrada, colocam-se com absoluta firmeza no ambiente contínuo, qualificam-no com nitidez e com discrição e jamais o fecham, sugerindo o campo ilimitado dos

²² Ludwig Mies van der Rohe e Charles-Edouard Jeanneret-Gris (Le Corbusier) foram dois dos principais arquitetos modernistas do séc. XX.

possíveis desenvolvimentos (BENÉVOLO, 2004: 462).

Conforme apontado por Benévolo, a utilização dos materiais proposta por Mies para o Pavilhão Alemão da Mostra Internacional de Barcelona de 1929 (fig. 20), bem como em suas diversas obras, aponta para o seu caráter concreto. A sua escolha dos diversos materiais em seu estado puro, integrados pela simplicidade geométrica das formas, de certo modo está em consonância com a disposição de objetos na música concreta. Em ambos os casos, o material existe por si mesmo, ele não é um elemento decorativo de uma estrutura, ou a abstração de uma sonoridade específica. Ele representa um plano, ou um objeto, construídos a partir um determinado material que é visível, ou perceptível como uma unidade.

A construção a partir do concreto em busca de uma noção abstrata, mencionada anteriormente por Schaeffer, já estaria presente no Pavilhão de Mies. O que o difere da construção tradicional é a sua ruptura, a decomposição mencionada por Benévolo, cujo efeito é criar uma necessidade de mudança na percepção da macroestrutura. Sob esse ângulo, a concepção de Schaeffer não estaria tão distante do pensamento arquitetônico moderno, visto que a quebra das barreiras do desenvolvimento da forma também partia do material.

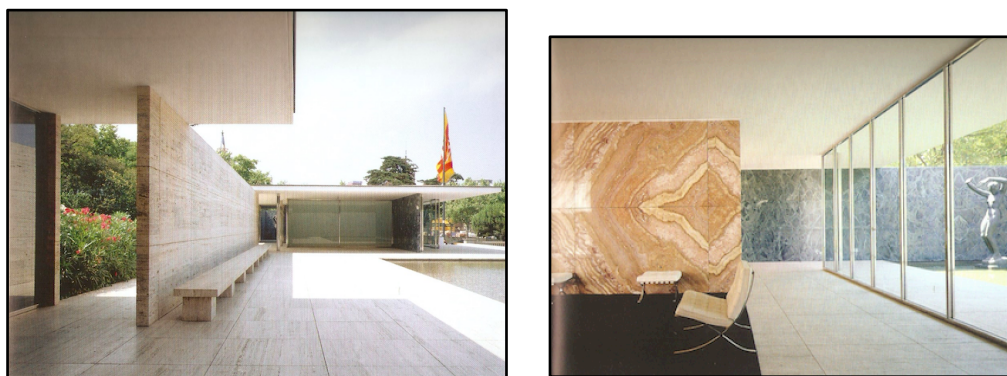


Figura 20 - Pavilhão Barcelona - Mies Van der Rohe (1929) (ZIMMERMAN, 2006:41, 43).

2.3 O Pavilhão Philips

Na arquitetura moderna, em termos de sua relação estética com a música, o Pavilhão Philips (figs. 21 e 22) destacou-se como uma contrapartida arquitetônica das formas e materiais empregados na busca de uma nova linguagem, a partir da música concreta. No âmbito da arquitetura e da engenharia, era uma estrutura revolucionária que combinava cascas de concreto em formato de parabolóide hiperbólico. O edifício, criado por Iannis Xenakis para a feira mundial EXPO 58, em Bruxelas, partia do conceito idealizado por Le Corbusier para um espaço multimídia, que contaria com projeções visuais produzidas por ele mesmo, além de composições de Edgar Varèse e do próprio Xenakis. Quando os executivos da Philips contactaram o escritório de Corbusier para projetar um pavilhão para a feira, cujo objetivo não era simplesmente expor os produtos da empresa e sim criar “a mais aventurosa demonstração na qual o progresso tecnológico pode nos levar ao futuro em termos de som e efeitos de luz”; a resposta do arquiteto foi a seguinte:

Eu não criarei um pavilhão e sim um “*Poème Électronique*” - uma “garrafa”, cujo conteúdo é uma mistura dos seguintes componentes poéticos: 1 - luz, 2 - cor, 3 - imagens, 4 - ritmo, 5 - som, 6 - arquitetura. Todos esses componentes representarão uma síntese orgânica acessível ao público, demonstrando ao mesmo tempo os acessórios utilizados pela Philips ao longo da produção. *Poème Électronique* terá 10 minutos de duração (XENAKIS; KANACH, 2008:105).

Xenakis chegou à Paris em 1947 como um refugiado, após lutar junto à resistência contra a ocupação da Grécia pelas forças do Eixo na IIª Guerra, e posterior guerra civil naquele país. Aos 25 anos, o recém-formado engenheiro conseguiu o emprego com Corbusier por intermédio de um colega do Instituto Politécnico de Atenas. Durante o seu curso no Instituto, Xenakis havia realizado um estudo detalhado sobre estruturas de concreto armado, o principal material construtivo utilizado na arquitetura modernista. Entretanto, desconhecia o trabalho de Le Corbusier, que na época já conseguia uma projeção internacional. Se para o jovem engenheiro nada na arquitetura contemporânea se comparava ao Partenon, o emprego como calculista certamente

garantiria seus estudos em música, no seu tempo livre. Dessa forma, Xenakis conseguiu participar das classes de Olivier Messiaen, a partir de 1949 até 1953, que o encorajaria a usar seus conhecimentos matemáticos e arquitetônicos em sua música. A partir daí, iniciou uma relação próxima com Hermann Scherchen, maestro de grande relevância na divulgação da música contemporânea. Neste período, ele escreveu suas primeiras composições orquestrais e eletrônicas, como: *Metastaseis* (1953-1954), *Pithoprakta* (1955-56), *Diamorphoses* (1957) e *Concret PH* (1958) (XENAKIS; KANACH, 2008: 7); além de diversos artigos no *Gravesaner Blätter*, editado por Scherchen, dentre eles uma crítica à música serialista (XENAKIS, 1956).

A ideia do *Poème Électronique* foi concebida pouco antes do rompimento de Xenakis com Corbusier, devido a controvérsias sobre a autoria do projeto arquitetônico do Pavilhão. Nesse projeto, Corbusier solicitou a Xenakis que transformasse o seu conceito e o “traduzisse em matemática” (XENAKIS; KANACH, 2008: 112). Na época, Corbusier direcionou toda a sua energia para o espetáculo visual da exposição, além de dividir sua atenção com o projeto da cidade de *Chandigarh*, na Índia. Ele deixou o design da arquitetura e suas soluções técnicas, que neste caso eram parte da própria estética do edifício, a cargo de Xenakis. Por fim, acabou por ceder a autoria do projeto (Idem: 101).

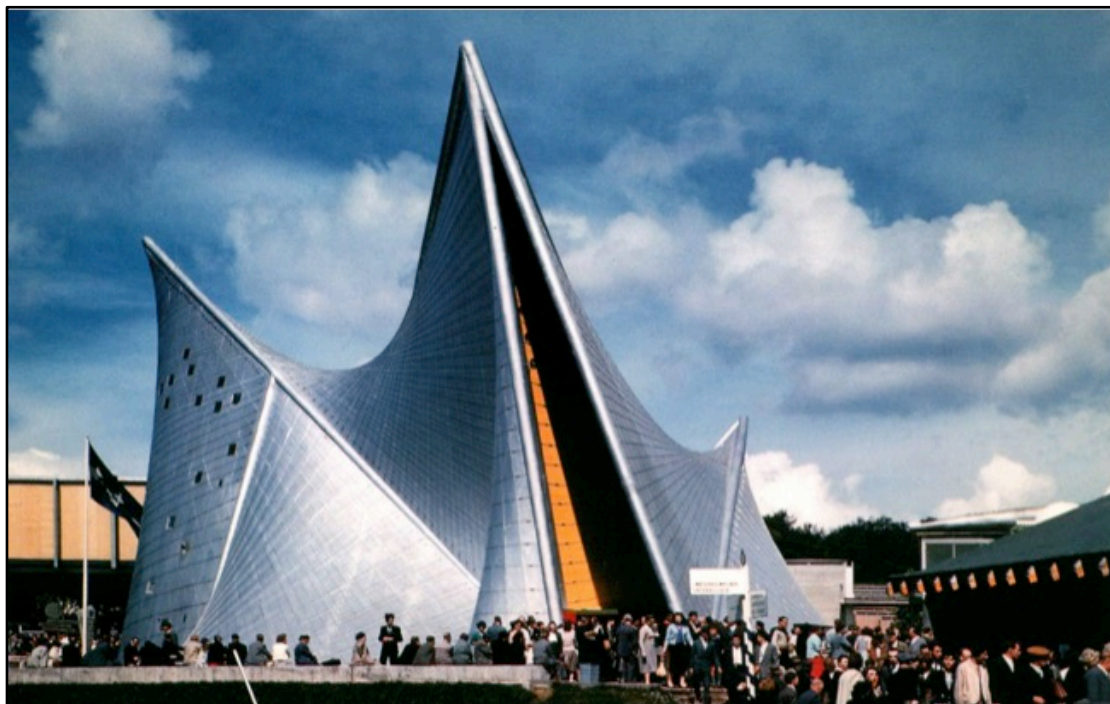


Figura 21 - Pavilhão Philips (LOPEZ, 2011).



Figura 22 – Pavilhão Philips (LOPEZ, 2011).

A obra musical para o espaço central do pavilhão ficou a cargo de Edgard Varèse (fig. 23). O compositor fora indicado pelo próprio Corbusier, à revelia dos executivos da Philips, que preferiam nomes como Benjamin Britten e Aaron Copland. O *Poème Électronique* certamente não era o esperado: “sem melodia, sem harmonia” - seria o veredito da Philips. A peça de Varèse era música concreta e obviamente incorporava sons incomuns. Todavia, é possível inferir que a música ia ao encontro do conceito do arquiteto, que buscava sons que se integrassem à sua construção de luz e imagem (fig. 24), esta que projetava uma experiência relativa à existência humana, aos avanços da civilização e ao seu “constante e árduo desenvolvimento em busca de uma nova harmonia no futuro” (Idem: 105, tradução nossa).

Foi ele (Corbusier) que elaborou o “libreto” óptico, a transformação visual de fatos reais da presença (humana), englobando desde o microcosmo de átomos e máquinas de fábrica, até o sorriso de um bebê e o caos nas estrelas (Idem, tradução nossa).

A parte musical da performance do poema eletrônico incluía diversos efeitos

de *panning*²³ no interior do ambiente. No intuito de criar esses efeitos de espacialização, Xenakis havia trabalhado junto aos engenheiros de som da Philips na distribuição de fontes sonoras. Além disso, o espaço contava com complexo sistema de seleção de mais de 400 alto-falantes (fig. 25).



Figura 23 - Edgard Varèse nos estúdios da Philips (XENAKIS; KANACH, 2008: 94).

²³ Em um sistema de sonorização com mais de uma fonte, a transferência - gradativa ou não - do sinal de áudio de um canal para outro. Por exemplo, em um sistema estereofônico, do alto-falante esquerdo para o direito.



Figura 24 - Imagem interna do Pavilhão durante a performance (LOPEZ, 2011).

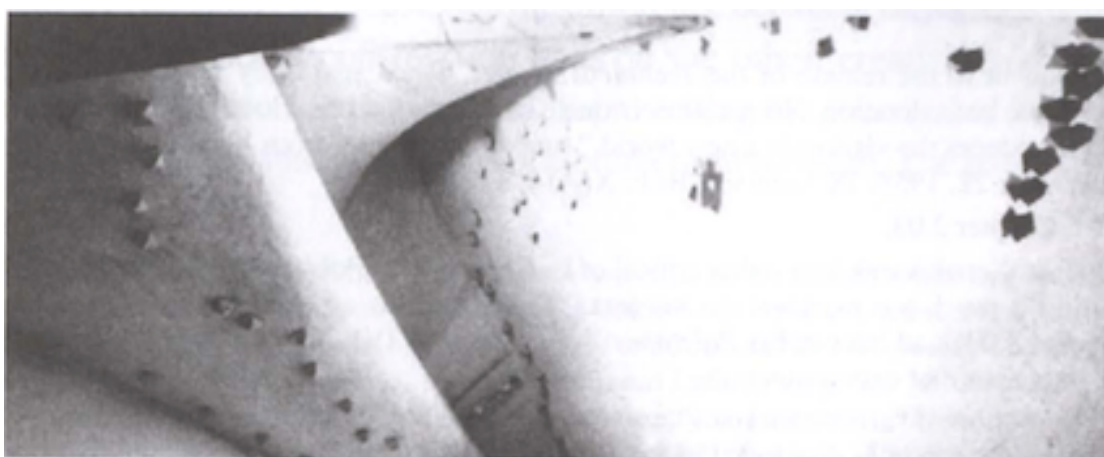


Figura 25 - Distribuição de alto-falantes no interior do ambiente (XENAKIS; KANACH, 2008: 100).

Além de todos os desafios do projeto arquitetônico e de sua solução estrutural, Xenakis ficou a cargo de compor uma peça para o interlúdio do evento, entre a saída dos espectadores e a entrada de um novo grupo, que poderia chegar a 500 pessoas. *Concret PH* tinha duração de 2'45" e consistia em sons de carvão em combustão, manipulados eletronicamente. Esses sons, espacializados através de centenas de alto-falantes, davam a sensação de que o edifício "estava rachando e perdendo a tensão de sua estrutura" (Idem: 102).

Infelizmente, o Pavilhão era uma estrutura temporária e, como os demais espaços de exposição do evento, foi demolido no ano seguinte. O fato é que o Pavilhão havia sido um sucesso sem precedentes, pois durante os meses da exposição cerca de 1,5 milhão de espectadores visitaram a instalação. Uma experiência interessante em relação ao edifício foi a reconstrução virtual do *Poème Électronique*, em 2009, através da modelagem acústica do espaço e da tecnologia de realidade virtual (LOMBARDO et al., 2009).

Sobre a construção deste espaço, é interessante observar que tanto a forma e os materiais do edifício quanto o aparato sonoro da Philips eram tecnologia de ponta. O concreto armado foi escolhido como revestimento devido às suas possibilidades plásticas e capacidade estrutural, o que era comum no modernismo arquitetônico. Entretanto, a forma concebida por Xenakis, com nove cascas em formato de parabolóide hiperbólico, era bastante inovadora. Tanto que, ao longo da fase de projeto, foi necessária a criação de grandes modelos para se constatar a possibilidade de sustentação de tal estrutura, ao contrário de todas as previsões. As placas de concreto armado pré-moldadas, de 5 cm de espessura, eram presas em uma dupla rede de cabos de aço de 8 mm, tensionadas pelas estruturas principais (fig. 26). O conjunto formava uma tenda esbelta de um material extremamente rígido, de 40 metros de comprimento por 22 metros de altura, em seu ponto mais alto (XENAKIS; KANACH, 2008: 96).

Pela primeira vez, engenheiros e construtores tinham que lidar com um edifício cuja estrutura experimental era baseada em parabolóides hiperbólicos autoportantes. O Pavilhão Philips não contava com estruturas de suporte internas ou externas (além do conjunto das cascas de concreto e cabos de aço). Xenakis estava levando o material escolhido ao seu limite extremo. (Idem: 95, tradução nossa).



Figura 26 – Detalhe para as placas de concreto pré-moldadas do Pavilhão, presas por cabos de aço (XENAKIS; KANACH, 2008: 97)

É clara a interferência entre Música e Arquitetura na concepção da estrutura do Pavilhão. Corbusier havia proposto, junto com o conceito visual do espetáculo, somente a planta do espaço. Não era uma planta arquitetônica usual. O formato de garrafa, que depois tornou-se algo parecido com o “estômago de uma vaca”, era basicamente uma ideia, com uma breve demarcação dos espaços. Os 500 espectadores permaneceriam por oito minutos dentro desse invólucro de interferência das artes. O prédio contaria também com um *foyer* de entrada e um outro para saída, nos dois minutos de interlúdio. Porém, a proposição de Xenakis não seguia simplesmente a elevação desta planta. Ele criou um conceito diferente relacionado à acústica, cuja distribuição dos alto-falantes direcionaria o som através dos diversos planos criados pela arquitetura.

A forma do pavilhão estava realmente de acordo com o pensamento musical da época. Para Xenakis, as construções tradicionais possuíam somente dois planos. Já o pavilhão atendia o seu anseio por uma arquitetura “tridimensional” (Idem: 110). Os planos da música também não eram mais os mesmos. Na peça de Varèse, não há como se ter uma previsão da continuidade ao longo de sua estrutura. Tanto o espaço interno quanto o externo do pavilhão seguiam a mesma tipologia, ou seja, a ampliação das características espaciais, a quebra de planos rígidos, a ruptura dos conceitos de métrica e duração.

Para Xenakis, uma fagulha dessa ideia surgiu durante a fase inicial do projeto,

quando Corbusier lhe transferiu a análise das necessidades da futura edificação. A preocupação acústica certamente foi uma das diretrizes para a vedação e cobertura do espaço. Todavia, foi crucial a transformação da técnica para a estética em sua análise:

Características do auditório e da eletroacústica = Tempo de Reverberação extremamente curto, que implica evitar superfícies paralelas (inúmeras possibilidades de reflexão); ausência de tetraedros (reverberação devida a bisseções de diedros); superfícies em arco, com curvas radiais, continuamente mutáveis” (Idem: 106, tradução nossa).

Ao final, a escolha para a solução estrutural do edifício partiria de um conceito musical presente em *Metastaseis*, com o objetivo de não interromper a continuidade da estrutura (figs. 27 e 28):

No Pavilhão Philips eu realizei as ideias básicas de Metastasis (sic), conforme o caso da música, aqui eu também estava interessado em saber se era possível ir de um ponto a outro sem a quebra da continuidade. Em Metastasis esse problema levou ao uso de glissandos, enquanto que no Pavilhão o resultado se deu nas formas de parabolóide hiperbólico (Idem: 99, tradução nossa).

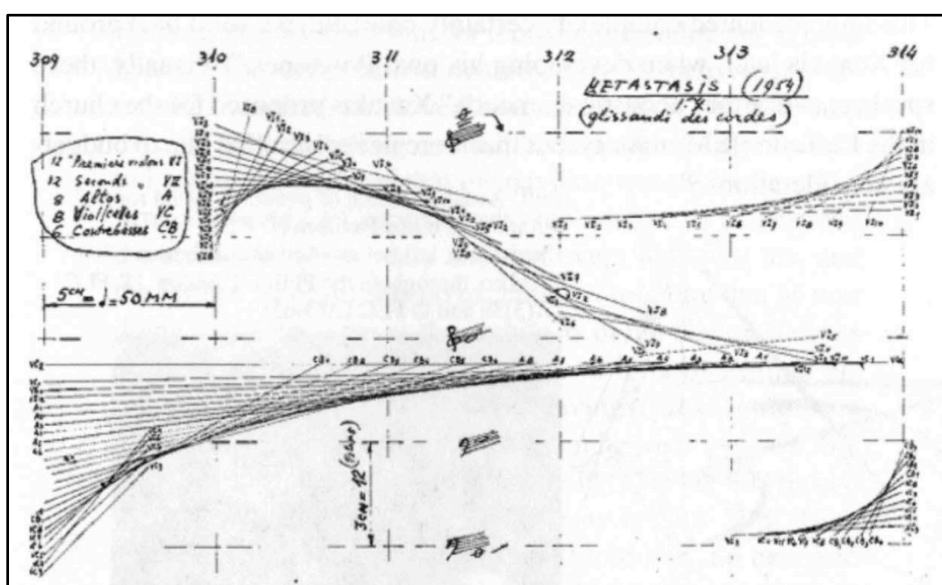


Figura 27 - *Metastaseis* - representação gráfica dos glissandos (XENAKIS; KANACH, 2008: 99).

Na arquitetura modernista, um preceito estético básico era de que a forma deveria seguir a sua função, bem como despojar o edifício de adornos “desnecessários” à sua estrutura. Entretanto, a tendência formalista do modernismo denota que sua estética nem sempre era tão objetiva. Quanto ao Pavilhão Philips é possível dizer que a forma seguia perfeitamente a sua função estética. Dentre as obras do modernismo arquitetônico, talvez tenha sido a de maior tangência com outras artes, sobretudo com a Música. Neste caso, a comparação não é abstrata, ela é categórica. No edifício, os glissandos físicos de Xenakis conformam uma polifonia estrutural, congelada tridimensionalmente, cujo movimento se mantinha à espera da interação sensorial do espectador.



Figura 28 – Pavilhão Philips (LOPEZ, 2011).

2.4 *I Am Sitting in a Room*

E se a forma e os materiais de uma arquitetura criassem música? Essa ideia, explorada em uma peça de Alvin Lucier, de 1969, extrapola os limites da influência acústica do ambiente no material sonoro. Para além dos espaços artificiais criados pela gravação sonora (que serão abordados mais adiante), os espaços sonoros das gravações de *I Am Sitting in a Room* talvez conformem a primeira ideia da acústica de um espaço virtual, no sentido moderno do termo. No momento em que o compositor começou a utilizar a acústica de uma sala como um elemento de interação com o som, modulando-o, o espaço perdeu seu caráter passivo de reflexão ou absorção de determinadas frequências. Na peça, esse caráter torna-se a interpretação de um som pelo ambiente no qual é produzido. A recursividade da acústica empregada por Lucier é uma ampliação dessas qualidades sonoras, um aumento de sua dinâmica.

A obra é desenvolvida a partir de um texto narrado pelo compositor (LUCIER; SIMON, 1980: 30)²⁴. Em tom monocromático, Lucier explica o processo da gravação e reprodução contínua do seu discurso. Assim, a cada geração do texto, o som que é regravado incorpora e ressalta as características acústicas do ambiente. Gradativamente, a narrativa se dissolve e o que resta é a influência da acústica da sala, ressaltando as frequências harmônicas do discurso que estão de acordo com o ambiente.

Já na primeira frase do texto, Lucier se direciona ao ouvinte de uma maneira que a princípio pode parecer óbvia, mas que exalta a condição de qualquer gravação de som. O espaço ali é outro, que é transportado para a situação do ouvinte. Nas suas gravações de 1970 e de 1980, Lucier utiliza a sua própria sala de estar (LUCIER: 1970, 1990)²⁵. É algo íntimo, simples, distante da concepção usual de uma gravação de música erudita – em uma sala de concerto ou um estúdio. Daqueles espaços, Lucier cria duas performances completamente diferentes, a partir das inflexões, transientes e pequenas

²⁴ "I am sitting in a room different from the one you are in now. I am recording the sound of my speaking voice and I am going to play it back into the room again and again until the resonant frequencies of the room reinforce themselves, so that any semblance of my speech, with perhaps the exception of rhythm, is destroyed. What you will hear, then, are the natural resonant frequencies of the room articulated by speech. I regard this activity not so much as a demonstration of a physical fact, but more as a way to smooth out any irregularities my speech might have."

²⁵ A primeira gravação da peça foi realizada por Lucier nos estúdios de música eletrônica da Universidade Brandeis em 1969. O compositor não ficou satisfeito com o resultado e, em 1970, optou por gravar a peça em sua sala de estar, em um pequeno apartamento em Middletown, CT. A gravação seguinte foi feita em outra residência da mesma cidade, em 1980.

variações de entonação da sua voz. Sua sala torna-se um filtro, um instrumento que cria variações harmônicas e tímbricas.

A primeira sala age como uma espécie de *vocoder*, pois concentra uma boa parte do som ao redor de uma ressonância constante de 1850 Hz, que fica em maior evidência que o outro grupo nodal sonoro em 450 Hz. O segundo ambiente fornece um resultado bem diferente, pois praticamente concentra todo o som em uma faixa grave, em torno de 350 Hz. Maiores considerações sobre essas gravações, de 1970 e 1980, estão presentes em nosso estudo realizado em 2016, cuja análise utilizou os critérios tipo-morfológicos de Pierre Schaeffer (VILAS BOAS; FREIRE, 2016).

É interessante o conceito de Lucier sobre a performance de sua obra. Ao observarmos a partitura de *I Am Sitting in a Room*, em nenhum momento o compositor tenta engessar a forma de criar essa interação entre o som e o espaço. Para ele, ela é virtual, é transponível para ser recriada em outras situações ou condições específicas. O que está escrito é uma ideia e a maneira de colocá-la em prática através da descrição de sua técnica. É preciso somente um gravador, um microfone, um reproduzidor sonoro e um alto-falante. A 1ª geração do texto é narrada, essa narração é retroalimentada ao gravador pelo conjunto alto-falante e microfone para obter-se a 2ª geração. Repete-se a operação até o alcance de um resultado satisfatório. Além disso, nas instruções Lucier é bastante generoso, pois incita a utilização de outros textos, com maior ou menor duração, diferentes línguas e o uso de espaços distintos.

Em dezembro de 2014, Lucier realizou uma performance de *I Am Sitting in a Room* no MoMA - Museu de Arte Moderna de Nova York; que acabou por integrar a peça a seu acervo. Após consultar o compositor, a equipe de curadores do museu decidiu que a aquisição da obra de arte incluiria tanto a performance de 2014, gravada naquele espaço, quanto a possibilidade da sua recriação por outros artistas.

Sobre o material sonoro para a criação da peça, Lucier explicou a sua motivação para o uso da voz em uma entrevista:

Meu primeiro impulso foi o de usar vários instrumentos musicais tocando uma grande variedade de sons, mas eu descartei a ideia porque eu senti que era muito “composicional” (“*composerly*”). Ao invés disso eu resolvi usar o discurso; é algo comum a todos e é uma fonte sonora magnífica. Possui um razoável espectro de frequências, ruídos, pausas e

inícios, diferentes níveis dinâmicos, formas complexas. É ideal para testar as características de ressonância de um espaço porque coloca tantas informações em tudo. É também extremamente pessoal (LUCIER; SIMON, 1980: 36, tradução nossa).

A articulação do espaço através do discurso, dos recursos da língua e não da linguagem, foi a essência dessa obra musical. Em retorno, o espaço dá sua impressão ao discurso, amalgamando ritmos e criando melodias, harmonias e texturas sonoras.

Entretanto, teria o compositor pensado no caráter arquitetônico de sua obra? Se por um momento considerarmos a sua técnica de recursividade da reverberação do ambiente, sem a tomarmos como um filtro da narrativa, não estaríamos presenciando a inserção de um espaço sonoro em outro? Como quando dispomos espelhos em posições opostas e observamos a sobreposição infinita do espaço em que nos encontramos, porém com um efeito contrário que é constantemente crescente?

2.5 O espaço acusmático

O advento da gravação sonora propiciou uma nova concepção de espaço na música. Esse espaço, criado por microfones e alto-falantes que captam som em uma determinada situação de um ambiente e o reproduzem em outra, alterou a condição tradicional da escuta musical. Essa transformação para a escuta acusmática²⁶, ou seja, sem a participação visual na percepção do som, se iniciou já com o uso do gramofone e do rádio. Posteriormente, com a música eletroacústica, essa condição foi expandida, pois a ruptura com o elemento causal do gesto musical na performance trouxe a necessidade de uma maior investigação do comportamento desse gesto no interior de uma paisagem sonora.

De acordo com Wishart (1996), com o advento da gravação de som surgiu a necessidade de uma redefinição do termo paisagem sonora (*sound landscape*), devido à questão da identificação da fonte sonora. Segundo o autor, o conceito de paisagem sonora anteriormente referia-se a percepção da fonte, como na audição de uma sinfonia ao vivo, onde a paisagem é a própria orquestra. Porém, o alto-falante é capaz de reproduzir qualquer fonte e não nos dá nenhuma informação além do som resultante da sua gravação. Ele afirma que:

Nós precisamos buscar uma redefinição do termo paisagem sonora. Se esse termo deve ter qualquer significância na música eletroacústica, nós temos que defini-lo como a fonte da qual nós *imaginamos* originar os sons. (WISHART, 1996: 134-136, tradução nossa).

Wishart ainda compara a audição de uma performance real de uma sinfonia em uma sala de concertos com outra reproduzida por alto-falantes, quando há uma mudança na percepção da paisagem. Esse transdutor nos permite a construção de um espaço acústico virtual, onde podemos projetar a imagem de qualquer espaço acústico existente. Por exemplo, imaginar uma sala de concertos ou mesmo um ambiente natural como uma floresta. Essa projeção, que evidencia a nossa capacidade de abstração do

²⁶ Originalmente o termo referia-se aos discípulos iniciantes de Pitágoras, que o ouviam por trás de uma cortina. Música acusmática refere-se a uma obra musical de concerto cuja performance se dá apenas por alto-falantes, sem a participação de intérpretes no palco.

espaço, mesmo numa condição de escuta por meio de um transdutor limitado, é apontada por Freire:

Foi também destacado o fato de que uma gravação, devido ao caráter ideal das obras musicais, pôde ser considerada uma concretização válida dessa obra. E se a captação puramente acústica de uma execução musical não alterou significativamente a fruição musical de obras tradicionais, isto se deve provavelmente a que a percepção dominante na situação é de outro tipo, mais ligada aos espaços 'internos' da música, por onde a audição pode se movimentar mesmo frente a uma execução e captação sonora estáticas (FREIRE, 2004: 50).

Dessa forma, a constituição de uma paisagem sonora depende da nossa imaginação quanto à percepção do objeto musical em seu interior. Para isso também utilizamos a memória do que captamos visualmente em uma performance. Auditivamente, reconstruímos o gesto musical esperado de uma frase melódica, entendemos a sua energia, direção e comportamento no ambiente. A relação entre causa e efeito e o desenrolar do objeto sonoro no tempo demonstram a sua interação com o espaço. A duração de sua ressonância pode inferir uma maior reverberação, como em um ambiente amplo e acusticamente vivo, ou um decaimento veloz, como normalmente acontece nos espaços externos. Entretanto, na música eletroacústica todos esses fatores podem ser amplificados e modificados, com a alteração de planos e hierarquias sonoras.

Outra importante questão na música acusmática é o distanciamento da fonte sonora, com a redução da expectativa do gesto instrumental. De acordo com Smalley:

A experiência da escuta de instrumentos musicais é um condicionamento cultural baseado em anos de treinamento audiovisual (...) Isso não pode ser ignorado e negado quando nos voltamos para a música eletroacústica. É particularmente importante no caso da música acusmática onde a origem e as causas da produção do som tornam-se remotas ou destacadas das fontes sonoras e de gestos físicos conhecidos e diretamente vivenciados (SMALLEY, 1997: 112, tradução nossa).

Smalley denomina *gestural surrogacy* ao processo de distanciamento progressivo entre o som e o gesto, que parte de um nível de reconhecimento imediato da fonte, como é o caso da voz, e segue progressivamente até uma substituição completa, sem vestígios do gesto original. Nesse caso a fonte e causa do som podem desaparecer ou se mostrar ambíguas ao ouvinte. O primeiro nível precede a atividade musical e refere-se a um gesto sonoro primal. Qualquer tipo de estruturação se enquadra em um segundo nível, como é o caso da música tradicional. Já os últimos níveis de substituição estão presentes na música acusmática e dependem da imaginação do ouvinte para perceber o seu comportamento dentro da paisagem sonora e compreender a sua morfologia. O interessante no espaço acusmático é o fato de que materiais sonoros de diferentes níveis de substituição podem coexistir (Idem).

Anteriormente, esse aspecto de estruturação sonora do espaço, o qual Wishart denomina *sonic architecture*, não fazia parte das ferramentas tradicionais de composição, tampouco era um elemento a ser controlado na performance musical. Esse autor advoga que a existência de um espaço acústico virtual fornece novas possibilidades de expressão ao compositor, que pode modificar elementos na representação do espaço e na percepção da paisagem sonora pelo ouvinte (WISHART, 1996: 136).

2ª Parte – Estudo de caso: o auditório da Escola de Música da UFMG

Este estudo de caso sobre o auditório da Escola de Música da UFMG teve como objetivo a realização de um diagnóstico acústico desse espaço e apoiou-se em duas diretrizes principais: a medição acústica da sala e sua simulação acústica digital. Para isso, contou com a análise do ambiente real, em diferentes pontos de emissão e recepção de som em seu interior; e com a criação de um modelo tridimensional virtual desse espaço, com a mesma disposição de fontes e receptores. Tanto a medição quanto a simulação forneceram dados que demonstram suas qualidades e particularidades acústicas e assim, ao contar com os dois cenários, foi possível comparar os resultados obtidos. Conseqüentemente, o advento de um modelo do auditório pode ser útil em futuros estudos de investigação e modificação dessa sala, caso se julgue necessário. A simulação é uma ferramenta útil para análise de alterações da geometria ou de materiais do ambiente, sem a necessidade de intervenção no espaço.

Ainda, as respostas ao impulso virtuais e reais obtidas nesses espaços podem ser utilizadas para a experimentação no âmbito da arte sonora. Conforme mencionado no fim da seção 2.4, a composição de Lucier é passível de ser percebida como uma virtualização do ambiente real. De certa forma, isso é similar a qualquer processo de gravação da performance musical em uma sala - a reprodução das características de um espaço no interior de outro. Porém, o ambiente final de *I Am Sitting in a Room* é análogo à criação de um somatório de diversos modelos do espaço, transfigurados pelo som.

A partir daqui, a pesquisa desdobra-se em uma nova perspectiva, com a intenção de gerar resultados pertinentes aos campos estético e técnico. Ela é consoante ao alcance da Sonologia, onde é praxe atentar-se aos mecanismos de construção no interior da composição musical, ao buscar entender a física e a matemática intrínsecas na criação do som. Conforme já mencionado na Introdução, o intuito foi compreender um pouco da Acústica no âmbito da Engenharia, a partir de uma visão da Música, ou da interseção da Música com a Arquitetura, pertinentes ao objeto do estudo de caso.

3. Métodos para previsão e avaliação acústica de salas

A reprodução sonora no interior dos espaços dedicados à performance musical é uma questão intrigante, pois é necessário prever uma infinidade de conformações acústicas. É preciso distribuir a clareza sonora em diversas posições na audiência, muitas vezes abarcar conformações que apresentam potências sonoras distintas e, sobretudo, lidar com necessidades variáveis quanto ao tempo de reverberação. Conforme mencionado nas seções 1.4 e 1.5, as orquestrações e estilos musicais de diferentes períodos funcionam com maior eficácia em tempos de reverberação específicos.

A readequação desses espaços devido a patologias sonoras tampouco é uma tarefa incomum no campo da acústica. Diversos métodos de medição da resposta do ambiente são usualmente empregados para diagnosticar e corrigir situações acústicas inesperadas em espaços já construídos. Foi o caso do Royal Albert Hall, em Londres, que apresentou problemas devido à conformação de sua cobertura. A sua forma de cúpula causava atrasos entre o trajeto direto do som e a sua reflexão a partir da cobertura, em pontos focais da audiência na plateia inferior, na ordem de 1/6 segundos. Foi necessário quebrar esses percursos com o uso de refletores (CREMER; MÜLLER, 2016: 73).

Os métodos mais antigos para a previsão da acústica de salas utilizavam a diagramação de raios sonoros baseados em regras de reflexão especular nas superfícies do ambiente. Essa técnica de diagramação, sobre uma representação bidimensional de um espaço em planta ou corte (seção), proporcionava uma descrição geométrica simples para o estudo das reflexões no seu interior. Uma variação dessa técnica, com a substituição da reflexão de um raio sonoro em um plano interno por uma imagem da fonte, espelhada a partir do ângulo de incidência e com a mesma distância do seu trajeto até esse plano, permitia estimar o comportamento de reflexões de 2ª e 3ª ordem, os atrasos de tempo entre um ponto e outro e a energia resultante do raio sonoro (Idem: 32, 189). A diagramação de raios e a imagem da fonte, ou método das fontes virtuais, são os mesmos métodos utilizados na simulação acústica computacional, que será abordada na seção 3.2.

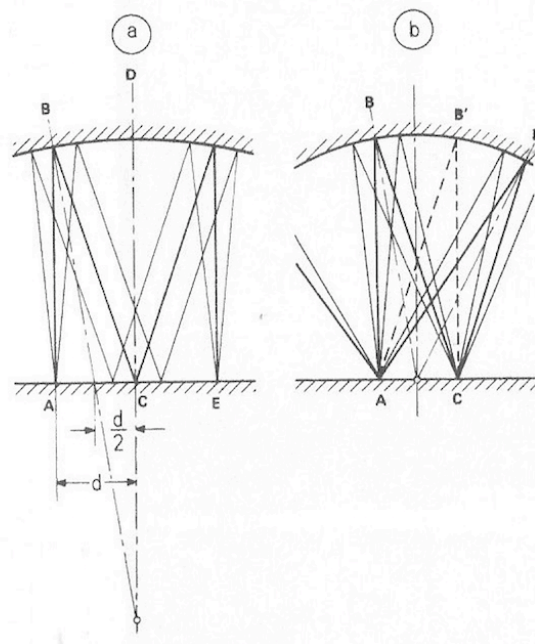


Figura 29 - Diagramação em traçado de raios em ambientes com teto curvo. Em (a) $r = 2h$; (b) $r = h$ / $r =$ raio de curvatura do teto; $h =$ altura (CREMER; MÜLLER, 2016: 84).

A figura 29 mostra a diagramação de raios em dois ambientes com tetos curvos. A concentração dos raios se dá em diferentes pontos, dependendo do raio de curvatura do teto. Em (a), partindo do Ponto A, um raio sonoro percorre 8 vezes o trajeto entre piso e teto até retornar ao ponto inicial, causando o *flutter echo*. Em (b) os raios sonoros partem do ponto A e se concentram em C, após a primeira reflexão em B. Porém, nem todos os sons refletidos em C retornam ao ponto A, somente aqueles refletidos perpendicularmente em C, a partir de B (linha tracejada). Mesmo assim, os que retornam tendem a se perder nas reflexões subsequentes. Em (b), o *flutter echo* ocorre somente com fonte e receptor localizados no centro (Idem: 85)

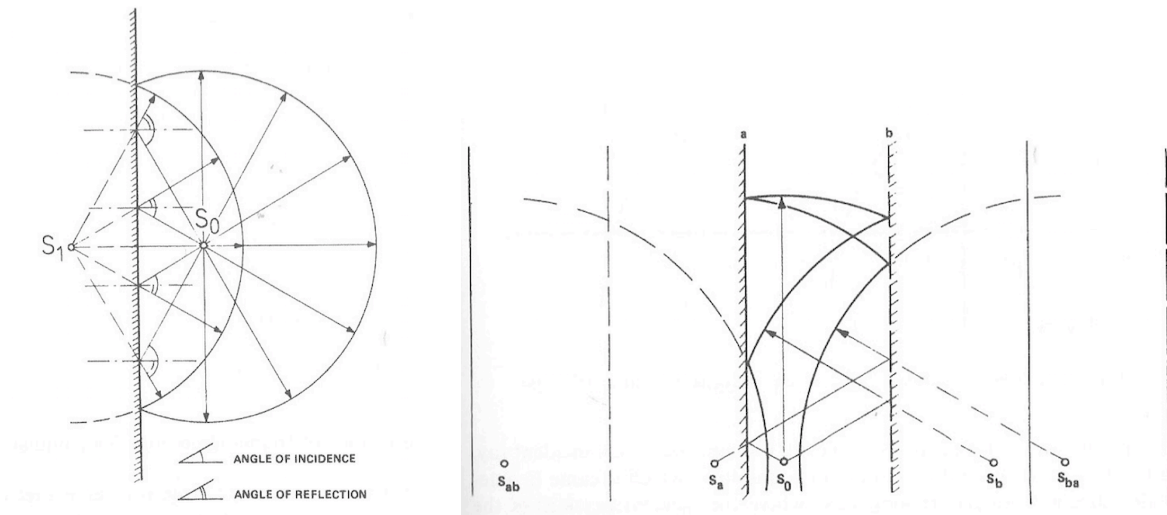


Figura 30 - Imagem da reflexão sonora em uma superfície plana (à esq.) e imagens de fonte sonora a partir de fontes virtuais em duas superfícies reflexivas planas e paralelas - imagens de reflexão até a segunda ordem (ex. S_{ba}) (Idem: 27,29).

A principal diferença entre a diagramação de raios e a imagem da fonte é que a primeira traça somente os vetores até o receptor em questão. Já na segunda, para cada reflexão é gerada uma fonte virtual, que emite raios sonoros em todas as direções, conforme a figura 30. Esses raios independem da posição do receptor. Assim, os vetores que partem da imagem da fonte podem atingir outros receptores, então é preciso definir quais fontes são visíveis para um determinado receptor. Por esse motivo, estimar reflexões de ordens avançadas era um trabalho que consumia bastante tempo.

Dessa forma, uma estimativa geral da qualidade acústica do ambiente a partir dessa técnica, para todos lugares em uma sala, era praticamente impossível. Nos últimos anos da década de 1890, W.C. Sabine foi pioneiro ao reconhecer e provar que a reverberação era uma variável importante e apropriada para caracterizar a acústica de um ambiente como um todo. Sabine utilizava tubos de órgão para a geração de sinais e um cronômetro para medir a duração do som no ambiente, “de ouvido”. Em seu método ele constatou que, em geral, a reverberação era a mesma em toda a sala e que a inclusão de uma maior quantidade de tubos na medição não aumentava linearmente a duração do tempo de reverberação. Assim, o aumento da quantidade de fontes sonoras de 2 para 4 tubos (com a mesma pressão sonora), proporcionava a mesma variação do tempo de reverberação ao se passar de 1 para 2 tubos. O decaimento obedecia uma relação exponencial de energia (CREMER; MÜLLER, 2016: 189-190).

A equação de Sabine para o Tempo de Reverberação, a seguir, depende do volume e da área de absorção totais do ambiente. Ele é mensurado a partir da interrupção do som da fonte até um decaimento de 1/1000 do som original, o equivalente a 60 dB. Ao contrário da geometria acústica, a técnica de Sabine é baseada em um método estatístico, utilizando dados empíricos de absorção dos materiais, sem considerar a forma em que estão distribuídas as áreas de absorção e reflexão do ambiente. Vale observar que a aplicação inversa da equação pode ser utilizada para o cálculo de coeficientes de absorção de materiais em uma mesma sala, a partir da diferença dos tempos de reverberação (Idem: 208).

$$RT_{60} = 0,163 \frac{V}{Sa}$$

Onde:

V = volume da sala em m³;

S = área total das superfícies na sala em m²;

a = média dos coeficientes de absorção das superfícies no ambiente.

RT60 = tempo de reverberação em segundos.

3.1 Histórico da simulação acústica

Devido à complexidade envolvida na previsão do comportamento sonoro de salas, paralelamente às técnicas geométricas e o método de Sabine, viu-se a necessidade da criação de modelos escalares dos ambientes para o estudo de sua acústica. Esses modelos procuravam comparar a propagação de ondas sonoras com as da superfícies da água ou aos raios de luz para o estudo da acústica de salas. Os primeiros modelos que utilizavam superfícies de água datam de meados do séc. XIX. A sua vantagem é a velocidade de propagação da onda, que é reduzida em 1/1000 em comparação com a onda sonora. Posteriormente, em 1912, Sabine foi o primeiro a utilizar as fotografias *Schlieren* para testes da acústica de salas. Em um modelo ainda bidimensional, em escala reduzida, essa técnica permitia registrar os efeitos das ondas sonoras causadas por um impulso de choque elétrico (*spark*), em direção perpendicular aos raios de luz (CREMER; MÜLLER, 2016: 171,175). Segue abaixo a comparação entre esses dois modelos:

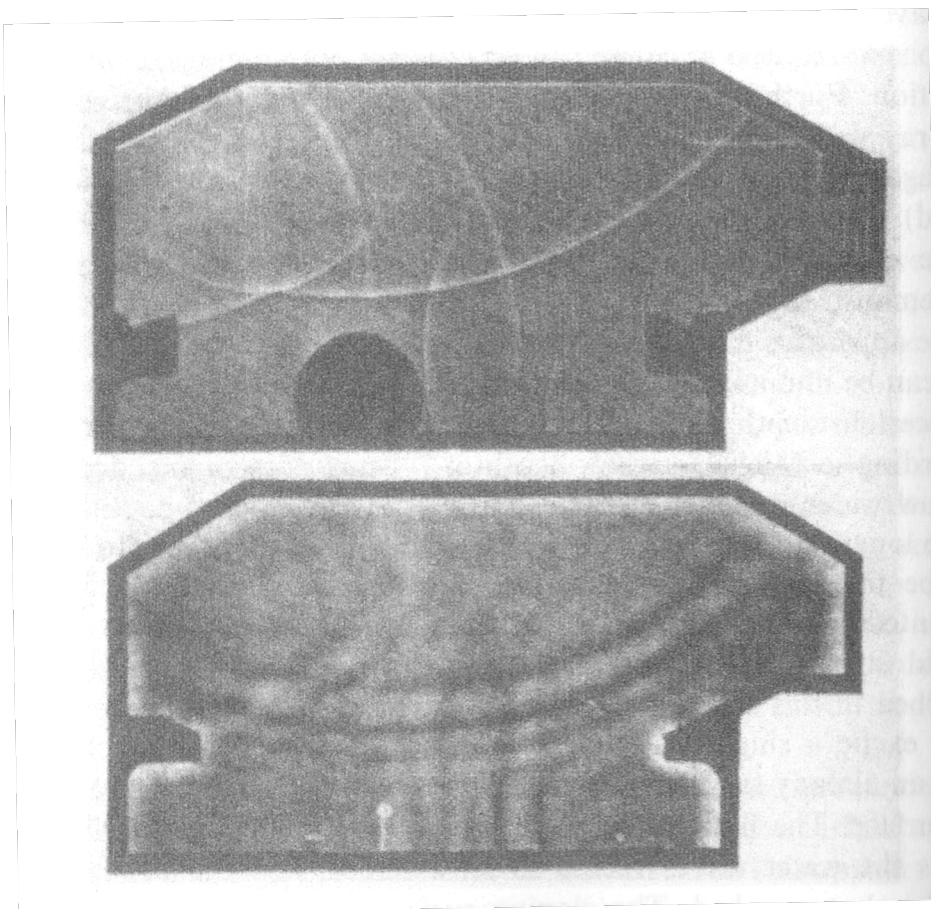


Figura 31 – Comparação entre fotografias de dois modelos de uma mesma sala, no mesmo instante. Acima: fotografia *Schlieren*; abaixo: modelo de superfície de água (*water-wave model*) (Idem: 172).

A analogia entre o comportamento de raios sonoros e de raios de luz também foi empregada em modelos tridimensionais para a observação do comportamento geométrico do som. Através do posicionamento das fontes luminosas em locais de emissão sonora no interior do modelo e do emprego de materiais reflexivos ou opacos, de acordo com a característica de absorção sonora do material, era possível observar o traçado das reflexões sonoras de primeira ordem. Entretanto, apesar de ser utilizada até hoje e de ser uma técnica convincente, ela não traz novidades à previsão acústica proporcionada pelo traçado geométrico bidimensional no desenho em planta.

Em 1929, Friedrich Spandöck e sua equipe desenvolveram estudos acústicos a partir da maquete de uma sala, construída na escala 1:10. Amostras de música e da fala eram reproduzidas no interior desse modelo após uma modificação em sua escala de frequências. Então o som era gravado e o sinal era transferido à escala real para uma nova reprodução, já com a influência do modelo nessas amostras (VORLÄNDER, 2007: 106). Apesar das limitações dos equipamentos da época, os experimentos podem ser considerados como as primeiras simulações aurais da acústica de salas. A técnica ainda sofreria modificações até 1949, quando Spandöck apresentou um sistema que empregava o uso de fitas magnéticas a diferentes velocidades, proporcionais à escala do modelo. Por exemplo, para um modelo em escala 1:10, uma variação de frequências de 100 a 5000 Hz na sala real corresponderia a uma variação de 1 a 50 kHz no modelo, alcançando uma região ultrassônica (KUTTRUFF, 2009: 317). O pedido de patente de seu método é de 1959 (publicado em 1964) e foi intitulado *Method and apparatus for determining acoustic effects*²⁷, na qual é inclusive demonstrada uma técnica para o controle da umidade relativa do ar nas simulações. É interessante a sua justificativa para a criação de um modelo reduzido do ambiente:

(...) “Ademais, características acústicas usadas em métodos convencionais como, por exemplo, tempo de reverberação, definição, ou difração da energia sonora são conceitos demasiado difíceis que se mostram frequentemente incompreensíveis para arquitetos, músicos e até mesmo experts. Em particular, nem mesmo os experts concordam sobre a melhor combinação desses fatores determinantes para uma ótima qualidade acústica de uma estrutura particular. Seria muito mais

²⁷ <<https://www.google.com/patents/US3139151>>. Acesso em 11 jul. 2017.

fácil se o padrão sonoro pudesse ser julgado diretamente pelo ouvido humano. É, dessa forma, um objeto da presente invenção fornecer um método aprimorado e os aparatos necessários para determinar os efeitos acústicos de uma sala antes da sua construção” (SPANDÖCK, 1964, tradução nossa).

O conceito de Spandöck não parece tão distante da escuta reduzida e do aparato de Pierre Schaeffer, apesar de suas perspectivas distintas em relação ao som:

“Conclusão: as nossas regras do solfejo, relativas ao valor das notas, não se aplicam senão numa zona privilegiada dos sons sustentados e homogêneos. Os elementos da forma [ou seja, perfil dinâmico] ou de informação perturbam consideravelmente os seus valores métricos. Assim, será um erro confiarmos no cronômetro ou no duplo-decímetro, e a existência de um esquema ou de um plano não assegura que se trate de uma partitura científica. Se existe uma máquina de calcular para calibrar música, nós já possuímos uma, prodigiosa, portátil, econômica: senhoras e senhores, é o nosso ouvido” (SCHAEFFER; REIBEL, 1966: 24, tradução de Dias).

Os modelos em maquetes ainda são métodos relevantes de previsão acústica e, naturalmente, a tecnologia de produção e captação sonora no interior desses modelos se desenvolveu. Hoje são utilizados transdutores eletrostáticos e piezo-eletrônicos para a geração de impulsos através de pequenos choques elétricos (*spark gaps*) e microfones condensadores compactos para uma captação mais precisa, como na figura 32. Entretanto, o desenvolvimento da tecnologia digital forneceu mecanismos ainda mais econômicos, rápidos e eficientes do que os modelos anteriores de simulação acústica. Através de programas computacionais, é possível antecipar o comportamento acústico de uma sala a partir do seu modelo arquitetônico digital, desenvolvido na plataforma CAD (*computer aided design*).

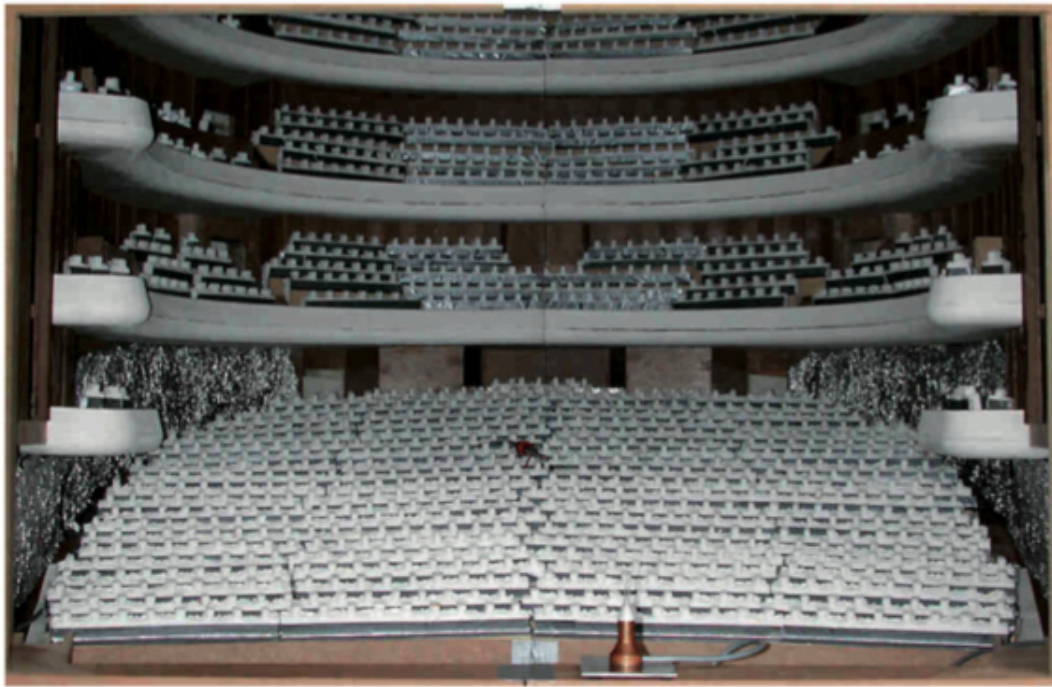


Figura 32 - Modelo de uma sala de ópera na escala 1:20. Fonte *spark gap* (RINDEL, 2011a: 268).

3.1.1 Simulação acústica digital

A modelagem computacional para a acústica de salas foi introduzida em 1962 por Schroeder e sua equipe e foi colocada em prática a partir de 1968 por Krokstad et al. Esses autores foram os primeiros a avaliar parâmetros acústicos de salas a partir de respostas ao impulso obtidas com o uso de técnicas de traçado de raios digital (KUTTRUFF, 2009: 318).

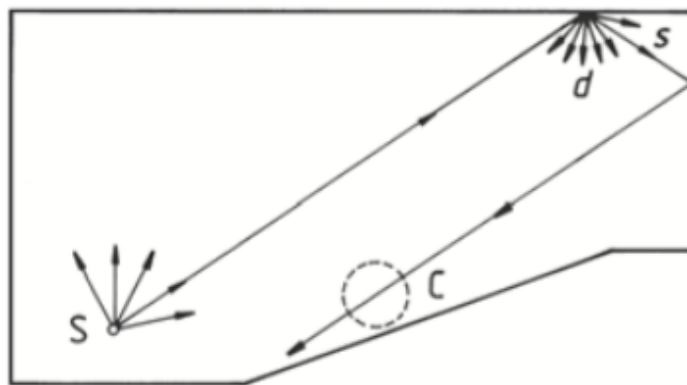


Figura 33 - Traçado de raios digital (*ray tracing*) - S= fonte Sonora; C= ponto de contagem dos raios; d = reflexão difusa; e s = reflexão especular (Idem: 319).

Em resumo, os algoritmos desses softwares utilizam traçados geométricos para a descrição do campo sonoro, que é reduzido a fatores como energia, tempo decorrido e direção da chegada de cada raio ao receptor (fig. 33). Porém, o método de traçado de raios não leva em conta todos os fenômenos de onda do som, desconsiderando, por exemplo, a difração em seus cálculos. Sendo assim, ainda são utilizados modelos físicos de salas para a identificação de problemas acústicos como ecos e pontos críticos, sobretudo em projetos acústicos mais vultosos (Idem: 318-319).

As ferramentas de auralização foram incorporadas aos *softwares* de simulação somente nos anos 1990, graças ao aumento da capacidade de processamento dos computadores comerciais. O termo denominado auralização é análogo à visualização, sendo, no entanto, voltada para o âmbito sonoro. Denota uma técnica para a criação de impressões auditivas de ambientes virtuais, sejam eles modelos físicos ou digitais. Em um sentido mais amplo, mesmo a medição de um ambiente real pode ser incluída na técnica, visto que a recriação da resposta sonora da sala se dará em um outro

espaço. A auralização envolve a convolução de amostras sonoras, preferencialmente anecoicas, com respostas ao impulsos medidas ou simuladas. Além disso, é necessário que o produto da simulação seja um sinal binaural, para não comprometer a impressão espacial do ambiente (Idem: 318,327).

3.2 Ferramentas para a simulação acústica

3.2.1 Geometria acústica digital

Os softwares de simulação geralmente utilizam dois métodos de traçado geométrico para a previsão acústica: o método das fontes virtuais (*image source*) e o traçado de raios (*ray tracing*). Nesses casos, o som é reduzido a linhas vetorizadas ou partículas que se distribuem no ambiente virtual na velocidade do som, sofrendo um decaimento de energia devido às reflexões no seu interior. Conforme mencionado, a desvantagem desses métodos é simplificar o fenômeno de onda sonora, que inclui difrações e interferências não previstas pelos raios. Ainda, a técnica é mais eficiente ao simular reflexões especulares, alcançando somente uma aproximação dos efeitos de espalhamento (*scattering*) para reflexões difusas. Apesar de ser uma simplificação do campo sonoro real, o traçado geométrico fornece resultados confiáveis em ambientes cujas dimensões são grandes em comparação ao comprimento das ondas sonoras (VORLANDER, 2007: 213). Ademais, é necessário considerar que os algoritmos de geometria acústica não incluem informações de fase, então os resultados podem ser considerados válidos a partir da Frequência de Schroeder:

$$F_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}$$

Onde:

T é o tempo de reverberação em segundos;

V é o volume da sala em m³;

Dessa forma, abaixo dessa frequência os modos da sala são proeminentes e isolados, ocorrendo sem superposição com modos vizinhos dentro da mesma faixa de frequências, e não podem ser previstos com acurácia na simulação acústica (RINDEL; CHRISTENSEN; KOUTSOURIS, 2013: 4). Ou seja, devido à ordem de grandeza dos comprimentos de onda, haverá uma concentração dos picos de pressão sonora em pontos específicos do ambiente, em determinadas frequências.

Os métodos geométricos digitais são análogos à diagramação de raios e à determinação de fontes virtuais, anteriormente utilizadas, porém o uso do computador proporcionou a construção das inúmeras partículas sonoras e imagens de fontes virtuais necessárias para uma análise mais detalhada do comportamento sonoro na sala. Ambos os métodos contam com uma complexa fundamentação físico-matemática, e alta complexidade de implementação computacional (KUTTRUFF, 2009:322 e VORLANDER, 2007: 164,166); trataremos, assim, apenas dos aspectos fundamentais para uma compreensão básica de cada método que, na prática, são associados para uma maior eficiência de processamento.

a) simulação de fontes virtuais

Se considerarmos apenas reflexões especulares no interior de um ambiente, a trajetória completa dos raios sonoros pode ser identificada do ponto de recepção à fonte sonora, através de imagens virtuais dessa fonte. As fontes virtuais são imagens da fonte sonora original, espelhadas a partir das superfícies do ambiente. Esse primeiro espelhamento define uma reflexão de primeira ordem. Em seguida, cada imagem virtual é espelhada novamente em outras superfícies, gerando imagens virtuais de segunda ordem, e assim por diante. Depois da criação das fontes virtuais, parte-se para o denominado “teste de audibilidade”, que verifica a efetividade de uma imagem construída para determinado receptor (VORLANDER, 2007: 201-202).

A indexação da fonte virtual indica dois números, referentes às superfícies de espelhamento para construção daquela fonte. No exemplo abaixo, as imagens de fontes S_1 e S_{12} são audíveis pelo receptor R. Já a S_{21} não é, pois o ponto de reflexão P está fora da poligonal criada pelas paredes 1 e 2. É um método preciso, porém de alto gasto computacional, pois, dentro de um modelo, a maior parte das imagens das reflexões de ordem avançada não atingirão o receptor, se mostrando “inaudíveis”.

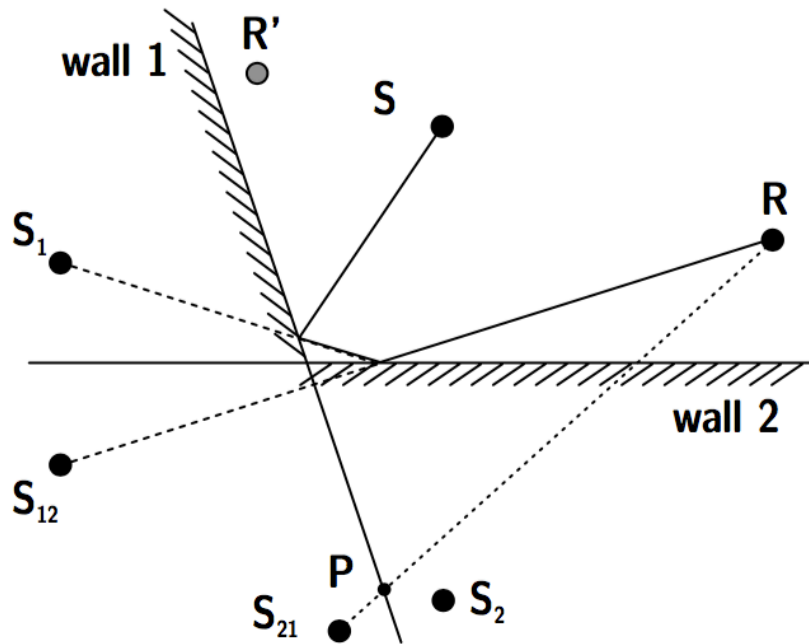


Figura 34 – Teste de audibilidade das fontes virtuais. S – fonte; R- Receptor (VORLANDER, 2007: 202).

No meio digital, a obtenção da resposta ao impulso por meio do método das fontes virtuais é um somatório da energia resultante de cada fonte “audível”, considerando coeficientes de reflexão e sua distância do receptor. No caso de existirem coeficientes de absorção diferentes para cada banda de frequência, é necessário repetir a operação para cada uma delas. Após a identificação das imagens virtuais audíveis, pode-se calcular a contribuição de cada imagem virtual à resposta ao impulso, de acordo com a equação (KUTTRUFF, 2009: 324):

$$E = \frac{E_0}{4\pi c d_{m_1 m_2 \dots m_i}^2} \cdot \rho_{m_1} \rho_{m_2} \dots \rho_{m_i} \delta \left(t - \frac{d_{m_1 m_2 \dots m_i}}{c} \right)$$

Onde:

E_0 – Energia total emitida a partir da fonte original;

m_1, m_2, m_i – superfícies de reflexão envolvidas no caminho sonoro;

ρ - coeficientes de reflexão das superfícies de reflexão;

d – distância do receptor até a imagem sonora considerada em metros;

c - velocidade do som em metros por segundo.

A contribuição de cada fonte virtual para a resposta ao impulso global (em cada faixa de frequência pré-definida), é representada por uma função Delta de Dirac δ , considerando seu tempo de chegada ao receptor (razão entre a distância de cada ponto da imagem específica e a velocidade do som), e os coeficientes de absorção envolvidos em cada traçado a partir das imagens de fonte (fig. 35). Pressupõe-se uma fonte sonora omnidirecional. Dessa forma, é possível obter os resultados para parâmetros acústicos de forma similar a de uma medição das curvas de decaimento, todavia considerando-se o perfil energético. Para a auralização, é mais útil utilizar uma resposta ao impulso ligada à pressão sonora, e as transformações requeridas são detalhadas por Kuttruff (2009: 325).

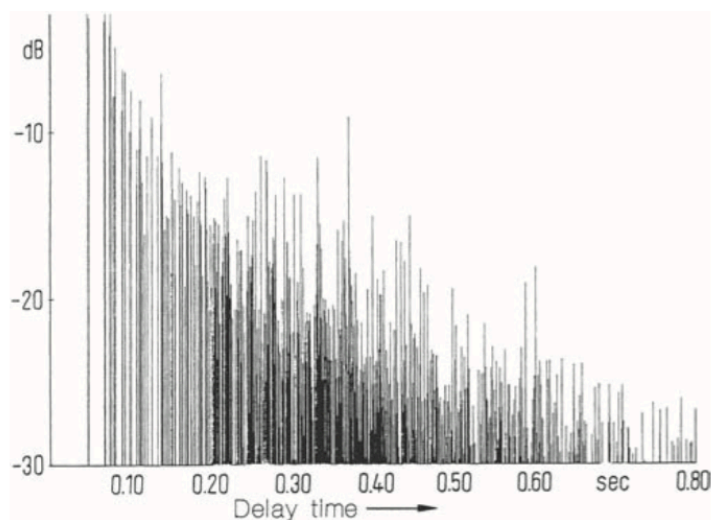


Figura 35 – Resposta ao impulso de uma sala, computada através do método das fontes virtuais (*image source*) (KUTTRUFF, 2009: 324)²⁸.

²⁸ Eixo das ordenadas: Energia (dB).

b) traçado de raios

O método do traçado de raios funciona de forma parecida. Entretanto, não são criadas imagens para cada reflexão. A partir da posição da fonte dentro do modelo digital, uma grande quantidade de raios é lançada em todas as direções e seguem um caminho contínuo até alcançar o tempo de execução do algoritmo. As reflexões de cada partícula sonora podem ser especulares ou difusas. Os coeficientes de absorção das superfícies internas reduzem progressivamente a energia do raio com um fator $1 - \alpha$. (α é o coeficiente de absorção da superfície de reflexão), ou pode-se aplicar uma função de probabilidade de reflexão.

Somente os raios que chegam ao receptor são utilizados no cálculo, por meio da contabilização de sua energia no momento da chegada ao ponto de recepção, através de um histograma, como o da figura abaixo:

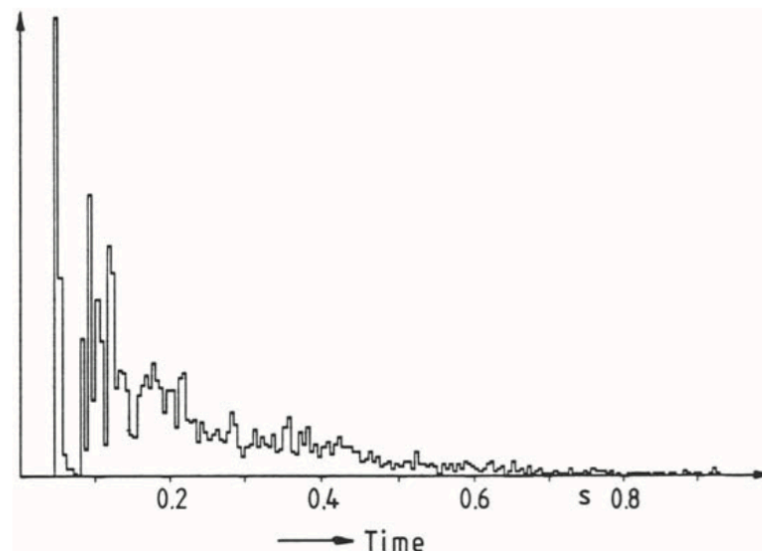


Figura 36 - Distribuição temporal da energia das partículas que atingem o receptor no método *ray tracing* - resposta ao impulso energética com intervalo de 5 ms para a média (KUTTRUFF, 2009: 320)²⁹.

²⁹ Eixo das ordenadas: Energia.

O histograma pode ser considerado como uma curta resposta ao impulso a partir da sua média energética. O cálculo dessa média é crítico para o resultado buscado. Assim, um intervalo muito longo para o cálculo dessa média eliminaria detalhes importantes da resposta da sala, enquanto um intervalo muito curto traria flutuações aleatórias. O intervalo ideal está entre 5 e 10 ms (Idem: 320).

Um fator interessante desse método é que ele considera que a partícula pode ser refletida de forma especular ou difusa. Na primeira, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. No caso do software que utilizamos para a simulação - Odeon³⁰, é utilizada para as reflexões difusas uma média entre as geometrias de uma reflexão especular e de uma aleatória, para cada raio que incide sobre a superfície em questão. Desse modo, quanto menor o coeficiente de espalhamento do material, mais o traçado se aproxima de uma reflexão especular. Esse artifício de inclusão do fenômeno de espalhamento sonoro no algoritmo desse software é denominado *vector based scattering*. A figura 37 mostra a reflexão resultante de um raio sonoro para uma superfície cujo o coeficiente de espalhamento é 0,5. Como o coeficiente varia de 0 a 1, a média é de 50% entre as reflexões especular e aleatória (CHRISTENSEN; KOUTSOURIS, 2013: 76,77).

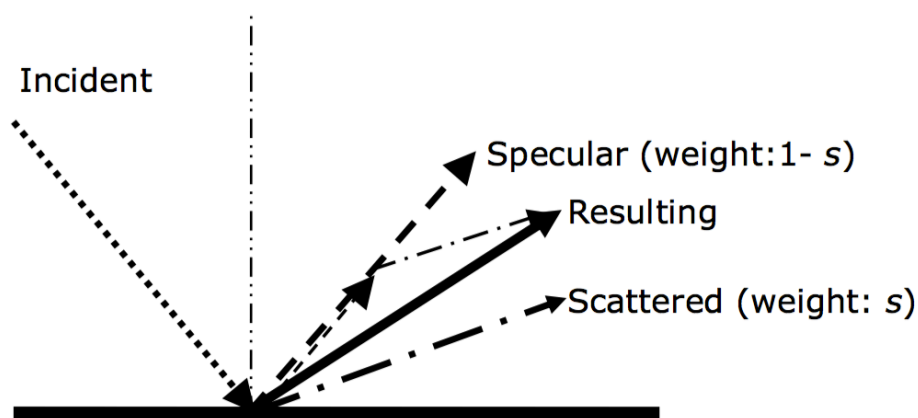


Figura 37 - *Vector Based Scattering* - média resultante entre a reflexão especular e aleatória (*scattered*) de um raio sonoro, incidente em um superfície com um coeficiente de espalhamento de 0,5 (50%). Onde s = coeficiente de espalhamento (Idem).

³⁰ <http://www.odeon.dk>. Acesso em 12 jul. 2017.

Devido ao fato de o método de traçado de raios considerar reflexões difusas e o de fontes virtuais fornecerem uma impressão mais fidedigna da resposta ao impulso, foram criadas alternativas híbridas desses dois métodos. Principalmente porque o método de fontes virtuais não apresenta bons resultados em modelos com geometrias de maior complexidade, o que por outro lado não é um problema para o traçado de raios (BORISH, 1984).

A união dos dois métodos pode utilizar o traçado de raios no primeiro momento da simulação para definir as reflexões “audíveis” pelo receptor e criar fontes virtuais somente para esses casos, proporcionando maior eficiência computacional, como é o caso do software Odeon, utilizado nesta pesquisa.

3.2.2 Auralização

A auralização é a transformação desses resultados gerados no ambiente virtual para uma resposta audível, posteriormente empregada como filtro em amostras sonoras, preferencialmente anecoicas. Com isso, tem-se a percepção de como essas amostras iriam soar no interior do ambiente.

Para fins de auralização é utilizada a resposta ao impulso relativa à pressão sonora, como mencionado anteriormente. É necessário ainda criar uma fase para o sinal, que não foi considerada na geometria acústica. Como não é possível prever as inversões de fase sofridas pelo raio em seu trajeto, há uma aproximação das características de fase, através métodos aleatórios, funções ímpares ou de fases mínimas (KUTTRUFF, 2009: 328).

Nem todos os softwares de simulação incluem essa opção, pois os cálculos dos parâmetros independem da geração de uma resposta ao impulso ligada à pressão sonora no ambiente virtual. Naqueles que utilizam essa ferramenta, além da aproximação de fase, a resposta ao impulso conta com algum tipo de filtragem. Utiliza-se o HTRF, para respostas binaurais, ou o Ambisonics, para respostas multicanal (fig. 38). O HTRF (*Head Related Transfer Function*) considera a diferença de fase entre os ouvidos, a filtragem do canal auditivo, a forma e a densidade geral da cabeça e do torso, entre outros fatores. Portanto, para os cálculos no modelo, as fontes e receptores são

omnidirecionais³¹, consoante ao disposto nas normas para a medição. Uma resposta ao impulso binaural da sala (BRIR) acontece à posteriori.

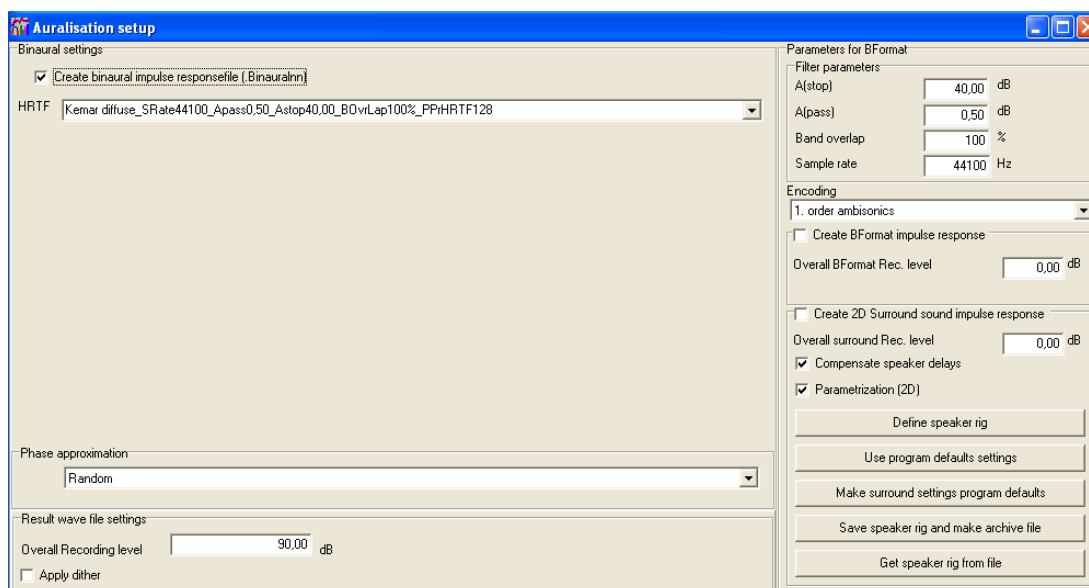


Figura 38 – Setup de auralização do ODEON (versão 7.0). Ajuste para criação de resposta ao impulso binaural, com aproximação de fase pelo método aleatório e filtro HRTF da resposta da Kemar *dummy head*³²

3.2.3 Resposta ao impulso - convolução

Conforme mencionado várias vezes no texto, utiliza-se a convolução em etapas da medição e da simulação acústicas e, principalmente, na auralização. Dessa forma, merece uma descrição sucinta, apesar de ser um assunto frequente na Engenharia. Esta operação está intimamente ligada à resposta ao impulso de um sistema, que é também a função utilizada na maioria dos cálculos de parâmetros acústicos de ambientes, como será visto na seção 5.1.

A convolução é uma função matemática ligada ao comportamento de sistemas lineares invariantes no tempo. Sinais senoidais que passam por um sistema linear podem sofrer alterações apenas em sua amplitude e fase. O mesmo se aplica a combinações desses sinais. As características dos sistemas lineares podem ser medidas a partir de um impulso de entrada, que idealmente representa todo o espectro de frequências (na acústica, um disparo de festim dentro de uma sala segue o mesmo

³¹ Em alguns softwares é possível gerar padrões polares diferentes para as fontes virtuais. Elas podem ser semi-direcionais ou mesmo representar características da voz humana, instrumentos musicais ou caixas acústicas.

³² <http://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html>. Acesso em 12 jul. 2017.

princípio). Ao sinal de saída assim obtido denomina-se resposta ao impulso, capaz de expressar todas as transformações de amplitude e fase do sistema. A operação de convolução permite aplicar essas características a qualquer sinal de entrada. Por exemplo, a convolução de um som anecoico com a resposta ao impulso de uma sala simula o comportamento desse som naquele ambiente.

Essa ideia pode ser explicada pela representação digitalizada do som. Na sua conversão, a onda sonora é transformada em amostras cuja quantidade depende da sua frequência de amostragem. No domínio do tempo, a passagem da onda contínua para um modo discreto possibilita ao sistema entender a onda como uma sequência de impulsos de amplitudes variáveis. Assim, o sistema empregará a sua resposta a cada um deles. O sinal de saída é uma soma dessas respostas, denominada soma de convolução (*convolution sum*) (TEMPELAARS: 1996:183-187).

Essa operação é calculada por uma somatório a partir da posição no tempo (k) da amostra analisada pelo sistema, segundo a fórmula (Idem):

$$y(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n).h(k - n)$$

De acordo com a figura 39, temos o impulso (função Dirac), a resposta ao impulso $h(k)$ e o sinal de entrada $x(k)$. À esquerda, o sinal está dividido em várias amostras e, na parte da direita, está o sinal resultante, a resposta, para cada impulso. As amplitudes finais das amostras do sinal de saída $y(k)$ são a soma das amplitudes das amostras de cada sinal resultante.

O indexador da função h sempre segue a distância entre a amostra de entrada e de saída. Então, para o sinal de saída na posição $k=1$, seguindo os dados da figura, temos:

$$y(1) = x(-2).h(1 - (-2)) + x(-1).h(1 - (-1)) + x(0).h(1 - 0) + x(1).h(1 - 1) + x(2).h(1 - 2)$$

$$y(1) = 3,0 \cdot 0,125 + 1,0 \cdot 0,25 + 2,0 \cdot 0,5 + 1,5 \cdot 1,0 + 1,0 \cdot 0,0 = 3,125$$

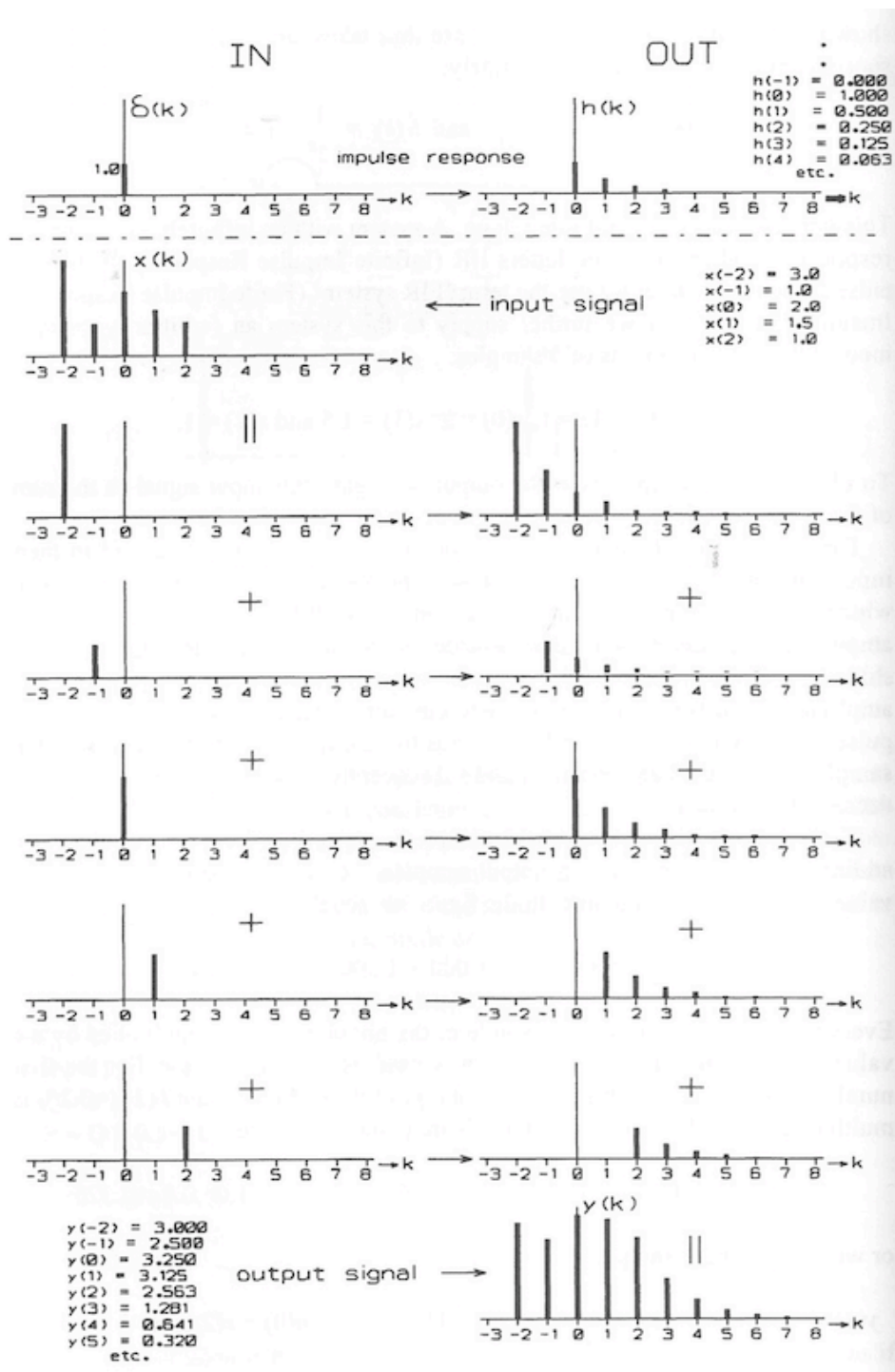


Figura 39 – Convolução no domínio do tempo (TEMPELAARS, 1996: 186)³³

³³ Conforme já explicado na nota 15: A maior parte das referências e todos os softwares utilizados neste trabalho utilizam o ponto, ao invés da vírgula, como divisor decimal. Dessa forma, os dados da literatura e os resultados dos cálculos acústicos apresentados na dissertação seguem o mesmo padrão.

A notação curta da expressão da soma da convolução, no domínio do tempo é:

$$y(k) = x(k) * h(k)$$

A convolução também pode ser descrita no domínio das frequências, a partir das variações de amplitude (*amplitude response*) e de fase (*phase response*), causadas pela resposta ao impulso em cada componente senoidal do sinal de entrada (Idem: 189-190).

A notação curta da convolução no domínio da frequência é a multiplicação dos espectros do sinal de entrada e da resposta do sistema:

$$Y(f) = X(f).H(f)$$

onde: $H(f)$ é a resposta em frequência do sistema.

Na figura 40, a função $H(f)$ está representada no quadro 1. O gráfico “a” representa a resposta em amplitude do sistema e o “b” sua resposta em fase. No quadro 2, há um diagrama com a construção do sinal de saída do sistema, “h”, a partir do sinal de entrada “c”, no domínio do tempo. O sinal de entrada é dividido em componentes senoidais harmônicas (“d”). Em “e”, estão representadas essas componentes após a alteração individual de amplitude e fase causadas pelo sistema. Em “f” há uma maior alteração de fase do que amplitude nessa componente. Já em “g”, acontece o oposto, a componente tem uma maior variação de amplitude. Essas alterações são condizentes com os gráficos do quadro 1. Daí, as respostas de cada componente senoidal são somadas para se obter o sinal de saída completo “h” (Idem).

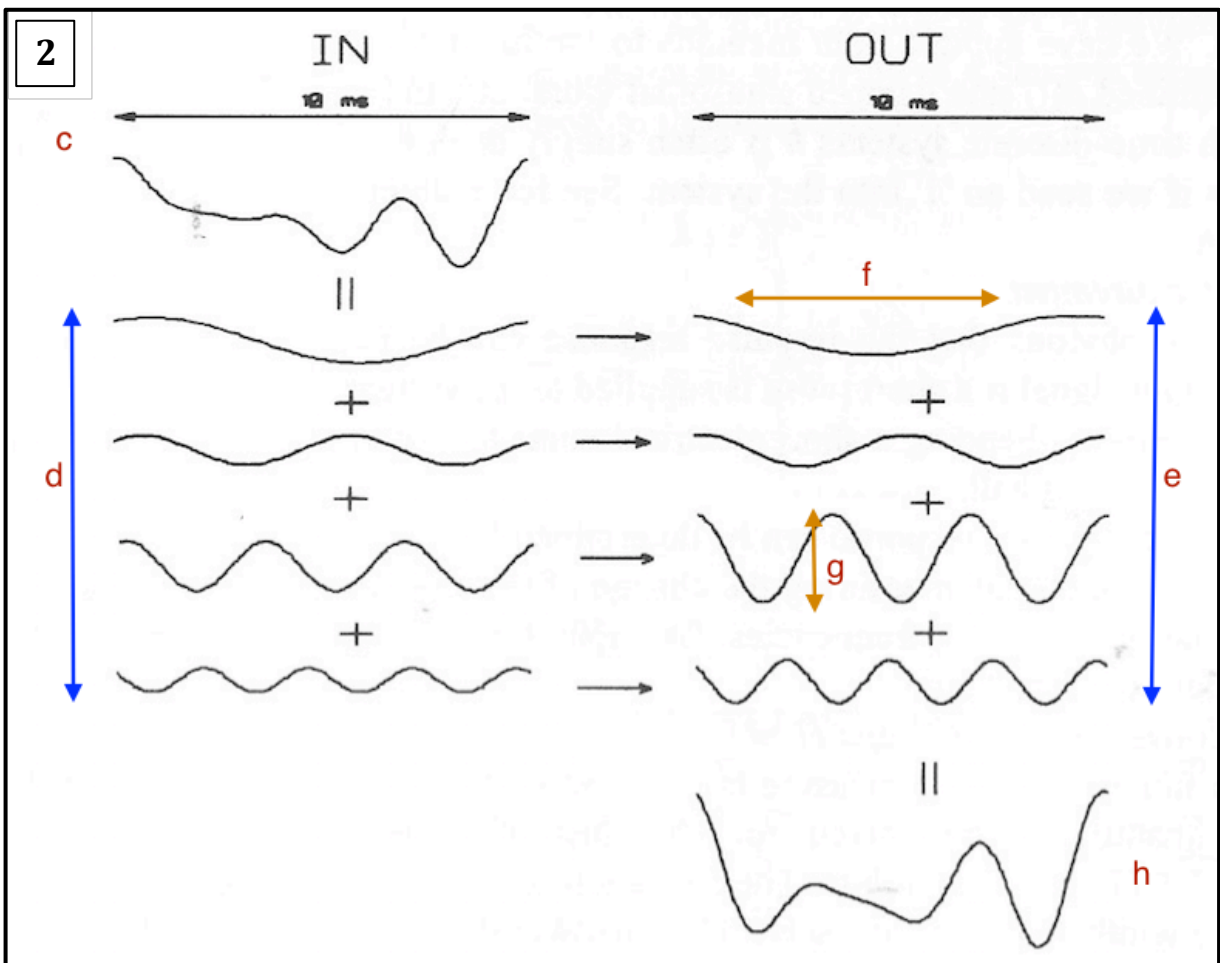
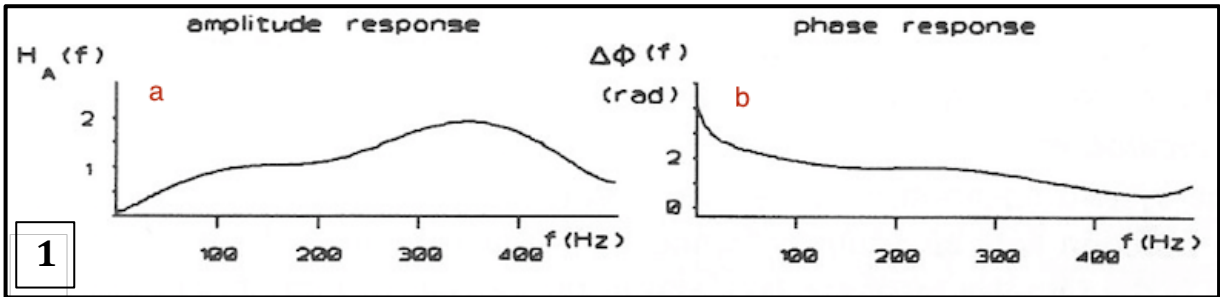


Figura 40 - 1 - Resposta em frequência do sistema. 2 - Construção do sinal de saída através da resposta em frequência do sistema (Idem: 189).

4. A simulação acústica do auditório da Escola de Música

A Escola de Música no campus da UFMG foi inaugurada em 1997. Desde então, seu auditório é amplamente utilizado pela comunidade docente e discente da Escola de Música durante o período letivo, tanto para apresentações frente a bancas de exames, quanto em séries de concertos abertos ao público. Dessa forma, o espaço comporta as mais variadas conformações de conjuntos e estilos musicais.

A percepção da qualidade acústica do auditório também é variável, mas há um consenso para a maior parte dos usuários de que o espaço apresenta dois principais problemas acústicos. O primeiro é o ruído, pois o ambiente não isola bem os sons externos. Por se tratar de uma escola de música, a interferência de outros sons no espaço é praticamente constante. Há inclusive uma sala de estudos de instrumentos de percussão contígua ao espaço do auditório. O estudo de caso não abordou este aspecto, nem na simulação, que trata o espaço como um ambiente completamente isolado, nem na medição, que foi realizada com a escola completamente vazia, após as 23 horas. O segundo problema, relativo às características internas da sala, como o excesso de reverberação e a falta de clareza e inteligibilidade do som em determinadas situações, foi o objeto do estudo.

4.1 A criação do modelo

O primeiro método para um diagnóstico acústico do auditório da Escola de Música da UFMG foi a criação de um modelo tridimensional virtual do ambiente, para utilização posterior em um software de simulação acústica de salas. Para a criação do modelo, contava-se apenas com algumas plantas, um corte, além de um laudo acústico sobre o espaço. A documentação continha poucas especificações sobre materiais de revestimento importantes, como a parede de fundo da área da audiência e o material de absorção no interior dos painéis laterais de madeira. Além disso, a planta não retratava muitas das dimensões realmente construídas, como as portas, a largura dos painéis laterais e partes da área da audiência. Ademais, o desenho em corte não indicava a conformação do pé-direito, que possui altura variável em toda a

extensão da sala. Dessa forma, optou-se pela mensuração total da área do auditório. Em relação a sua altura, a alternativa foi traçar uma linha no piso do auditório, com uma fita adesiva no seu eixo longitudinal, e obter a medida em intervalos regulares ao longo desse eixo, com o uso de uma trena a laser.

Para o desenho do modelo foi utilizado o software *SketchUp*, em plataforma livre. Para posterior importação no software de simulação acústica foram seguidas as seguintes recomendações do manual do ODEON (CHRISTENSEN; KOUTSOURIS, 2013: 40-43):

- modelagem da área da audiência com uma elevação constante de 80 cm de altura, a partir do plano do piso (as irregularidades de forma da área com assentos foram compensadas através do coeficiente de espalhamento);
- dimensões mínimas de 40cm³⁴. As superfícies convexas foram convertidas em planos com essa dimensão mínima;
- supressão dos detalhes do ambiente, como luminárias e marcos de porta, inclusive os elementos verticais de alvenaria na parede de fundo;
- modelagem dos painéis laterais de madeira como se fossem uma superfície interna e não como uma grande caixa oca, pois, devido à sua abertura inferior, o painel não parece funcionar como armadilha de graves - *bass trap*. Os materiais escolhidos para o painel foram dois tipos de superfície vibrante, como será visto no capítulo 4.3.

O modelo final é uma casca das superfícies internas e tem as seguintes características:

³⁴ Na criação de modelos para o ODEON, recomenda-se que as superfícies não tenham menos do que 34 cm, aproximadamente o comprimento de onda de um som de 1000 Hz - a dimensão mínima foi considerada no modelo (Idem: 40).

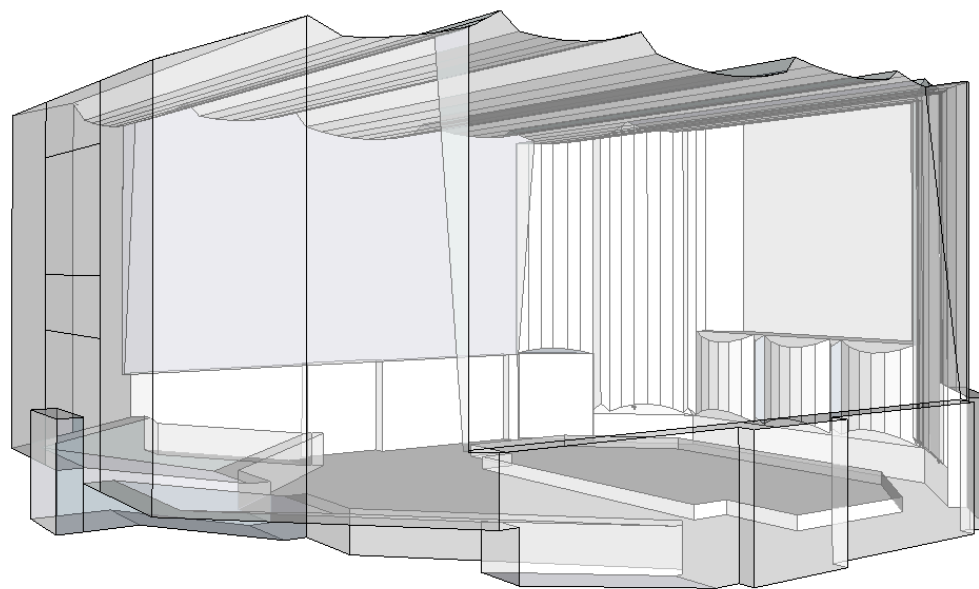
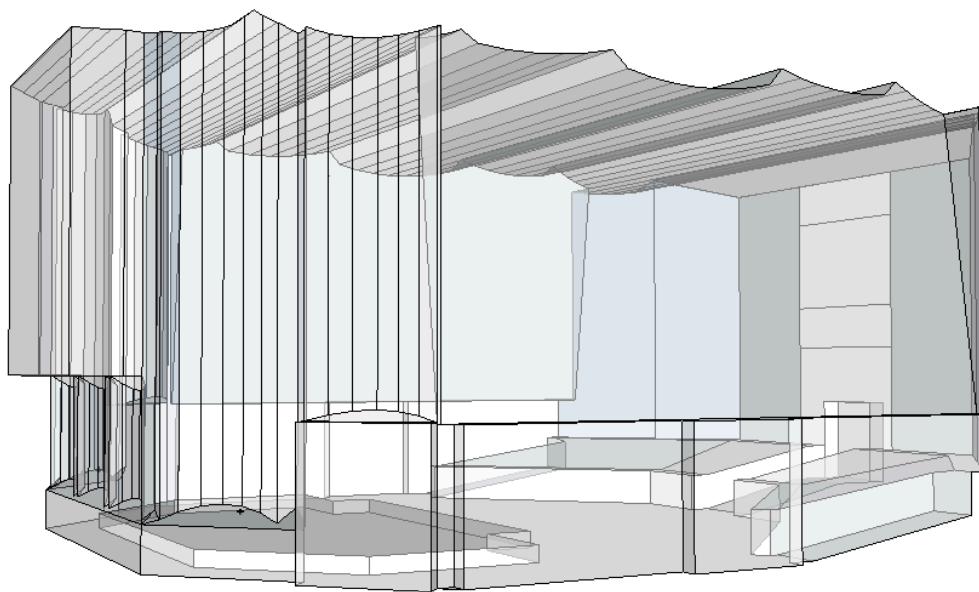


Figura 41- Imagens do modelo tridimensional do auditório da Escola de Música criado com o *SketchUp*.

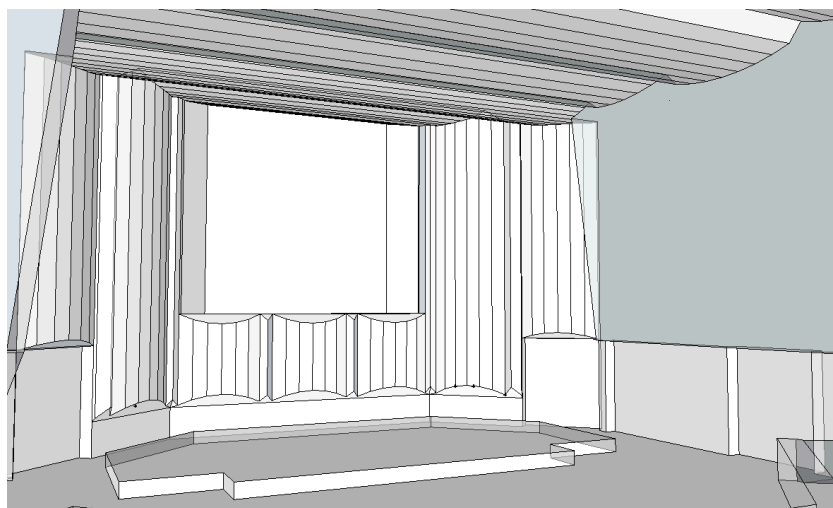


Figura 42 - Imagem do modelo tridimensional do auditório da Escola de Música criado com o *SketchUp*³⁵.

4.2 Parametrização da simulação acústica

Para a simulação acústica do auditório, esse modelo foi importado para o software ODEON – *Room Acoustics Simulation Software* (versão 7.0) disponibilizado pelo Laboratório de Dinâmica e Acústica Estrutural (LADAE) da Escola de Engenharia da UFMG. O laboratório é coordenado pelo Professor Marco Antônio Vecci.

Essa versão do ODEON utiliza a técnica de traçado de raios (*ray tracing*) e das fontes virtuais, permitindo cálculos e previsões acústicas rápidos no interior de um modelo tridimensional do espaço em análise. A partir do posicionamento de fontes e receptores virtuais no modelo, o software fornece a resposta de um ponto a outro de forma similar a uma medição da resposta ao impulso no ambiente real. A técnica empregada na simulação é um método híbrido, explicado no item 3.2.1.

Dessa forma, as primeiras reflexões (*early reflections*) são tratadas de forma diferente das reflexões tardias (*late reflections*) na simulação do traçado dos raios. Para as primeiras reflexões é utilizado o método de traçados de raios para identificar os caminhos que atingem o receptor. A partir desse traçado, os caminhos de reflexão da fonte são substituídos por caminhos diretos da imagem espelhada na superfície, de acordo com a técnica das fontes virtuais. Já as reflexões tardias são calculadas a partir de fontes secundárias, que emitem energia a partir de pontos de reflexão com direcionalidades que independem da posição do receptor, contribuindo para um

³⁵ As medidas do auditório constam na planta com a disposição de fontes e receptores utilizados na medição – figura 48, p. 93.

panorama geral da sala na reverberação tardia, conforme a figura abaixo. Esse método híbrido mantém a densidade de reflexões sob controle e diminui o tempo de cálculo (RINDEL, 2000: 220).

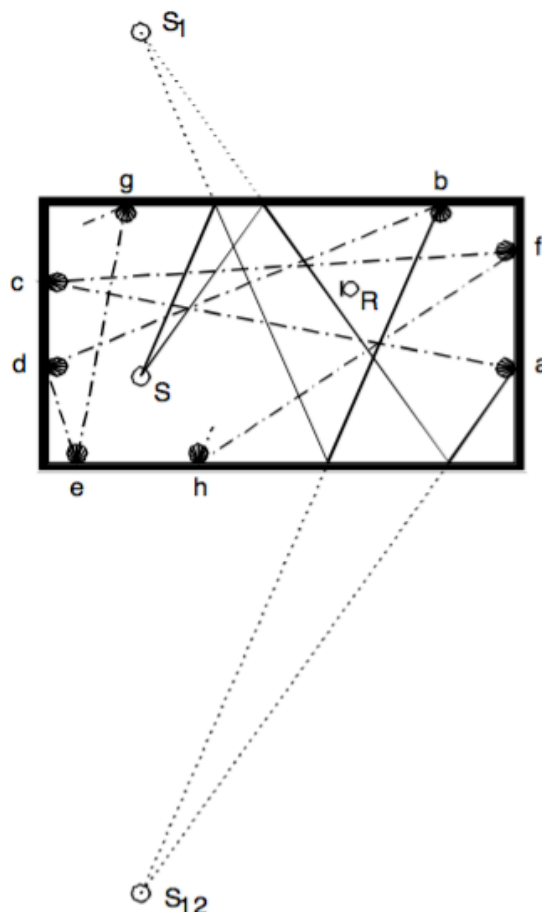


Figura 43 – Modelo híbrido do ODEON. Os raios criam fontes virtuais para as reflexões iniciais (até 2ª ordem) e, a partir daí, fontes secundárias para reflexões tardias. (Idem: 221).

No *room setup* do ODEON (fig. 44) foi utilizada a configuração *precision* para todos os cálculos, com a emissão de 13.000 raios sonoros e com a *Transition Order* = 2. A transição refere-se à mudança do método de análise para as reflexões tardias e, nesse ajuste, ela acontece após as reflexões de 2ª ordem. Esse último ajuste é recomendado pelo manual do ODEON³⁶. A disposição de fontes e receptores foi a mesma empregada na medição e os resultados obtidos nos dois casos são comparados no capítulo 6, sobre a avaliação dos parâmetros acústicos.

³⁶ Para a diferença entre ajustes da ordem de transição, ver RINDEL; CHRISTENSEN; KOUTSOURIS, 2013: 8.

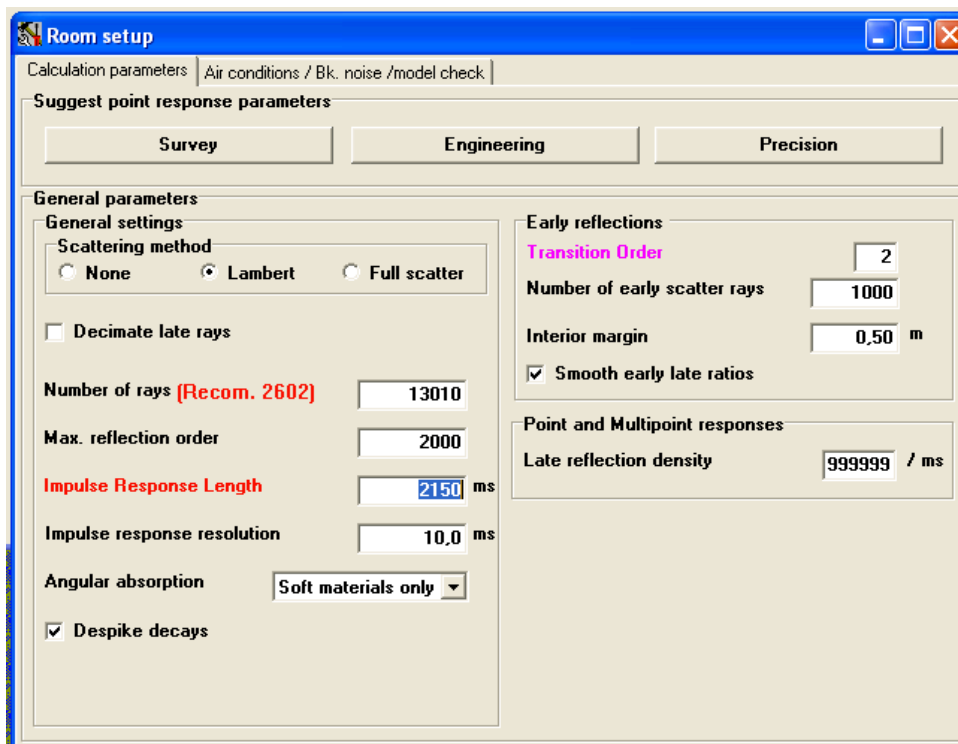


Figura 44 - Room setup do ODEON, ajustes dos parâmetros de cálculo para o traçado de raios e criação de imagens virtuais.

4.3 A escolha dos materiais de revestimento

Após a importação do modelo pelo software de simulação acústica, e uma vez verificado que ele não apresenta problemas de vazamento de raios em suas superfícies³⁷, inicia-se a parte mais sensível da simulação acústica e, também, a de maior incerteza: a escolha dos materiais internos. Isso ocorre porque os coeficientes de absorção dos materiais, constantes na biblioteca dos softwares de simulação, devem ser considerados como uma aproximação da realidade. Esses coeficientes têm pouca precisão em baixas frequências e o mesmo acontece com materiais rígidos (CHRISTENSEN; KOUTSOURIS, 2013: 40-43). Todavia, para materiais com alta absorção, e nas altas frequências em geral, os dados são mais confiáveis. Do mesmo modo, a escolha dos coeficientes de espalhamento dos materiais (*scattering coefficients*) podem causar variações no resultado. Testes comparativos de softwares de simulação acústica: *International Round Robins on Room Acoustic Simulation* – 1995, 2000, 2002; indicam a necessidade de um melhor tratamento do coeficiente de espalhamento. O primeiro destes testes foi realizado em um auditório e o segundo em uma sala de concertos. Já o terceiro foi feito em um estúdio musical (sala para piano). Os resultados entre medição e simulação se mostraram mais próximos nessa sala menor, entre 1 e 2 jnd³⁸, indicando que em certas situações essa tecnologia pode apresentar maior acurácia. Entretanto, o usuário do software ainda tem uma grande influência na variação dos resultados, pois a escolha dos coeficientes de materiais dependem de sua avaliação da situação simulada e de sua experiência (VORLANDER, 2007: 215).

Conforme mencionado, visto que o ODEON e os demais softwares de simulação atuais não representam de maneira fiel todos os fenômenos de onda sonora, os coeficientes de absorção e de espalhamento não são tão precisos nas frequências graves. Por exemplo, uma superfície corrugada, que causaria uma reflexão difusa em uma frequência alta, poderia se mostrar especular no grave. Além disso, os coeficientes de absorção são medidos com amostras de materiais, em uma câmara reverberante. No ambiente real, as superfícies revestidas por esses materiais podem ser bem maiores, o que tornaria os valores de absorção no grave uma aproximação.

³⁷ O modelo mostrou-se praticamente hermético, com um vazamento de 400 raios dentre os 13000, o que é aceito pelo ODEON.

³⁸ *just noticeable difference*. - uma diferença dentro desse limiar (1 jnd) não é notada auditiva ou psicologicamente. Ver capítulo 6, p. 97.

Ademais, quanto menor a sala simulada, pior é a sua resposta nos graves. De acordo com a equação da página 64, a Frequência de Schroeder para o auditório da Escola de Música, para um tempo máximo de reverberação de 2,2 segundos, é de 67 Hz³⁹. Ou seja, abaixo dessa frequência o resultado não é confiável. A incerteza na região do grave e médio-grave, bandas de 125 e 250 Hz, pode ser percebida na comparação dos resultados no capítulo 6.

Para o auditório, foram escolhidos os seguintes materiais e coeficientes de espalhamento (*scattering coefficients*):

LISTA DE MATERIAIS DO MODELO NO ODEON										
MATERIAL / REFERÊNCIA E COEFICIENTE DE ABSORÇÃO POR BANDA DE OITAVA	CÓD. ODEON	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO ESCOLHIDO (SCATTERING)
JANELAS ESTÚDIO	2381	<i>Windows, double 3 mm glass / 10 mm distance Ref. Dalenbäck, Datensatz der CATT-Software, November 2000. Data-Category in CATT: WINDOW_DBL_10, C: Windows, D: DoubleDatensatz der CATT-S</i>								
		0.02	0.02	0.06	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0
PAREDES DE ALVENARIA	2311	<i>Walls, hard surfaces average (brick walls, plaster, hard floors etc.) Ref. Dalenbäck, Datensatz der CATT-Software, November 2000. Data-Category in CATT: HARDSURF70, C: Walls, D: Hard</i>								
		0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.1
PORTAS	603	<i>Solid wooden door (Ref. 15)</i>								
		0.14	0.14	0.1	0.06	0.08	0.1	0.1	0.1	0.15
TETO	2294	<i>Ceilings, plasterboard ceiling on battens with large air-space above Ref. Dalenbäck, Datensatz der CATT-Software, November 2000. Data-Category in CATT: CEIL_PLASTER, C: Ceilings, D: Plasterboard</i>								
		0.2	0.2	0.15	0.1	0.08	0.04	0.02	0.02	0.1
PISO	2340	<i>Floors, wood parquet on concrete Ref. Dalenbäck, Datensatz der CATT-Software, November 2000. Data-Category in CATT: PARQUET30, C: Floors, D: Wood</i>								
		0.04	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.1
ESCADAS DA ÁREA DA AUDIÊNCIA	2468	40.00% Mat. 2466, 60.00% Mat. 2467								
		0.052	0.052	0.304	0.288	0.36	0.45	0.48	0.62	0.2

³⁹ O volume da sala é de aproximadamente 1940 m³.

PAINÉIS LATERAIS DE MADEIRA	2469	20.00% Mat. 2370, 80.00% Mat. 2371							
		0.34	0.34	0.174	0.106	0.064	0.048	0.05	0.05
PAREDE DE FUNDO DA ÁREA DA AUDIÊNCIA	2471	40.00% Mat. 2359, 20.00% Mat. 2292, 40.00% Mat. 2311							
		0.052	0.052	0.072	0.12	0.218	0.324	0.364	0.364
ÁREA DA AUDIÊNCIA	2368	<i>Chairs, lightly upholstered concert hall chairs, average. Ref. Dalenbäck, Datensatz der CATT-Software, November 2000. Data-Category in CATT: UPHOLST_LIGHT, C: Chairs, D: Lightly</i>							
		0.35	0.35	0.45	0.57	0.61	0.59	0.55	0.55
PALCO (TABLADO)	2480	40.00% Mat. 2467, 60.00% Mat. 2388, tablado							
		0.248	0.248	0.196	0.152	0.182	0.23	0.22	0.26
OUTROS MATERIAIS UTILIZADOS PARA MESCLAGEM									
2359	<i>Walls, 30 mm "Soundboard" (pressed wood curls with air gaps) Ref. Dalenbäck, Datensatz der CATT-Software, November 2000. Data-Category in CATT: SOUNDBOARD1, C: Walls, D: 30</i>								
	0.06	0.06	0.09	0.17	0.35	0.52	0.56	0.56	
2292	<i>Carpets, 2 cm Ref. Dalenbäck, Datensatz der CATT-Software, November 2000. Data-Category in CATT: CARPET_THICK, C: Carpets, D: 2</i>								
	0.1	0.1	0.14	0.2	0.33	0.5	0.6	0.6	
2466	<i>wood, stage floor, 2 layers, 27 mm over airspace (cern)</i>								
	0.1	0.1	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	
2467	<i>Thin carpet, cemented to concrete (cern)</i>								
	0.2	0.2	0.4	0.8	0.2	0.35	0.4	0.5	
2370	<i>Walls, slightly vibrating walls (suspended ceilings etc.) Ref. Dalenbäck, Datensatz der CATT-Software, November 2000. Data-Category in CATT: VIBRATING70, C: Walls, D: Slightly</i>								
	0.1	0.1	0.07	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	
2371	<i>Walls, Strongly vibrating walls (e.g. wooden panelling over air space) Ref. Dalenbäck, Datensatz der CATT-Software, November 2000. Data-Category in CATT: VIBRATING71, C: Walls, D: Strongly</i>								
	0.4	0.4	0.2	0.12	0.07	0.05	0.05	0.05	
2388	<i>Floors, hollow wooden podium Ref. Dalenbäck, Datensatz der CATT-Software, November 2000. Data-Category in CATT: WOOD_PODIUM, C: Floors, D: Hollow</i>								
	0.4	0.4	0.3	0.2	0.17	0.15	0.1	0.1	

Tabela 1 – Lista de materiais utilizados no modelo do auditório da Escola de Música – biblioteca de materiais do ODEON.

Devido ao grau de incerteza dessa etapa da simulação acústica, foram selecionados, na biblioteca do software, os materiais que possuíam uma descrição mais direta possível, de acordo com a sua aplicação. Não houve dificuldades em encontrar referências para as superfícies lisas, como as janelas, paredes, portas e pisos. Ou mesmo para o teto de gesso que, no caso do auditório, conta com um grande volume vazio em cima, que dá acesso ao aparato de iluminação. Nesses casos, os coeficientes de espalhamento foram mantidos próximos a 0,1⁴⁰. No caso da área da audiência, que foi modelada como um só volume elevado, o coeficiente adotado foi de 0,6, para um panorama próximo ao de uma área irregular, com várias cadeiras. A diretriz adotada para a escolha desses coeficientes teve como base as orientações do manual do software (CHRISTENSEN; KOUTSOURIS, 2013: 78) e os exemplos da literatura (VORLANDER, 2007: 311).

Para os outros materiais, a biblioteca não contava com referências próximas. No caso das escadas e da parede de fundo da área da audiência, do palco e dos painéis laterais de madeira, foi necessário mesclar materiais, um recurso presente no Odeon. Por exemplo, tanto o palco quanto a área da audiência apresentam revestimento de carpete sobre um tablado de madeira. Entretanto, o carpete do palco é muito fino, se comparado com o das escadas. Além disso, devido ao seu escalonamento de altura, há uma maior quantidade de ar abaixo da área da audiência. Por isso, foram escolhidas diferentes percentagens de carpete e dois tipos de pisos de madeira sobre espaços vazios.

Em relação aos painéis laterais, os materiais foram painéis de madeira suscetíveis à forte vibração. Por causa das dimensões desses painéis, de sua densidade e do fato de não estarem fechados, esse material foi mesclado, em menor proporção, com um material similar, porém com menor suscetibilidade à vibrações. Por fim, a parede de fundo da audiência foi a única que contou com a fusão de três materiais. Ela é constituída de um carpete fino sobre painel acústico de compensado com furos. Entretanto, há uma grande quantidade de tijolos aparentes, nas colunas que vão até o teto (Figura 49, p. 94), que são superfícies reflexivas. Por causa desses diferentes materiais, foi escolhido um coeficiente de espalhamento de 0,2.

⁴⁰ O coeficiente de espalhamento varia de 0 a 1, conforme explicado na página 69.

Por fim, parecem existir duas vertentes opostas no que tange a adequação de um modelo a partir da medição acústica do ambiente. Um linha advoga que uma tentativa de aproximação é válida, caso o ambiente em estudo seja um espaço já existente (RINDEL; CHRISTENSEN; KOUTSOURIS, 2013: 2). Trata-se um cenário em que o espaço necessita de intervenções. Então, partir de um modelo o mais aferido possível parece um excelente ideia. Entretanto, a outra linha defende que a adequação não deve acontecer. Nesse caso, deve-se realizar a medição e a simulação em separado e investigar a razão dessas diferenças posteriormente (VORLANDER, 2012: 1206).

No presente trabalho, nossa opção preferencial foi pela segunda vertente. No entanto, por curiosidade, em um dado momento houve uma tentativa de aproximação mais severa dos materiais e de seus coeficientes. Ela se mostrou infrutífera, pois a tentativa de um melhor resultado para um determinado parâmetro, em uma posição em particular, sempre prejudicava outros parâmetros acústicos. O que nos levou a um método mais simples para a seleção desses materiais, como foi explicado, e sem a preocupação de alcançar um resultado específico referente à medição.

5. Medição acústica do auditório da Escola de Música

Para um espaço já existente como o auditório da Escola de Música é importante contar com uma medição acústica do ambiente, em paralelo aos trabalhos de criação do modelo e sua simulação acústica. Segundo a literatura referente à tecnologia de simulação, a medição pode servir como base comparativa do modelo. Seja como uma ferramenta de aferição, para que as alterações de características do modelo partam de um ponto mais próximo do real, seja como fonte de pesquisa para a tecnologia, demonstrando as diferenças entre a medição e a simulação de um espaço (VORLANDER, 2013: 1206-V).

De qualquer forma, ambas as técnicas têm as suas vantagens e limitações. Um ruído de fundo elevado ou a distorção no equipamento podem tornar uma medição imprecisa, por exemplo. A direcionalidade de fontes e receptores de som e a sua resposta dinâmica são outras preocupações. No caso da simulação, é mais simples criar fontes e receptores perfeitamente omnidirecionais, sem distorções e com uma curva de respostas plana. Dessa forma, a comparação com a medição da sala pode trazer informações relevantes para um melhor diagnóstico do ambiente em estudo (RINDEL; CHRISTENSEN; KOUTSOURIS, 2013: 4).

5.1 Metodologia da medição acústica

A medição acústica da sala é realizada a partir da sua resposta ao impulso. Para isso, a transmissão de som de um ponto a outro do som em seu interior é considerada próxima à de um sistema linear e não-variante com o tempo. Nesse tipo de sistema, a resposta ao impulso fornece todas as suas características ao sinal que se desloca seu interior.

As respostas ao impulso de uma sala são geradas por mecanismos de excitação, como os disparos de festim, o estouro de balões ou geração de ruídos em seu interior.

Os métodos eletroacústicos foram empregados a partir de 1920, com o advento do amplificador elétrico. O método tradicional era o ruído interrompido, onde

era gravado o decaimento da sala após a injeção de um ruído branco, filtrado para cada banda de medição, dentro do espaço em estudo. Depois de alcançar o estado estacionário (*steady state level*), o sinal era interrompido, em uma técnica similar à empregada por Sabine.

Assim, o decaimento era gravado para análise do tempo de reverberação. A desvantagem desse método é a variação das medições em um mesmo ponto, devido a diferenças de amplitude e fase na interrupção do sinal. Assim, eram necessárias diversas medições para a obtenção de uma média confiável. Comparativamente, o método de integração da resposta ao impulso desenvolvido por Schroeder conseguia um resultado mais eficiente, em uma única medição, de acordo com a figura 45 (SCHROEDER, 1965).

A partir da excitação da sala com um disparo de festim filtrado ou um disparo de sinal (*tone burst*) no alto falante, o som era gravado e invertido no domínio do tempo (tocado de trás para a frente?) antes de ser enviado a um circuito (*RC network*) para integração do quadrado da resposta ao impulso. O método fornecia um resultado mais preciso que, comparado ao método anterior, era uma função positiva no domínio do tempo com um decaimento constante e menores flutuações. Além disso, a integração inversa excluía o ruído de fundo, ao partir do final da gravação do impulso. Esses fatores permitiam maior acurácia no cálculo do tempo de reverberação total e uma melhor previsão do período inicial do decaimento, que era suscetível a maiores variações.

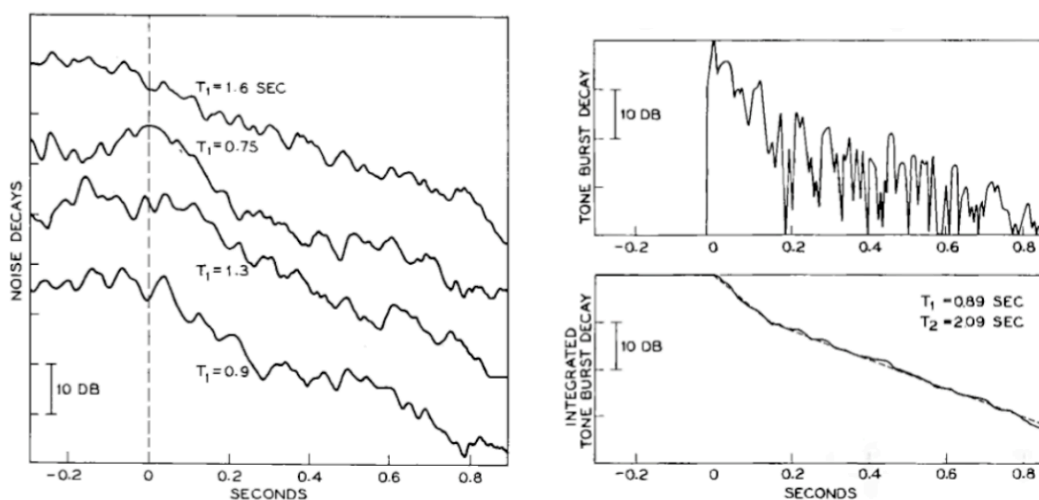


Figura 45 – À esquerda: o decaimento obtido com o ruído interrompido – Sala da Filarmônica de NY; a linha tracejada é o ponto de interrupção sonora. À direita acima: a resposta de um disparo de sinal (*tone burst*) com a mesma disposição de falante e microfone da figura ao lado. À direita abaixo: a integração do quadrado da resposta do disparo de sinal (SCHROEDER, 1965).

Atualmente, com exceção do ruído interrompido, os métodos de medição acústica de uma sala utilizam a integração inversa do quadrado da resposta ao impulso, cujo o decaimento é obtido pela fórmula (ISO/TC 3382, 2009):

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

Onde:

p - pressão da resposta ao impulso em função do tempo
 E - energia da curva de decaimento em função do tempo;
 T - tempo.

Dentre os métodos eletroacústicos mais recentes, foi escolhida a varredura senoidal exponencial (ESS, *Exponential Sine Sweep*, também chamada de varredura logarítmica) para a medição do auditório da Escola de Música. Esse é um método indireto da obtenção da resposta ao impulso, visto que é preciso realizar uma deconvolução do sinal da resposta gravada no ambiente (fig. 46). Entretanto, por ser um método determinístico, com o controle exato do sinal gerado, a repetitividade da medição é possível (ISO/TC 18233, 2006).

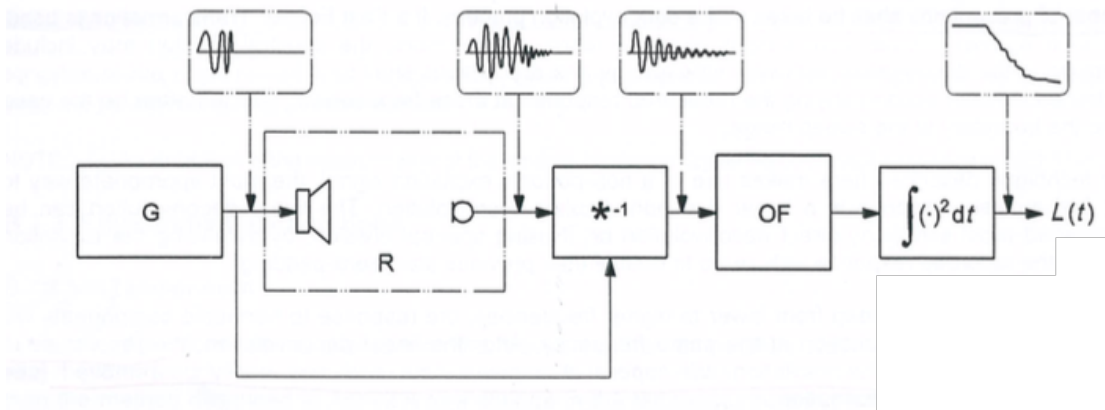


Figura 46 - Diagrama da deconvolução direta do método da varredura senoidal. G- sinal; R - sala; $*^{-1}$ - deconvolução; e OF - Filtro de divisão por oitavas (ISO/TC 18233, 2006).

Os métodos eletroacústicos têm limitações devido à utilização de transdutores eletrônicos, que empregam a sua própria distorção harmônica na medição acústica. Nesse caso, as varreduras senoidais, simples e exponencial, apresentam vantagens sobre os outros métodos como o MLS (*Maximum Length Signal*). Por empregar uma deconvolução linear, implementada diretamente no domínio do tempo com um filtro inverso do sinal de entrada⁴¹, as distorções do sistema se deslocam negativamente, antecedendo a resposta ao impulso linear. Na varredura exponencial, as distorções formam picos facilmente identificáveis, como na figura abaixo, e podem ser removidas da resposta ao impulso por edição sonora.

Como é possível fornecer maior potência ao sinal da varredura senoidal, aliada a um aumento do tempo de excitação da sala, há uma melhora considerável na relação sinal/ruído. No caso da exponencial, o sinal tem uma distribuição igualitária de energia por banda de oitava, aumentando a relação sinal/ruído nos graves (FARINA, 2000:5).

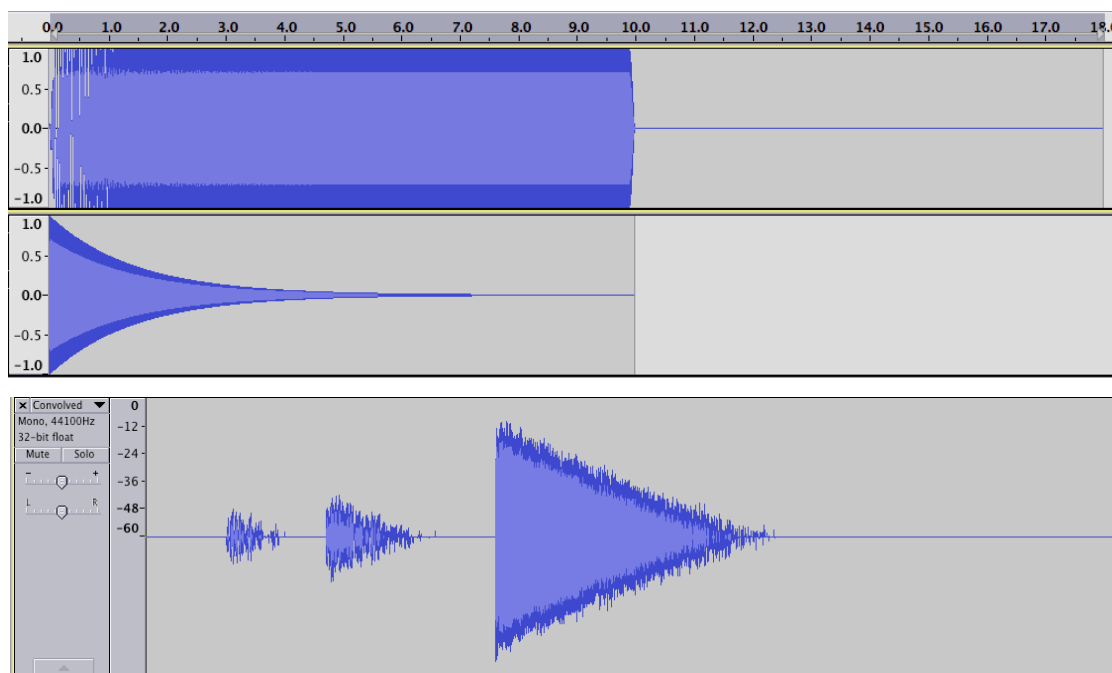


Figura 47 – Acima: sinal utilizado na medição do auditório da Escola de Música e seu filtro inverso. Abaixo: distorção harmônica em uma resposta ao impulso da medição, após a deconvolução com o filtro inverso do sinal.

⁴¹ O sinal da ESS é similar a um ruído rosa. Assim, ao contrário da varredura simples, é aplicado ao filtro inverso um envelope de amplitude com um aumento de 3 dB por oitava.

5.1.1 Relatório da medição

A medição do auditório da Escola de Música foi realizada em 19/09/2016, de 22:00 h até 5:00 h do dia seguinte, em conformidade com disposto na norma ISO/TC 3382-1. O auditório possui aproximadamente 120 lugares na área da audiência e para a medição foram retiradas todas as cadeiras do tablado utilizado como palco. Seu volume é de aproximadamente 1940 m³. Duas pessoas permaneceram em seu interior para os trabalhos. A sua descrição interna e escolha dos materiais podem ser visualizadas nas seções 4.1 e 4.3 (p.76 e 82), que tratam da criação do modelo. As duas caixas de som (PA) que integram a sonorização do auditório, foram mantidas na sala, mas não foram consideradas na simulação. Estas estavam alinhadas no limite das portas laterais, mais próximas à área do palco. O mesmo ocorreu com os pianos de cauda, que permaneceram fechados durante a medição (ver fig. 49, p. 94). A temperatura no interior do ambiente estava em torno de 20° C.

A medição contou com o seguinte equipamento:

- um alto-falante dodecaedro omnidirecional Bruel & Kjaer: B&K *Type* 4292-L ;
- sistema de amplificação da Bruel & Kjaer: B&K *Type* 2734-A;
- microfone binaural Neumann KU-100 – *dummy head*;
- microfone omnidirecional Behringher ECM 8000, para medições acústicas;
- placa de áudio Focusrite Scarlett 2i2 – utilizada com o KU100;
- placa de áudio MOTU UltraLite-mk3 Hybrid – utilizada com o Behringher ECM 8000.

A medição foi realizada em conjunto com Calebe Giaculi Júnior, na ocasião, mestrando do programa da Engenharia Elétrica. O falante dodecaedro e o microfone KU100 foram gentilmente cedidos pelo prof. Dimas Alberto Gazolla Palhares, do Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, da Escola de Engenharia da UFMG; e pelo Prof. Jalver Machado Bethônico, da Escola de Belas Artes da UFMG, respectivamente. O Professor Marco Antônio de Mendonça Vecci orientou a disposição de fontes e receptores durante a medição, vistoriou a instalação do equipamento e os

sinais utilizados, de forma a atendermos às distâncias mínimas e demais especificações requeridas pela norma.

As figuras 48 e 49 mostram a disposição e altura das fontes e receptores no auditório. A norma indica uma quantidade mínima de 3 fontes e 6 receptores, esta última para salas de 500 lugares. A maior parte dos receptores foi distribuída no espaço da audiência e do palco a partir de uma linha central, dada a simetria do espaço, o que é uma outra recomendação da norma.

Na medição, o alto-falante dodecaedro omnidirecional ocupou as posições F1 a F4, sendo que F1, F2 e F3 encontravam-se sobre o tablado, que é o local usual da emissão sonora. Porém, algumas performances orquestrais costumam ocupar até o alinhamento da posição F4, que foi considerada na medição. Esta também está próxima à posição de um solista em recitais de câmara. Para a gravação dos sinais gerados no interior da salas, os microfones omnidirecional Behringer e o binaural Neumann KU-100 foram empregados em cada uma das posições R1 a R9.

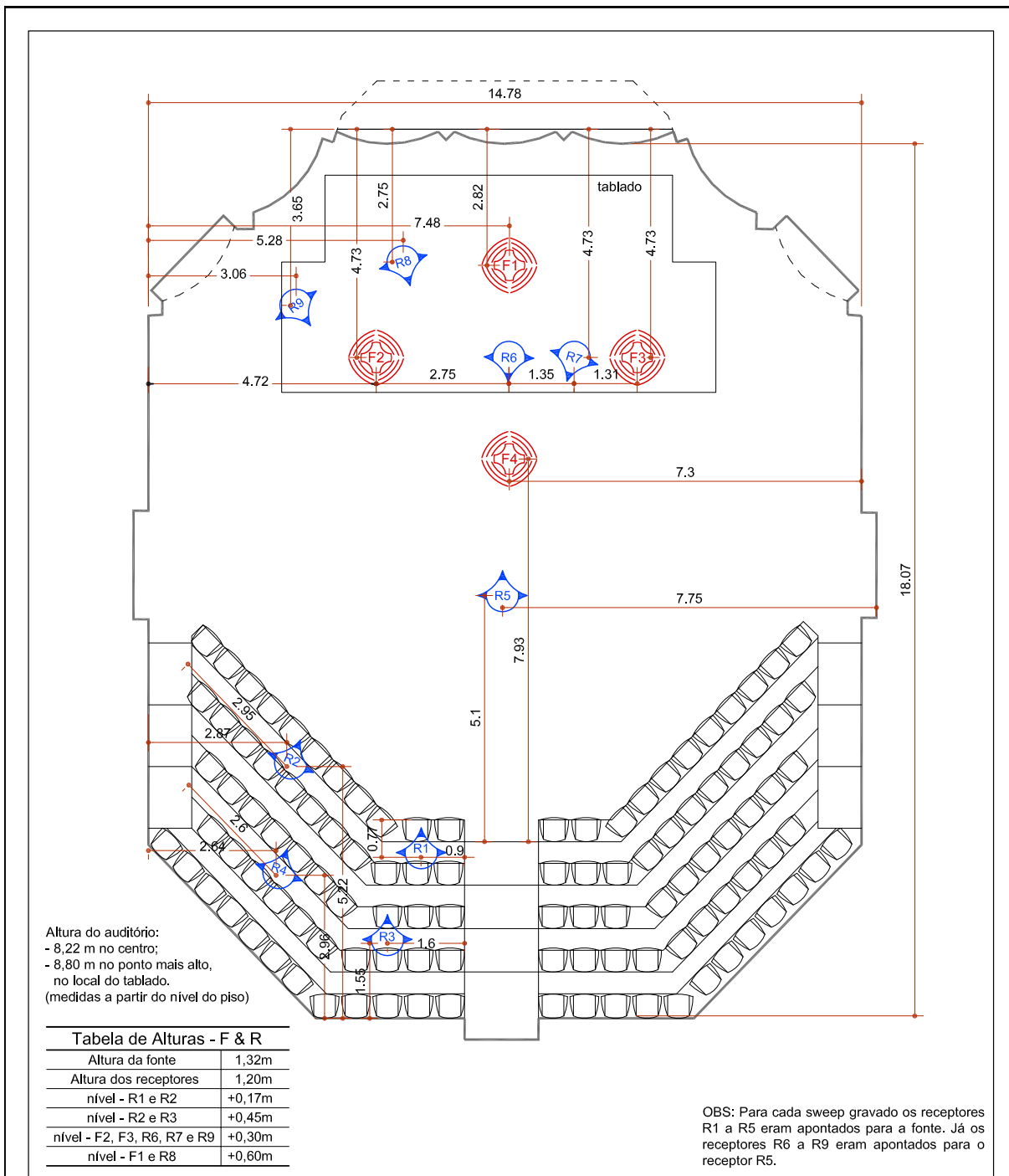
Para a análise acústica foram consideradas as seguintes posições:

- Fontes F1 a F4 para os receptores R1 a R4;
- Fontes F1 a F3 para o receptor R5;
- Fontes F3 e F4 para o receptor R8;
- Fontes F1, F3 e F4 para o receptor R9;

Os receptores R6 e R7 e as posições F1R8, F2R8, F2R9 e F4R5 foram excluídos dos cálculos do tempo de reverberação por estarem a uma distância da fonte menor do que 3,30 metros, que é a distância mínima de acordo com o volume da sala⁴². As respostas ao impulso obtidas com os receptores R6 e R7 podem ser utilizados para experimentos sonoros ou estudos de distribuição de nível sonoro no palco. Em cada uma das posições foi realizada a medição com os dois microfones.

Em geral, procurou-se a obtenção de parâmetros da sala como um todo, para a análise do som percebida tanto pelo espectador quanto pelo músico que realiza a performance.

⁴² $D_{min} = 2 \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}}$; onde V é o volume da sala, C é a velocidade do som e T é o tempo de reverberação estimado (ISO/TC 3382, 2009).



DISPOSIÇÃO DE FONTES E RECEPTORES DE SOM

ESCALA 1:100

MEDIÇÃO ACÚSTICA DO AUDITÓRIO DA ESCOLA DE MÚSICA DA UFMG - MÉTODO ESS
 (Exponential Sine Sweep Method) - 19/09/2016

FONTE RECEPTOR

MEDIÇÃO:
 CALEBE GIACULI JR.
 LUCAS VILAS BOAS

ORIENTAÇÃO:
 PROF. MARCO ANTÔNIO VECCI

Figura 48 – Disposição de fontes e receptores de som – medição acústica do auditório da Escola de Música.

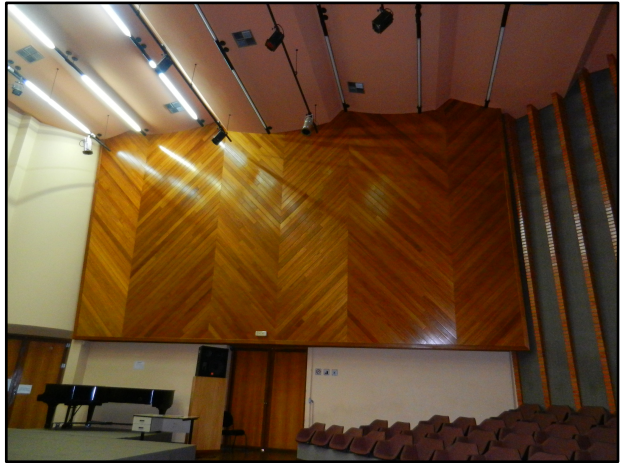


Figura 49 – Fotos da medição acústica do auditório: falante dodecaedro e microfone KU100 na posição F2R9/ detalhe do painel lateral e caixa de PA (antes da medição) / posição F1R1 / microfones KU100 e Behringer EBM 8000.

5.1.2 Software utilizado na medição

Devido à praticidade do uso de softwares livres, optou-se pela utilização do programa Aurora, em seu formato *plug-in* para a DAW (*Digital Audio Workstation*) Audacity. O Aurora foi desenvolvido por Ângelo Farina e disponibilizado na versão livre a partir de 2009 (CAMPANINI; FARINA, 2009). Atualmente, a aplicação disponibiliza ferramentas para a geração de sinal e convolução com amostras sonoras, além do cálculo de parâmetros acústicos.

Para os trabalhos de medição, foi criado um *sweep* logarítmico de 10 segundos de duração, com resolução de 24 bits e frequência de amostragem de 44,1 kHz, e o seu filtro inverso, utilizado na deconvolução com a resposta gravada na sala durante a medição para a obtenção da resposta ao impulso. Cabe ressaltar outra grande vantagem do método ESS, principalmente em medições com dois setups de equipamentos receptores como esta. Não existe a necessidade de sincronização perfeita entre o “*clock*” de reprodução do *sweep* e de sua gravação. Ou seja, a latência da conversão analógico-digital (A/D) da placa de som pode ser desconsiderada. No momento da edição das respostas ao impulso, somente é preciso remover as distorções harmônicas que antecedem o sinal, conforme mencionado na página 90.

A partir daí, a resposta ao impulso foi utilizada para a obtenção dos parâmetros acústicos do auditório no Aurora, com a ferramenta *Acoustical Parameters*, e para auralização de amostras de som no Aurora *Convolver*.

6. Resultados I: parâmetros acústicos

Os métodos até aqui apresentados são mecanismos para a previsão de situações acústicas de uma sala ou um arcabouço teórico e técnico para a adequação de ambientes em suas intervenções. Porém, existe ainda o fator psicoacústico, a percepção do usuário sobre as qualidades do ambiente, como método de avaliação da sala. Esses valores, de cunho subjetivo, muitas vezes contradizem indicadores de natureza física do espaço, em prol de sensações visuais e da experiência emocional da performance como um todo (CREMER, MÜLLER, 1982: 451). No entanto, parte dessa subjetividade tem sua contrapartida nos parâmetros acústicos objetivos. A literatura aponta várias correlações, sendo que algumas delas serão mencionadas neste estudo comparativo, sempre que possível (IAZZETTA; FIGUEIREDO; MASIERO, 2004).

Dessa forma, a partir da resposta ao impulso da sala, é possível obter parâmetros acústicos objetivos que quantificam as suas características acústicas. O Tempo de Reverberação (T), obtido pelo método desenvolvido por Schroeder (1964) para obtenção das curvas de decaimento (fig. 50), ainda é considerado como a principal característica da acústica de um ambiente. Entretanto, conforme a Norma Técnica ISO-3382-1/2009, a acústica de espaços para a performance necessita da análise de outros parâmetros, como a Clareza (C80) e o EDT (*Early Decay Time*), para uma melhor avaliação desses espaços.

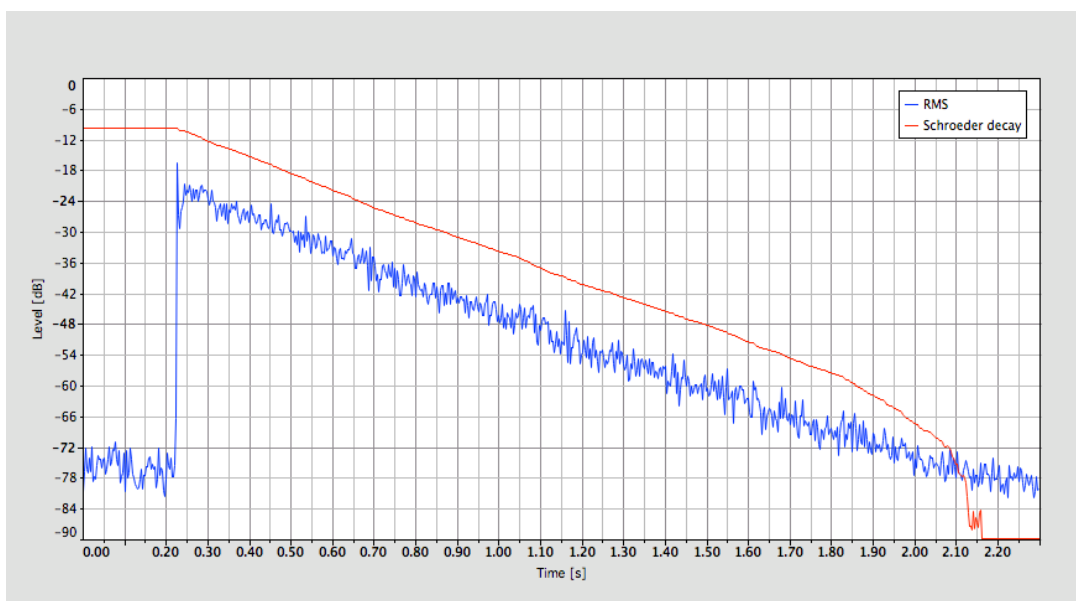


Figura 50 – Curva de resposta de energia de um impulso da medição (azul) e a curva de decaimento (vermelho).

Tanto a medição quanto a simulação do auditório permitem o cálculo dos demais parâmetros (com exceção do *Interaural Cross-Correlation* (IACC), na versão 7.0 do ODEON), através de fórmulas específicas de integração. Apesar das limitações apontadas anteriormente, chegou-se a uma aproximação razoável do modelo ao espaço real. A diferença mensurada entre os dois cenários está de acordo com a literatura (SHIOKAWA; RINDEL, 2007). Como a simulação acústica não é tão eficaz em frequências graves, os resultados comparativos costumam se aproximar em frequências médias. Em geral, é mais difícil alcançar valores próximos em tempos de reverberação, ao contrário de parâmetros relativos à clareza, como o C80 e o D50 (VORLANDER, 2013: 1212). O extremo agudo também representa um problema para as medições, já que sua representação pode ser afetada tanto pela resposta em frequência quanto pela direcionalidade dos equipamentos.

Dessa forma, para cada parâmetro analisado a seguir, foi feita uma comparação entre simulação e medição do auditório, com base no disposto na norma. Assim, os resultados apresentam o erro referente ao limiar subjetivo (*subjective limen*) de cada parâmetro, conforme a figura 51. A escala dessa aferição é denominada JND – *just noticeable difference*; o que significa que uma diferença dentro desse limiar não é notada auditiva ou psicologicamente. Na maior parte dos parâmetros, a área do palco e da audiência foram analisadas separadamente, porém para o T e o EDT foi feita uma média espacial de todas as posições com o cálculo do seu desvio padrão. O intuito foi proporcionar um panorama geral da sala, tanto para o ouvinte quanto para o músico.

Parameter	Definition (ISO 3382-1, 2009) and (IEC 60268-16, 2003) for STI	Subj. limen
T_{30} (s)	Reverberation time, derived from -5 to -35 dB of the decay curve	5 % rel.
EDT (s)	Early decay time, derived from 0 to -10 dB of the decay curve	5 % rel.
D_{50} (%)	Deutlichkeit (definition), early (0 - 50 ms) to total energy ratio	5 % abs.
C_{80} (dB)	Clarity, early (0 - 80 ms) to late (80-∞) energy ratio	1 dB abs.
T_s [ms]	Centre time, time of first moment of impulse response or gravity time	10 ms abs.
G (dB)	Sound level related to omni-directional free field radiation at 10 m distance	1 dB abs.
LF (%)	Early lateral (5 - 80 ms) energy ratio, \cos^2 (lateral angle)	5 % abs.
STI (RASTI)	Speech Transmission Index	0.03 abs.

Figura 51 - Parâmetros acústicos e seus limiares subjetivos (rel. - valores relativos / abs. - valores absolutos) (CHRISTENSEN; KOUTSOURIS, 2013: 97)

Para o cálculo do erro, foram utilizadas as seguintes fórmulas (SHIOKAWA; RINDEL, 2007):

$$Error (T e EDT) = \frac{\sum |PA medido - PA simulado| \times 100}{\frac{PA medido \times SL}{N_{pos}}}$$

$$Error (C80, Ts e LEF) = \frac{\sum |PA medido - PA simulado|}{\frac{SL}{N_{pos}}}$$

onde:

PA = parâmetro acústico

SL = limiar subjetivo - *subjective limen*

N_{pos} = número de posições entre fontes e receptores no ambiente

Para a obtenção de uma média dos parâmetros acústicos T, EDT, C80 e Ts foram consideradas a área da audiência (receptores R1 a R4, fontes F1 a F4) e a área do tablado/palco (fontes F1 a F4 e receptores R5, R8, R9 – excluídas F1R8, F2R8, F2R9 e F4R5, por não atenderem às distâncias mínimas da norma). Os parâmetros L (nível de som/ *G-strength*) e os parâmetros de distribuição de energia lateral (LEF e LG80) não foram medidos no auditório, devido à restrições do equipamento. Para esses parâmetros foi feita uma simulação em toda superfície (*grid*) da plateia, a partir da fonte F1 Para o G, também foi realizada a simulação no palco, a partir de F4. O LFE e o LG80 tem estreita relação com a noção de espacialização do som na sala pelo ouvinte, o mesmo ocorre com o IACC (*inter-aural cross correlation*). Por utilizarmos um microfone binaural, o IACC pôde ser medido e comparado com a simulação, a partir das fontes F1 a F3 e dos receptores R1 a R4, na área da audiência.

Conforme mencionado na seção 5.1.2, os parâmetros acústicos da medição foram calculados pela ferramenta *Acoustic Parameters* do Aurora e, com exceção do IACC, utilizou-se o áudio monaural do microfone Behringer. Já os parâmetros da simulação foram obtidos diretamente no software Odeon, para evitarmos qualquer influência dos mecanismos de auralização sobre esses dados. Como a versão 7.0 do Odeon não calcula o IACC, foram geradas respostas ao impulso binaurais virtuais para

cada posição de fonte e receptor em estudo. Para isso, foram utilizados a aproximação de fase aleatória e o filtro HTRF da Kemar *dummy head*, ajuste conforme a figura 38 (p. 71). Todos os cálculos para a obtenção do IACC foram realizados no Aurora, a partir das respostas virtuais e das respostas obtidas com o microfone binaural Neumann KU-100. Ademais, os parâmetros somente simulados foram tratados em conjunto, onde também foi abordado o ITDG (*Initial Time Delay Gap*), referente à sensação de intimismo.

6.1 Tempo de Reverberação (T)

Para uma média do Tempo de reverberação do auditório considerou-se o T30, visto que os parâmetros apresentados no ODEON calculam o tempo de reverberação a partir do mesmo parâmetro, não fornecendo os valores de T20. Isso se deve ao fato de não existir ruído de fundo no ambiente virtual (que pode ser simulado, se necessário) e, assim, não há problemas para a obtenção de um decaimento de -5 dB a -35 dB, requerido pelo T30. O ponto inicial da análise, -5 dB, é contado a partir do ponto de maior amplitude da resposta ao impulso (*steady state level*). O T20 parte dos mesmos -5 dB, mas decai somente 20 dB, sendo que as inclinações de ambos são extrapoladas para uma queda de 60 dB, de acordo com o T60 da fórmula de Sabine.

Como foi usado um falante dodecaedro na medição, as respostas mostram uma boa relação sinal/ruído e assim não houve problemas para a obtenção do T30, ao menos nas bandas de frequências de comparação requeridas pela norma – de 125 Hz a 4 kHz. Como a curva de decaimento deve ser truncada antes do ruído de fundo, o que pode influenciar os dados dos parâmetros, as respostas ao impulso da medição foram editados para que tivessem uma duração de 2,3 segundos, que é um pouco maior que o tempo de reverberação da sala. O IR gerado no Odeon foi mantido no mesmo comprimento para fins de comparação, o que é algo em torno das 100.000 amostras indicadas por Farina para o método ESS⁴³, na frequência de amostragem de 44,1 kHz⁴⁴. A análise de parâmetros do Aurora possui uma ferramenta que identifica o ruído de fundo e realiza a truncagem da curva de decaimento automaticamente.

Abaixo estão os dados comparativos referentes ao Tempo de Reverberação do auditório:

⁴³ Na versão gratuita do Aurora, para o Audacity, não há um manual para a realização do método. Farina explica detalhadamente o passo a passo em seu fórum sobre o software: <http://aurora-plugins.forumfree.it/?t=53443032>. Acesso em 05 jul. 2017.

⁴⁴ $\frac{100.000 \text{ amostras}}{44100 \text{ amostras/segundo}} = 2,2675 \text{ segundos.}$

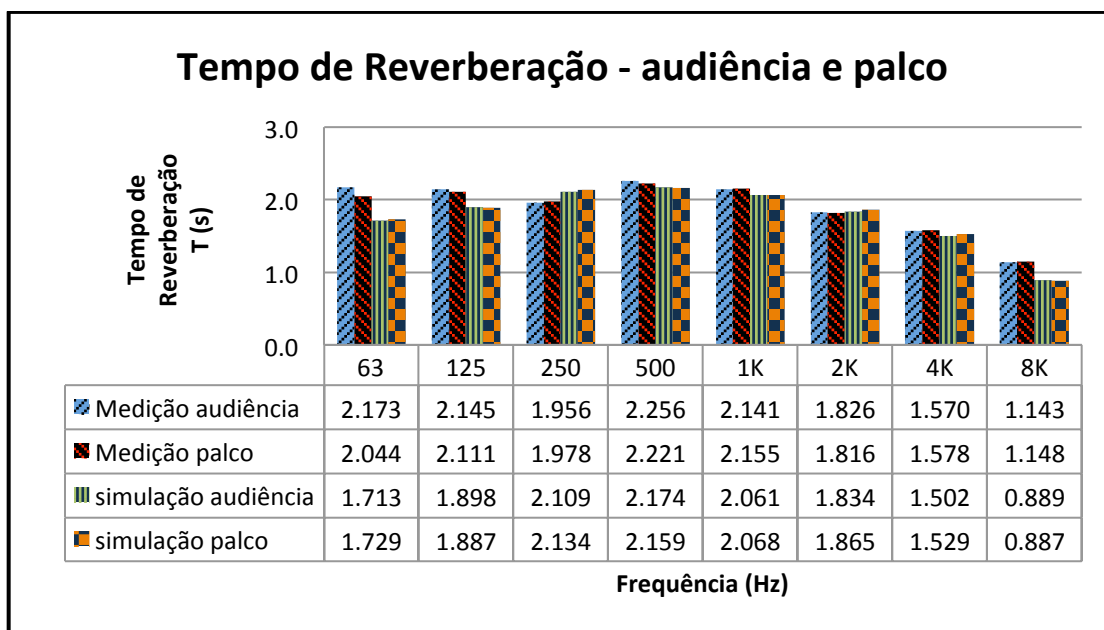


Figura 52 - Média dos Tempos de Reverberação - área da audiência (fontes F1 a F4 e receptores R1 a R4) e área do palco (fontes F1 a F4 e receptores R5, R8, R9 –excluídas F1R8, F2R8, F2R9 e F4R5).

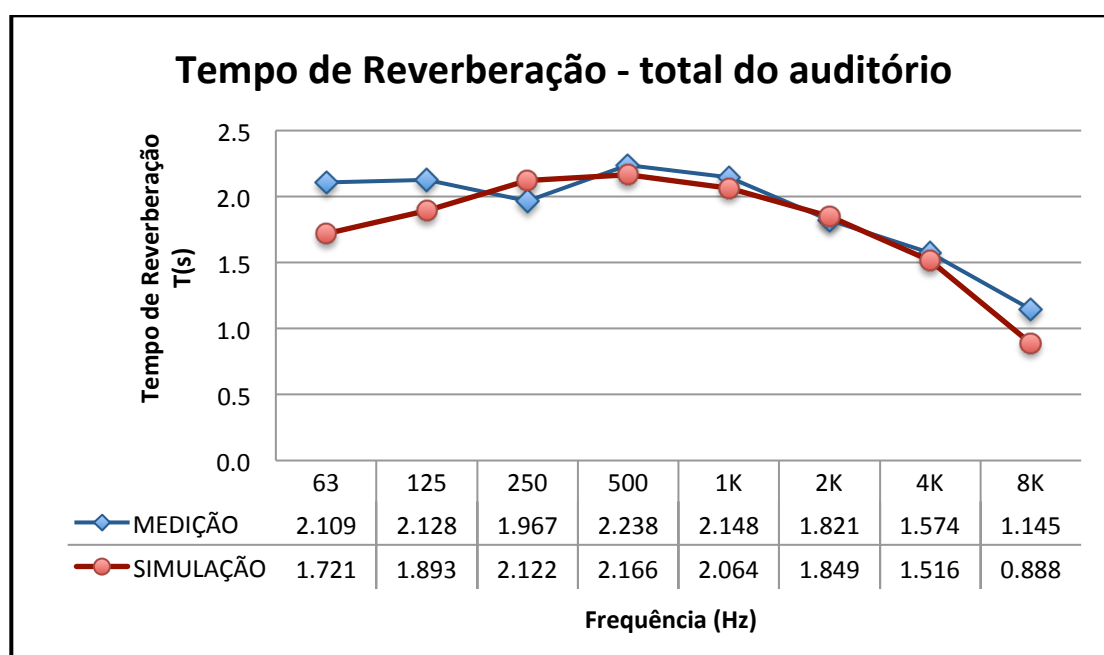


Figura 53 - Média total dos Tempos de Reverberação no auditório.

Desvio Padrão - T	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
MEDIÇÃO	0.167	0.121	0.067	0.055	0.036	0.023	0.017	0.013
SIMULAÇÃO	0.057	0.050	0.065	0.047	0.052	0.062	0.051	0.048

Tabela 2 - Desvio padrão do Tempo de Reverberação para todas as posições no auditório - medição e simulação.

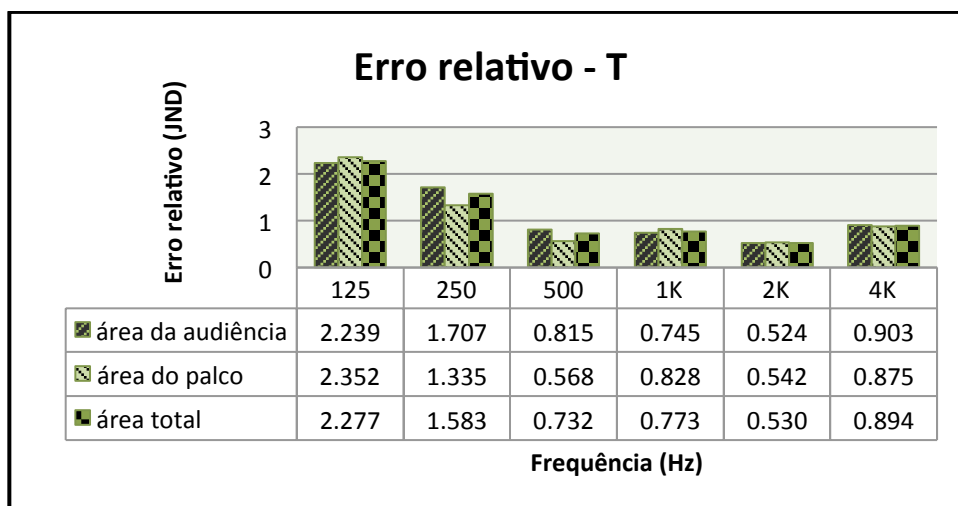


Figura 54 - Erro relativo do Tempo de Reverberação no auditório. Escala em JND⁴⁵.

Em relação à comparação entre medição e simulação, o erro está dentro do esperado, devido às limitações do método de traçado de raios para frequências graves e à baixa precisão dos coeficientes de absorção da biblioteca de materiais dos *softwares* de simulação, em frequências médias e graves. Artigos sobre a comparação de medição e modelo geralmente calculam o erro a partir das frequências médias (RINDEL; CHRISTENSEN; KOUTSOURIS, 2013: 13).

De maneira geral a sala apresenta um elevado tempo de reverberação. De acordo com a medição, se considerarmos as bandas de 63 Hz a 1 kHz, os tempos encontram-se muito próximos ou acima de 2 segundos. Entretanto, apesar da importância desse parâmetro, ele não é o único para avaliar a qualidade de uma sala. Sobretudo para um local que comporta formações e estilos musicais tão diversos. O auditório é amplamente utilizado durante o ano letivo da Escola de Música e abriga conjuntos que vão desde a música de câmara e recitais solos até a orquestra sinfônica, passando por performances de percussão, *big-band*, música acusmática, e conjuntos barrocos. Em conversas informais com diversos alunos e músicos que rotineiramente se apresentam no auditório, as opiniões sobre a quantidade de reverberação divergem. Formações menores, como a música de câmara, canto e piano e conjuntos barrocos costumam se adaptar melhor ao espaço.

⁴⁵ As bandas de frequência utilizadas para o erro relativo, de 125 Hz a 4 kHz, são as mesmas exigidas pela ISO/TC 3382-1: 2009 para o parâmetro Tempo de Reverberação (T).

Seria imprudente determinar um tempo de reverberação ideal para o auditório. Todavia é possível apontar algumas características e possíveis patologias com base na literatura.

Conforme mencionado na seção 1.6, os tempos de reverberação das salas de concerto do fim do séc. XIX até início do séc. XX, variam de 1,7 a 2,0 segundos (fig. 18, p.31), em frequências médias. Os valores são bem maiores que as salas do séc. XVII, descritas na seção 1.5 (fig. 17, p. 30), que variam de 1,0 a 1,7 segundos. Há inclusive uma estimativa de tempos de reverberação ideais, de acordo com o estilo de época das performances musicais:

Type of music (speech)	Recommended RT (s)
Organ music	>2.5
Romantic classical music	1.8–2.2
Early classical music	1.6–1.8
Opera	1.3–1.8
Chamber music	1.4–1.7
Drama theatre	0.7–1.0

Figura 55 - Tempos de Reverberação recomendados para salas ocupadas (RT = Tempo de Reverberação (T))
(BARRON, 2009 apud TOPA ET AL, 2012).

Os dados da figura acima são bastante abrangentes ao compararmos com as figuras já mencionadas. Afinal, os tempos de reverberação variam com o volume da sala e a área de absorção de materiais, de acordo com a fórmula de Sabine. Os valores indicados para as salas de ópera se aproximam daqueles constantes na figura 15 (p.26). Porém, há que se considerar que a tipologia da sala de ópera é bem menos variada que a da sala de concertos. A figura acima nos dá uma noção de que a voz e o texto, nos casos do teatro e da ópera, necessitam de um menor tempo de reverberação para uma melhor articulação do conteúdo e daí, progressivamente, maiores conjuntos musicais e uma menor necessidade de articulação permitem tempos maiores. Entretanto, de acordo com a figura 56, ainda é difícil concluir sobre um tempo de reverberação ideal:

Hall	V(m ³)	f(Hz)						Data Source
		125	250	500	1000	2000	4000	
Musikhochschule, Berlin	9 600	1.6	1.8	1.7	1.6	1.6	1.3	ITA
Konzertsaal, Turku	9 600	1.9	1.75	1.6	1.6	1.55	1.3	Beranek
Stadtkasino, Basel	10 500	2.2	2.0	1.8	1.6	1.5	1.4	Furrer
(Old) Queen's Hall, London	12 000	1.3	—	1.3	—	1.3	1.2	Parkin <i>et al.</i>
Saal d. Senders Freies, Berlin	12 500	2.3	2.2	2.0	1.9	1.8	1.4	ITA
Herkulesaal, Munich	13 400	2.1	1.8	2.0	2.0	1.9	1.6	Müller
Philharmonic, Liverpool	13 500	1.3	—	1.6	—	1.5	1.3	Parkin <i>et al.</i>
Neues Festspielhaus, Salzburg	14 000	1.7	1.6	1.5	1.5	1.4	1.3	Schwaiger
Musikvereinssaal, Vienna	14 600	2.4	2.4	2.2	2.1	2.0	1.3	Ravag, Vienna
Musikvereinssaal, Vienna	14 600	2.8	2.0	1.9	1.7	1.4	1.3	Bruckmayer
Academy of Music, Philadelphia	15 600	1.4	1.7	1.45	1.35	1.25	1.15	Beranek
Usher Hall, Edinburgh	15 700	1.9	—	1.8	—	1.6	1.5	Parkin
Liederhalle, Stuttgart	16 000	—	1.9	1.6	1.7	1.7	1.4	ITA
Beethovenhalle, Bonn	16 000	2.0	1.7	1.7	1.7	1.7	1.6	Meyer, Kuttruff
St. Andrew's Hall, Glasgow	16 100	2.1	—	2.2	—	2.1	2.0	Parkin <i>et al.</i>
(Old) Philharmonie, Berlin	18 000	2.6	2.5	1.9	1.9	1.9	1.7	Meyer, Jordan
Symphony Hall, Boston	18 800	2.2	2.0	1.8	1.8	1.7	1.5	Beranek
Concertgebouw, Amsterdam	19 000	2.25	2.25	2.2	2.2	1.9	1.7	Geluk
Mann-Auditorium, Tel-Aviv	21 250	1.55	1.5	1.55	1.55	1.5	1.3	Beranek
Royal Festival Hall, London ^a	22 000	1.4	1.5	1.5	1.5	1.4	1.3	Parkin
Meistersingerhalle, Nürnberg	23 000	2.2	2.05	2.05	1.9	1.7	1.5	Müller
Carnegie Hall, New York	24 300	1.8	1.8	1.8	1.6	1.6	1.4	Beranek
New Philharmonie, Berlin	24 500	2.4	2.0	1.9	2.0	1.9	1.7	ITA
De Doelen, Rotterdam	27 000	2.3	2.2	2.1	2.2	2.2	1.9	de Lange

Figura 56 – Tempos de Reverberação de salas de concerto ocupadas (CREMER, MÜLLER, 1982: 621).

Outra consideração importante para a análise do auditório da Escola de Música é que as estimativas apresentadas referem-se a salas ocupadas. Os valores apresentados para a medição e simulação do auditório são da sala vazia. Para uma estimativa do tempo de reverberação do auditório ocupado, utilizou-se a seguinte correção, a partir das equações de Schultz (BRADLEY, 1991: 1191):

Frequency (Hz)	DT (s)
125	0.510 RT-0.708
250	0.605 RT-0.867
500	0.668 RT-0.929
1000	0.696 RT-0.935
2000	0.694 RT-0.889
4000	0.652 RT-0.752

Figura 57 – Estimativa da mudança no Tempo de Reverberação com a sala ocupada, por banda de oitava (DT = tempo de difusão - *diffusion time*) (BRADLEY, 1991 apud TOPA ET AL, 2012).

Ao se aplicar a fórmula (Idem):

$$RT_o (T \text{ com a sala ocupada}) = RT - DT$$

(1)

obtem-se o seguinte resultado para a média das medições do auditório ocupado:

TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTIMADO COM A SALA OCUPADA (SCHULTZ)					
125	250	500	1K	2K	4K
1.764	1.649	1.672	1.587	1.448	1.299

Tabela 3 - Estimativa do Tempo de Reverberação do auditório ocupado, a partir dos dados da medição.

Outra estimativa realizada foi através da própria simulação acústica. Com a mudança de coeficientes de absorção nas áreas do palco e audiência no ODEON, obteve-se a seguinte média para o auditório ocupado:

TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTIMADO COM A SALA OCUPADA (ODEON)					
125	250	500	1K	2K	4K
1.707	1.647	1.595	1.440	1.290	1.117

Tabela 4 - Estimativa do Tempo de Reverberação do auditório ocupado - simulação no ODEON.

Para essa estimativa, os materiais utilizados foram: músicos com instrumentos no pódio (código 900); e público em assentos com estofamento médio (cód. 909) - para as áreas do palco e audiência, respectivamente, conforme a tabela que se segue. Para as outras superfícies, os demais materiais foram mantidos.

LISTA DE MATERIAIS NO ODEON PARA ESTIMATIVA DA SALA OCUPADA										
ÁREA DA SALA / REFERÊNCIA E COEFICIENTE DE ABSORÇÃO POR BANDA DE OITAVA	CÓD. ODEON	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	COEFICIENTE SCATTERING ESCOLHIDO
PALCO	900	<i>Orchestra with instruments on podium</i>								
		0.27	0.27	0.53	0.67	0.93	0.87	0.80	0.80	0.7
AUDIÊNCIA	909	<i>Audience, lightly upholstered seats.</i>								
		0.51	0.51	0.64	0.75	0.80	0.82	0.83	0.83	0.6

Tabela 5 - Materiais modificados no ODEON para a estimativa da sala ocupada.

A figura 18 (p. 31), da seção 1.6, demonstra que há outros fatores além do Tempo de Reverberação para uma análise da acústica de salas, pois a conformação do ambiente tem um efeito decisivo na distribuição do som. Em contraste com a forma das salas de ópera, por exemplo, a distribuição do público na sala de concertos proporciona um maior valor na razão entre volume da sala por quantidade de assentos, aumentando o Tempo de Reverberação (CREMER, MÜLLER, 2016: 619). Em uma sala com uma forma pouco usual como a do auditório da Escola de Música, de dimensões moderadas, com aproximadamente 120 lugares, não é prudente confiar plenamente em parâmetros de salas com mais de 1000 assentos. Além disso, seu pé-direito está em torno de 8 metros, ou seja, uma grande superfície de reflexão em relação à ocupação da sala que se dá praticamente a nível do solo. Conforme mencionado, o volume do auditório é de aproximadamente 1940 m³ e o gráfico da figura 58 sugere uma diminuição nos limites do Tempo de Reverberação com a diminuição do volume:

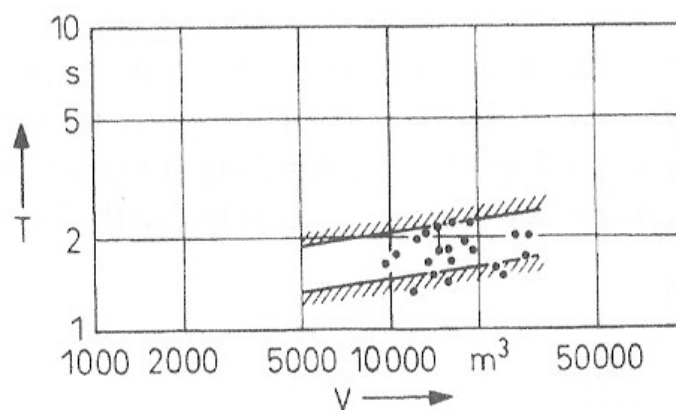


Figura 58 – Tempos de Reverberação mínimo e máximo para salas de concerto de acordo com seu volume (T = Tempo de Reverberação / V = Volume da sala) (Idem: 620).

Ademais, tanto a medição quanto a simulação indicam que só há uma redução do parâmetro a partir de 2 kHz. Comparativamente, as frequências graves e médias soam muito na sala, comprometendo frequências críticas como a região de 250 Hz, na transição do grave para o médio. Essa banda de frequências é também chamada de “*mudrange*”. Dentro da região que engloba a maior parte das notas fundamentais dos sons musicais, de 65,41 a 1046,50 Hz (C2 a C6), a banda de 250 Hz (aproximadamente de E3 a E4, passando pelo dó central)⁴⁶, é uma região geralmente de maior densidade sonora e que é facilmente mascarada por graves excessivos (MOULTON; BATZDORF, 2001: 32).

⁴⁶ Em um sistema fixo de solmização, C = dó e E = mi. O dó central, C4, localiza-se na quarta oitava do teclado de um piano.

6.2 Early Decay Time (EDT)

O EDT é calculado da mesma forma que o Tempo de Reverberação T, porém os limites de análise das curvas de decaimento são de 0 a -10 dB, extrapoladas posteriormente para -60 dB. Isso permite uma melhor investigação do comportamento da sala em resposta ao início do evento sonoro.

Na verdade, não há uma ampla variação do tempo de reverberação total de uma sala devido às particularidades de sua forma interna. O decaimento sonoro como um todo depende de um grande número de reflexões que possuem energias e atrasos diversos. Já o EDT é mais sensível à geometria interna do espaço, por estar relacionado às primeiras reflexões no ambiente. Ele é um fator determinante na sensação do ouvinte quanto a reverberação do espaço (KUTTRUFF, 2009:237).

A seguir, estão os dados comparativos referentes ao EDT do auditório:

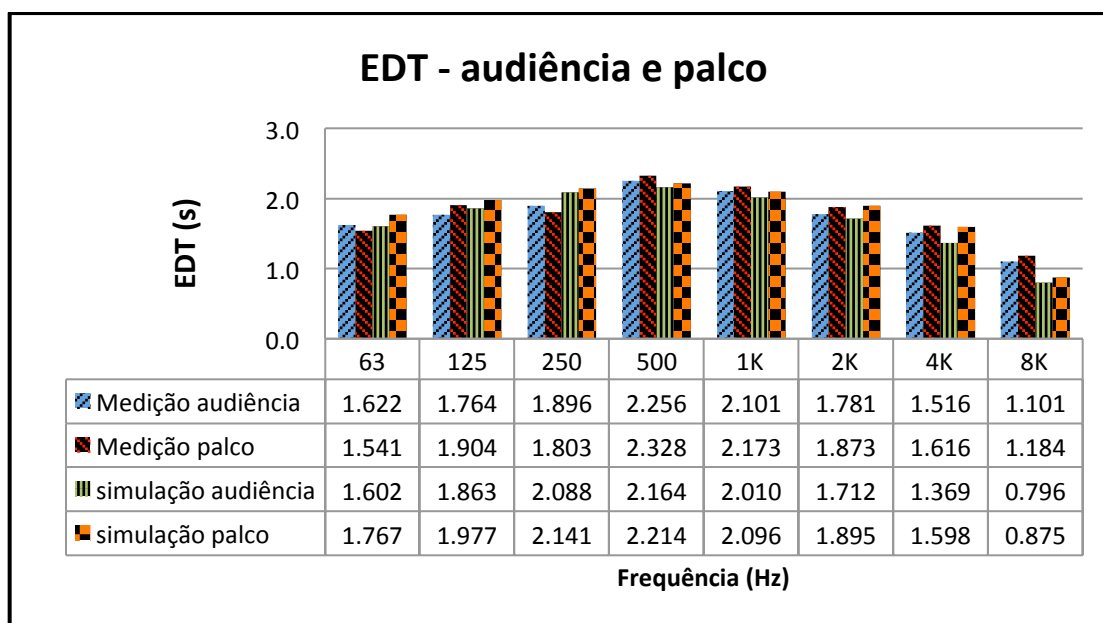


Figura 59 - Média dos *Early Decay Time* (EDT) – área da audiência (fontes F1 a F4 e receptores R1 a R4) e área do palco (fontes F1 a F4 e receptores R5, R8, R9 – excluídas F1R8, F2R8, F2R9 e F4R5).

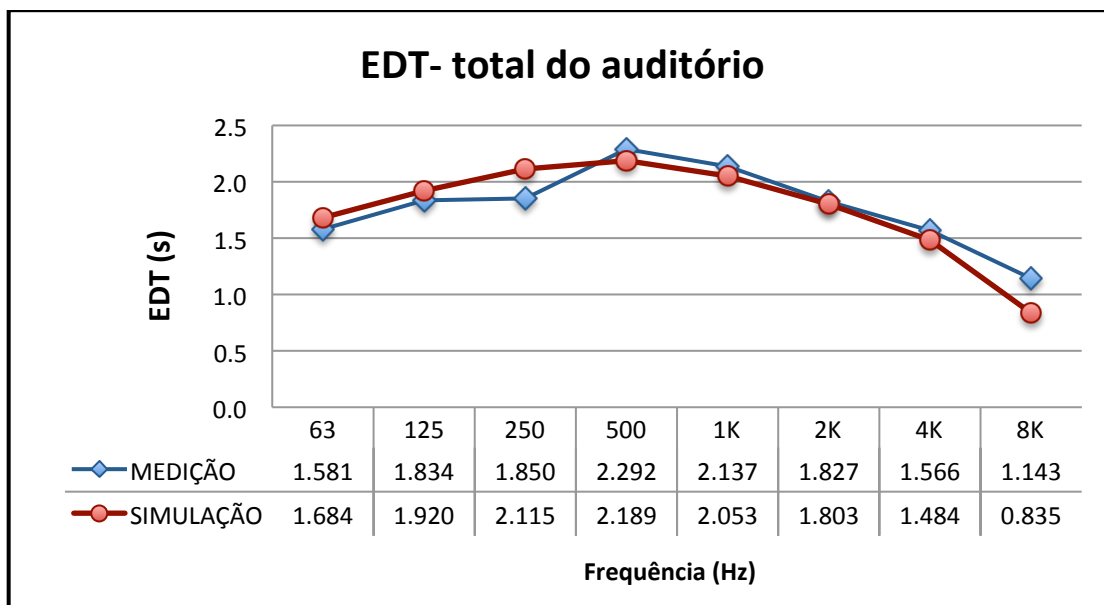


Figura 60 - Média total do *Early Decay Time* (EDT) no auditório.

Desvio Padrão - EDT	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
MEDIÇÃO	0.324	0.320	0.176	0.146	0.080	0.096	0.087	0.102
SIMULAÇÃO	0.139	0.150	0.121	0.090	0.131	0.175	0.211	0.324

Tabela 6 - Desvio padrão do *Early Decay Time* (EDT) para todas as posições no auditório - medição e simulação.

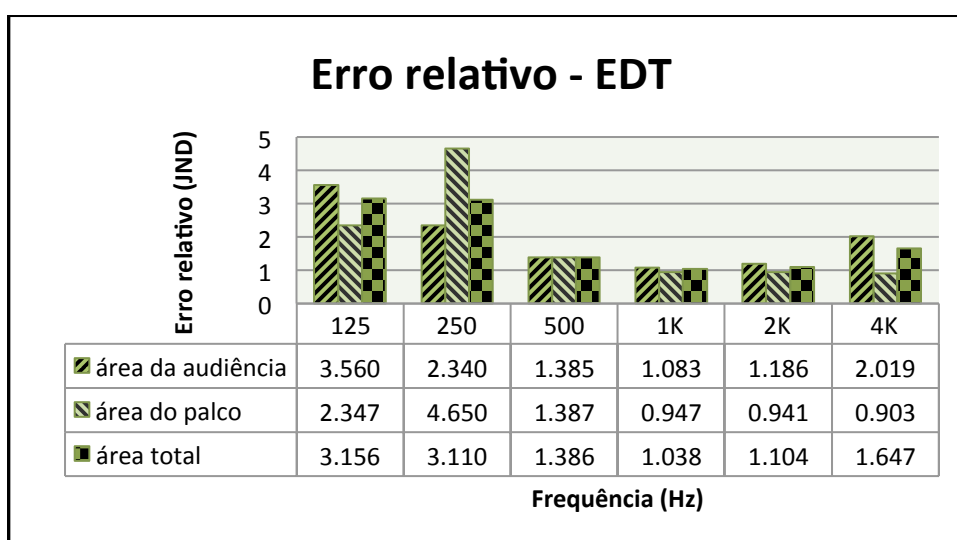


Figura 61 - Erro relativo do *Early Decay Time* (EDT) no auditório. Escala em JND⁴⁷.

⁴⁷ Idem nota 44 (p. 102).

A razão EDT/T (*Early Decay Time* e Tempo de Reverberação) nas frequências médias é um bom indicador para avaliar se o ambiente tem um som mais direto ou difuso em seu interior. Valores entre 0.8 e 1.1 indicam uma boa distribuição sonora (TOPA et al, 2012):

EDT / T		
	500	1K
MEDIÇÃO	1.024	0.995
SIMULAÇÃO	1.010	0.994

Tabela 7 - EDT/T - Média total do auditório nas bandas de frequência de 500 Hz e 1 kHz.

Em salas sem a presença do público, os valores do EDT costumam ser bem próximos aos do Tempo de Reverberação (T), nas bandas de frequência de 125 Hz a 4 kHz (BERANEK, 2004: 506). Nos dados comparativos do auditório, é possível observar essa relação a partir da banda de 500 Hz. Isso poderia indicar que a persistência das frequências médias-graves no parâmetro T, ao contrário do que ocorre no EDT, se dá na reverberação tardia do ambiente.

6.3 Clareza (C80)

O parâmetro Cte indica a diferença entre a energia inicial e a tardia do total da energia sonora entre fonte e receptor. Ele pode ser calculado para um tempo inicial de 50 ou 80 ms de acordo com a fórmula (ISO/TC 3382, 2009):

$$C_{80} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} dB$$

Onde:

te = limite do tempo inicial para 50 ou 80 ms

p(t) = pressão sonora instantânea da resposta ao impulso medida no ponto.

A escala é em dB e o valores típicos variam de -5 dB a + 5 dB

Para a análise de parâmetros foi considerado o C80, que é relacionado às condições de espaços para a música. De acordo com a norma, o *te* de 50 ms é empregado em espaços destinados à fala e ao discurso em apresentações. O limite maior para esse tempo inicial está relacionado ao fato de que uma reflexão de um som musical no interior de uma sala é menos detectável que a do som da fala. Testes subjetivos apontam que uma C80 = 0 dB é suficiente para passagens musicais rápidas em sons orquestrais, entretanto um valor de até -3 dB é ainda aceitável (KUTTRUFF: 225). Já para o canto, os valores ideais estão entre 1 e 5 dB (TOPA et al, 2012).

De forma geral, esse parâmetro está inversamente relacionado com o Tempo de Reverberação e, assim, salas mais reverberantes apresentam valores negativos. É um difícil equilíbrio, pois espaços com maior clareza certamente terão menores tempos de reverberação, o que pode afetar a sensação de envolvimento sonoro pelo ouvinte e o seu próprio conforto.

Maior clareza sonora em detrimento do tempo de reverberação não significa sempre uma boa troca. Estudos mostram que os valores para a Clareza podem ser diferentes em situações específicas. Durante os ensaios, os regentes geralmente expressam satisfação em ambientes com maior clareza, com valores de C80 entre +1 e

+5 dB. Já para o concerto, tanto o regente quanto público costumam preferir valores entre -1 dB e -5 dB (BERANEK, 2004: 527).

Para o cálculo do C80, a ISO/TC 3382 sugere uma média entre as bandas de 500 Hz e 1 kHz, mas esse alcance foi estendido para as bandas vizinhas, para uma melhor análise de regiões críticas na percepção de sons musicais. Incluindo a banda de 250 Hz, conforme mencionada na página 107; e também a de 2 kHz, por ser uma região de definição sonora e de maior conteúdo harmônico e identificadores espectrais de diversos instrumentos (MOULTON; BATZDORF, 2001: 32).

As figuras 62 e 63 indicam o parâmetro C80 nas áreas da audiência e do palco, com a comparação entre medição e simulação, seguidas do desvio padrão, na tabela 8, e seu erro relativo na figura 64. Além disso, foi comparada a Clareza na posição usual do regente, R5, em performances de orquestra sinfônica – figura 65.

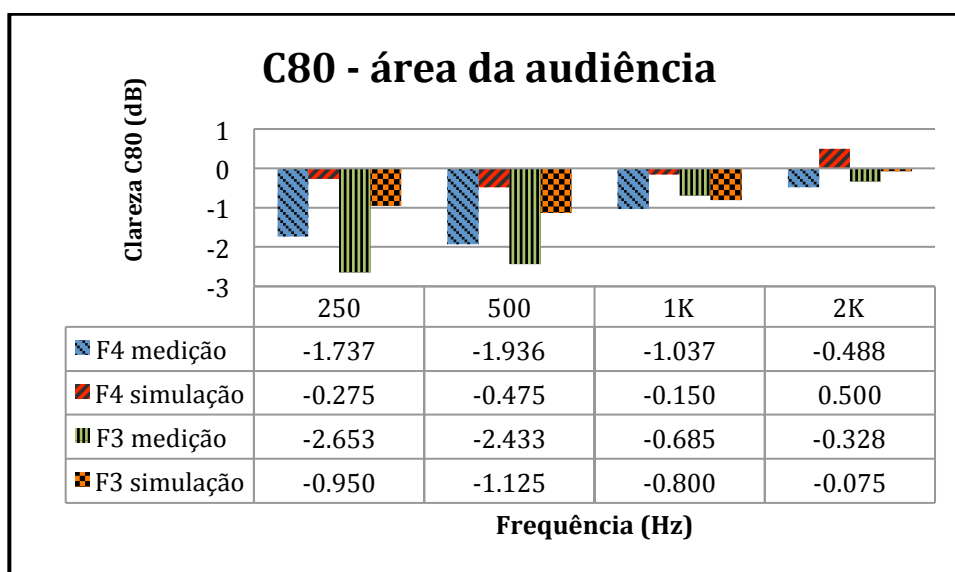


Figura 62 - Média da Clareza (C80) na área da audiência. Fontes F3 e F4 e Receptores R1 a R4.

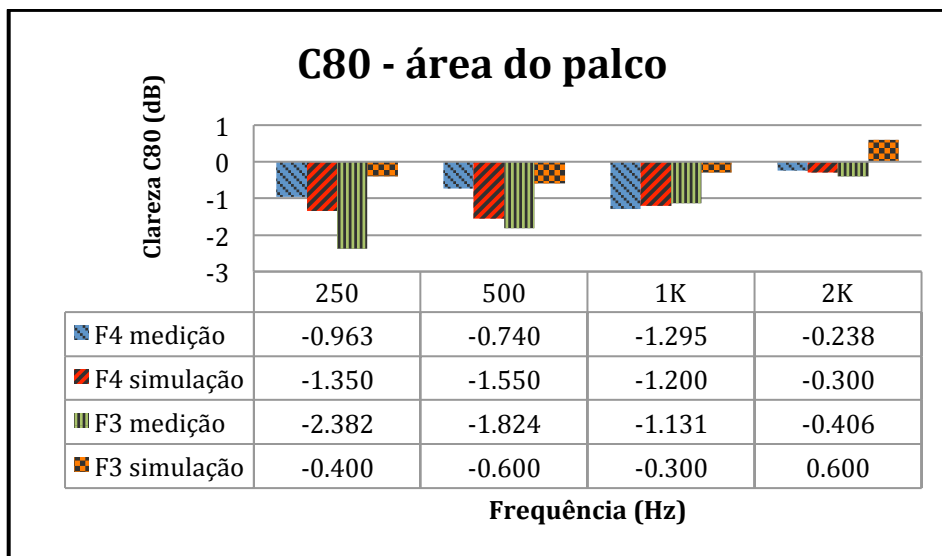


Figura 63 - Média da Clareza (C80) na área do palco. Fontes F3 e F4 e Receptores R8 e R9.

Desvio Padrão - C80	250	500	1K	2K
MEDIÇÃO	1.630	0.995	1.014	0.766
SIMULAÇÃO	0.677	0.711	0.738	0.735

Tabela 8 - Desvio padrão da Clareza (C80) para todas as posições no auditório - medição e simulação.

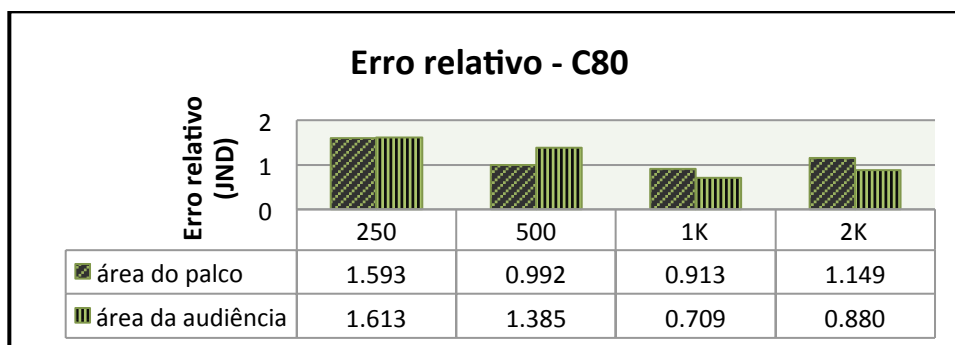


Figura 64 - Erro relativo da Clareza (C80) no auditório (escala em JND).

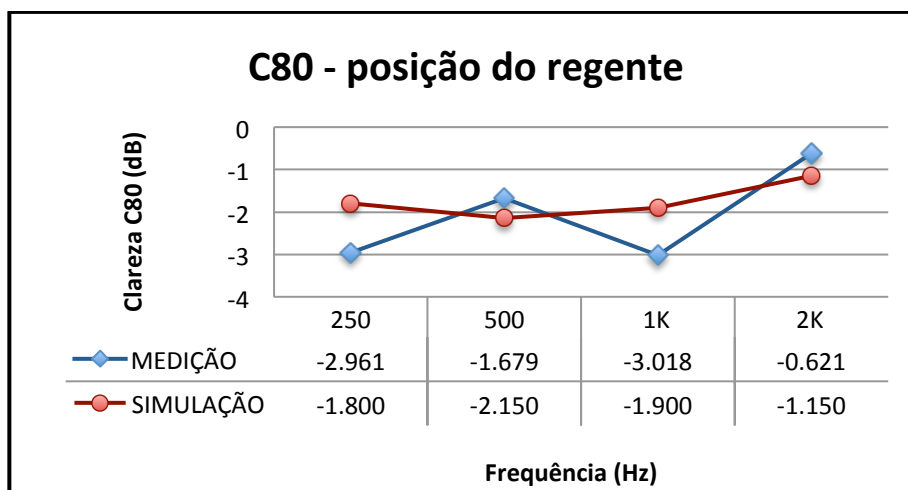


Figura 65 - Média da Clareza (C80) na posição do regente. Fontes F2 e Receptor R5.

Consoante aos valores de T, o auditório tem menor clareza na faixa crítica de 250 Hz. Os valores obtidos com o C80 para a área da audiência auxiliam no entendimento do comportamento da reverberação, pois enquanto os valores deste parâmetro se mantêm elevados de 250 Hz até 2 kHz, é possível averiguar um aumento gradual da clareza nas faixas apresentadas, principalmente na medição a partir F3 (com exceção de F4, na área do palco). Além disso, a clareza é menor na medição do que na simulação nas bandas de 250 e 500 Hz. Esses valores se aproximam a partir de 1kHz.

6.4 Tempo central (Ts)

Este parâmetro corresponde ao centro de gravidade do quadrado da resposta ao impulso. O Ts é calculado em milissegundos e evita a divisão da resposta em períodos inicial e tardio, para demonstrar em que ponto se dá essa divisão. Para os espaços destinados a performance musical, os valores típicos encontram-se entre 70 e 150 ms, na banda de oitava de 1 kHz (TOPA et al., 2012).

Estão representados abaixo os valores do Ts e o seu erro relativo para as bandas de 500 Hz e 1 kHz:

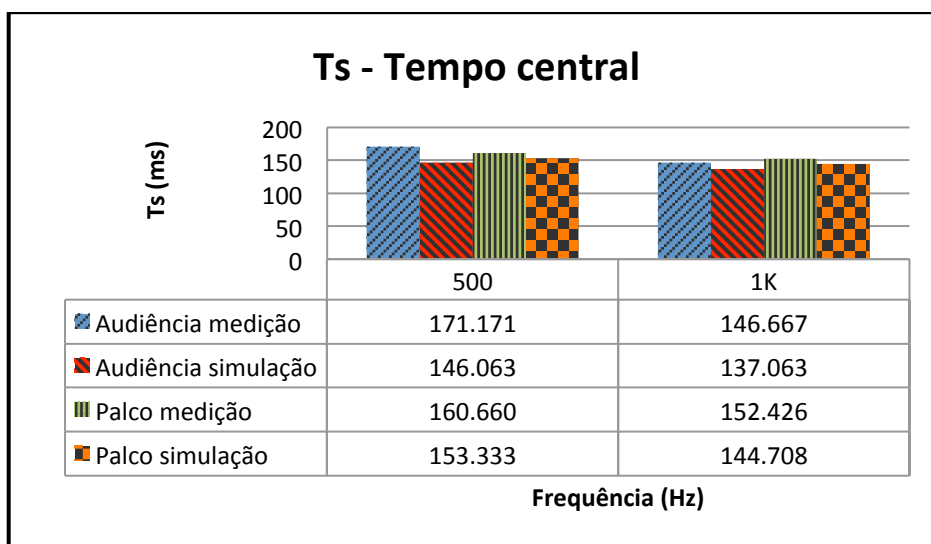


Figura 66 - Média do Tempo Central (Ts) – área da audiência (fontes F1 a F4 e receptores R1 a R4) e área do palco (fontes F1 a F4 e receptores R5, R8, R9 –excluídas F1R8, F2R8, F2R9 e F4R5).

Desvio Padrão - Ts	500	1K
MEDIÇÃO	10.839	11.919
SIMULAÇÃO	8.123	8.246

Tabela 9 - Desvio padrão do Tempo Central (Ts) para todas as posições no auditório – medição e simulação.

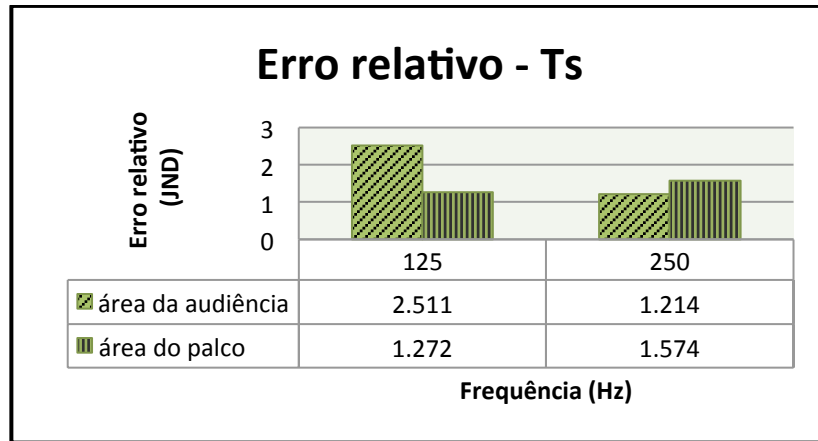


Figura 67 - Erro relativo do Tempo Central (Ts) no auditório. Escala em JND.

Para a banda de 1 kHz, é possível verificar que o Ts está no limite superior do desejado para espaços da música, o que sugere que há bastante energia ainda na região de transição entre a resposta inicial e a tardia. Entretanto, os valores do erro do Ts, entre medição e simulação, indicam sua proximidade. Este é um parâmetro passível de maior divergência, visto que os *softwares* de simulação acústica utilizam métodos híbridos para a construção da resposta ao impulso. Nesse caso, o *ray tracing* e o método das fontes virtuais são utilizados até uma certa ordem de reflexões. No ODEON, a parte tardia da resposta ao impulso é construída a partir de fontes secundárias que independem do receptor, conforme mencionado na seção 4.2.

6.5 Interaural Cross-Correlation (IACC)

Este parâmetro é utilizado para a avaliação das características de espacialização do som dentro do ambiente. A partir da diferença entre a pressão sonora captada entre um ouvido e o outro, é possível estimar o nível de espacialização da fonte sonora na área da audiência de uma sala. Entretanto, a impressão espacial depende de mais de um parâmetro subjetivo, sendo que os principais são o ASW (*Apparent Source Width*), ao qual o IACC está relacionado, e o LEV (*listener envelopment*), que será tratado no capítulo seguinte (KUTTRUFF, 2009: 241). Uma boa conotação do ASW poderia ser o quanto o ambiente “alarga” a sensação da fonte sonora.

Para a medição do IACC é necessário utilizar um microfone *dummy head* ou similar, como o empregado na medição do auditório. O parâmetro é calculado através das equações abaixo, a partir da integração da resposta ao impulso medida em cada orelha do microfone (ISO/TC 3382, 2009):

$$\text{IACF}_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_e(t) \cdot p_d(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_e^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_d^2(t) dt}}$$

$$\text{IACC}_{t_1, t_2} = \max |\text{IACF}_{t_1, t_2}| \quad (-1 \text{ ms} < \tau < 1 \text{ ms})$$

Onde:

$p_e(t)$ é a resposta ao impulso na entrada do canal do ouvido esquerdo;

$p_d(t)$ é a resposta ao impulso na entrada do canal do ouvido direito;

O IACC é obtido com a máxima do valor absoluto com $|\tau| < 1$ ms.

O JND para o IACC é 0,075.

O IACC pode ser calculado para o tempo total de reverberação, ou para a parte inicial do som, até 80 ou 100 ms. Optou-se pelo cálculo do parâmetro até os 80 ms, o denominado IACC_E (E = *early sound*). Ao contrário do anterior, este permanece praticamente o mesmo com a sala ocupada ou vazia (BERANEK, 2004: 510). Isso permite uma avaliação mais fidedigna à espacialização do ambiente em seu uso normal.

De forma similar aos parâmetros anteriores, foi realizada a comparação com a simulação e o cálculo do erro. Porém, a versão do ODEON utilizada não calcula o IACC. Assim, as respostas binaurais geradas virtualmente foram exportadas para o Audacity para o cálculo desse parâmetro com o Aurora, da mesma forma que uma resposta ao impulso obtida com a medição.

Os valores para o IACC encontram-se em torno de 0,3 para salas de concerto consideradas excelentes. Ou seja, ele é relacionado negativamente com a sensação de espacialização sonora, visto que quanto maior a correlação entre os lados direito e esquerdo, maior é a sensação de simetria entre os planos laterais do ouvinte (KUTTRUFF, 2009: 240).

Beranek utiliza um indexador diferente para este parâmetro, denominado BQI – *Binaural Quality Index*. É uma subclassificação do IACC_E, segundo a fórmula (BERANEK, 2004: 508):

$$BQI = 1 - IACC_{E3}$$

Onde o IACC_{E3} é o IACC *early* obtido com a média dos valores nas bandas de oitava de 500 Hz a 2 kHz.

A subtração de 1 indica que a indexação zero representa a ausência de reflexões laterais. Somente as bandas de frequência médias são consideradas, pois a região mais sensível da audição para perceber essas diferenças está entre 350 e 2850 Hz. Nas salas de concerto mais bem avaliadas, a similaridade dos sons entre os ouvidos é muito baixa e os valores do BQI estão acima de 0,6 (BERANEK, 2004: 508).

Entretanto os parâmetros de espacialização medidos sofrem flutuações consideráveis com pequenas alterações de posição e direcionalidade do microfone (DE VRIES et al, 2001). Tanto a literatura quanto a norma sugerem a necessidade de mais estudos na área. Por isso, para o cálculo desse parâmetro no auditório, optou-se por uma média dos receptores somente na área da audiência (R1 a R4), a partir das fontes localizadas em cima do tablado (F1 a F3). Os dados obtidos, representados nas figuras a seguir, sugerem uma excelente espacialização. Porém, não foi encontrada na literatura a informação sobre valores tão altos de BQI (ou tão baixos de IACC). Isso poderia sugerir

que os valores geralmente obtidos em salas de concerto de volumes maiores não são aplicáveis em um espaço como o auditório, ou que a diferença encontrada está realmente no limite da espacialização, o que causaria uma grande sensação de difusão da fonte sonora.

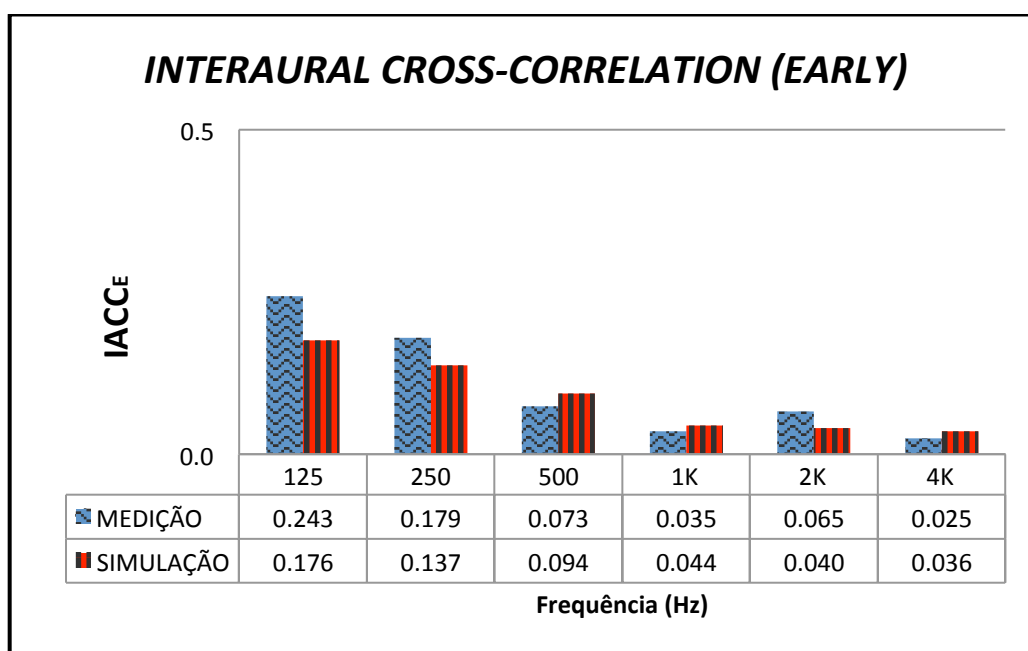


Figura 68 - Média do *Interaural Cross-Correlation (early)* - IACCe - na área da audiência (fontes F1 a F3 e receptores R1 a R4).

Desvio Padrão - IACCe	125	250	500	1K	2K	4K
MEDIÇÃO	0.083	0.072	0.026	0.012	0.036	0.005
SIMULAÇÃO	0.061	0.051	0.031	0.013	0.012	0.007

Tabela 10 - Desvio padrão do *Interaural Cross-Correlation (early)* - IACCe - na área da audiência (fontes F1 a F3 e receptores R1 a R4), medição e simulação.

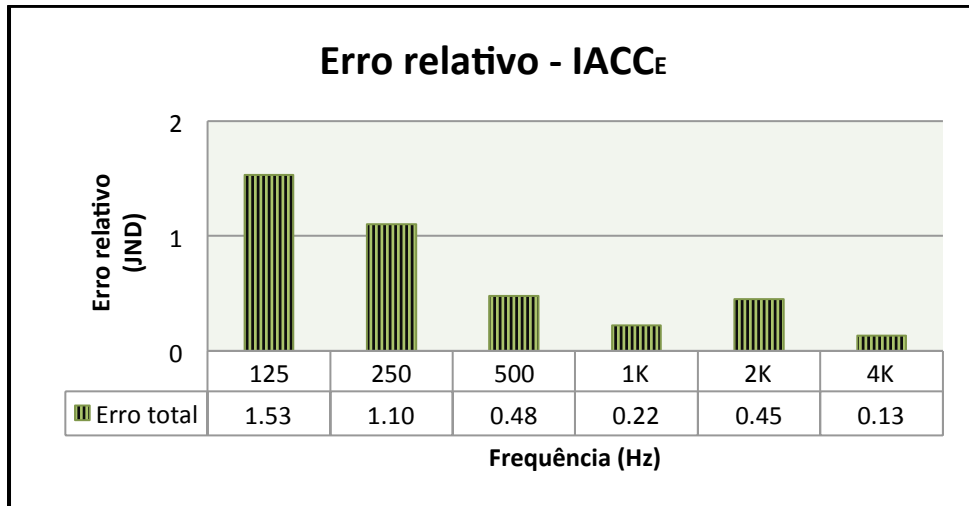


Figura 69 - Erro relativo do *Interaural Cross-Correlation (early)* - IACC_E - na área da audiência. Escala em JND.

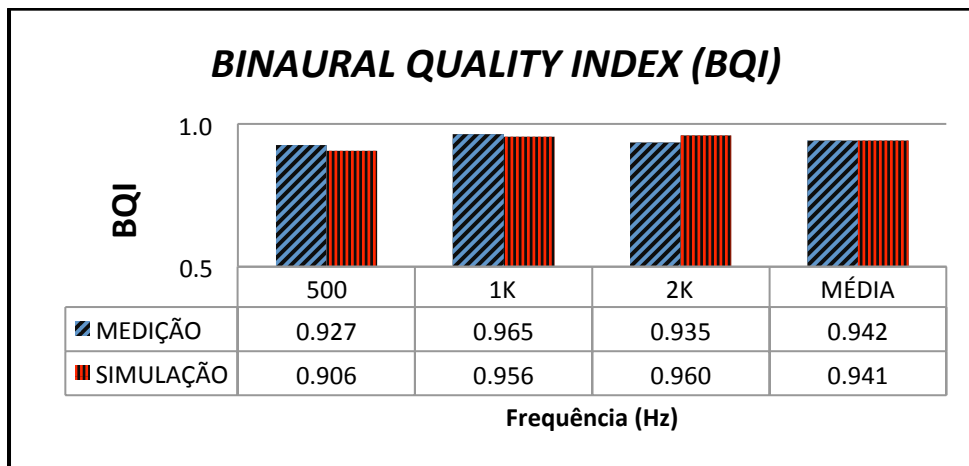


Figura 70 - *Binaural Quality Index (BQI)* na área da audiência (fontes F1 a F3 e receptores R1 a R4).

6.6 Nível de Som (L, G) e outros parâmetros espaciais

Conforme mencionado na introdução do capítulo 6, alguns parâmetros não foram medidos devido às restrições do equipamento utilizado. No caso, os parâmetros *Lateral Energy Fraction* (LF80) e *Late Lateral Energy* (LG80) dependiam da utilização de um microfone Figure-8, disposto perpendicularmente ao microfone omnidirecional mono apontado para a fonte. Ele captaria as reflexões laterais em cada posição. Além disso, para o LG80, e também para o Nível de Som (L), era necessária a aferição do equipamento em um campo livre ou câmara anecoica para a obtenção do valor de G – Nível Sonoro (*Sound Strength*⁴⁸).

Devido à proximidade entre os resultados da medição e da simulação na maior parte dos parâmetros, nas bandas de frequência de 500 Hz a 4 kHz, foram incluídos cálculos de LEF, LG80 e G de forma gráfica (*Grid*), nas superfícies da audiência e do palco. O intuito é fornecer maiores informações sobre a acústica no auditório, apesar da impossibilidade de comparação.

6.6.1 *Lateral Energy Fraction* - LEF (LF80)

Da mesma forma que o IACC, o *Lateral Energy Fraction* está relacionado como o parâmetro subjetivo ASW (*Apparent Source Width*). É calculado a partir do ângulo das reflexões laterais nos primeiros 80 ms. A contribuição da reflexão lateral para a espacialidade é proporcional à sua energia e ao cosseno do ângulo entre o eixo do ouvido e a direção da incidência sonora, entre 5 e 80 ms. Os valores típicos variam de 0 a 0,5 (BARRON apud KUTTRUFF, 2009, 240).

⁴⁸ O nível de som pode ser obtido a partir da resposta ao impulso como os outros parâmetros, porém a calibração permite a subtração da resposta do equipamento em um espaço onde não há influência das reflexões. É medido com o microfone a uma distância de 10 m da fonte (ISO/TC 3382-2009). No ODEON, é possível simular essa situação com um ajuste de +31 dB/oitava de ganho nas fontes virtuais (CHRISTENSEN; KOUTSOURIS, 2013: 88).

Como o padrão do microfone Figure-8, bi-direcional, é proporcional ao cosseno do ângulo de incidência ($\cos 90^\circ = 0$ - posição onde é colocado perpendicularmente o microfone mono), no cálculo da equação abaixo basta inserir o valor da resposta obtida no microfone no numerador. O ODEON simula essas características nos receptores virtuais. O *Lateral Energy Fraction* é calculado a partir da equação (ISO/TC 3382, 2009):

$$LEF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} [p^2(t) \cos^2 \theta] dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}$$

Onde:

$p^2(t)$ é a pressão sonora instantânea no ponto de medição

LEF = *Lateral Energy Fraction*

O LF80 apresenta valores baixos em locais próximos a fontes sonoras, que aumentam na vizinhança das paredes laterais. Salas retangulares e mais estreitas geralmente tem uma melhor distribuição da espacialidade lateral, ao contrário de espaços de audiência espalhados (*fan-shaped halls*) (KUTTRUFF, 2009: 301).

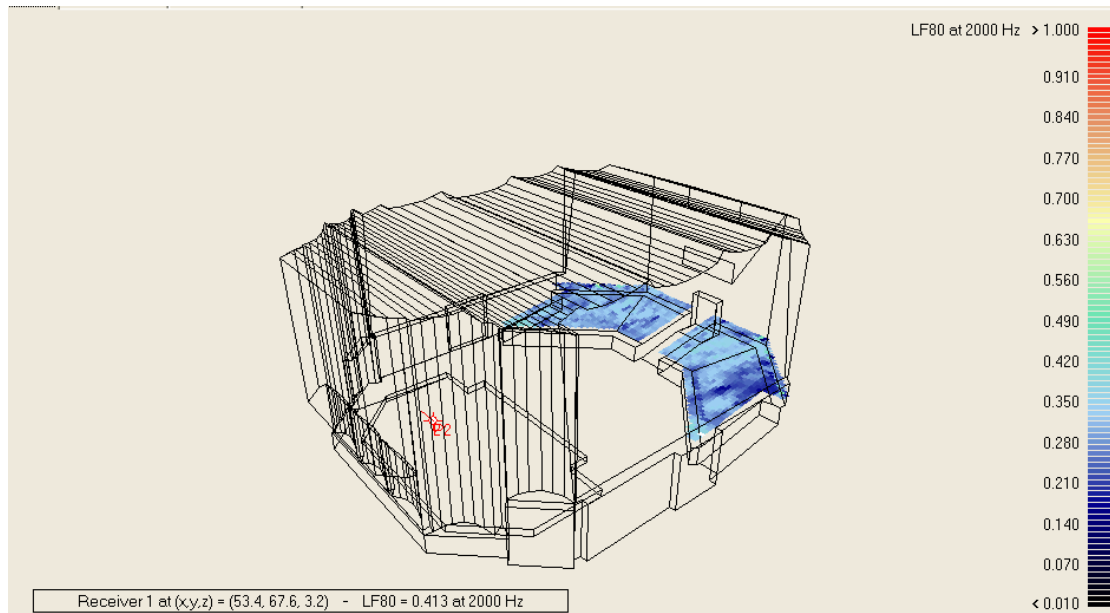
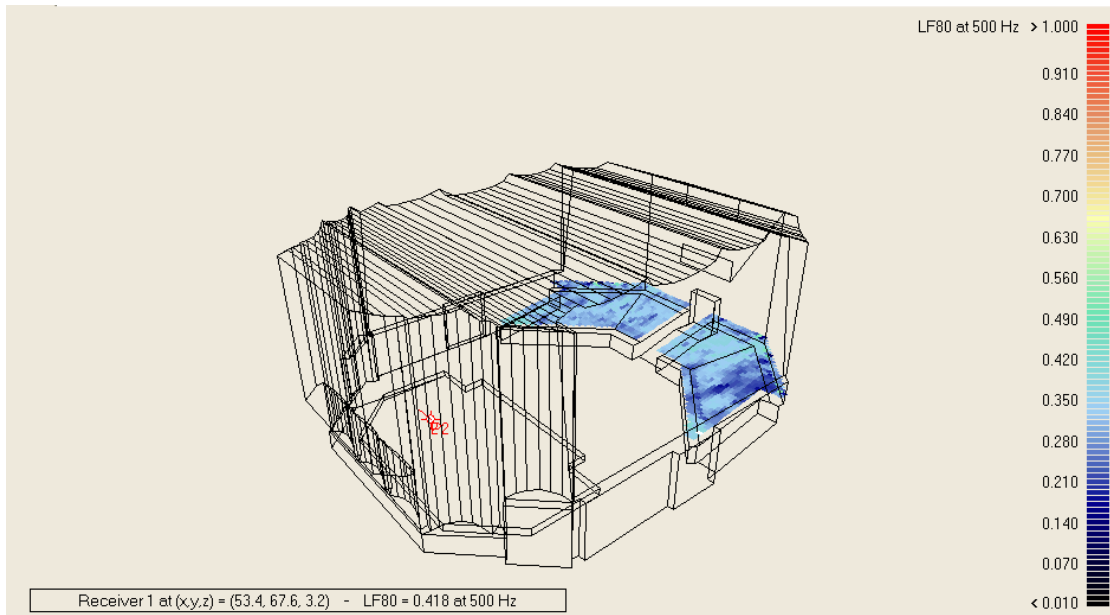


Figura 71 – Resposta em Grid da Lateral Energy Fraction (LF80) na área na audiência a partir de F1 (ponto em vermelho na área do palco). Bandas de frequência de 500 Hz e 2 kHz.

Os resultados do LEF, na figura acima, indicam que a distribuição espacial é regular na área da audiência, nas duas bandas de frequência apresentadas. Ela tende a piorar em locais próximos às paredes laterais e de fundo. Possivelmente, devido à ausência de materiais difusores. Na audiência direita⁴⁹, o parâmetro se mostra um pouco melhor do que na esquerda, mas essa diferença pode indicar uma pequena variação no cálculo executado pelo do software.

⁴⁹ À direita do ouvinte que olha para o palco. Será mantida essa nomenclatura para os outros parâmetros a seguir, em áreas referentes à plateia.

6.6.2 Late Lateral Energy (LG80)

Um outro parâmetro subjetivo importante na impressão espacial da sala é o LG80. Refere-se às reflexões tardias no ambiente e está relacionado com a sensação de envolvimento do ouvinte (LEV – *Listener Envelopment*). É medido com o mesmo arranjo de microfones do LF80, porém a sensação de envolvimento com o som pelo ouvinte depende significativamente do nível sonoro dessas reflexões. É calculado pela seguinte equação (ISO/TC 3382, 2009):

$$LG80 = 10 \lg \frac{\int_{80ms}^{\infty} p_l^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_c^2(t) dt}$$

Onde:

p_l – é a pressão sonora instantânea na resposta ao impulso medida com um microfone Figure-8;

p_c – é a pressão sonora instantânea na resposta ao impulso medida com um microfone omnidirecional a uma distância de 10m em um campo livre;
- os valores variam de -20 a 2 dB em salas de grande volumes. O valor mínimo corresponde à falta de envolvimento pelo ouvinte.

- o resultado é a média das bandas de frequência de 125 Hz a 1 kHz.

Novamente, é necessário ponderar sobre o tamanho do auditório em relação à escala desse parâmetro encontrada na literatura (KUTTRUFF, 2009: 242). As considerações sobre nível sonoro geral do ambiente serão tratadas no subcapítulo referente ao parâmetro G. Entretanto, de modo geral a distribuição desse parâmetro é ainda mais regular em toda a área da audiência do que no caso do LF80, de acordo com a figura 72.

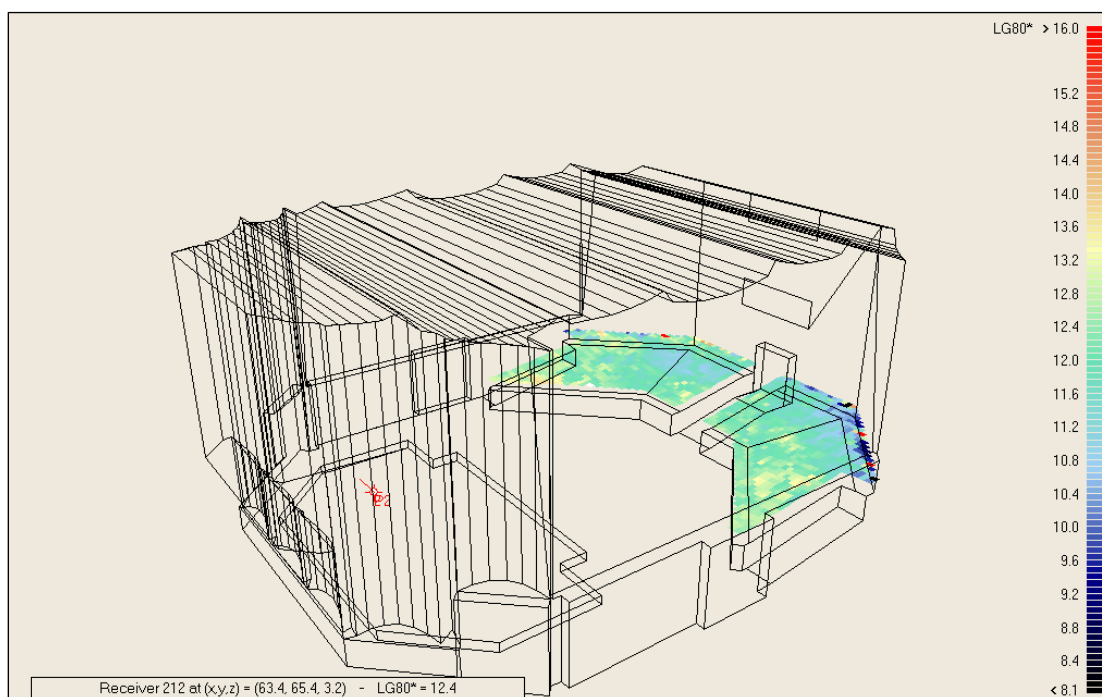


Figura 72 – Resposta em Grid da Late Lateral Energy (LG80) na área na audiência a partir de F1 (ponto em vermelho na área do palco). Média das bandas de frequência de 125 Hz a 1 kHz. Valores em dB.

6.6.3 Initial Time Delay Gap (ITDG)

O ITDG (*Initial Time Delay Gap*) é o único parâmetro dentre os aqui apresentados que não é integrado a partir da resposta ao impulso⁵⁰. Refere-se ao espaço de tempo, em milissegundos, entre o som inicial e a sua primeira reflexão. É obtido por medição direta na resposta ao impulso, como na figura abaixo:

⁵⁰ O cálculo dos parâmetros não considera o espaço de tempo que antecede a captação do som. De acordo com a norma ISO/TC 3382, isso ocorre mesmo em parâmetros como a Clareza (C80), que dependem da quantidade de energia recebida nos primeiros 80 ms, em comparação com a energia do tempo restante do evento sonoro.

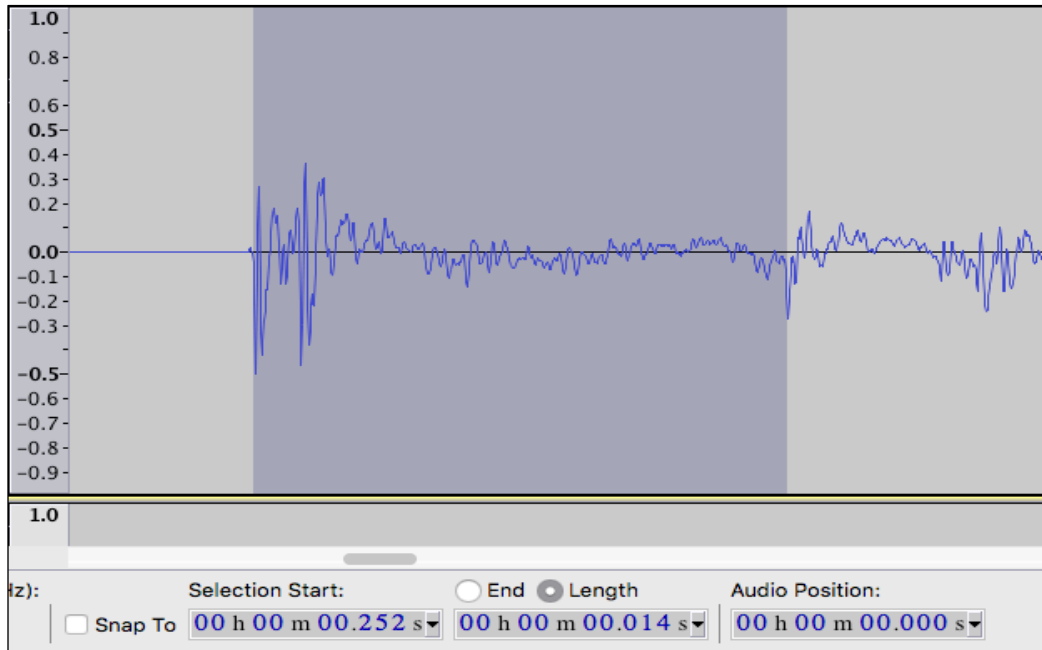


Figura 73 - *Initial Time Delay Gap (ITDG)* de 14 ms medido no auditório - posição F2R1.

Abaixo estão alguns valores de ITDG em posições no auditório:

ITDG (ms)						
	F1R1	F1R4	F2R3	F3R2	F3R4	F4R2
MEDIÇÃO	16	8	10	13	11	13
SIMULAÇÃO	10	8	10	13	6	12

Tabela 11- *Initial Time Delay Gap (ITDG)* em algumas posições na área da audiência.

Os valores de ITDG considerados ideais estão entre 12 e 21 ms, para salas de concerto. Porém, deve ser considerada a dimensão longitudinal do auditório de Escola de Música, com aproximadamente 18 m. Os valores encontrados para o auditório na tabela acima indicam uma boa sensação de intimismo, o que parece estar de acordo com o conceito da disposição do seu espaço interno, que aproxima músicos e ouvintes. Entretanto, apesar da boa distribuição e difusão sonora no espaço, os níveis de som chamam atenção, conforme será visto a seguir.

6.6.4 Nível Sonoro (*Strength - G*)

A densidade de energia produzida por uma fonte sonora em uma sala não figurava como uma qualidade acústica do ambiente até pouco tempo atrás. Entretanto, percebeu-se que níveis elevados de Clareza não correspondem necessariamente a uma boa experiência para o ouvinte, caso o som não alcance um nível sonoro adequado. Se a pressão sonora no interior de um ambiente deve refletir as suas propriedades e não a da fonte, referindo-se ao som que a sala não dissipa, é necessária uma certa normalização do equipamento. Essa pressão sonora deve ser calculada considerando-se o nível sonoro do equipamento, medido em um campo livre, a uma distância de 10m.

Como já mencionado, os parâmetros que contemplam o Nível de Som no interior do auditório foram obtidos através da simulação acústica. Nesse cenário, o LG80 e o G, apresentam valores elevados de pressão sonora. Vale observar que esses parâmetros não estão necessariamente ligados ao Tempo de Reverberação ou à Clareza, pois ambientes com valores similares de T e C80 podem apresentar dinâmicas diferentes.

Em salas maiores, com mais de 2000 assentos, com uma boa dinâmica, o decaimento de pressão sonora a partir do seu centro até o final da área da audiência é de até 5 dB. Nesses casos, considera-se que a pressão sonora já sofreu uma diminuição até o centro da sala, devido à absorção da área da audiência. Desse ponto, o baixo decaimento de 5 dB depende da conformação do auditório, que deve ter boas reflexões iniciais, preferencialmente laterais (BERANEK, 2004: 511).

Os valores de G são calculados pela seguinte equação (ISO/TC 3382, 2009):

$$G = 10 \lg \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} pc^2(t) dt}$$

Onde:

p - é a pressão sonora instantânea na resposta ao impulso no ponto de medição;

pc - é a pressão sonora instantânea na resposta ao impulso medida com um microfone omnidirecional a uma distância de 10 m em uma câmara anecoica ou em um campo livre;

No caso do auditório, há um decaimento de 11 dB no nível sonoro, a partir de F1 para a área da audiência. Se considerarmos que na simulação o som inicial tinha 31 dB de ganho⁵¹, os resultados mostrados a seguir apontam para uma média próxima de 20 dB no parâmetro G e de 13 dB nas reflexões laterais tardias (LG80). Entretanto, a fonte F1 e a área da audiência estão em lados opostos do auditório. Se considerarmos uma maior pressão sonora na fonte, esse decaimento não parece suficiente.

No auditório, a área da audiência não se inicia logo no limite da área do palco, como é comum em salas de concerto. Assim, o som praticamente não encontra superfícies absorvedoras na parte central da sala. É possível visualizar na figura a seguir que, mesmo com a proximidade da fonte, o decaimento na área do palco, a partir de F4, é bem mais rápido que na área da audiência, apesar da pressão sonora se distribuir bem nas duas áreas. Entretanto, em performances de grupos maiores como a orquestra sinfônica e a *big band*, permanece a sensação, tanto para músicos quanto para o público, de que há som demais no interior do auditório.

⁵¹ ver nota 47 (p. 121).

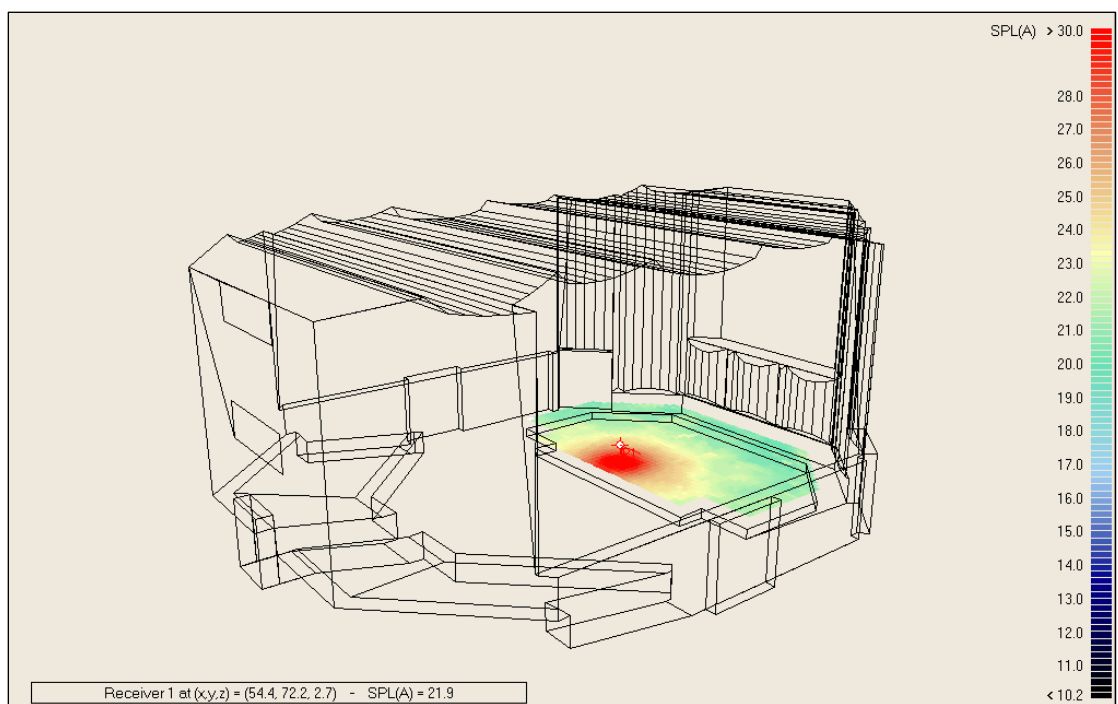
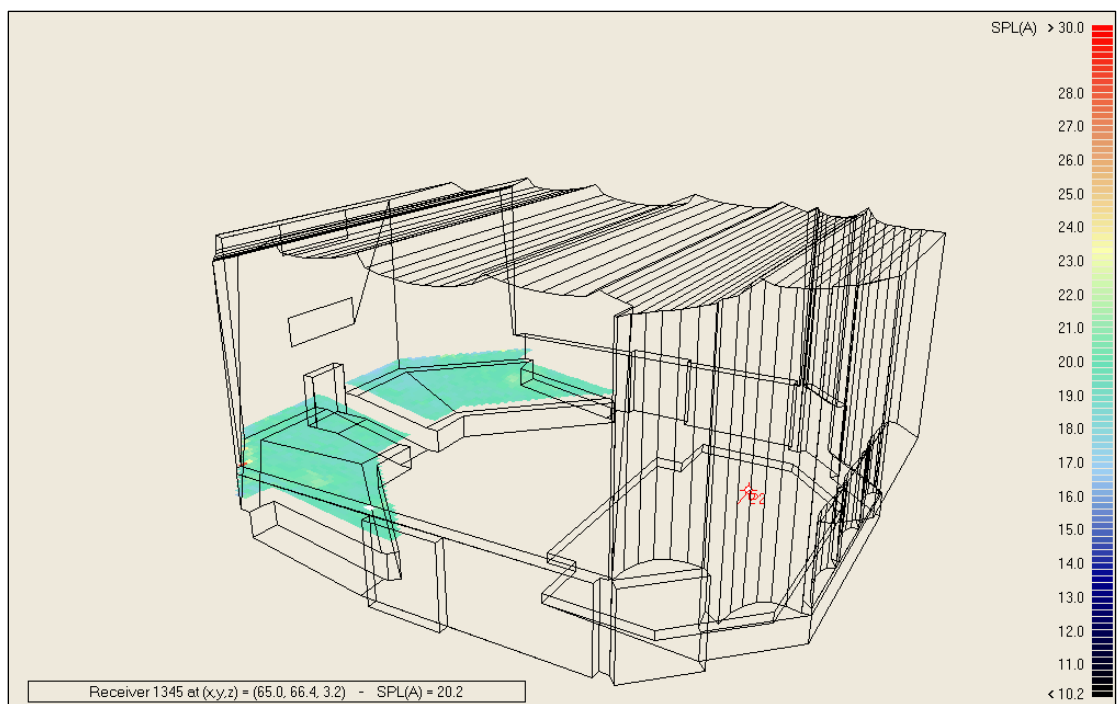


Figura 74 – Resposta em Grid do Nível Sonoro (*Strength - G*) na área da audiência (a partir de F1) e na área do palco (a partir de F4). Valores em dB.

7. Resultados II: auralização de diferentes excertos musicais

A separação por bandas de oitava, ou por terços de oitava, dos parâmetros acústicos está de acordo com a norma técnica que rege a medição acústica e a quantificação desses parâmetros para os espaços da performance, a ISO 3382: 2009. Entretanto, mesmo que essa representação gráfica e numérica acompanhe um nível crescente de precisão tecnológica, com novos equipamentos e metodologias de quantificação acústica, ela carece de uma aproximação do comportamento real do som em uma sala.

Testes psicoacústicos relacionados a esses parâmetros normalmente contam com um questionário, com adjetivos opostos para a descrição do som⁵², e todo um aparato tecnológico para tentar reproduzir o som de uma sala em um ambiente controlado (FARINA, 2004: 9, 11). Dessa forma, é possível comparar as respostas ao impulso de várias salas, obtidas por medição, com as mesmas amostras anecoicas através da convolução. Ou, o teste pode ser realizado *in loco*, com essas amostras reproduzidas no interior da sala. As duas situações apresentam limitações. Na primeira, existe a dificuldade de se reproduzir um ambiente no interior de outro. Além disso, por melhor que seja o equipamento sonoro e o tratamento da sala de audição, a resposta ao impulso ainda é uma representação do ambiente real. Na segunda, há a impossibilidade de comparação imediata com outros ambientes (IAZZETTA; FIGUEIREDO; MASIERO: 2004: 5). Em ambos, há o problema de direcionalidade da fonte, pois os sons reais, de instrumentos ou da voz, não tem o mesmo padrão omnidirecional dos alto-falantes dodecaedros utilizados para a geração de sinal no ambiente.

No presente estudo, nos limitamos a realizar a auralização de uma seleção de trechos musicais que apresenta grande variedade de ocupação espectral, e comparar a distribuição de energia por oitavas das três versões: (1) gravação anecoica, e resultados da convolução desta gravação com as respostas ao impulso (2) do modelo, e (3) da medição. Estes resultados servirão de ponto de partida para um posterior uso artístico dessas respostas ao impulso.

⁵² No artigo citado, os pares de critérios subjetivos utilizados, em uma escala de 1 a 5, foram: “*Pleasant-Unpleasant*”, “*Round-Sharp*”, “*Soft-Hard*”, “*Diffuse-Localizable*”, “*Detached-Enveloping*”, “*Dry-Reverberant*”, “*Treble boosted-Treble reduced*”, “*Bass boosted-Bass reduced*”, “*Quiet-Loud*” (FARINA, 2004: 9).

As convoluções foram realizadas no software Audacity, com a ferramenta *Aurora Convolver*. As filtragens foram programadas em Max-Msp, no domínio da frequência, através do agrupamento de *bins* da transformada rápida de Fourier (2048 amostras) para cada uma das 10 oitavas do espectro audível. O valor RMS (em dBFS) do sinal de cada oitava foi calculado para cada 2048 pontos, com *hop size* de 512. Devido ao uso da transformada rápida de Fourier, que exige uma potência de 2 como número de amostras, as frequências centrais de cada oitava não são as mesmas utilizadas na ISO 3382-1: 2009. Enquanto estas são representadas pela nota dó, em nosso caso podem ser aproximadas à nota sib nas oitavas superiores (e a nota mi na 1a. oitava), fato que acreditamos não impedir uma possível comparação entre os resultados.

As amostras utilizadas foram extraídas em sua maior parte da biblioteca de amostras anecoicas que acompanham o software ODEON (também disponíveis em www.odeon.dk), de uma bateria eletrônica tocada no software Kontakt, e de uma amostra de tímpanos (da primeira sinfonia de Mahler), disponibilizada pelo *Department of Media Technology*, Universidade de Aalto, Finlândia⁵³.

As fontes sonoras escolhidas foram: solistas (piccolo, flauta, tuba, voz masculina, voz feminina, tímpanos), um duo (fagote e clarineta) e um set completo de bateria. As auralizações dos excertos musicais, a partir da medição e da simulação, estão disponíveis no CD anexo a esta dissertação⁵⁴. As respostas ao impulso escolhidas foram as relativas à fonte 1 e receptor 5 (posição F1R5 - ver figura 48, p. 93). Os gráficos representam somente um canal da resposta binaural obtida com o microfone *dummy head* na medição, e com a simulação binaural virtual do Odeon. Nos dois casos, foi escolhido o canal direito da resposta ao impulso para ser utilizado como filtro na convolução⁵⁵.

As figuras a seguir trazem as curvas de valores RMS em cada oitava, contendo as três versões na seguinte ordem: gravação anecoica, auralização via simulação, auralização via medição.

⁵³ Disponível em: <http://research.cs.aalto.fi/acoustics/virtual-acoustics/research/acoustic-measurement-and-analysis/85-anechoic-recordings.html>. Acesso em 11 jul. 2017.

⁵⁴ As auralizações dos excertos musicais também podem ser ouvidas através do link: <https://drive.google.com/drive/folders/0B7SZq17EH1uqeGcxMlo0UVNuaEE?usp=sharing>. Acesso em 11 jul. 2017.

⁵⁵ Foram utilizados a aproximação de fase aleatória e o filtro HTRF da Kemar *dummy head*, ajuste conforme a figura 38, p.71.

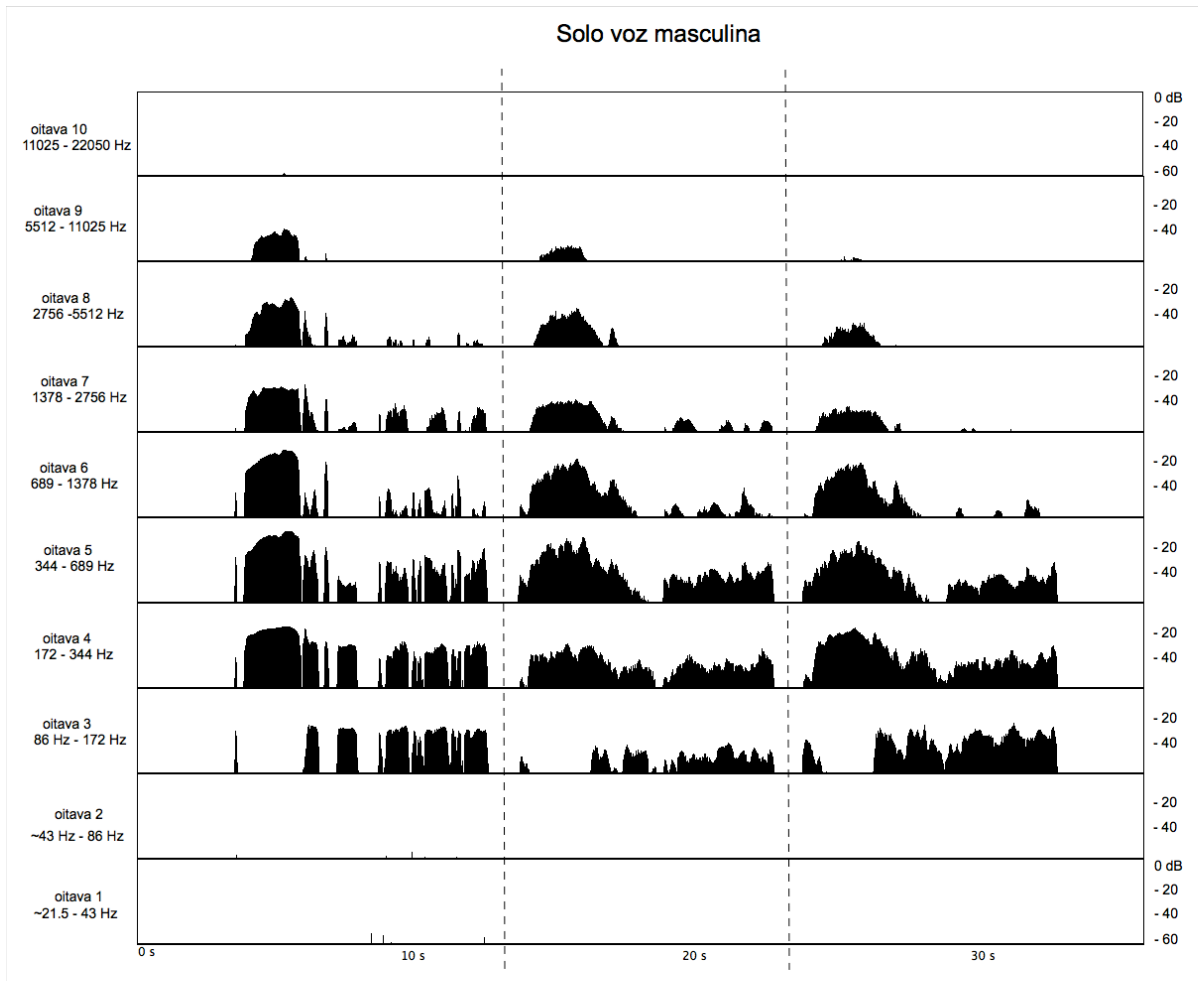


Figura 75 - Curvas de valores RMS em 10 oitavas, posição F1R5. Amostra da voz masculina solo, com três versões na seguinte ordem: gravação anecoica, auralização via simulação, auralização via medição.

No excerto com voz masculina cantada (fig. 75), podemos observar algumas características comuns à maioria das auralizações analisadas: (1) claro efeito da reverberação sobre as notas *staccatto*, cuja energia pontual é temporalmente dilatada; (2) na 3ª oitava, a curva da medição apresenta energia superior à da simulação, aproximando-se da amostra anecoica; (3) a amostra gerada pela medição apresenta perda significativa de energia nas oitavas superiores.

No duo de clarineta e fagote (fig. 76), pode-se notar mais claramente as diferenças relativas à 3ª oitava, e uma queda de energia da medição já na 6ª oitava. Na tuba, esta queda de energia na 6ª oitava é significativa. Nos tímpanos, esta diferença já pode ser notada a partir da quinta oitava (figs. 77 e 78).

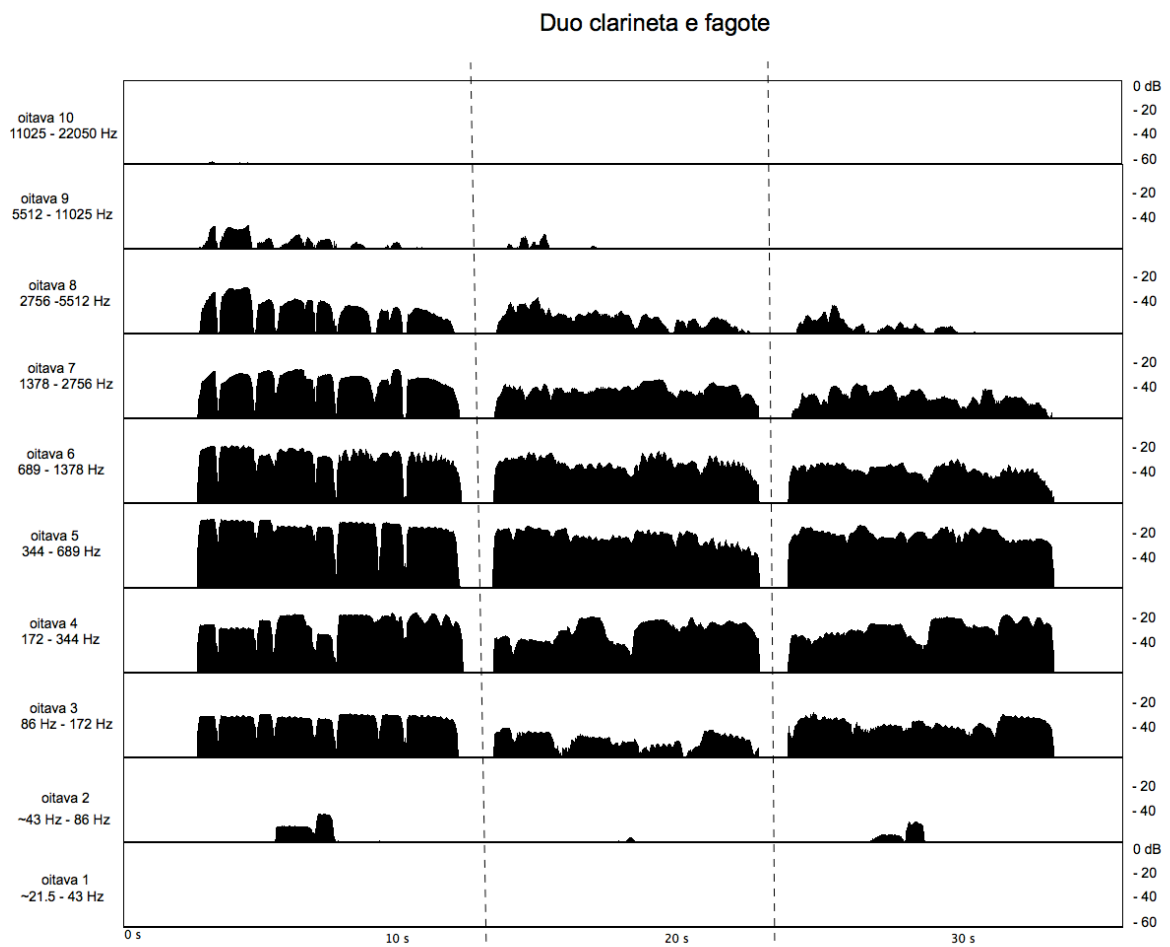


Figura 76 - Curvas de valores RMS em 10 oitavas, posição F1R5. Amostra do duo de clarinete e fagote, com três versões na seguinte ordem: gravação anecoica, auralização via simulação, auralização via medição.

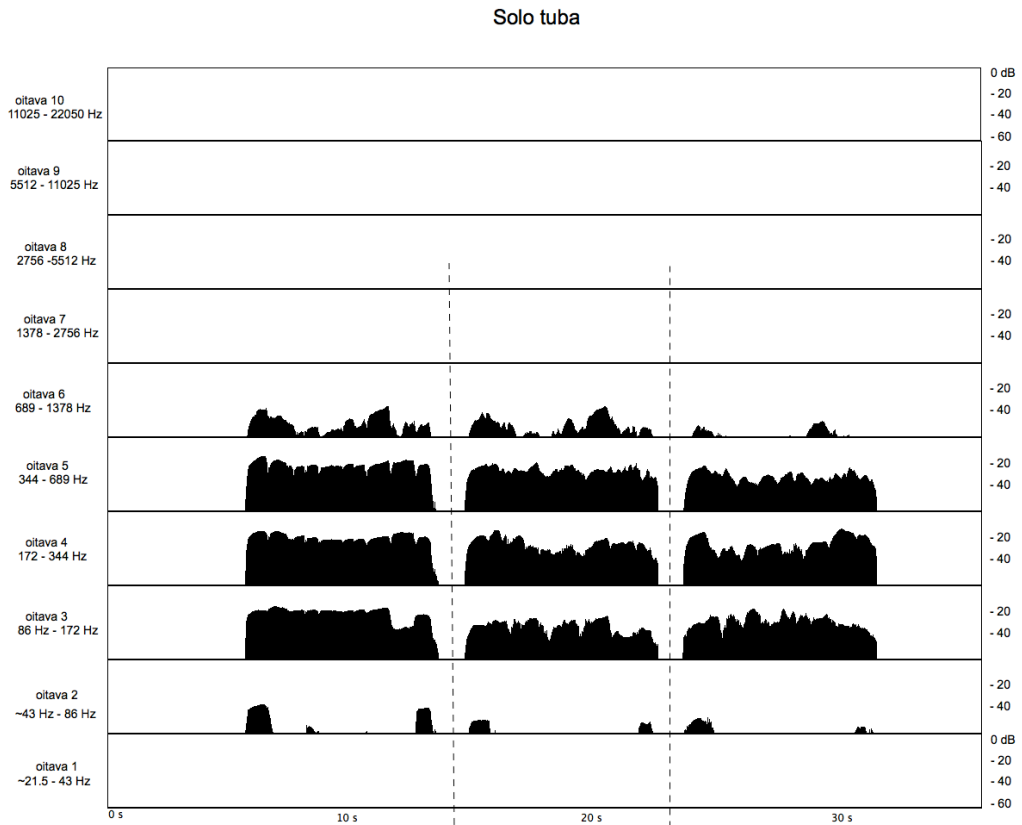


Figura 77 - Curvas de valores RMS em 10 oitavas, posição F1R5. Amostra da tuba solo, com três versões na seguinte ordem: gravação anecoica, auralização via simulação, auralização via medição.

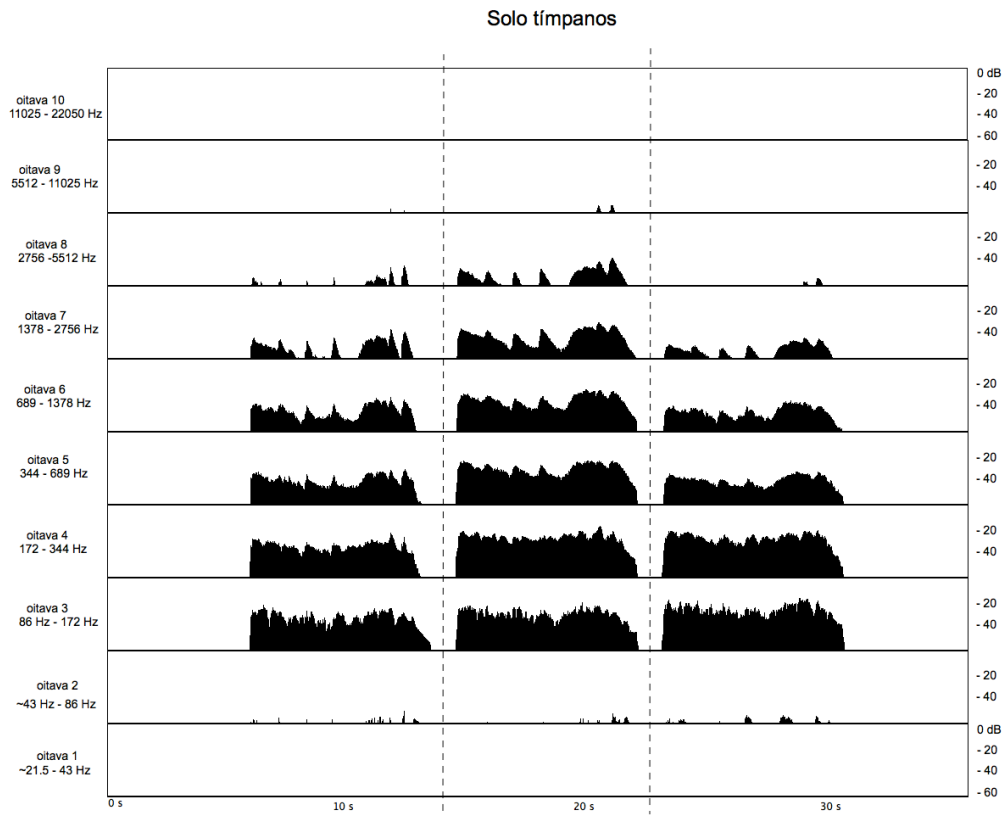


Figura 78 - Curvas de valores RMS em 10 oitavas, posição F1R5. Amostra do tímpano solo, com três versões na seguinte ordem: gravação anecoica, auralização via simulação, auralização via medição.

Por outro lado, na flauta as diferenças significativas de energia surgem apenas a partir da 8ª oitava (fig. 79). Para o piccolo e a voz feminina, essas diferenças são mais marcantes a partir da 9ª oitava (figs 80 e 81). No caso da voz feminina, os resultados para simulação e medição são muito próximos.

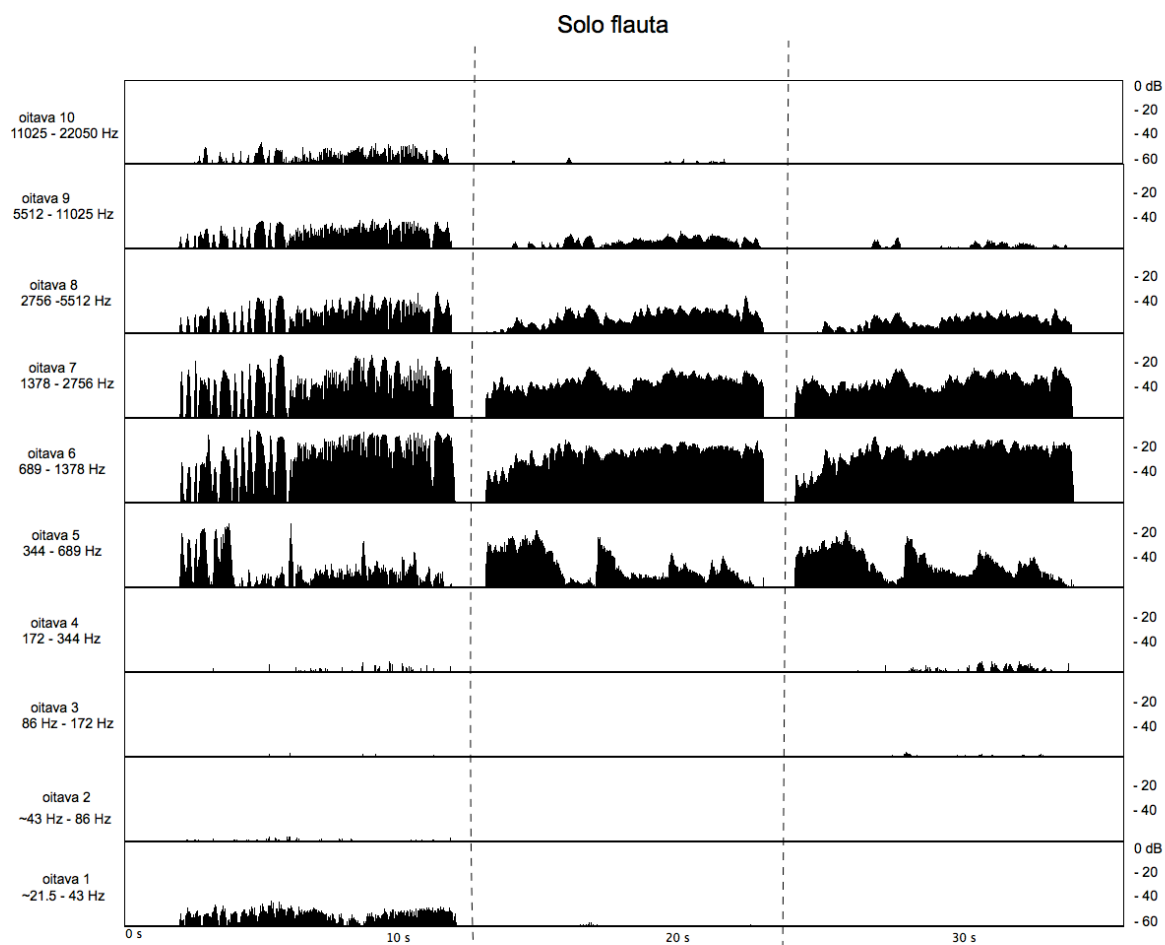


Figura 79 - Curvas de valores RMS em 10 oitavas, posição F1R5. Amostra da flauta solo, com três versões na seguinte ordem: gravação anecoica, auralização via simulação, auralização via medição⁵⁶.

⁵⁶ A amostra anecoica da flauta não deveria apresentar energia na primeira oitava no gráfico, o que possivelmente é causado por ruídos causados no mecanismo de gravação da amostra anecoica original.

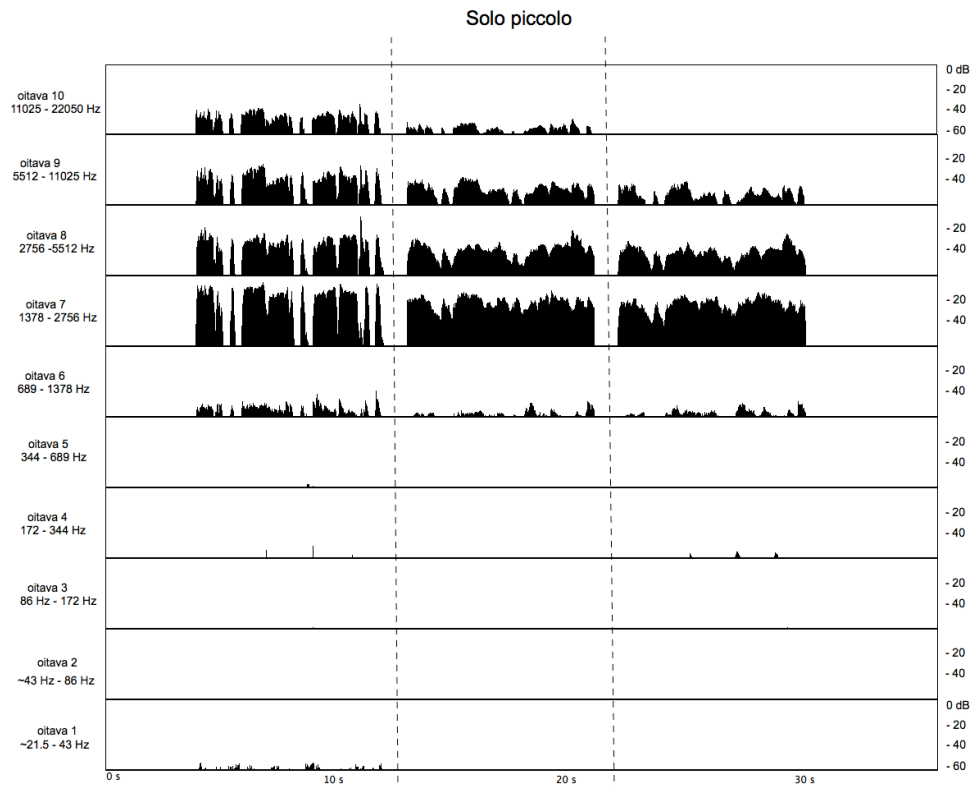


Figura 80 - Curvas de valores RMS em 10 oitavas, posição F1R5. Amostra da flauta piccolo, com três versões na seguinte ordem: gravação anecoica, auralização via simulação, auralização via medição⁵⁷.

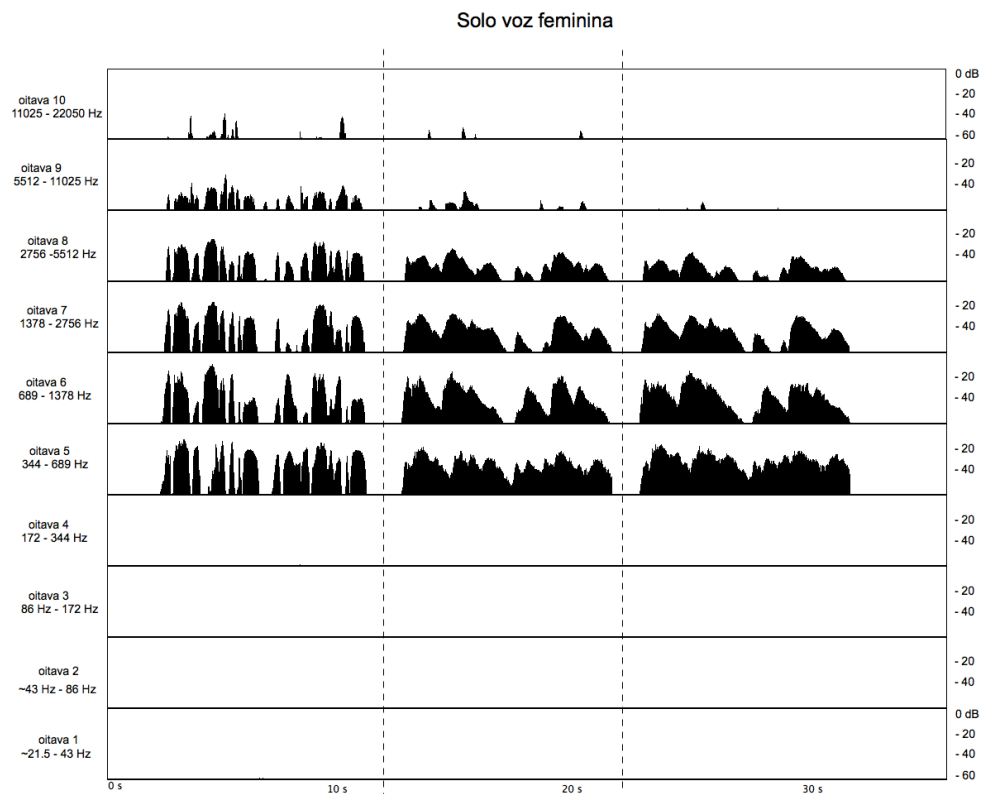


Figura 81 - Curvas de valores RMS em 10 oitavas, posição F1R5. Amostra da voz feminina solo, com três versões na seguinte ordem: gravação anecoica, auralização via simulação, auralização via medição.

⁵⁷ Idem para a flauta piccolo.

Deixamos para comentar por último a bateria (fig. 80), já que esta amostra sonora cobre praticamente todo o espectro audível. Primeiramente, pode-se notar uma perda de energia na 1ª oitava, quando se compara a medição com a simulação. Nota-se também um leve aumento da energia na 3ª oitava na medição. A partir da 5ª oitava, as perdas da medição são significativas.

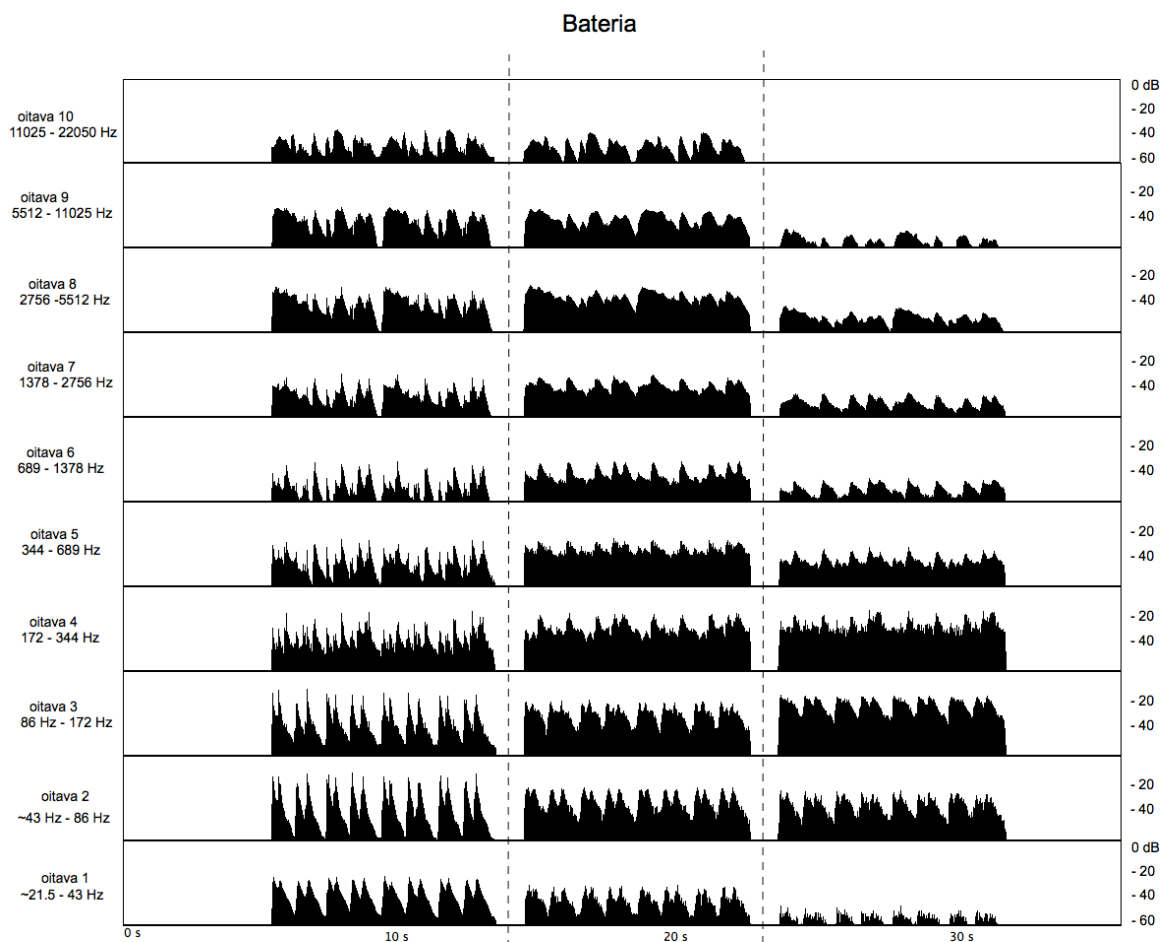


Figura 82 - Curvas de valores RMS em 10 oitavas, posição F1R5. Amostra da bateria, com três versões na seguinte ordem: gravação anecoica, auralização via simulação, auralização via medição.

Parte dessas diferenças entre os resultados da simulação e da medição, nas 1ª, 9ª e 10ª oitavas, podem ser atribuídas ao equipamento utilizado, principalmente à resposta em frequência e à direcionalidade do alto-falante dodecaedro. As especificações desse alto falante e dos microfones utilizado são descritas nas figuras 83, 84 e 85. Quanto à primeira oitava, a resposta dos microfones também não é suficiente, de acordo com as figuras 86 e 87. Os demais equipamentos utilizados na medição, como o

amplificador B&K Type 2734-A e as placas de áudio Focusrite e Motu, apresentam resposta em frequência de 20 Hz a 20 kHz⁵⁸.

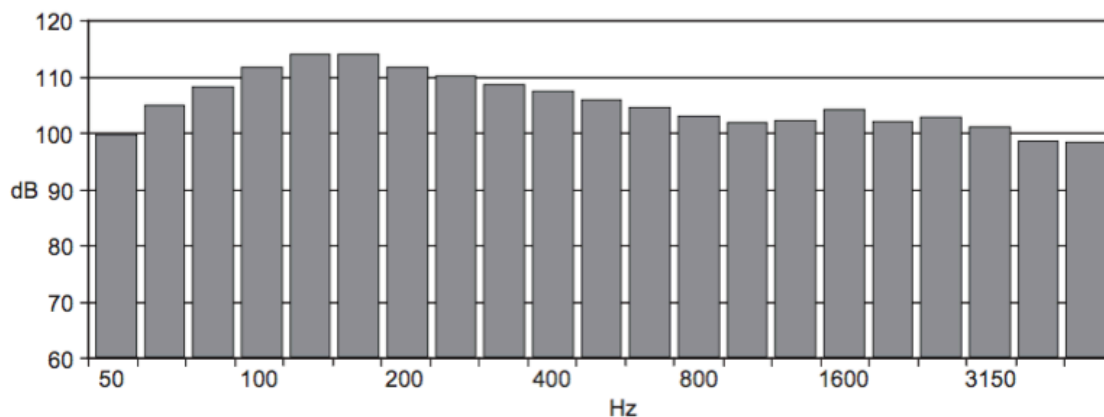


Figura 83 – Resposta em frequência por terço de oitava do alto-falante B&K *OmniPower Sound Source Type 4292-L*⁵⁹.

<p>STANDARDS Conforms to the following: ISO 140-3 ISO 3382 DIN 52210</p>	<p>SOUND POWER LEVEL (with Power Amplifier Type 2734, duty cycle 1/3, 100 – 3150 Hz pink-noise signal) Broadband: 122 dB re 1 pW Spectral: Min. 100 dB/1 pW in each 1/3-octave band</p>
<p>NOMINAL IMPEDANCE 6 Ω</p>	<p>TRIPOD Adjustable to give a speaker height of between 131 and 207 cm</p>
<p>POWER HANDLING 300 W continuous broadband 1000 W short duration (duty cycle 1/10, on time 10 s)</p>	<p>FLOOR MOUNTING Rubber feet provided for floor mounting</p>
<p>OPERATING FREQUENCY RANGE 50 – 5000 Hz (1/3-octave band centre frequencies)</p>	<p>DIAMETER Speaker Enclosure: 39 cm (15.35")</p>
<p>CONNECTION Four-pin Neutrik® Speakon® socket, pins 1+ and 1-</p>	<p>WEIGHT Speaker Enclosure: 8.0 kg (17.6 lb.) Tripod: 2.3 kg (5.1 lb.)</p>

Figura 84 – Especificações técnicas do alto-falante B&K *OmniPower Sound Source Type 4292-L*. Alcance da frequência de operação destacada em vermelho.

⁵⁸ Especificações disponíveis em: <https://us.focusrite.com/usb-audio-interfaces/scarlett-2i2#techspec> e http://cdn-data.motu.com/manuals/firewire-usb-audio/UltraLite-mk3_Hybrid_Win.pdf . Acesso em 11 jul. 2017.

⁵⁹ Catálogo de produtos disponível em: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/sound-sources/omni-power-light-4292> . Acesso em 11 jul. 2017.

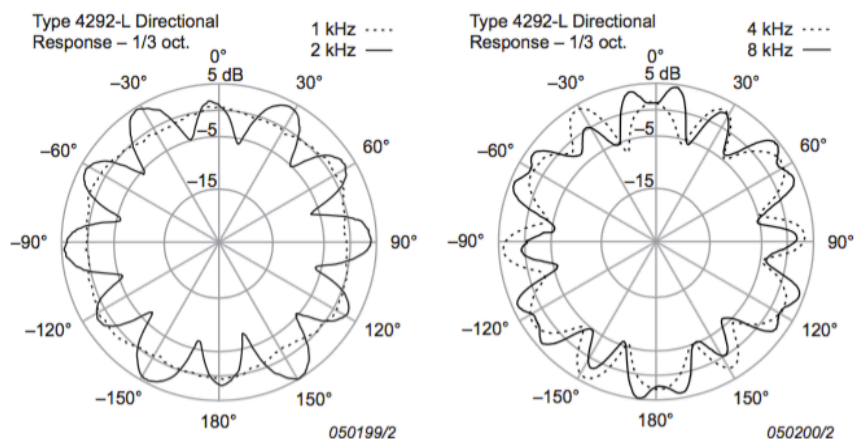


Figura 85 – Resposta direcional no plano horizontal do alto-falante B&K *OmniPower Sound Source Type 4292-L*. Abaixo de 1 kHz, o padrão omnidirecional não apresenta desvios significativos.

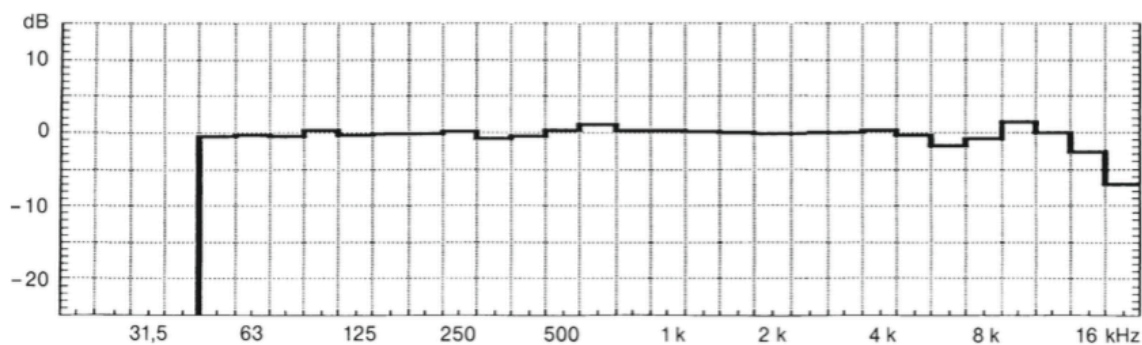


Figura 86 – Resposta em frequência em campo difuso do microfone binaural *dummy head* Neumann KU-100⁶⁰.

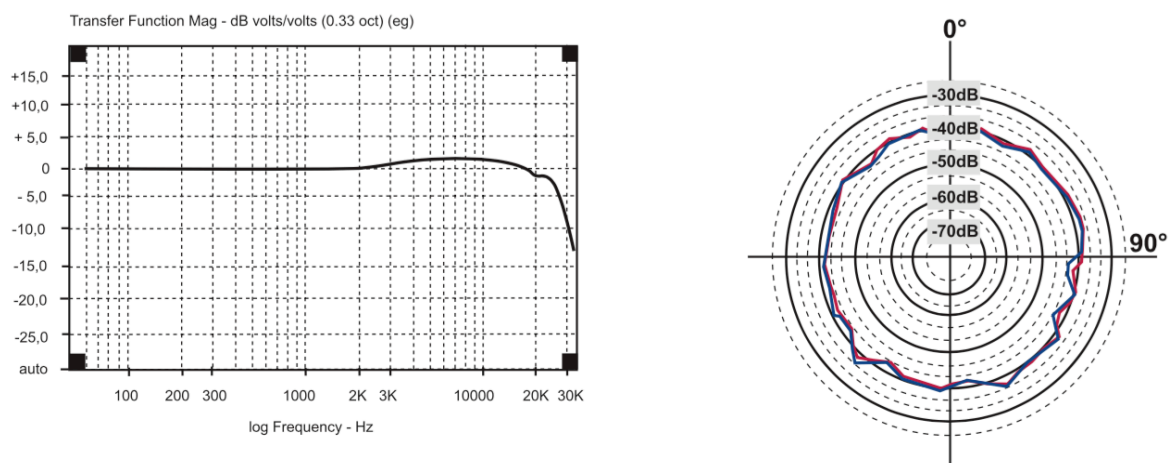


Figura 87 – Resposta em frequência e direcional do microfone Behringer ECM 8000⁶¹.

⁶⁰ Manual de operação: http://www.neumann.com/?lang=en&id=current_microphones&cid=ku100_manuais. Acesso em 11 jul. 2017.

⁶¹ Especificações disponíveis em: http://downloads.music-group.com/software/behringer/ECM8000/ECM8000_C_Specs.pdf. Acesso em 11 jul. 2017.

No entanto, isto não explica as diferenças encontradas nas oitavas médias e médio-agudas, que parecem estar relacionadas com os diferentes instrumentos musicais e seu conteúdo espectral. Em outras palavras, a resposta em frequência da sala (representada por sua resposta ao impulso) não foi a mesma para as diferentes sonoridades utilizadas.

8. Discussão

Diante dos resultados dos parâmetros acústicos expostos no capítulo 6, sobretudo quanto ao Tempo de Reverberação (T) e à Clareza (C80), junto ao desafio de se incorporar performances musicais de conjuntos diversos e com diferentes pressões sonoras, a implementação de alguma forma de acústica variável parece ser uma possível mitigação dos problemas acústicos do auditório. Assim, um estudo posterior sobre o posicionamento de placas de materiais absorvedores no interior do ambiente, de forma modular e ajustável, para que se absorva uma maior ou menor quantidade de som, seria bastante oportuno. Da mesma maneira, a investigação sobre o uso de difusores no ambiente seria também apropriada, pois a parede de fundo do palco é muito reflexiva e lisa. A parede de fundo da área da audiência tampouco atua como superfície difusora, apesar de contar com materiais absorvedores, como o carpete que reveste o painel de madeira com orifícios, e com sucessivos elementos verticais de alvenaria. Ademais, uma análise pormenorizada do efeito dos painéis laterais de madeira seria interessante, para sabermos, caso esses painéis fossem fechados, o efeito causado na absorção de graves no interior do auditório. Nesse caso, poderia ser estudado algum tipo de ajuste em armadilhas de grave, para reduzir os tempos de reverberação nas frequências do médio grave e do grave, abaixo de 250 Hz.

Sobre os resultados do capítulo 7, tem-se a ideia, à princípio, de que a simulação acústica de um ambiente estaria aquém de qualquer medição feita no próprio local. Entretanto, as vantagens e limitações de cada um dos métodos, descritas no capítulo 5 (p. 87), comprovaram-se no estudo do auditório: a diferença encontrada nos tempos de reverberação e seu erro relativo nas bandas de 63, 125 e 250 Hz (figuras 53 e 54, p. 101 e 102); e a diferença subjetiva na percepção sonora de frequências médias-altas e altas. A primeira demonstra a dificuldade da tecnologia de simulação em avaliar o comportamento de frequências graves no interior da sala. Conforme já mencionado, isto se deve à baixa acurácia dos coeficientes de absorção e espalhamento nessa região, e o fato da tecnologia não prever todos os fenômenos de onda, como a difração. A segunda diferença é devida a uma limitação da resposta em frequência da fonte sonora, conforme mencionado no capítulo anterior. Essa resposta se mantém suficientemente plana nas

bandas exigidas pela norma, de 125 Hz a 4 kHz, mas filtra as frequências a partir de 5 kHz. Um resultado similar ao encontrado por Rindel e Christensen (2003).

Entretanto, os resultados ainda são bastante próximos, o que valida a simulação do auditório e serve como contraponto à medição. Os valores das médias totais do Tempo de Reverberação (T) e do *Early Decay Time* (EDT) (figuras 53 e 60, p. 101 e 109), nas bandas de 500 Hz a 4 kHz, encontram-se próximos ou abaixo de 1 jnd (*just noticeable difference*) (figuras 54 e 61, p. 102 e 109). A diferença entre os métodos nos Tempos de Reverberação na banda de 125 Hz já era esperada. Conforme mencionado no início do capítulo 6 (p. 97), não encontramos exemplos na literatura de comparações entre simulação e medição acústicas nessa região de frequências. Essa diferença demonstra que a medição acústica é mais confiável nessa banda, que é extremamente importante na acústica da performance musical, pois é onde situa-se uma boa parte de seus tons fundamentais (MOULTON; BATZDORF, 2001: 32). No EDT, os resultados na banda de 125 Hz se aproximam, mas na banda de 250 Hz são mais distantes do que no tempo de reverberação, apesar do erro relativo do EDT ser maior e estar em torno de 3 jnd⁶². São resultados relativamente próximos ao da posição F1R5, utilizada para a auralização dos excertos musicais no capítulo 7. Porém, nesta posição, há uma diferença ainda menor na banda 125 Hz no tempo de reverberação e uma diferença considerável na banda de 250 Hz no EDT, conforme as figuras a seguir.

⁶² No EDT, as diferenças entre posições de fonte e receptores são maiores do que no tempo de reverberação (T), o que gera um maior erro relativo nas comparações. O desvio padrão em T é menor que no EDT (Tabelas 2 e 6, p. 101 e 109).

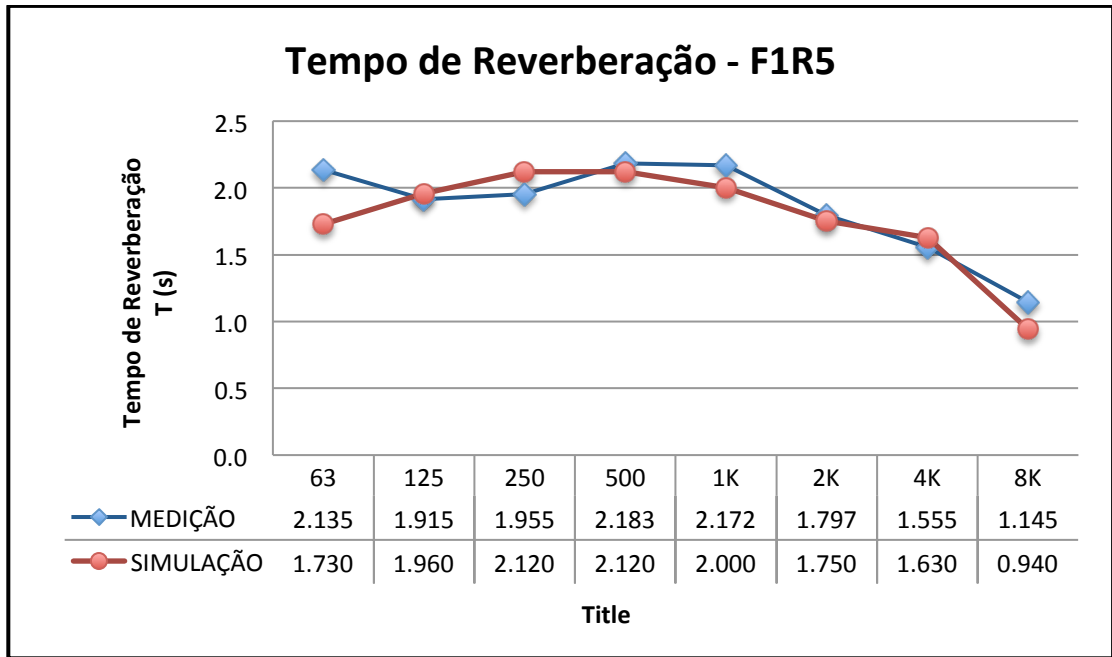


Figura 88 - Tempo de Reverberação – Fonte F1 e Receptor R5.

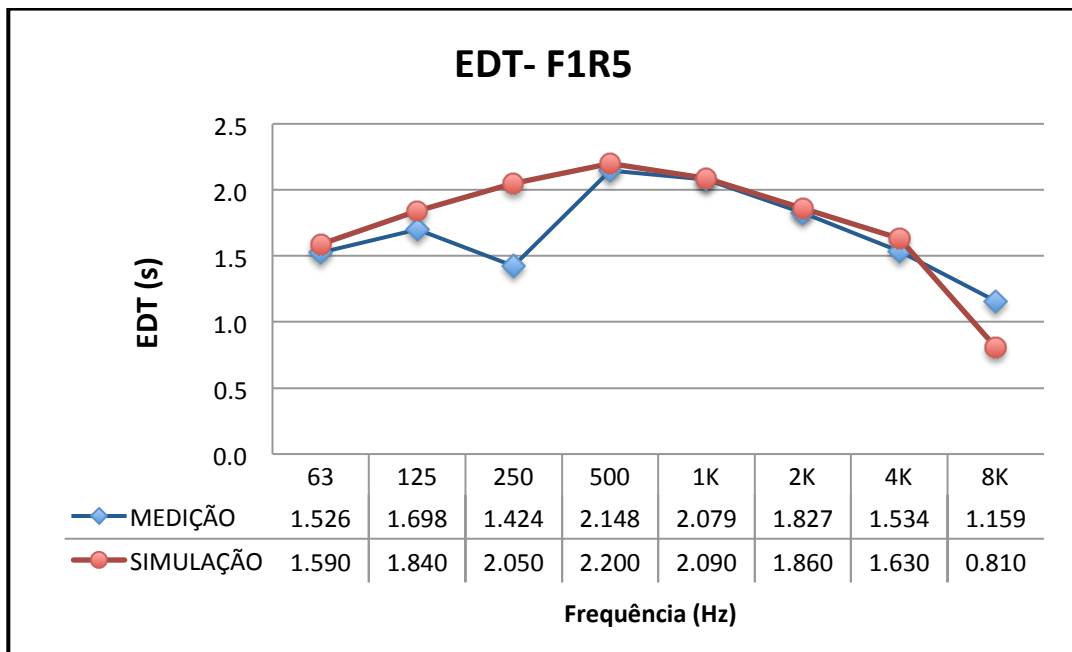


Figura 89 - Early Decay Time (EDT) – Fonte F1 e Receptor R5.

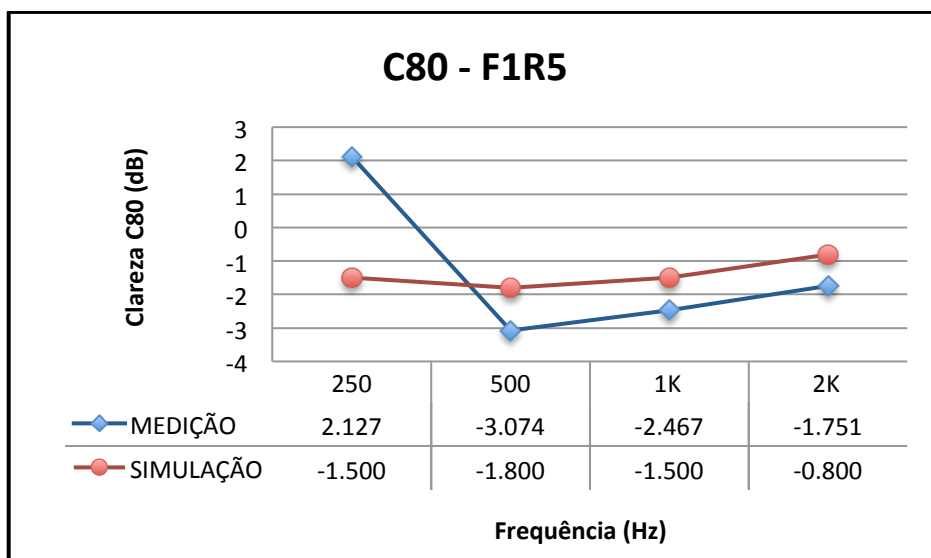


Figura 90 - Clareza (C80) – Fonte F1 e Receptor R5.

Esse é um ponto chave para a análise do problema de excesso de graves no auditório. No capítulo 7, os gráficos RMS das auralizações das amostras do duo de clarinete e fagote e da bateria (figuras 76 e 82, p. 133 e 137), por exemplo, mostram que há uma energia maior na medição do que na simulação na 3ª oitava, em frequências próximas às da banda de 125 Hz. O mesmo acontece com as amostras de tuba e tímpano, embora em menor proporção. Porém, a figura 88 mostra tempos de reverberação muito próximos nessa faixa, sendo que na figura 89, referente ao EDT, a diferença é significativa e, curiosamente, a medição apresenta um valor menor do que a simulação.

Em relação à banda de 250 Hz, os valores desses parâmetros se afastam, com valores relativos ainda menores na medição. No EDT, a diferença ultrapassa meio segundo. Todavia, nas curvas RMS dos excertos da bateria e do duo de clarinete e fagote, a energia permanece praticamente a mesma ou apresenta um pequeno aumento na 4ª oitava. Aliada a isso, há uma diferença visual na suavização dos transientes na auralização com a resposta ao impulso da medição.

Entretanto, o excerto da voz masculina revela um detalhe inesperado (fig. 75, p. 132). Essa amostra, na parte inicial sustentada, causa um aumento considerável de energia na 4ª oitava, na auralização via medição. Nesse mesmo instante, a energia da 5ª e 6ª oitavas permanece praticamente a mesma em relação à simulação. Comparando com outras amostras que apresentam energia nestas oitavas (tímpanos, tuba, bateria, duo de clarinete e fagote), esse resultado é único, e pode estar relacionado com a interação

entre o conteúdo espectral da voz sustentada e características do auditório presentes nas respostas ao impulso, porém não reveladas pelos parâmetros acústicos.

Sobre a Clareza, há um outro ponto importante sobre a utilização das auralizações para um diagnóstico acústico do ambiente. A figura 90, com os resultados do C80 para a posição F1R5, diverge das médias do C80 para a área da audiência e do palco (figuras 62 e 63, p. 112 e 113) na banda de 250 Hz, pois apresenta um valor maior na medição (salvo em F4, para a área do palco). A escuta das auralizações da tuba e do tímpano, por exemplo, demonstra que isso não é possível. Essa diferença entre a medição individual e a média de várias medições exigidas pela norma, indica a necessidade de se ter mais de um ponto de recepção do sinal para um panorama acústico real do ambiente.

Na verdade, os dois métodos realizados para um diagnóstico acústico do Auditório de Escola de Música são complementares. Ao analisarmos os gráficos das figuras 91 e 92, referentes ao espectro da resposta ao impulso obtida na medição e na simulação da sala, a partir da posição F1R5, percebe-se que o primeiro método é melhor para os graves e médio-graves e o segundo destaca-se nas frequências médias-agudas e agudas. Elas se aproximam em amplitude nos médios.

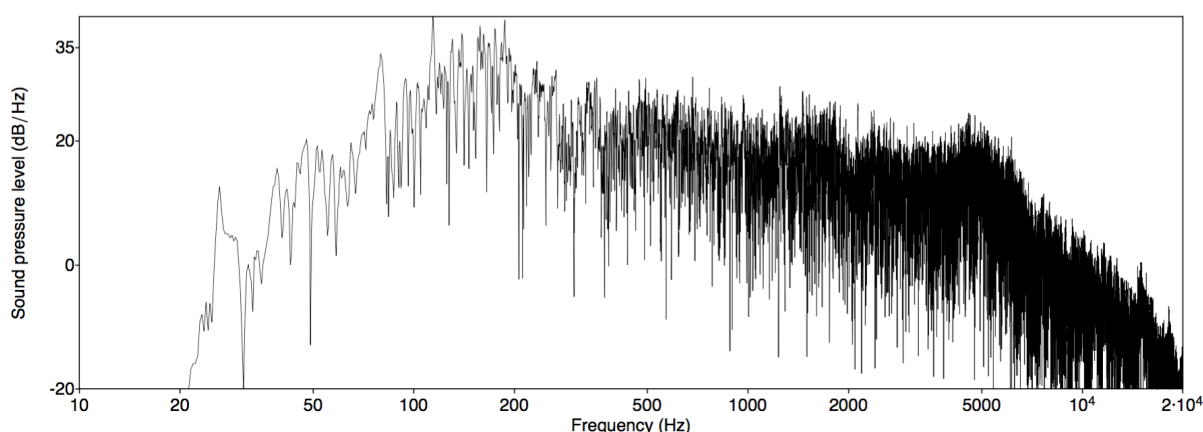


Figura 91 - Espectro da resposta ao impulso da posição F1R5, medição acústica.

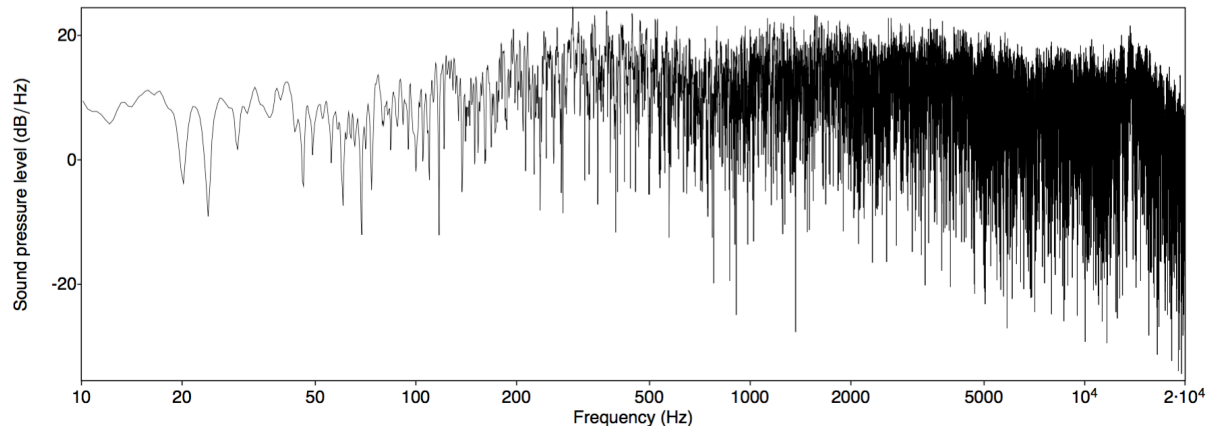


Figura 92 - Espectro da resposta ao impulso virtual da posição F1R5, simulação acústica.

Considerações finais: em busca de novas interseções

Com o progressivo desenvolvimento tecnológico, os métodos de medição e simulação acústicas alcançam níveis cada vez mais precisos de diagnóstico e previsão do comportamento acústico de ambientes. Sua técnica é demasiadamente moderna e, por vezes, pode parecer inacreditável que muitos dos seus conceitos datam do início do século passado. A ideia da auralização soa quase irreal: imprimir a característica acústica de qualquer espaço sobre qualquer som. Transportar o som ao interior de uma sala específica. Hoje, um usuário dessa tecnologia possivelmente não se interessará pela engenhosidade desse processo, seja pelo excesso de informação a que todos estamos expostos, seja pela facilidade de acesso às ferramentas digitais. Entretanto, com um breve olhar sobre o passado, podemos nos surpreender com soluções geniais, como as de Sabine e Schroeder, advindas de uma época em que havia menor facilidade e era preciso criar seus próprios mecanismos.

Em música, historicamente, a tecnologia causou mudanças de práticas e comportamentos. O avanço na fabricação de instrumentos de corda no período da renascença, a era de ouro do órgão barroco e a invenção do piano ao final do século XVIII, sem sabermos o quanto disso partia de necessidades ou gerava as demandas, alteraram o costume de suas épocas, inclusive na forma de compor. O mesmo aconteceu no início do século XX, pois a invenção do gramofone e o surgimento das tecnologias de gravação fizeram uma revolução nos hábitos de produção e escuta musical. Posteriormente, a criação do CD e do MP3, sem um juízo de valor a respeito disso, representaram outra grande transformação na distribuição de música e no seu consumo. Atualmente, uma variedade de softwares utilizados na área da computação musical, entre eles o Max/Msp, fazem parte de um novo paradigma na composição. Eles quebram barreiras de conectividade, amplificando a interação entre o mundo real e o virtual, a ponto de nos questionarmos se realmente existe uma separação entre eles.

Isso nos leva a pensar se a tecnologia de simulação acústica poderia ter uma participação, ainda que singela, nos processos de criação e análise musical. Tradicionalmente, seus meios de antecipação do comportamento acústico de um ambiente a direcionam para um campo de diagnóstico e previsão acústica de salas. No entanto, o desenvolvimento das técnicas de auralização ampliou seu alcance para outros

projetos que não envolvem somente a adequação de salas de concerto e auditórios. Hoje, com a realidade virtual, a auralização é utilizada para simular a acústica de áreas externas para o controle de ruído de tráfego e aéreo, investigar a transmissão de som entre ambientes, realizar pesquisas sobre a audição e na reconstrução sonora de espaços históricos, no campo da arqueologia acústica⁶³. Uma vez que a simulação inclui a sonorização da resposta ao impulso virtual, ela também poderia se tornar um campo interdisciplinar entre música e arquitetura.

A auralização a partir de respostas ao impulso medidas em um ambiente real já fornece elementos para a experimentação sonora, como a recriação da espacialização de um ambiente, ou mesmo para análises quantitativas quanto à variação do comportamento de objetos sonoros em diferentes situações, conforme os resultados do capítulo 7. Essa perspectiva nos permite antever a inserção dessa tecnologia nas práticas musicais contemporâneas e elencar algumas de suas possibilidades, que estiveram fora do escopo desta pesquisa.

Dentre essas possibilidades, a própria inclusão de um espaço em outro já é uma ideia extraordinária. Este é um conceito bastante utilizado na música acusmática, em sua exploração dos espaços internos do som. Todavia, seria um campo de pesquisa interessante ampliar a base de respostas ao impulso hoje existente com a criação de espaços fictícios, cuja construção é impossível, e estudar os efeitos sonoros gerados nesses ambientes. Modelar espaços para criar sons. Citando mais uma vez o caso de *I Am Sitting in a Room*, as duas gravações da obra lançadas pelo compositor soam completamente diferentes, por terem sido realizadas em espaços distintos. Extrapolando essa ideia, seria possível incluir uma variedade de espaços em uma mesma peça musical. Por exemplo, ao realizar a recursividade de um espaço no interior de outro de forma controlada e programável. Ou ainda, investigar a modificação de um som através de alteração progressiva de seu entorno, com a modificação de formas e materiais. Como a simulação acústica permite modelar a direcionalidade de fontes, reproduzindo digitalmente as características de distribuição sonora, tanto de caixas acústicas quanto de instrumentos musicais, abre-se ainda um outro campo de experimentação. São possibilidades que trariam grandes estímulos e desafios à criação sonoro-musical.

⁶³ Sobre o projeto ERATO, ver Rindel, 2011c. Sobre acústica virtual, ver Pedrero Gonzáles et al, 2013 e Vorländer, 2014.

De certa forma, a busca por uma interseção entre Música e Arquitetura, no desenvolvimento conceitual da primeira parte desta pesquisa, almejava embasar esses conceitos. Desenhar paralelos entre as duas artes a partir do seu ponto tangencial mais evidente até a dissolução completa de suas formas, em um caminho para a virtualização de ambas. A partir daí, dentro do estudo de caso, conhecer uma parte dos instrumentos utilizados pela Acústica em sua percepção do som, em uma relação mais direta entre os sons e os espaços que os cercam.

O estado tecnológico atual já oferece as condições necessárias para a aplicação desses conceitos. O resultado das auralizações do modelo digital de uma sala, como é o caso do auditório da Escola de Música, é mesmo surpreendente. As ferramentas e equipamentos de medição e simulação acústica utilizadas nesta pesquisa encontram-se no estado da arte. No caso da simulação, é necessário lembrar que foi utilizada uma versão mais antiga do software Odeon, a 7.0. Hoje, ele encontra-se na versão 13. No seu desenvolvimento, a inovação mais importante que poderia ser aplicada para uma aproximação maior do modelo à medição do auditório foi introduzida na versão 8.0⁶⁴. São os mecanismos para o tratamento dos coeficientes de espalhamento, denominados *Reflection Based Scatter* e *Oblique Lambert*, que consideram o espalhamento devido à propriedades geométricas como o tamanho das superfícies, ângulo de incidência dos raios sonoros e a proporção do seu efeito dependente da frequência em questão.

Parece não haver mais caminhos para um grande desenvolvimento da simulação acústica, além de uma tentativa de incluir todos os fenômenos de onda sonora. Seria um avanço considerável para essa tecnologia e bastante oportuno para as criações musicais aqui consideradas. Entretanto, essa hipótese é lançada de forma quase ingênua, sem a menor ideia do trabalho necessário para alcançá-la. De modo similar ao de um músico que pede ao *luthier* que faça modificações em um instrumento, solicitando um ajuste ou mesmo uma alteração estrutural, e aguarda ansioso pelo resultado.

⁶⁴ <http://www.odeon.dk/development-room-acoustics-software>. Acesso em 11 jul. 2017.

Referências

AZEVEDO, A. V. DE. **Teatros e auditórios – acústica e arquitetura**. Rio de Janeiro: H. Sheldon, 1994.

BASHFORD, C. "Chamber music". **Grove Music Online. Oxford Music Online**. Oxford University Press. Disponível em: <<http://www.oxfordmusiconline.com/subscriber/article/grove/music/05379>>. Acesso em 28 ago. 2017.

BENÉVOLO, L. **História da arquitetura moderna**. 3. ed. São Paulo: Ed. Perspectiva S.A., 2004.

BERANEK, L. **Concert halls and opera houses: music, acoustics, and architecture**. Nova Iorque: Springer, 2004.

BORISH, J. Extension of the image model to arbitrary polyhedra. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 75, n. 6, p. 1827–1836, 1984.

BRADLEY, J. S. A comparison of three classical concert halls. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 89, n. 3, p. 1176 -1192, 1991.

BROWN, H. et al. "Opera (i)". **Grove Music Online. Oxford Music Online**. Oxford University Press, acesso em 23 ago. 2017. Disponível em: <<http://www.oxfordmusiconline.com/subscriber/article/grove/music/40726pg2>>.

BRYANT, D. "Gabrieli, Giovanni". **Grove Music Online. Oxford Music Online**. Oxford University Press, acesso em 28 ago. 2017. Disponível em: <<http://www.oxfordmusiconline.com/subscriber/article/grove/music/40693>>.

BURKHOLDER, J.; PALISCA, C. **Norton anthology of western music: ancient to baroque**. Nova Iorque: WW Norton & Company Incorporated, 2006.

CAMPANINI, S.; FARINA, A. **A new audacity feature: room objective acoustical parameters calculation module**. Parma: [s.n.], 2009.

CHION, M. **Guide to sound objects: Pierre Schaeffer and musical research**. Tradução de John Dack and Christine North. Paris: Buchet/Chastel, 1983. Disponível em: <<http://www.ears.dmu.ac.uk>>. Acesso em 10 dez. 2017.

CHRISTENSEN, C. L. **Odeon room acoustics program version 7.0**: manual do usuário. Copenhagen, 2005.

CHRISTENSEN, C. L.; KOUTSOURIS, G. **Odeon room acoustics program version 12.0**: manual do usuário. 2. ed. Copenhagen, 2013. Disponível em: <<http://www.odeon.dk/pdf/ODEONManual12.pdf>>. Acesso em: 11 jul. 2017.

CREMER, L.; MÜLLER, H. A. **Principles and applications of room acoustics**. Westport, CT: Peninsula Publishing, 2016. v. 1.

DE ALMEIDA, J. **Crítica dialética em Theodor Adorno: música e verdade nos anos vinte**. Cotia, SP: Ateliê Editorial, 2007.

DE VRIES, D.; HULSEBOS, E. M.; BAAN, J. Spatial fluctuations in measures for spaciousness. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 110, n. 2, p. 947–954, 2001.

DECLERCQ, N. F.; DEKEYSER, C. S. A. Acoustic diffraction effects at the Hellenistic amphitheater of Epidaurus: seat rows responsible for the marvelous acoustics. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 121, n. 4, p. 2011–2022, 2007.

FARINA, A. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. In: AUDIO ENGINEERING SOCIETY CONVENTION, 108., 2000, Paris. **Anais...** Nova Iorque: Audio Engineering Society, 2000, p. 1-25.

FARINA, A. et al. Listening tests performed inside a virtual room acoustic simulator. In: Iº SEMINÁRIO MÚSICA CIÊNCIA E TECNOLOGIA "ACÚSTICA MUSICAL", 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 2004, p. 1-26.

FARINA, A. Advancements in impulse response measurements by sine sweeps. In: 122nd AES CONVENTION, 2007, Viena. **Anais...** Nova Iorque: Audio Engineering Society, 2007, p. 1–21.

FORSYTH, M. **Buildings for music: the architect, the musician, the listener from the seventeenth century to the present day**. Cambridge: CUP Archive, 1985.

FREIRE, S. **Alto-, alter-, auto-falantes: concertos eletroacústicos e o ao vivo musical**. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 2004.

GOMBRICH, E. H. **A história da arte**. Tradução de Álvaro Cabral. 16ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

HANSEN, J. A. “ Ut Pictura Poesis” e verossimilhança na doutrina do conceito no século XVII colonial. **Revista de Crítica Literária Latinoamericana**, v. 23, n. 45, p. 177–191, 1997.

HEYMAN, J. The stone skeleton. **International Journal of Solids and Structures**, v. 2, n. 2, p. 249-279, 1966.

IANNACE, G.; IANNIELLO, E. Sound-focusing effects in the plan of horse-shoe shaped opera theatres. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 123, n. 5, p. 3191, 2008.

IAZZETTA, F.; FIGUEIREDO, F. L.; MASIERO, B. S. Parâmetros subjetivos em salas destinadas à prática musical. In: ACÚSTICA, 2004, Guimarães. **Anais...** Guimarães, Portugal: [s.n.], 2004, n. 83, p. 1-8.

ISO/TC 3382-1: 2009. **Acoustics - Measurement of room acoustic parameters**. Part 1: performance spaces. Genebra: International Organization for Standardization, 2009.

ISO/TC 3382-2: 2008. **Acoustics - Measurements of room acoustics parameters**. Part 2: reverberation time in ordinary rooms. Genebra: International Organization for Standardization, 2008.

ISO/TC 18233: 2006. **Acoustics - Application of new measurement methods in building and room acoustics**. Genebra: International Organization for Standardization 2006.

JENCKS, C. Architecture becomes music. **Architectural Review**, n. 1395, p. 91–108, 2013.

KERMAN, J. **Contemplating music: challenges to musicology**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1985.

KROKSTAD, A.; STROM, S.; SØRSDAL, S. Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. **Journal of Sound and Vibration**, v. 8, n. 1, p. 118–125, 1968.

KUTTRUFF, H. **Room acoustics**. 5. ed. Londres: Spon Press, 2009.

LEWCOCK, R. et al. "Acoustics". **Grove Music Online. Oxford Music Online**. Oxford University Press, acesso em 28 ago. 2017. Disponível em: <<http://www.oxfordmusiconline.com/subscriber/article/grove/music/00134pg1>>.

LOMBARDO, V. et al. A virtual-reality reconstruction of poeme electronique based on philological research. **Computer Music Journal**, v. 33, n. 2, p. 24–47, 2009.

LONG, M. **Architectural acoustics**. Burlington, MA: Elsevier, 2006.

LOPEZ, O. AD Classics: Expo'58 + Philips Pavilion / Le Corbusier and Iannis Xenakis. 2011. **ArchDaily**. Disponível em: <<http://www.archdaily.com/157658/ad-classics-expo-58-philips-pavilion-le-corbusier-and-iannis-xenakis>>. Acesso em 15 ago. 2017.

LUCIER, A. **I am sitting in a room**. Para voz e fita eletromagnética. Middletown, CT: gravado por Lucier em 454 High Street, 1970. Disponível em: <<http://www.ubu.com/sound/lucier.html>>. Acesso em 13 dez. 2017.

LUCIER, A. **I am sitting in a room**. Para voz e fita eletromagnética. Nova Iorque: Lovely Music, 1990. Compact Disc. Gravação realizada em 29 out. 1980.

LUCIER, A.; SIMON, D. **Chambers: scores by Alvin Lucier; interviews with the composer by Douglas Simon**. Middleton, CT: Wesleyan University Press, 1980.

MEYER, J. **Acoustics and the performance of music: manual for acousticians, audio engineers, musicians, architects and musical instrument makers**. Nova Iorque:

Springer Science & Business Media, 2009.

MOULTON, D.; BATZDORF, N. **Total Recording: the complete guide to audio production and engineering**. Sherman Oaks, CA: Kiq Productions, 2001.

NIETZSCHE, F. **O nascimento da tragédia ou Helenismo e pessimismo**. Tradução de J. Guinsburd. São Paulo: Companhia das Letras, 1992.

NUTTGENS, P. **The story of architecture**. Londres: Phaidon, 1997.

PALISCA, C. "Camerata". **Grove Music Online. Oxford Music Online**. Oxford University Press, acesso em 23 ago. 2017. Disponível em:
<<http://www.oxfordmusiconline.com/subscriber/article/grove/music/04652>.

PEDRERO GONZÁLEZ, A. et al. Auralización del canto mozárabe en una iglesia prerománica. In: *TecniAcustica - 44º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA*, 2013, Valladolid. **Anais...** Valladolid, Espanha: [s.n.], 2013, p. 1448-1455. Disponível em:
<[http://oa.upm.es/30121/1/INVE MEM 2013_163657.pdf](http://oa.upm.es/30121/1/INVE_MEM_2013_163657.pdf)>. Acesso em 4 set. 2017.

PIRROTTA, N. Dante musicus: gothicism, scholasticism, and music. **Speculum**, v. 43, n. 2, p. 245-257, 1968.

PRINA, F.; DEMARTINI, E. **1000 years of world architecture: an illustrated guide**. Londres: Thames & Hudson, 2006.

PRYCE, W. **World architecture: the masterworks**. Nova Iorque: Thames & Hudson, 2008.

PSARRAS, S. et al. Measurements and analysis of the Epidaurus ancient theatre acoustics. **Acta Acustica United with Acustica**, v. 99, n. 1, p. 30-39, 2013.

RINDEL, J. H. The use of computer modeling in room acoustics. **Journal of Vibroengineering**, v. 3, n. 4, p. 41-72, 2000.

RINDEL, J. H. Room acoustic modelling techniques: a comparison of a scale model and a computer model for a new opera theatre. **Building Acoustics**, v. 18, n. 3-4, p. 259-280, 2011a.

RINDEL, J. H. Echo problems in ancient theatres and a comment to the 'sounding vessels' described by Vitruvius. In: *THE ACOUSTICS OF ANCIENT THEATRES CONFERENCE*, 2011, Patras. **Anais...** Patras, Grécia: [s.n.], 2011b, p. 18-21.

RINDEL, J. H. The ERATO project and its contribution to our understanding of the acoustics of ancient theatres. In: *THE ACOUSTICS OF ANCIENT THEATRES CONFERENCE*, 2011, Patras. **Anais...** Patras, Grécia: [s.n.], 2011c, p. 1-6.

RINDEL, J. H.; CHRISTENSEN, C.L. Room acoustic simulation and auralization – how close can we get to the real room. In: *8th WESTERN PACIFIC ACOUSTICS CONFERENCE*, 2003, Melbourne. **Anais...** Melbourne, Austrália: [s.n.], 2003, manuscrito n. 1025J, p. 1-8.

RINDEL, J. H.; CHRISTENSEN, C. L.; KOUTSOURIS, G. Simulations, measurements and auralisations in architectural acoustics. In: ACOUSTICS NEW DELHI, 2013, Nova Deli. **Anais...** Nova Deli, Índia: [s.n.], 2013, p. 1–16.

ROWLAND, I. D. et al. (Ed.). **Vitruvius: 'Ten Books on Architecture'**. Nova Iorque: Cambridge University Press, 1999.

RUA, H. **Os dez livros de arquitetura de Vitruvius corrigidos e traduzidos recentemente em Português, com notações e figuras**. 1. ed. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 1998.

SCHAEFFER, P.; REIBEL, G. **Solfège de l'objet sonore**. Paris: INA-GRM-Groupe de recherches musicales, 1966. Tradução para o português de 2007 de António de Sousa Dias (manuscrito). Disponível em: <http://www.dmu.uem.br/aulas/tecnologia/SolObjSon/PDFs/Schaeffer_SolfejoObjeto_port.pdf>. Acesso em 17 ago. 2017.

SCHROEDER, M. R. New method of measuring reverberation time. **The Journal of the Acoustical Society of America**, n. 37, p. 409–412, 1965.

SELFIDGE-FIELD, E. Beethoven and greek classicism. **Journal of the History of Ideas**, v. 33, n. 4, p. 577–595, 1972.

SHIOKAWA, H.; RINDEL, J. H. **Comparisons between computer simulations of room acoustical parameters and those measured in concert halls**. Tokyo: Nihon University, 2007.

SMALLEY, D. Spectromorphology: explaining sound-shapes. **Organised Sound**, v. 2, n. 2, p. 107–126, 1997.

SMALLEY, D. Space-form and the acousmatic image. **Organised sound**, v. 12, n. 1, p. 35–58, 2007.

SPANDOCK, F. **Method and apparatus for determining acoustic effects**. U.S. Patent n. 3.139.151, 30 jun. 1964. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US3139151>>. Acesso em: 11 jul. 2017.

TOPA, M. D. et al. Experimental acoustic evaluation of an auditorium. **Advances in Acoustics and Vibration**, v. 2012, 2012.

TRACHTENBERG, Marvin. Architecture and music reunited: a new reading of Dufay's "Nuper rosarum flores" and the cathedral of Florence. **Renaissance quarterly**, v. 54, n. 3, p. 741-775, 2001.

VILAS BOAS, L.; FREIRE, S. Os grãos da voz e do espaço: escutando objetos sonoros de Schaeffer nas salas de Lucier. In: XXVI CONGRESSO DA ANPPOM, 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Disponível em: <<http://www.anppom.com.br/congressos/index.php/26anppom/bh2016/paper/view/4>>

[411](#)>. Acesso em 28 ago. 2017.

VON GOETHE, J. W. **Conversations with Goethe in the last years of his life**. Boston; Cambridge, MA: Hilliard, Gray, and Company, 1852. v. 4.

VORLÄNDER, M. **Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality**. Berlin: Springer Science & Business Media, 2007.

VORLÄNDER, M. Computer simulations in room acoustics: concepts and uncertainties. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 133, n. 3, p. 1203–1213, 2013.

VORLÄNDER, M. Virtual acoustics. **Archives of Acoustics**, v. 39, n. 3, p. 307-318, 2014.

WINNINGTON-INGRAM, R. P. Aristoxenus and the intervals of greek music. **The Classical Quarterly**, v. 26, n. 3-4, p. 195-208, 1932.

WISHART, T. **On sonic art**, edited by Simon Emmerson. Amsterdam: Harwood, 1996. v. 12.

XENAKIS, I. The crisis of serial music. **Gravesaner Blätter**, v. 1, p. 2–4, 1956.

XENAKIS, I.; KANACH, S. E. **Music and architecture: architectural projects, texts, and realizations**. Nova Iorque: Pendragon Press, 2008.

ZIMMERMAN, C. **Mies Van Der Rohe, 1886-1969: The Structure of Space**. Hong Kong; Los Angeles: Taschen, 2006.