

Estudo da Acústica de Salas Voltadas ao Ensino de Música em Belém-Pa

Santana, A. L. S.^{*1}; Ohana, G. J.^{*2}; Melo, G. S. V.⁺¹; Soeiro, N. S.⁺²

*Instituto de Estudos Superiores da Amazônia – IESAM; andresantana@prof.iesam-pa.edu.br¹; ohana@prof.iesam-pa.edu.br²

+Grupo de Vibrações e Acústica – GVA/FEM/ITEC/UFPA; gmelo@ufpa.br¹; nsоеiro@ufpa.br²

Resumo

Este trabalho tem como objetivo a proposição de um modelo de sala de aula com design acústico adequado para o ensino de música em escolas de nível fundamental e médio, impulsionado pela demanda gerada a partir da lei 11.769, de 18 de agosto de 2008, que torna o ensino de música obrigatório nas escolas desses níveis. Rocha (2010) concluiu em sua pesquisa que nas escolas investigadas não havia uma concepção prévia de arquitetura visando a essa atividade, o que culminou na adaptação dos espaços sem parâmetros técnicos para tal. A partir dessa análise, buscou-se na literatura requisitos que indicassem parâmetros a serem alcançados para uma boa performance de ambientes dessa natureza para as adaptações. A estratégia definida foi selecionar uma sala utilizada para ensino de música que não tenha sido projetada para tal, buscada a aproximação com a realidade que foi encontrada em Rocha (2010). Na sequência, foi feita a medição de resposta acústica da sala e a simulação virtual que permitiu simular alterações nos parâmetros acústicos julgados relevantes para propor modificações testadas e atender às especificações. Na busca da definição dos valores de parâmetros para orientar a execução de projetos de salas para ensino de música e da proposição de um ambiente adaptado que utilize esses valores, foi feita uma investigação do estado da arte do desenvolvimento do design acústico para salas com esse fim. Depois de formatar um grupo de valores definidos na literatura a partir de uma revisão bibliográfica extensa, foram propostas alterações nas tipologias iniciais da sala virtualizada, colhidos os resultados numéricos e depois levadas ao processo de auralização, quando foi possível ouvir a resposta da sala aos diversos instrumentos e vozes que o software possui na biblioteca. Essas audições permitiram a avaliação da qualidade da sala indicando as impressões subjetivas que nortearam o resultado da pesquisa.

Palavras-chave: Acústica. Parâmetros Acústicos. Salas para Ensino de Música. Design Acústico.

1. Introdução

1.1 Breve Histórico

Em A República, Corvisieri (1997) diz que o estímulo das habilidades utilizadas na metodologia de ensino de música desenvolve conhecimentos que transcendem o universo musical, possibilitando um desenvolvimento do cérebro de forma mais completa.

Estudos atuais chamam a atenção para a relevância do ambiente na composição sonora, chegando a merecer o mesmo grau de importância do instrumento musical (ROCHA, 2010). A concepção projetual dos ambientes destinados às apresentações musicais tem sido desenvolvida ao longo do tempo de forma gradativa. Os primeiros projetos eram carregados de conceitos empíricos que careciam de rigor científico, os quais eram inexistentes, ficando muitas vezes sujeitos ao acaso e com resultados muitas vezes ineficientes, fato que justificava a cópia de projetos bem sucedidos para evitar erros (FIGUEIREDO, 2005). Segundo Lindsay (1972), o primeiro registro sobre acústica arquitetônica foi apresentado aproximadamente em 50 A.C. pelo

engenheiro e arquiteto romano Marcus Vitruvius Pollio na sua obra *De Architectura Libri Decem*, onde tratava das soluções dos teatros gregos e romanos. Quando as soluções arquitetônicas greco-romanas passaram a gerar teatros em ambientes confinados, os efeitos acústicos passaram a ser mais relevantes, mas ainda faltavam conhecimentos científicos. (FIGUEIREDO, 2005).

Em 1900, o físico Wallace Clement Sabine começou a definir os primeiros parâmetros que serviriam de base para o atual modelo de concepção de acústica arquitetônica. Àquela época, a Universidade de Harvard inaugurara o auditório *Foog Art Museum*, o qual deveria ser uma obra prima da arquitetura, não fosse a ineficiência acústica que praticamente o inutilizava para o fim ao qual era destinado. Sabine foi chamado para resolver o problema e dessa forma iniciou os estudos baseados nos efeitos observados no referido ambiente (FIGUEIREDO, 2005). O primeiro teatro baseado nos conhecimentos adquiridos por Sabine que foi contruído sob sua consultoria foi o *Symphony Hall*, em Boston, USA, inaugurado em 1900, considerado na época como uma das três melhores salas de concerto do mundo.

1.2 Justificativa

Buscando incorporar os benefícios do ensino e aprendizagem de música à metodologia utilizada atualmente no Brasil, a educação musical passa a ser obrigatória nas escolas de educação básica a partir da lei 11.769 de 18 de agosto de 2008. Segundo esta lei, os sistemas de ensino contam com três anos letivos para as adaptações necessárias, tornando o ensino obrigatório a partir de 2012.

Rocha (2010) observou em sua pesquisa o desconhecimento por parte dos profissionais de ensino de música sobre as características acústicas buscadas nos espaços utilizados para essa prática, ainda que sua influência seja plenamente admitida. Observou também que as salas pesquisadas não foram projetadas para essa atividade, ocasionando tentativas de adaptação sem critérios técnicos definidos e, portanto, sem resultados significativos.

O foco desse trabalho parte do entendimento de que foi gerada uma demanda pela ausência da incorporação, quando da fase de projeto de soluções acústicas, para tornar o ambiente de ensino e aprendizado de música adequado e a busca por um modelo que satisfaça as condições encontradas nas normas para acústica de teatros. Sob essa ótica, percebeu-se a necessidade da busca por valores de parâmetros ideais que orientassem a concepção de um projeto de sala acusticamente favorável para a educação musical. Observa-se que tal situação provoca prejuízos à educação dos indivíduos afetados pela má qualidade acústica das salas de aula, principalmente no que diz respeito a crianças.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Acústica

Segundo Gerges (2000), o som é resultado de flutuações na pressão sonora que excitam o aparelho auditivo humano, provocando a sensação de audição, que só ocorrerá quando a amplitude e a frequência dessas flutuações estiverem dentro de uma certa faixa de valores. A faixa de frequência que compreende a audição humana está entre 20 Hz e 20 kHz, sendo que as frequências inferiores a este intervalo são denominadas infrassônicas e as frequências superiores, ultrassônicas. É importante ressaltar que dentro da faixa de audição o ouvido não se comporta da mesma forma, pois existem diferenças na sensibilidade auditiva ao longo da escala de audibilidade. Para provocar a sensação auditiva, é necessária uma variação de pressão da ordem de aproximadamente 20 μPa e o limiar superior, onde a sensação passará a ser de dor, 100 Pa, como mostra a Figura 1. A unidade de medida mais utilizada na acústica é o decibel (em homenagem a Alexander Graham Bell), sendo esta uma unidade fictícia, situada na escala logarítmica

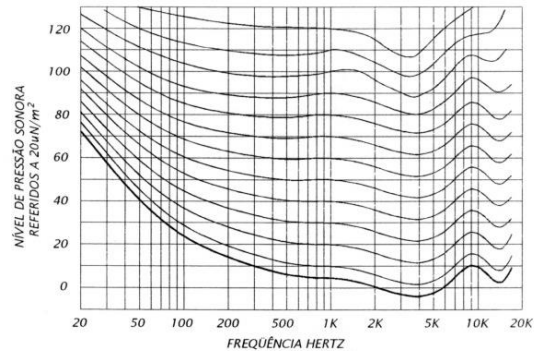


Figura 1: Curvas de isoaudibilidade.

Fonte: Gerges, 2000.

Ainda segundo Gerges (2000), o som se propaga no ar a uma velocidade de 343 m/s a 20 °C. Pode se chegar à velocidade do som no ar através da Equação (1):

$$c = 331 + 0,6t \quad (1)$$

Onde: c é a velocidade do som no ar em m/s; t é a temperatura em °C. Sabine (1900) obteve de forma experimental a primeira expressão para tempo de reverberação, que é definido como o tempo em que o som leva para decair 60 dB após cessada a fonte:

$$TR = 0,161 V/A \quad (2)$$

Onde: V é o volume total da sala; A é a soma dos coeficientes de absorção α_i das superfícies de área S_i , calculado por:

$$A = \sum_i \alpha_i S_i \quad (3)$$

Eyring aperfeiçoou a expressão de Sabine adaptando-a para ambientes com alta absorção (GERGES, 2000) [8]. Segundo Eyring, pode-se calcular o Tempo de Reverberação de ambientes através da expressão:

$$TR = \frac{0,161 V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (4)$$

Onde: S representa a área das superfícies internas da sala e $\bar{\alpha}$ é o coeficiente de absorção médio dado por:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{S} \quad (5)$$

2.2. Parâmetros Acústicos

Para a análise do desempenho acústico de uma sala, os pesquisadores utilizam parâmetros que ajudam a definir um panorama do ambiente a partir de valores numéricos. Esses valores de parâmetros podem ser percebidos e mensurados com o auxílio de equipamentos apropriados. Para esse trabalho foram definidos quatro parâmetros para serem trabalhados. Essa seleção foi feita via análise que será mostrada na sequência dos itens.

a) Tempo de Reverberação: é o tempo, em segundos, a partir do desligamento da fonte, que o nível de pressão sonora demora para decair 60 dB. Como, na prática, é difícil se observar um decaimento de 60 dB, a análise é feita utilizando-se um decaimento de 30 dB, esperando-se um decaimento inicial de 5 dB após o desligamento da fonte para estabilizar o decaimento, e o resultado é multiplicado por dois. Esse parâmetro passa a ser chamado de T30 (em último caso, é aceito o T20, a partir de procedimento similar, considerando um decaimento de 20 dB e multiplicando o resultado final por três) (Equação (2)).

b) Tempo de Decaimento Inicial (EDT): Quando a análise do T30 é feita para o decaimento de 10 dB, o parâmetro passa a ser chamado de Tempo de decaimento inicial. Também chamado de reverberância, carrega a informação do comportamento da curva de decaimento sonoro logo após o término da emissão do som pela fonte.

c) Clareza (C80): Figueiredo (2005) mostra que a clareza é a razão logarítmica entre a energia do som até os primeiros 80 ms e a energia após os 80 ms até 3000 ms. A informação mais importante é a energia contida nos primeiros 80 ms em relação à energia após os 80 ms. Isso é importante para monitorar a concentração de energia dentro da curva de decaimento. Esse parâmetro é mais indicado na avaliação de recintos para execução musical.

$$C80 = \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \text{ dB} \quad (8)$$

2.3. Método dos Raios Acústicos

O estudo de ambientes confinados realizado sob a ótica da teoria de ondas acústicas, por sua complexidade, produz uma resposta rica em informações sobre os diversos parâmetros acústicos, mas demanda uma carga computacional que torna o processo custoso e lento. A teoria dos raios acústicos, por sua simplificação, surge como uma alternativa mais prática e, portanto, largamente utilizada nesses casos (MELO, 2007).

De acordo com a acústica de raios, o som se propaga como um raio luminoso, comportando-se com propriedades análogas à ótica geométrica. Dessa forma, o som vai se propagando em linha reta sendo submetido às interferências do meio e das superfícies de contorno, como o ar, as paredes e o piso. Essas superfícies provocam os efeitos de absorção, reflexão especular (MELO, 2007). A reflexão especular é a que obedece à lei de Snell, quando a onda refletida tem o mesmo ângulo da incidente. Isso ocorre quando a superfície refletora é rígida e com dimensões muito maiores que o comprimento da onda incidente. Se a reflexão é diferente da especular, chama-se de não especular ou difusa (MELO, 2007). Nesse caso, a reflexão especular é o fenômeno mais importante do método, como se

observa na prática (GERGES, 2000). Porém, essa condição sugere uma limitação em baixas frequências, quando a reflexão difusa (difração) passa a ser alta demais em relação à reflexão especular para ser negligenciada. A frequência de corte, definida por Schoeder, onde acima dela a teoria é válida, é dada por:

$$f_c = 2000 \sqrt{T/V} \quad (10)$$

Onde T é o maior tempo de reverberação em segundos; V é o volume em metros cúbicos (GERGES, 2000).

2.4. Dissertação de Letícia Rocha (2010)

Motivada pela obrigatoriedade legal do ensino de música no ensino básico e fundamental, Rocha (2010) pesquisou sobre os pormenores que envolvem essa parte da ciência no tocante ao ambiente de ensino, ou seja, a sala de aula. Nessa pesquisa, cujo tema é Acústica e Educação em Música: Estudo Qualitativo para Sala de Ensaio e Prática de Instrumento e Canto, baseada no conhecimento de que a música é o resultado da interação entre os diversos envolvidos como cantor, instrumento, público e sala, selecionou ambientes utilizados para essa atividade e, partindo do pressuposto de que não há consenso nem na literatura nem entre profissionais da música sobre os critérios fundamentais para atender às necessidades do ensino e aprendizagem de música, investigou quais seriam esses critérios a serem adotados em salas de prática de ensino e aprendizagem de música que promovam o máximo desenvolvimento do aluno. Essa pesquisa foi feita com base em busca na literatura e em levantamento de opinião junto a professores e alunos de música. Por meio desta, foi possível estabelecer tendências que indicaram direções na obtenção da acústica mais favorável para salas de música. A revisão bibliográfica, o questionário aplicado e a análise dos resultados corroboraram para a confirmação do pressuposto.

2.5. Dissertação de Fernanda Marros (2011)

Em sua pesquisa sobre o tema Caracterização Acústica de Salas para Prática e Ensino Musical, Marros (2011) investigou a correlação entre parâmetros objetivos e subjetivos buscados através de medições e consulta aos usuários. A comparação dos resultados permitiu a confirmação de alguns valores de parâmetros de referência levantados nesse trabalho e também a confirmação da não existência de definição por parte dos profissionais sobre quais itens devam ser considerados importantes para uma acústica eficiente.

Destacam-se nas conclusões o evidenciamento de algumas contradições entre as recomendações de autores e a percepção subjetiva dos usuários. A diferença entre o volume das salas pode ser determinante para essa conclusão, considerando que os autores investigaram grandes teatros e o objeto da pesquisa de MARROS (2011) é investigar salas de aula de dimensões comparativamente inferiores.

Percebe-se o caráter complementar entre a dissertação ora referenciada e esse trabalho quando se observa na seção de sugestões para trabalhos futuros, que aponta os itens a seguir, claramente coincidentes com o objeto proposto:

- Auralização de modelos computacionais de salas de volumes reduzidos, para auxílio na avaliação subjetiva;
- Definir valores de referência para os parâmetros de avaliação da qualidade acústica de salas para música relacionados à salas com volumes reduzidos.

2.7. Dissertação de Márcio Carboni (2012)

Na pesquisa realizada como dissertação de Mestrado em Engenharia Civil na área de acústica, Carboni (2012) buscou identificar as preferências dos professores de música em relação às salas de ensino e prática de música, preferencialmente acerca do tempo de reverberação. Como Rocha (2010), identificou que não existe um consenso entre os profissionais sobre essas preferências. Carboni (2012) primeiramente instruiu alguns professores selecionados a participar da pesquisa para que eles adquirissem vocabulário técnico e respondessem ao questionário devidamente capacitados.

A análise qualitativa dos dados obtidos ao final da pesquisa retornou com dados bastante úteis à essa pesquisa:

- Os extremos quanto à recerberação são muito prejudiciais;
- Quando se fala em sala ideal, é imperativo definir o tipo de instrumento utilizado, pois cada um possui necessidades de sustentação acústica diferenciadas;
- O ideal é que as salas permitissem fácil modificação do tempo de reverberação para atender à uma maior gama de instrumentos.

2.8. Norma Internacional ISO 3382

O Anexo A da norma internacional ISO 3382 trata das especificações para medição da resposta impulsiva em auditórios. Esta parte especifica os métodos para a medição do tempo de reverberação e outros parâmetros de desempenho acústico de salas. Ela descreve o procedimento de medição, o aparelhamento necessário, a cobertura necessária e o método de avaliar os dados e apresentar o relatório de ensaio. É destinada à aplicação de modernas técnicas de medição digital e para a avaliação de parâmetros acústicos de salas derivados de respostas ao impulso.

3. Materiais e Métodos

3.1. Descrição das Salas Utilizadas nas Medições

Atendendo às características levantadas, foi selecionada a sala de artes da Escola de Ensino Fundamental Santa Emília localizada na região central de Belém-Pa, que já

é utilizada para ensino de artes, incluindo música, e não se encontra acusticamente preparada para esse fim. Trata-se uma instituição privada de educação básica que atende alunos na faixa de 02 a 14 anos nas modalidades de Educação Infantil e Ensino Fundamental.

3.2. Ensaio Experimentais

3.2.1. Metodologia

Dentre outras providências, a norma ISO 3382 determina o número de posições de microfone, de médias, posições de fonte e faixas de frequência a serem utilizadas nas medições para a obtenção de resultados válidos. Esses valores são definidos com base nas áreas das salas pesquisadas e no objeto da investigação. Nesse ensaio busca-se os valores dos parâmetros EDT, T30 e C80 utilizando o software DIRAC para posterior comparação com os mesmos parâmetros encontrados na modelagem virtual dos recintos com o software ODEON.

De acordo com a norma, foram utilizadas duas posições para a fonte: uma no canto da sala, para excitar o maior número de modos possível; a outra foi posicionada mais ao centro, a 1,5 m de altura, apenas com o cuidado de não colocar exatamente no centro geométrico, evitando a alocação em um nó e, dessa forma, deixando de receber as respostas de algum modo acústico. A faixa de frequência utilizada foi a de 250 – 8000 Hz, limites naturais da fonte. Quanto aos microfones, foram utilizadas seis posições diferentes, com alturas variadas, mas não inferiores a 1 m de cada superfície, seja piso, parede ou teto. Cada posição foi excitada por 3 vezes e, ao final, o resultado apresentado é uma média espacial e temporal dos valores de T30, EDT e C80. Os equipamentos utilizados estão relacionados a seguir, de acordo com o esquema de montagem dos mesmos ilustrado na Figura 2.

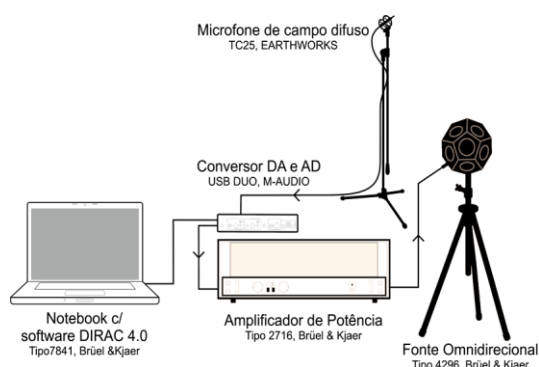


Figura 2: Esquema de montagem dos equipamentos .

- Power Amplifier Type 2719 da B&K, SN 2719E02A04K0256;
- Professional USB Mic preamp with S/ PDIF ;
- Placa de audio DUO USB Mic Pre. Stand Alone A/D Converter 24 BIT/96 kHz;

- Microfone de campo difuso Earthworks TC25;
- Fonte unidirecional omnidirecional 4296 serial nº 2448667 com 12 altofalantes;
- Software especializado em medições de acústica Dirac B&K 4.0 Type 7841 Build 2552.

3.2.2. Medição da Resposta Impulsiva

Na medição, a localização das fontes em coordenadas x, y e z foram F1 (1.5, 1.5, 1.5) e F2 (0.00, 0.00, 0.00), enquanto que os microfones ficaram em M1 (3.72, 4.94, 1.20), M2 (1.74, 5.50, 1.20), M3 (1.37, 2.30, 1.20), M4 (3.37, 1.29, 1.20) e M5 (3.00, 3.00, 1.20). Os dois retângulos no canto inferior representam a mesa e o armário. O pé direito é 3,40m O experimento foi realizado em 04 de outubro de 2011 e iniciado às 13:58h. A temperatura era 26°C, umidade 50%, com condicionador de ar tipo split ligado. A Figura 3 mostra a locação dos pontos através de coordenadas. Baseado nessas medidas, a frequência de Schroeder calculada é 305,8 Hz.

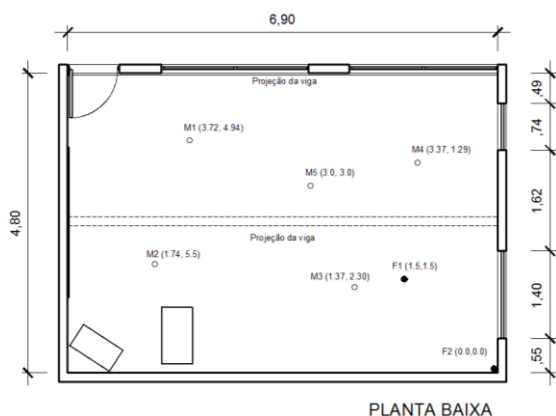


Figura 3: Planta baixa da sala de estudo.

4. Modelagem virtual

4.1. Elaboração dos Modelos Tridimensionais

Na modelagem virtual, é necessário que se utilize ao menos dois softwares distintos. Para tal foram utilizados AutoCAD 2010 e ODEON. As etapas da modelagem são descritas a seguir:

- Modelagem da geometria no Autocad 3D: a primeira parte, referente à modelagem da geometria, pode ser feita utilizando-se o software AutoCAD. Essa etapa é concluída com a criação das superfícies, quando o arquivo é salvo na extensão dxfl.
- Importação pelo ODEON: importação da geometria pelo software de modelagem virtual acústica ODEON.
- Atribuição de materiais para as superfícies: no software ODEON torna-se possível inserir características de absorção de cada superfície.

- Alocação das fontes e receptores: nessa primeira fase é necessário que se utilize as mesmas posições de fonte e microfone, para que se possa comparar de forma confiável as versões experimentais e virtuais.
- Processamento das informações: após a inserção de todas as informações necessárias, o programa calcula a resposta da sala através do método dos raios acústicos.
- Leitura dos dados (parâmetros): os resultados podem ser lidos através de tabelas e gráficos, por bandas ou terças de oitava e por microfone ou a média destes.

A Figura 4 mostra etapa da modelagem feita no AutoCAD. As cores evidenciam a separação de superfícies por layers.

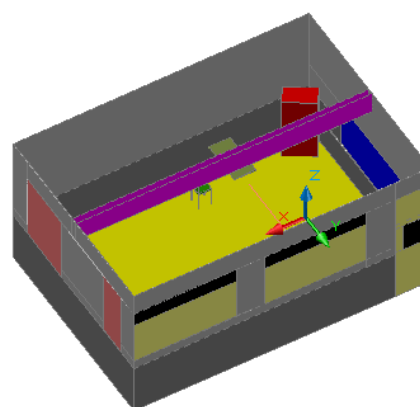


Figura 4: Modelagem da geometria da sala de estudo no Software AutoCAD.

Na Tabela 1 são mostrados os valores de absorção e materiais selecionados para a sala.

Tabela 1: Coeficientes de absorção acústica das superfícies da sala de estudo.

Superfície	Material	Absorção por Banda [Hz]					
		250	500	1k	2k	4k	8k
Armário Metali	17013	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Quadro Branco	17004	0,07	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10
Cadeira	17013	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Piso Lajota	17004	0,07	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10
Viga Alvenaria	17004	0,07	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10
Parede Alv	17004	0,07	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10
Teto Alvenaria	17004	0,07	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10
Vidro	16000	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	0,01
Esq /Divisoria	17020	0,30	0,30	0,30	0,20	0,18	0,10
Azulejo	01000	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Mesinha	17013	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Cortina	17002	0,40	0,30	0,47	0,65	0,80	0,80

4.2. Convergência de Resultados.

Antes de iniciar o cálculo dos parâmetros, foi necessário ajustar o número de raios que o software ODEON necessita para que não haja alteração dos valores por insuficiência de amostragem. Essa etapa, aqui denominada de convergência de resultados, consiste em

testar os resultados dos parâmetros que serão utilizados na validação nas frequências médias de 500 e 1000 Hz para números de raios diferentes. Quando os valores convergirem a um número, a quantidade de raios é considerada suficiente. Um elevado número de raios torna o processo computacional complexo e lento, enquanto que um baixo número, simples e rápido, com o risco de ser insuficiente. O compromisso é encontrar um bom custo benefício entre o tempo de processamento e a confiabilidade do resultado.

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para os parâmetros T30, EDT, C80 e D50 em 500 e 1000 Hz da sala da Escola Santa Emília com a variação do número de raios de 500 a 10000 com passo de 250.

Tabela 2: Valores de parâmetros por número de raios para a sala de estudo.

Nº Raios	T30		EDT		C80	
	500 Hz	1000 Hz	500 Hz	1000 Hz	500 Hz	1000 Hz
500	0,54	0,62	0,57	0,62	8,60	7,90
750	0,57	0,61	0,55	0,57	9,00	8,40
1000	0,56	0,62	0,58	0,62	8,40	7,90
2500	0,58	0,63	0,58	0,62	8,50	7,90
5000	0,58	0,61	0,57	0,60	8,30	7,80
7500	0,59	0,62	0,55	0,61	8,60	8,00
10000	0,59	0,62	0,58	0,63	8,50	8,00

Como observado pelos resultados da tabela, para todos os parâmetros o número de raios que alcançou a estabilidade das respostas foi 2500. O teste até 10000 raios mostra que não houve alteração significativa a partir de 2500 raios. Esse resultado foi adotado como valor padrão para todos os testes deste trabalho.

4.3. Validação do modelo.

Alguns testes são necessários para garantir a equivalência acústica entre os modelos real e virtual. Nessa parte do trabalho são confrontados os resultados das medições experimentais com os das simulações virtuais e comparados em gráficos que apresentam simultaneamente as situações medidas, simuladas e ainda a tolerância de erros chamada de diferença no limite do observável estipuladas pela ISO 3382-1, cuja sigla original é JND (*just noticeable difference*). O JND é função do valor medido. As comparações são em relação aos quatro parâmetros objetivos que serão explorados no trabalho, T30 (tempo de reverberação), EDT (reverberância) e C80 (clareza). Uma sala é considerada válida quando os resultados dessa etapa é considerado satisfatório. A Tabela 3 mostra os valores de tolerância de erro para mais e para menos referentes a cada parâmetro que serão consideradas em todos os gráficos.

a) T30 – Tempo de Reverberação

A simulação da sala para o T30 ficou inteiramente dentro da faixa do JND e praticamente coincidente entre

500 e 1000 Hz. Os valores e as curvas resultantes da simulação são apresentadas na Tabela 4 e na Figura 5.

Tabela 3: Valores de JND por parâmetro.

Aspecto Subjetivo	Parâmetro Objetivo	Frequências Médias	JND
Reverberação	T30	500 - 1000	0,05 s
Reverberância	EDT	500 - 1000	0,05 s
Clareza	C80	500 - 1000	1dB

Fonte: ISO 3382-1

Tabela 4: Valores de T30 medido x simulado para sala a sala de estudo.

Freq[Hz]	Medido	Simulado
250	1,2710	1,265
500	1,1515	1,105
1000	1,0705	1,080
2000	0,9709	0,990
4000	0,8360	0,870
8000	0,6485	0,655

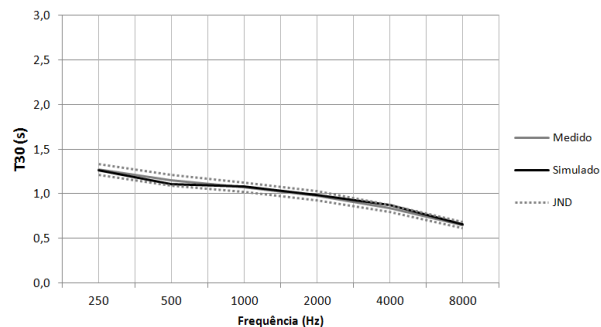


Figura 5: Validação do T30 para a sala de estudo.

b) EDT – Tempo de Decaimento Inicial

Os resultados para o EDT mostraram diferenças consideráveis. Evidenciou-se, no entanto, uma relação entre a tendência de decaimento das curvas, o que indica que a sala tem respostas semelhantes. Os valores e as curvas resultantes da simulação são apresentadas na Tabela 5 e na Figura 6.

Tabela 5: Valores de EDT medido x simulado para a sala de estudo.

Freq[Hz]	Medido	Simulado
250	1,6515	1,30
500	1,5255	1,12
1000	1,6050	1,07
2000	1,3070	1,01
4000	1,1480	0,88
8000	0,8015	0,66

c) C80 – Clareza

Como o EDT, o C80 também ficou fora da faixa de tolerância, demonstrando, no entanto, a mesma tendência na curva, indicando um comportamento semelhante entre os modelos comparados. Os valores e as curvas resultantes da simulação são apresentados na Tabela 6 e na Figura 7.

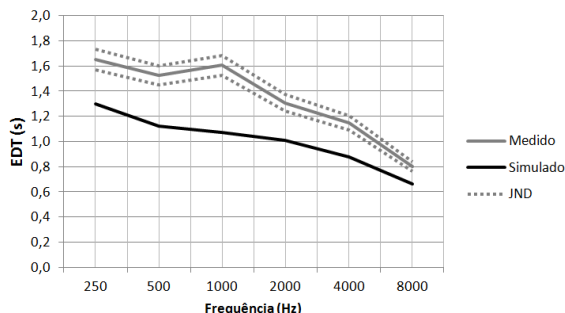


Figura 6: Validação do EDT para a sala de estudo.

Tabela 6: Valores de C80 medido x simulado para a sala de estudo.

Freq[Hz]	Medido	Simulado
250	0,260	1,8
500	-0,475	2,8
1000	-0,800	3,1
2000	0,390	3,7
4000	1,755	4,8
8000	4,270	7,3

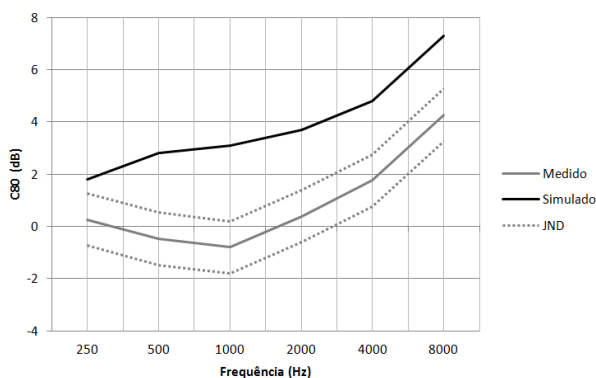


Figura 7: Validação do C80 para a sala de estudo.

Apesar das diferenças na comparação de alguns parâmetros, com resultados conseguidos depois de exaustivas tentativas, considerou-se que essa é a melhor versão virtual da sala, levando-se em conta a dificuldade na definição da absorção das divisórias nas esquadrias por conta da fuga de energia, o que pode ter influenciado fortemente no erro apresentado.

5. Definição das Referências

Para balizar essa seleção, foram selecionados valores de referência cujos autores os conceberam baseados em ambientes com a mesma função. Foram também criados três grupos com diferentes valores de tempo de reverberação, cada um referente a um grupo de instrumentos ou vozes.

Em relação ao primeiro grupo, Osaki e Schmidt (2009) determinaram em sua pesquisa que para ensino de teoria musical, quando a fala deve ser bem compreendida apesar de ser utilizada uma sala de música, os valores

de tempo de reverberação devem estar entre 0,4 e 0,8 s para salas com volumes entre 120 e 210 m³. Esse volume enquadra as três salas envolvidas nesse estudo e também o diferencia dos valores estipulados para grandes salas de apresentação, com volumes obviamente maiores. Essa particularidade na obtenção dessa faixa foi determinante para a seleção dos valores de referência.

No segundo grupo Cohen (1992) indicou valores entre 0,8 e 0,9 s para salas onde será ouvido piano. Creighton e Lamberty (1978) indicaram o ideal de 0,75 s para prática de percussão e Boner e Cofen (2000) indicaram a faixa 0,7 a 0,9 para ensaio de conjunto de sopro. Será admitida como faixa para esse estudo a situada entre 0,8 e 0,9 s, eliminando a interceção entre a faixa inferior, ainda que seja incluso no grupo os instrumentos de percussão (0,75 s), pois pelas características são mais apropriados ao tempos da faixa superior.

O terceiro grupo, com maior tempo de reverberação, foi determinado segundo dados das pesquisas de Boner e Cofen (2000), que indicaram a faixa de 0,9 a 1,5 s para ensaio de coral e ensaio de banda/orquestra.

A referência do Tempo de decaimento inicial (EDT) foi definida pela pesquisa de Pisani (2001), com valores entre 1,8 e 2,6 s.

Quanto ao C80, Beranek (2004) observa que para salas de estudo os músicos tem preferência por valores entre 1 e 5 dB, lembrando que os valores mais elevados nesse parâmetro aumentam a inteligibilidade e a percepção dos intervalos. A Tabela 7 mostra a compilação dos valores admitidos aqui como referência.

Tabela 7: Valores de referência.

Parâmetro Objetivo	Autor	Instrumento	Referência
T30 - 1º grupo	Osaki e Schmid	Teoria musical	0,4 a 0,8 s
T30 - 2º grupo	Cohen/Ryherd/Geerds	Piano/Sopro/percussão	0,8 a 0,9 s
T30 - 3º grupo	Boner e Coffen	Coral/orquestra	0,9 a 1,5 s
EDT	Pisani	-	1,8 a 2,6 s
C80	Beranek	-	01 a 05 dB

Fonte: Mannis (2008). Compilado pelo autor (2013).

6. Modificações nos Modelos Virtualizados

6.1. Seleção das Modificações

Nessa fase são feitas alterações nos materiais das superfícies da sala modelada objetivando a modificação dos valores de parâmetros na intenção de aproximar ou igualar as referências encontradas na Tabela 7. Foi proposta uma alteração de material descrito na sequência, sendo que as demais superfícies serão mantidas iguais às originais. Ao final, são apresentados os resultados de cada parâmetro tanto das alterações

propostas quanto das simulações anteriores para comparação.

Na proposta foram posicionados em uma das paredes dois painéis com material acusticamente absorvedor de 1,875 x 3,125 m Sonex Roc 45mm, cujos valores dos coeficientes de absorção são apresentados na Tabela 8. A ordem de colocação dos painéis, tendo como referência a vista da secção 01, começa com o painel da direita, seguido pelo da esquerda. O posicionamento dos painéis são mostrados na planta baixa (Figura 8) e na secção 01 (Figura 9).

Tabela 8: Coeficientes de absorção acústica para Sonex Roc 45 mm.

Superfície	Material no Odeon	Banda					
		250	500	1k	2k	4k	8k
Sonex Roc 45 mm	17027	0,70	1,00	0,85	0,91	0,90	0,90

Fonte: Catálogo Owa Brasil Sonex (2008).

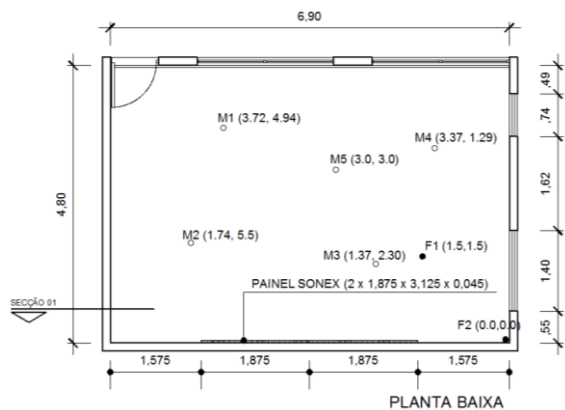


Figura 8: Planta Baixa da sala de estudo.

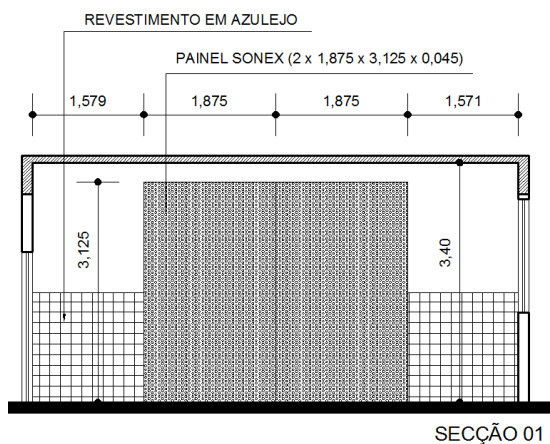


Figura 9: Secção 01 da sala de estudo.

6.2. Análise dos Resultados.

Cada figura apresenta três informações sobre valores de parâmetros: original – referente à resposta da sala sem modificações; painel 1 – referente à resposta da sala com a inserção do primeiro painel; e painel 2 – referente à resposta da sala com a inserção do segundo painel.

Um grupo de faixas em nuances de cinza facilita a visualização das referências apresentados na Tabela 9.

a) T30

Na Tabela 9 e na Figura 10 podemos conferir os valores e as curvas de resposta da sala para o T30.

Tabela 9: Valores de T30 para a sala de estudo.

Freq[Hz]	Situações		
	Original	Painel 1	Painel 2
250	1,30	0,94	0,71
500	1,12	0,78	0,58
1000	1,07	0,81	0,61
2000	1,01	0,73	0,57
4000	0,88	0,68	0,55
8000	0,66	0,53	0,45

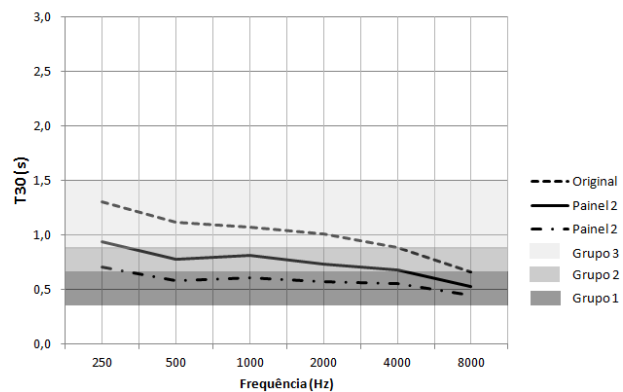


Figura 10: Comparação dos T30 para a sala de estudo.

Em uma análise preliminar, verifica-se que os três grupos de instrumentos foram atendidos na proposta, pois cada curva se encontra em uma faixa de referência distinta, sobretudo na banda entre 500 e 1000 Hz. Essa condição destaca que a sala em seu estado original já atende às determinações dos autores que definiram os limites do Grupo 3. Com a adição do Painel 1, a curva foi deslocada em sua maior extensão para a faixa do Grupo 2, ficando posicionada ao centro na banda entre 500 e 1000Hz. Ao adicionar o Painel 2, a curva foi deslocada quase completamente para a faixa do Grupo 1, satisfazendo as condições estabelecidas pelos autores.

b) EDT

A Tabela 10 e a Figura 11 apresentam as curvas referentes à resposta da sala em relação ao EDT.

Tabela 10: Valores de EDT para sala de estudo.

Freq [Hz]	Configuração		
	Original	Painel 1	Painel 2
250	1,29	0,92	0,69
500	1,12	0,78	0,57
1000	1,09	0,78	0,60
2000	0,99	0,71	0,59
4000	0,88	0,66	0,53
8000	0,63	0,51	0,41

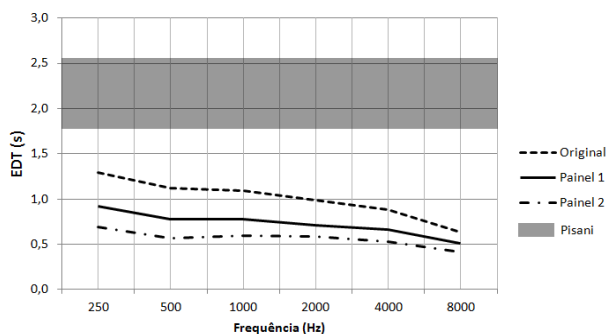


Figura 11: Comparação dos EDT para sala de estudo.

Observa-se que as curvas ficaram bem abaixo da faixa de referência determinada por Pisani, obedecendo igualmente a proporção direta entre a adição de absorção e o distanciamento da curva em relação à referência, reiterando a idéia de que os valores divergentes da referência são motivados pela divergência entre volume das salas comparadas, já que esse parâmetro é sensível à tal mudança.

c) C80

A Figura 12 e Tabela 11 mostram o resultado das respostas da sala para o C80.

Tabela 11: Valores de C80 para sala da Escola Santa Emília.

Freq [Hz]	Configuração		
	Original	Painel 1	Painel 2
250	1,8	4,3	6,4
500	2,8	5,7	8,3
1000	3,1	5,6	7,8
2000	3,7	6,2	8,4
4000	4,8	7,1	9,2
8000	7,3	9,4	11,4

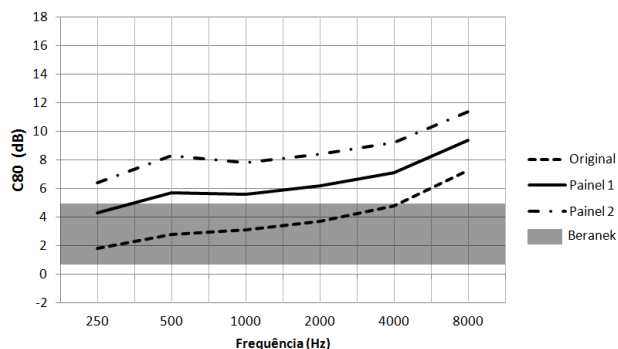


Figura 12: Comparação dos C80 para sala da Escola Santa Emília.

Nessa situação observamos que o autor encontra na sala original a melhor resposta. A relação é direta entre a adição de absorção pelos painéis e o afastamento das curvas da faixa definida por Beranek. As duas interferências deslocaram a curva do C80 para acima

dos valores máximos estipulados e devem ser avaliados comparativamente com a sensação subjetiva na auralização.

7. Auralização

A auralização é uma funcionalidade do software ODEON que consiste em ouvir a resposta da sala virtual a estímulos sonoros gravados em câmara anecóica, cujos efeitos percebidos são unicamente causados pela interação entre instrumento e a sala testada.

Nesse trabalho, um músico e professor profissional foi convidado a ouvir a auralização e emitir suas opiniões sobre as impressões subjetivas da sala, indicando as virtudes e os problemas que possam ser encontrados na avaliação. Esse procedimento é feito em etapas distintas. A primeira é executada quando a modelagem é validada. A segunda é feita depois que os valores dos parâmetros são alterados pela modificação das superfícies

7.1. Análise da Auralização.

Na configuração original foi observado que as vozes do Grupo 3 foram bem atendidas pela resposta da sala, confirmando a informação fornecida pelo Gráf. 3.40. Os grupos 1 e 2 não foram bem percebidos na avaliação desse ensaio, pois os tempos de reverberação elevados foram prejudiciais a ambos.

Utilizando-se um painel de Sonex (Painel 1) observou-se que o Grupo 3 foi prejudicado, ficando as frases interrompidas por um tempo excessivo. O Grupo 2 foi o mais bem percebido, avaliando a informação do Gráf. 3.68. O grupo 1 não foi bem atendido por essa configuração da sala, uma vez que a voz falada não foi bem assimilada no ensaio.

Já com a configuração Painel 2, o Grupo 1 foi muito bem atendido, pois frases bem inteligíveis foram evidenciadas no teste. O Grupo 3 não foi bem avaliado, pois a voz cantada ficou excessivamente curta, comprometendo a performance. O grupo 2 foi bem avaliado, pois a sala apresentou resposta satisfatória para os instrumentos desse grupo.

7.2. Análise dos Resultados

As análises da auralização em paralelo com as análises das curvas nos gráficos da sala reafirmam em sua maioria as constatações utilizadas como referência, divergindo em outros pontos, principalmente no parâmetro EDT. Nos gráficos referentes ao T30 o comportamento das curvas em relação aos valores de referência foi compatível com as sensações subjetivas. As divisões dos grupos foi percebida de maneira clara na análise da auralização.

Para o parâmetro subjetivo EDT, as respostas da auralização e o comportamento do gráfico em relação às curvas são bastante divergentes em todas as simulações. Desde a medição da resposta impulsiva, representada no

gráfico pela curva denominada Original, as diferenças em relação aos valores definidos por Pisani foram discordantes. O comportamento da curva do parâmetro é proporcional ao comportamento da curva do T30, o que justifica que a adição de absorção na sala tende a afastar ainda mais os valores da referência. Partindo dessa premissa, observamos que o T30 e EDT são valores aproximados com uma ligeira superioridade dos valores para o T30. Como a referência de EDT não foi determinada pelo mesmo autor da referência do T30, pois os autores não trabalharam os mesmos parâmetros, entende-se que os valores estipulados por Pisani não levaram em consideração o tipo de uso da sala e, nesse caso, não podem ser adotados no caso específico de pequenas salas e instrumentos que necessitem de sustentações diferenciadas.

Sobre o parâmetro C80, a curva referente à sala original ficou dentro da faixa por quase toda a banda. Com a adoção do painel 1, houve um deslocamento para cima da faixa, ainda que bem próximo do limite. A introdução do painel 2 afasta ainda mais a curva do limite da referência.

A Tabela 12 mostra a nova composição dos valores de referência após as conclusões deste trabalho.

Tabela 12: Valores de referência.

Parâmetro Objetivo	Autor	Instrumento	Valores de Referência
T30 - 1º grupo	Osaki e Schmid	Teoria musical	0,4 a 0,8 s
T30 - 2º grupo	Cohen/Ryherd/Geerds	Piano/Sopro/percussão	0,8 a 0,9 s
T30 - 3º grupo	Boner e Coffen	Coral/orquestra	0,9 a 1,5 s
EDT	André Santana	-	0,57 a 1,20 s
C80	Beraneck	-	01 a 05 dB

Fonte: Mannis (2008). Compilado pelo autor (2013)

8. Considerações finais

Após a utilização dos painéis e da análise das auralizações e comparações com os gráficos de resposta, pôde-se observar com precisão que foram encontrados os mesmos valores de T30 que foram apontados nas referências, reafirmando esses tempos para a sala ora projetada.

Os valores de EDT não foram confirmados pela modelagem feita nesse trabalho, o que implica em novos valores para orientar as construções e adaptações acústicas para as atividades relacionadas às salas de música. Esses novos valores que ficaram entre 0,57 e 1,2 foram aprovados nas auralizações, o que indica uma confirmação dos valores para a determinação de referências para novas salas.

O parâmetro C80, tal como o T30, apresentou aproximações satisfatórias com os valores de Beraneck,

entendendo-se, portanto, que podem ser utilizados como base para as salas dessa característica.

Referências

- [1] BERANEK, L. L. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustic and Architecture*. New York: Springer-Verlag, 2004.
- [2] CARBONI, M. H. S. Qualidade Acústica em Salas de Ensino de Música: Parâmetros Acústicos Preferenciais na Opinião de Professores de Música. Dissertação para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, Curitiba: UFPR, 2012.
- [3] CORSIVIERI, E. A República. Editora Nova Cultural Ltda, São Paulo, SP, 1997.
- [4] FIGUEIREDO, F. L. Parâmetros acústicos subjetivos: Critérios para avaliação da qualidade acústica de salas de música. Dissertação do curso de Artes na área de Musicologia da Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 2005.
- [5] GERGES, S. N. Y., Ruído - Fundamentos e Controle, Editora NR, 2ª edição, Florianópolis –SC – Brasil, 2000.
- [6] ISO 3382:1997: *Acoustics – Measurement of the reverberation time of room with reference to other acoustical parameters*.
- [7] LINDSAY, R. *Acoustics: Historical and Philosophical Development*. Dowden: Hutchinson&Ross, 1972.
- [8] MARROS, F. Caracterização Acústica De Salas Para Prática E Ensino Musical. Dissertação para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria: UFSM, 2011.
- [9] MELO, V. et al. Aperfeiçoamento do software RAIOS para simulação numérica de acústica de salas com inclusão de modelo modal para baixas frequências. *Acústica e Vibrações*, v. 38, 2007.
- [10] OSAKI, A. G.; SCHMID, A. L. Tempo de reverberação de salas de ensino de música. In: EVINCE. Anais, Curitiba, 2009.
- [11] PISANI, Raffaele. Valutazione delle qualità austiche delle sale per spettacolo. In: SPAGNOLO, Renato (Org.) *Manuale di acustica applicata*. Torino: UTET, 2001.
- [12] ROCHA, L. Acústica e educação em música: critérios acústicos preferenciais para sala de ensino e prática de instrumento e canto. Dissertação para o Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná. Curitiba: UFPR, 2010.