

SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE UMA SALA MULTIUSO PARA A PRÁTICA MUSICAL: POSSIBILIDADES DE ADAPTAÇÃO AO USO

Pollyanna Rodrigues Lima (1); E. Felipe Vergara (2)

(1) Arquiteta, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina, pollyannalima@outlook.com

(2) Dr., Professor do Departamento de Engenharia Mecânica, e.f.vergara@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica - Laboratório de Vibrações e Acústica, Campus Universitário, Trindade, Florianópolis-SC, 88040-970, Tel.: (48) 3721-9227

RESUMO

Para que o músico desfrute de uma experiência satisfatória no ambiente de sua prática musical, um projeto acústico específico é essencial. Em um contexto onde cada vez mais um mesmo ambiente é utilizado para usos que requerem projetos acústicos distintos, salas multiuso vêm sendo utilizadas para a prática musical, sem que haja uma adequação acústica das mesmas. Partindo do pressuposto de que essas não se encontram adequadas à prática musical, esse trabalho se dedicou a caracterizar o ambiente acústico de uma sala multiuso através de ensaios experimentais e simulação computacional a fim de simular alternativas que possam adequá-las ao uso. O objetivo principal foi demonstrar a contribuição da simulação computacional acústica na possibilidade de adaptação de salas de aula multiuso existentes para o ensino e prática musical. Os principais parâmetros acústicos (TR, EDT, C_{80} , D_{50} , STI) da sala foram obtidos experimentalmente, posteriormente tratados, analisados e comparados com os valores indicados pela literatura para a prática musical. Os valores obtidos não se encontravam dentro dos limites indicados. Para testar diferentes alternativas fazendo uso da simulação computacional, foi necessário antes desenvolver um modelo computacional fiel ao modelo real, cuja diferença entre eles deveria estar dentro do limiar diferencial (JND), de acordo com a norma ISO 3382: 2009. Após resultar em um modelo computacional fiel ao modelo real da sala, diferentes alternativas de soluções foram testadas a fim de obter um modelo que adequasse a sala à prática musical. O modelo considerado mais adequado foi apresentado, indicando as especificações necessárias para a adaptação da sala. A simulação computacional possibilitou criar um modelo computacional para a sala, fiel ao real, flexível a testes de diferentes combinações de modelos adaptados da sala, não só para a prática musical, como para futuros usos que possam vir a serem dados a ela, considerando que com esse modelo pode se testar diferentes possibilidades de inserção e/ou remoção de materiais acústicos.

Palavras-chave: acústica de salas, prática musical, qualidade acústica, adequação acústica, simulação computacional.

ABSTRACT

For the musician enjoy a satisfactory experience in your musical practice environment, a specific acoustic design is essential. In a context where increasingly the same environment is used for uses that require separate multipurpose rooms acoustic designs have been used for musical practice, without a fitness acoustics. On the assumption that these rooms need to go through a study and subsequent adaptation to avoid damaging the musical practice, this work is devoted to characterize the acoustic environment of a multipurpose room through experimental tests and computer simulation in order to simulate alternatives that may suit them to use. The main objective was to demonstrate the contribution of computational acoustics simulation on possibility of adapting existing multipurpose classrooms for teaching and musical practice. The main acoustic parameters (RT, EDT, C_{80} , D_{50} , STI) of the room were obtained experimentally, further processed, analyzed and compared with the values indicated by the literature for the musical practice. The values obtained were not within the limits indicated. To test different alternatives making use of computer simulation, was necessary before developing a computational model faithful to the real model, whose difference between them should be within the *just noticeable difference* (JND), according to ISO 3382:2009.

After working in a computational model faithful to the real model, different alternative solutions were tested in order to obtain a model that suited the music practice room. The model considered best suited was presented, indicating the specifications required for the adaptation of the room. The computer simulation made it possible to create a computational model for the room, faithful to the real, flexible testing different combinations of models adapted the room not only for musical practice, as for future uses that may be given to it, whereas with this model can test different possibilities of insertion and/or removal of acoustic materials.

Keywords: room acoustics, musical practice, acoustic quality, adequacy acoustics, computer simulation.

1. INTRODUÇÃO

A experiência satisfatória do usuário em um determinado ambiente está associada a diversos fatores, objetivos e subjetivos. No que diz respeito ao ambiente adequado ao ensino e prática musical, além dos requisitos mínimos de projeto (como conforto térmico, lumínico, ergonômico, acessibilidade), um projeto acústico específico é essencial para a performance do músico. Rocha (2012) afirma que a experiência da música não pode ser separada da acústica do espaço na qual ela é executada, isso tanto no ensaio e aprendizagem, quanto na apresentação.

O aparente descaso com a funcionalidade do espaço tem resultado em projetos cada vez mais multifuncionais, o que pode vir a prejudicar a sonoridade e a qualidade da performance artística. As mesmas salas utilizadas para a palavra falada cada vez mais têm abrigado também a prática musical, porém essas atividades exigem requisitos acústicos distintos (TAKAHASHI, 2010).

Em agosto de 2008, o Governo Federal aprovou a Lei nº 11.769, que torna obrigatória o ensino de música na componente curricular de artes, já antes obrigatória pela Lei nº 9.394, na educação básica. A mesma lei estabeleceu o prazo de 3 anos letivos, a contar daquela data, para que os sistemas de ensino se adaptassem a tal exigência. Com a aprovação da lei, muitas escolas têm adaptado salas de aula convencional, onde a fala é a principal atividade, para as atividades de ensino e prática de música, tendo em vista que a maioria das escolas não dispunha de um ambiente próprio para tal atividade. Muitas vezes, a adaptação das salas é quase nula, sem levar em conta os requisitos de condicionamento acústico necessários para a execução da atividade musical.

No caso de edificações existentes, é preciso indicar soluções práticas e adaptáveis para que o ambiente seja adequado à atividade ao qual se destina. Em se tratando da nova legislação imposta às escolas de ensino básico, poucas conseguiriam dispor de um novo ambiente projetado e construído para esse fim, de forma que se torna essencial conhecer estratégias de reformas e adaptações adequadas para o uso.

De modo geral, para avaliar o desempenho acústico de salas são usados os parâmetros de ruído de fundo e tempo de reverberação. O método tradicional para a medição do tempo de reverberação baseia-se na medida do decaimento do som no ambiente a partir da interrupção de um sinal sonoro (ruído branco ou rosa) emitido por uma fonte. Um método mais recente para avaliar as propriedades acústicas de uma sala baseia-se no princípio da resposta de um sistema a um impulso sonoro. A técnica impulsiva permite, além do cálculo do tempo de reverberação, o cálculo de outros parâmetros acústicos (OLIVEIRA, 2006).

Outro método de caracterizar o ambiente acústico de uma sala é por meio de simulação computacional. De acordo com Gade (2007), a simulação computacional leva em consideração a geometria e a distribuição dos materiais em um ambiente, bem como a posição real da fonte e do receptor. Como resultado, é possível prever os valores para diversos parâmetros acústicos importantes e, ainda, a geração de amostras de áudio do som produzido naquele ambiente para julgamentos subjetivos.

A simulação acústica de salas vem ganhando cada vez mais importância e aplicações, devido às interfaces cada vez mais amigáveis com as quais tem sido desenvolvidos os programas computacionais e, ainda, a maior precisão nos resultados encontrados. Além disso, a possibilidade também de se realizarem diversas modelagens com rapidez podendo ainda ser alteradas as dimensões e geometrias das salas, bem como as propriedades acústicas dos materiais que compõem as salas possibilitando simular diferentes campos acústicos e prever os parâmetros acústicos envolvidos com a qualidade acústica a qual se destina aquela sala (VÖRLANDER, 2008).

Um *round robin*¹ organizado por Vörländer (1995, apud MARROS, 2011, pg. 49) em 1995 testou 14 diferentes programas computacionais de simulação acústica para um mesmo auditório. O *Odeon*, *software*, que foi utilizado neste trabalho, estava entre os três programas que obtiveram melhores resultados. Trata de um software de simulação acústica que se baseia nos princípios da acústica geométrica, na teoria do traçado de raios, termo que vem originalmente da física ótica, que analisa a distribuição do campo acústico de uma

¹ Teste de comparação onde um participante enfrenta todos os outros participantes o mesmo número de vezes.

sala através da propagação dos raios sonoros (SVENSSON, 2008).

Para que um modelo computacional se aproxime o mais próximo possível do modelo real de uma sala a ser simulada, o ideal é comparar os dados obtidos experimentalmente com os dados obtidos por meio de simulação computacional. O critério que mensura a diferença aceitável entre o modelo computacional e modelo real recebe o nome de diferença apenas perceptível ("just noticeable difference", JND), ou limiar diferencial. Christensen e Koutsouris (2013) observam que o JND fornece uma boa sugestão quanto à precisão desejável em uma simulação computacional. Se a diferença entre o "real" (medido experimentalmente com precisão) e o parâmetro acústico simulado é menor do que o JND, então não há diferença perceptível e o resultado da simulação é tão bom quanto deveria ser. A ISO 3382:2009 e o manual do *Odeon* fornecem valores de JND para alguns parâmetros de avaliação da qualidade acústica, compilados na Tabela 1.

Dos parâmetros acústicos apresentados, além do Tempo de Reverberação (TR), considerado o parâmetro acústico mais importante no estudo de espaços internos – é o tempo, em segundos, em que um som se apresenta audível em um ambiente –, dois deles são considerados de maior importância para a música: Tempo de Decaimento Inicial, ou EDT, e Clareza, ou C_{80} .

O EDT, também apresentado em segundos, pode ser considerado subjetivamente mais importante do que o TR, pois é o parâmetro que descreve a percepção do tempo de reverberação pelo ouvido humano. Já C_{80} , apresentada em decibels, representa o grau de clareza com que uma música tocada em uma sala é ouvida. É o parâmetro acústico que demonstra o quão limpo e preciso um som se apresenta na sala. Quando C_{80} não está adequada, o som se apresenta confuso.

Tabela 1 - Parâmetros acústicos do ambiente e seu respectivo JND. (ISO 3382, 2009; CHRISTENSEN E KOUTSOURIS, 2013)

Aspecto subjetivo	Parâmetro objetivo	Frequência média (Hz)	JND
Reverberação	TR (s)	500 a 1000	5%
Percepção da reverberação	EDT (s)	500 a 1000	5%
Clareza	C_{80} (dB)	500 a 1000	1 dB
Definição	D_{50} (%)	500 a 1000	5%
Tempo Central	T_s (ms)	500 a 1000	10 ms
Percepção da audibilidade	G (dB)	500 a 1000	1 dB

No que diz respeito à qualidade de salas para a prática musical, diversos autores como Rigden (1985), Beranek (1962, 2004), Egan (1998), Barron (1993) Mehta, Johnson e Rocafort (1999) e Hidaka e Beranek (2000) tem publicado estudos onde avaliam parâmetros, objetivos e subjetivos, associados à prática musical, buscando junto a músicos experientes e/ou maestros de música critérios que possam ser estabelecidos para garantir um espaço adequado a prática, especialmente no que diz respeito a grandes salas de concerto – volumes superiores a 2000 m³. Em publicação mais recente, Vergara, Marros e Paul (2017) apresentam dados de sua pesquisa realizada em pequenas salas – menor do que 300 m³ – de prática e ensino de música, comparando os dados obtidos nas salas com a opinião dos músicos que as utilizam e também com os valores indicados como adequados pela literatura.

2. OBJETIVO

O objetivo desse artigo é demonstrar a contribuição da simulação computacional acústica na possibilidade de adaptação de salas de aula multiuso existentes para o ensino e prática musical.

3. MÉTODO

O método deste trabalho foi organizado nas seguintes etapas:

1. Ensaios Experimentais;
2. Simulação Computacional.

3.1. Ensaios experimentais

A sala aqui caracterizada é uma das três salas de aulas artísticas de uma instituição de ensino médio e superior, localizada em Florianópolis, Santa Catarina. Apesar de cada uma das salas receberem um nome que supostamente indicam seu uso – Sala de Música, Sala de Artes Visuais e Sala de Teatro – todas as três são utilizadas pelo ensino e prática musical, atualmente maior demanda da coordenadoria artística desta instituição. Os usos voltados à música são requeridos pelo Curso Básico de Instrumentos de Orquestra de qualificação profissional, pelos ensaios da Orquestra Experimental e do Coral da instituição, bem como pelas

aulas teóricas e práticas de música para os alunos do ensino médio conforme as exigências da Lei nº 11769, dentro da componente curricular de Artes do Ensino Médio.

3.1.1. Caracterização da sala

A Sala de Artes Visuais tem uma área de 59,50 m² e volume de 204,70 m³. É utilizada para todos os tipos de atividades artísticas pelos alunos da instituição e, frequentemente, vem sendo utilizada para a prática musical. Possui duas portas de acesso, do tipo de giro de uma folha, e, no sentido oposto a essas, há oito janelas do tipo maxim-ar. As Figuras 1 e 2 mostram o interior da sala.

Em relação aos materiais das superfícies, as paredes são simples de alvenaria de tijolos cerâmicos furados, rebocadas e pintadas com tinta látex acrílica. O piso é de cerâmica. O teto não possui forro, sendo apenas de reboco alisado e pintado com tinta látex acrílica. As janelas são de estrutura de PVC e vidro simples 6 mm. As portas são de madeira maciça com duas janelas de vidro cada uma. Persianas cobrem toda a extensão das janelas de vidro, exceto nas portas. O mobiliário presente na sala é muito variado, tais como mesa em MDF, estantes e armários metálicos, mapoteca metálica, pia para a lavagem de materiais, pranchetas para desenhos, telão para projeções, cadeiras plásticas e estofadas, piano de parede, violinos, entre outros materiais para atividades artísticas.



Figuras 1 e 2 - Interior da Sala de Artes Visuais.

3.1.2. Obtenção dos parâmetros acústicos

Nesta etapa da pesquisa foram realizados ensaios experimentais na sala a fim de obter os parâmetros acústicos da sala de modo experimental para posterior ajuste e compatibilização do modelo simulado em computador.

A resposta impulso da sala foi obtida a partir de medições acústicas realizadas de acordo com as determinações da norma ISO 3382-1:2009, que apresenta os métodos para obtenção dos parâmetros acústicos utilizados para determinar a qualidade acústica de salas. Os parâmetros resultantes dessa medição foram: Tempo de reverberação (TR), Tempo de decaimento inicial (EDT), Clareza (C₈₀), Definição (D₅₀) e Índice de transmissão da fala (STI).

O sistema utilizado para a medição da resposta impulso foram o sonômetro SOLO da marca 01 dB; um computador portátil com o software dBbati32, ligado ao sonômetro SOLO; e balões de látex tamanho gigante. Os balões gigantes foram utilizados como fonte para a geração do impulso sonoro quando estourados, enquanto que o sonômetro ligado a um computador portátil foram responsáveis pela aquisição dos dados e pós-processamento dos mesmos.

Foram utilizadas duas posições de fontes e para cada fonte foram fixados quatro pontos de receptor. Em cada ponto de receptor foram realizadas três medições a fim de garantir maior precisão da medição, dessa forma, valores incoerentes com podem ser eliminados. As fontes foram posicionadas a uma altura de 1,50 m e o microfone, em cada um dos pontos receptores, a 1,20 m.

Cabe aqui observar que antes das medições preocupou-se em remover as cadeiras existentes na sala, tendo em vista que esse mobiliário não é fixo nas salas e também provisório, bem como considerando a diminuição da complexidade do modelo computacional a ser confeccionado na etapa de simulação computacional. Além disso, as persianas foram mantidas fechadas.

Os resultados das medições foram tratados inicialmente no software dBbati32 a fim de corrigir os intervalos de decaimento para ajuste do Tempo de Reverberação aproximando-o mais próximo possível da correlação² igual a 1.

3.2. Simulação computacional

O *software* utilizado para realizar as simulações computacionais neste trabalho foi o *Odeon*, um *software* desenvolvido pelo Departamento de Tecnologia Acústica da Universidade Técnica da Dinamarca. Essa etapa de simulação foi realizada em quatro fases principais: confecção do modelo geométrico, definição e aplicação de materiais, ajuste do modelo e simulação acústica, a fim de resultar no modelo geométrico mais próximo possível do real comparando os parâmetros medidos experimentalmente com os obtidos na simulação (TR, EDT, C₈₀, D₅₀, STI). A Figura 3 ilustra de maneira esquemática os processos que envolveram a etapa de simulação computacional.

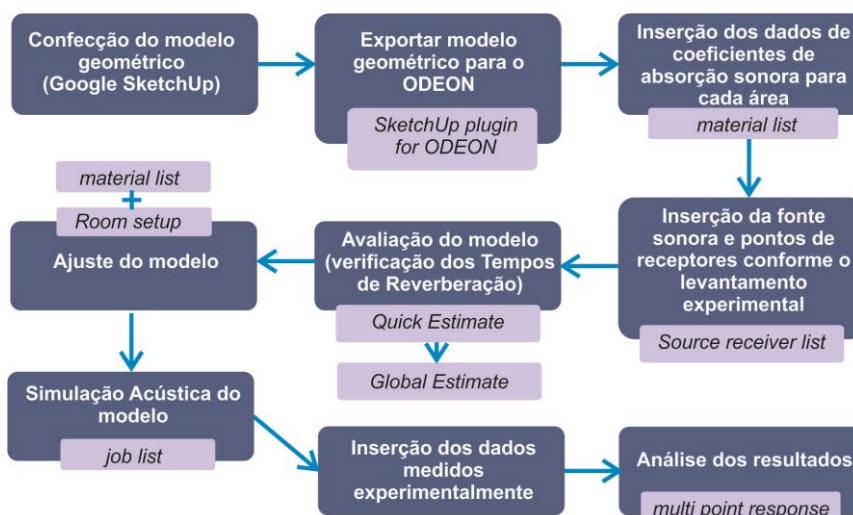


Figura 3 - Procedimentos gerais da simulação acústica e as respectivas ferramentas envolvidas.

3.2.1. Confecção do modelo geométrico

A criação de um arquivo contendo as informações das características geométricas da sala que se pretende simular é o ponto de partida para analisar uma sala no *Odeon*. A criação desse arquivo pode ser por meio da digitação dos dados em um arquivo de texto no módulo *Odeon editor*, utilizando o próprio software, ou utilizando o *plugin* disponível para o *SketchUp*, ou importando arquivos criados em programas de CAD (por exemplo, *AutoCAD*, *Autodesk Revit*, *3DStudioMax*) com extensão ".dxf", ou ainda combinando esses diferentes métodos de modelagem (CHRISTENSEN; KOUTSOURIS, 2013).

Estudos demonstraram que a confecção do modelo no *SketchUp* e posterior exportação do modelo para o *Odeon* pode se mostrar um método menos complexo, especialmente para aqueles que já familiarizam-se com a ferramenta, e, por isso, também torna-se um método mais rápido, de forma que esse foi o método adotado para este trabalho (MARROS; DORNELES; VERGARA, 2010).

A geometria da sala foi modelada de maneira simplificada, com a minimização de superfícies – desprezando pequenas bordas, reentrâncias e detalhes minuciosos irrelevantes para a simulação –, seguindo o levantamento arquitetônico antes realizado da sala. Ainda levando-se em conta que a complexidade do modelo geométrico gera arquivos mais pesados e, com isso, uma simulação lenta, decidiu-se trabalhar com a geometria da sala sem a inserção dos mobiliários e objetos existente na mesma. Cada tipologia de superfície foi modelada em uma *layer*, ou *camada*, diferente, de acordo com o material de composição, para posterior inserção de dados de absorção sonora. Na sequência, o modelo geométrico foi exportado na extensão ".par" (extensão de arquivos suportada pelo *Odeon*) através de um *plugin* para *Sketchup* fornecido pelo fabricante do *Odeon*.

² Segundo o menu "Ajuda" do *software* dBbati, no caso do cálculo do tempo de reverberação o coeficiente de correlação representa a capacidade da linha reta calculada de ajustar a curva de decaimento real. Normalmente, um coeficiente de 0,95 é considerado como satisfatório para estimativas de tempo de reverberação.

3.2.2. Definição e aplicação de materiais

Após inicializar o software *Odeon*, foi necessário abrir o modelo geométrico de formato ".par" a partir do local onde o arquivo foi salvo. Feito isso, a etapa seguinte foi inserir os coeficientes de absorção sonora de cada superfície, já antes modelada em *camadas* diferentes de acordo com o material. Para essa etapa foi necessário utilizar a ferramenta "*material list*", onde é possível utilizar a lista de coeficientes de absorção sonora já presente na biblioteca do *Odeon*, ou inserir os coeficientes necessários, por banda de oitava (63 – 8000 Hz), através da opção "*edit material list*".

Na sequência, foi necessário inserir a localização da fonte sonora bem como dos pontos de recepção do sinal. Para isso foi utilizada a ferramenta "*source-recives list*", onde é inserida tanto a localização da fonte, quanto dos receptores, indicando as coordenadas x , y e z de localização de cada um desses elementos, de acordo com as localizações dos mesmos nas medições experimentais.

3.2.3. Ajuste do modelo

Existem dois métodos para a verificação inicial da qualidade do modelo geométrico e aplicabilidade dos materiais escolhidos no *Odeon*. O primeiro é utilizando a ferramenta "*quick estimate*" (estimativa rápida) e o segundo é utilizando a ferramenta "*global estimate*" (estimativa global), ambos calculando os tempos de reverberação do modelo (CHRISTENSEN; KOUTSOURIS, 2013).

A "*quick estimate*" é um método rápido de estimativa do TR, baseado nas fórmulas de Sabine, Eyring e Arau-Puchades, exibindo os resultados para os diferentes autores. Essa ferramenta encontra-se na lista de materiais (*material list*) e assume condição de campo difuso para a sala simulada. Já a "*global estimate*" é um método um pouco mais preciso de verificação do TR, de forma que esse método não elabora suposições sobre o campo difuso e resulta em um TR mais confiável, desde que sejam inseridos os coeficientes de dispersão dos materiais (CHRISTENSEN; KOUTSOURIS, 2013). Apesar do potencial de confiabilidade da ferramenta "*global estimate*", a escassa informação dos devidos coeficientes de dispersão dos materiais já resultou em uma limitação inicial para essa simulação, de forma que esses dados não foram inseridos (RINDEL, 2000). No entanto, ambos os métodos foram utilizados para verificação inicial da qualidade do modelo, que resultou em uma grande discrepância dos tempos de reverberação simulados com aqueles medidos experimentalmente.

Para ajustar o modelo buscando a mínima diferença entre dados medidos e simulados, esse passou por diversos ajustes e posteriores verificações, incluindo ajustes nas configurações da sala na ferramenta "*room setup*" conforme sugeria o Manual do Usuário do *Odeon* quando ajustes são necessários. Ainda assim, o modelo computacional da Sala de Artes Visuais pouco se aproximou do real, possivelmente pela grande variedade de elementos presente na sala real que não foram considerados no modelo computacional.

Diante da não compatibilidade do modelo computacional com o modelo real, optou-se por inserir no modelo geométrico os elementos existentes na sala que, conhecendo seus coeficientes de absorção proposto pelas bibliografias consultadas, apresentavam área e coeficientes de absorção sonora relevantes, aqui considerados maiores do que 0,10. Esses elementos foram as mesas de madeira, os pianos, as estantes de livros, bem como a inserção no modelo também de duas pessoas, conforme a presença dessas nas salas no momento da medição – uma estourando o balão e outra controlando o computador. Para inserir simplificada duas pessoas no modelo geométrico utilizou-se a referência de Silva (2016), que afirma que a área da superfície do corpo humano considerado normal é de aproximadamente 1,6 m² para mulheres e 1,9 m² para homens.

Nesta segunda verificação, agora com a existência desses elementos aqui considerados relevantes para a absorção sonora do ambiente, o modelo computacional conseguiu se aproximar significativamente do modelo real. Apesar dessa proximidade, o modelo ainda não estava dentro do JND proposto pela norma ISO 3382-1:2009, sugerindo que a simulação computacional ainda não estava atingindo uma precisão desejável para o trabalho. Dessa forma, a estratégia adotada para um novo ajuste foi variar alguns coeficientes de absorção 5% para mais ou para menos, levando em conta a variabilidade de absorção sonora de um elemento existente nesta sala com um mesmo elemento apresentado pelas bibliografias, como, por exemplo, um piano de coeficiente de absorção α em uma bibliografia possuir absorção não exatamente igual ao piano existente na sala estudada. Além disso, existe ainda uma extensa diversidade de dados de coeficientes de absorção sonora para mesmos elementos em diferentes bibliografias consultadas, conforme observado por Bork (2000), o que vem a justificar essa possibilidade de simulação do modelo utilizando pequenas variações nos coeficientes.

3.2.4. Simulação acústica

Após fazer os ajustes possíveis no modelo e verificar uma aproximação dos tempos de reverberação simulados com os medidos experimentalmente, a próxima etapa do processo de simulação foi configurar o tipo de resultado desejado através da resposta impulsiva da sala na ferramenta "job list". Existem três formas de obtenção dos resultados: "single point response", "multi point response" e "grid response". A primeira oferece um cálculo detalhado dos resultados para um único ponto de receptor selecionado; a segunda oferece os parâmetros acústicos da sala para todos os receptores definidos na lista de receptores; e a última oferece um cálculo geral dos parâmetros do quarto levando em conta uma grade criada no menu "define grid".

Inicialmente a opção escolhida foi a "single point response" a fim de obter dados detalhados de cada um dos pontos de recepção. Posteriormente foi obtida a resposta também por meio de "multi point response" onde é possível inserir os dados das medições experimentais e verificar gráficos diretamente no *Odeon* para comparações desses dados com os simulados. Após os devidos ajustes, o modelo computacional apresentou um resultado satisfatório, atingindo parâmetros dentro do JND proposto pela ISO 3382-1:2009, conforme mostra a Tabela 2, apresentando os valores medidos e simulados, bem como a diferença entre eles que deve estar dentro do limite de JND.

Tabela 2 - Diferença entre valores medidos e simulados, na faixa de 500 e 1000 Hz, comparados com o JND para as três salas.

	TR	EDT	C80	D50
MEDIDO	1,86 s	1,89 s	-1,42 dB	31,9 %
SIMULADO	1,93 s	1,95 s	-0,86 dB	32,3 %
DIFERENÇA	4%	3%	0,56 dB	1,2%
JND	5%	5%	1 dB	5 %

4. RESULTADOS

Após resultar em um modelo computacional fiel ao modelo real, e considerando que a sala não se encontra adequada para a prática musical, extrapolando a maioria dos valores desejados para os parâmetros indicados pela bibliografia, novas simulações foram realizadas para sugerir alternativas de adaptação da sala ao uso.

Antes de iniciar as simulações, os valores dos parâmetros simulados foram compilados em um único quadro que apresentasse esses valores simulados frente aos valores desejados para a prática musical indicados pela literatura, conforme pode ser visto na Tabela 3.

Além dos parâmetros simulados, outros três parâmetros considerados importantes para a música foram calculados: Vivacidade, Brilho e Calor. Esses três parâmetros representam o equilíbrio da música nas médias (500 e 1000 Hz), altas (2000 e 4000 Hz), e baixas (125 e 250 Hz) frequências, respectivamente.

Tabela 3 - Valores simulados e valores desejados para os parâmetros de acústica de salas voltadas para a prática musical.

Parâmetro	Sala de Artes Visuais	Observação
TR (s)	S 1,93	Média entre 500 e 1000 Hz
	D Entre 0,4 e 1,4	
EDT (s)	S 1,95	Média entre 500 e 1000 Hz
	D Entre 0,4 e 1,4	
C80 (dB)	S -0,86	Média entre 500 e 1000 Hz
	D Entre 1 e 5	
D50 (%)	S 31,50	Média entre 500 e 1000 Hz
	D Entre 50 e 65	
STI	S 0,44	
	D > 0,45	
Vivacidade	C 1,86	
	D > 1,6	
Calor	C 1,5	Considerando que o TR ideal seja aproximadamente 1,4
	D Entre 1,1 e 1,45	
Brilho	C 0,77	
	D > 0,7	

Legenda S: Simulado, D: Desejado, C: Calculado

A Sala de Artes Visuais apresentou valores relativamente próximos daqueles considerados adequados para a prática musical. Neste caso, supõe-se que isso se deve ao fato da existência de diversos elementos

absorvedores de som na sala.

Ainda que exista alguma proximidade dos valores dos parâmetros encontrados nesta sala com aqueles considerados adequados para a prática musical, seriam necessárias algumas adaptações para que esses valores se adequassem dentro dos limites desejados.

Uma limitação para a inserção de dispositivos para corrigir esses parâmetros nesta sala foi a pouca área disponível nas paredes para fixação de algum dispositivo, considerando os dois quadros que ocupam grande parte de duas paredes, a utilização das paredes na projeção de vídeos, e ainda a existência estantes para o armazenamento de materiais, mesas, entre outros elementos.

Diante dessa limitação inicial, uma primeira alternativa foi inserção de um tapete aumentando consideravelmente a absorção do piso. O resultado foi satisfatório para que o TR e outros parâmetros se aproximassem ainda mais dos limites desejados, mas o cálculo do parâmetro Calor, com base nos valores simulados de TR, ainda se encontrava distante do desejado, o que significava que a sensação dos TRs das baixas frequências encontrava-se irregular para a sensação dos TRs das médias frequências. Os TRs nas baixas frequências estavam ainda muito altos quando comparados aos TRs das médias frequências.

A alternativa adotada para corrigir essa irregularidade foi utilizar dispositivos chamados de *bass traps*. Esses dispositivos servem para controlar os sons graves dentro de salas, sendo capaz de absorver consideravelmente o som nas baixas frequências. Uma boa sugestão de localização desses dispositivos é entre parede e teto, o que foi de encontro à limitação de área de parede existente nesta sala. Após alguns ajustes, o modelo simulado com as alternativas adotadas resultou em valores de parâmetros acústicos dentro dos limites desejáveis para a prática musical, modelo esse apresentado nas especificações descritas na Figura 5 e nas Tabelas 4 e 5.

Com as adaptações, apenas o parâmetro Vivacidade não ficou dentro do recomendado pela bibliografia consultada, entretanto cabe ressaltar que a referência encontrada tratava de Vivacidade adequada para salas de concerto, com volumes muito superiores – acima de 2000 m³ – aos de pequenas salas de prática – inferior a 300 m³. Dessa forma, considerou-se que as salas estando dentro dos limites desejados para o TR indicado para pequenas salas de prática musical, conseqüentemente a Vivacidade também estaria adequada para essa tipologia.

Os resultados obtidos no modelo computacional após as adaptações foram compilados na Tabela 6, apresentando esses valores simulados comparados com os valores indicados como adequados para a prática musical.

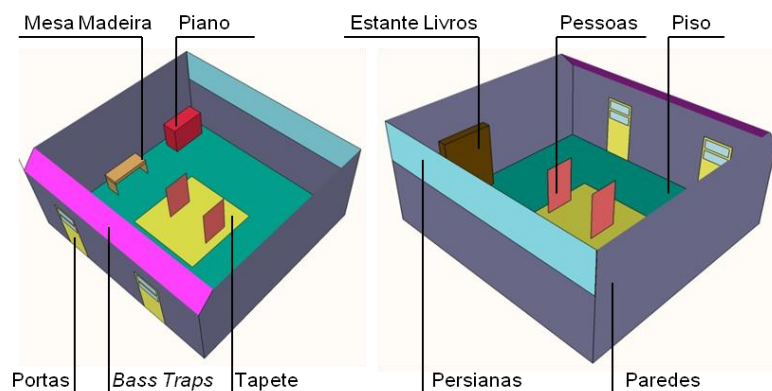


Figura 5 - Volumetria do modelo adotado para a Sala de Artes Visuais indicando os diferentes elementos considerados.

Tabela 3 - Especificações de materiais, áreas e coeficientes de absorção simulados para a Sala de Artes Visuais.

Material	Área (m ²)	Coeficiente de absorção						Referência
		125	250	500	1000	2000	4000	
Piso cerâmico	50,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	Carvalho, 2010
Teto rebocado liso	54,77	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03	Bistafa, 2006
Parede alvenaria rebocada	86,64	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	Bistafa, 2006
Portas de madeira fechadas	4,26	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10	Bistafa, 2006
Persiana	10,20	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35	Bistafa, 2006
Pessoa de pé ¹	3,20	0,11	0,20	0,27	0,26	0,28	0,23	Bistafa, 2006
Mesa Madeira	2,97	0,10	0,10	0,05	0,05	0,04	0,04	Carvalho, 2010
Piano	5,56	0,20	0,52	0,60	0,57	0,52	0,43	Carvalho, 2010
Estante Livro	9,48	0,11	0,33	0,90	0,60	0,79	0,68	Carvalho, 2010
Tapete 5 mm de Espessura	9,00	0,04	0,04	0,15	0,29	0,52	0,59	ABNT, 1992
Bass Traps SuperBassExtreme	6,72	0,61	0,39	0,28	0,43	0,43	0,32	Fabricante

¹ Calculado em função da área do corpo humano, adaptado da Absorção publicada em Bistafa (2006)

Tabela 4 - Especificações dos dispositivos especiais inseridos.

Item	Especificação	Localização
Bass Traps SuperBassExtreme	Bass Trap VICOUSTIC SUPER BASS EXTREME - Fabricante: Vicoustic	Entre teto e parede, na parede de acesso da sala, por toda extensão.

Tabela 5 - Resultados obtidos nos modelos após adaptações comparados aos resultados desejados (continua).

Parâmetro	Sala de Artes Visuais	Observação
TR (s)	S	1,25
	D	Entre 0,4 e 1,4
EDT (s)	S	1,25
	D	Entre 0,4 e 1,4

Tabela 5 - Resultados obtidos nos modelos após adaptações comparados aos resultados desejados (conclusão).

Parâmetro	Sala de Artes Visuais	Observação
C80 (dB)	S	1,98
	D	Entre 1 e 5
D50 (%)	S	56,13
	D	Entre 50 e 65
STI	S	0,56
	D	> 0,45
Vivacidade	C	1,25
	D	> 1,6
Calor	C	1,36
	D	Entre 1,1 e 1,45
Brilho	C	0,81
	D	> 0,7

5. CONCLUSÕES

O trabalho permitiu verificar que salas de aula multiuso podem se adequar à prática musical com a efetivação de algumas intervenções, desde que um adequado estudo acústico seja realizado a fim de garantir padrões aceitáveis de qualidade ao uso para o qual a sala se destina.

A simulação computacional possibilitou criar um modelo computacional para a sala, fiel ao real, flexível a testes de diferentes combinações de modelos adaptados da sala com o objetivo de propor aquele que melhor se adequasse as necessidades da prática musical, permitindo a inserção e remoção de materiais e dispositivos acústicos, conforme os resultados mostravam necessários ou não tais elementos. Com o modelo computacional resultante, é possível adaptar a sala modelada para diferentes realidades, seja de prática musical ou qualquer outro uso que possa vir a ser dado a sala, considerando que com esse modelo pode se testar diferentes possibilidades de inserção e/ou remoção de materiais acústicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRON, Michael. **Auditorium acoustics and architectural design**. 2. ed. New York: Spon Press, 2010.
- BERANEK, Leo L. **Concert halls and opera house: music, acoustics & architecture**. 2. ed. New York: Springer, 2004. 661 p.
- BERANEK, Leo L.; **Concert and opera halls: how they sound**. EUA: Acoustical Society of America, 1996.
- BORK, Ingolf. **A Comparison of Room Simulation Software – The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer**

- Simulation.** Acta Acustica, Vol. 86, 2000, pp 943-956.
- CHRISTENSEN, Claus. L.; KOUTSOURIS, Georgios. **Odeon Room Acoustics Software**, Version 12, User Manual. Universidade Técnica da Dinamarca, 2013.
- GADE, C. **Acoustics in Halls for Speech and Music**. Springer Handbook of Acoustics, Ed. T. D. Rossing, 2007.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - **ISO 3382-1**: Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces, 2009.
- MARROS, F.; DORNELES, L. F. F. ; VERGARA, E. F. M. **Compatibilidade de modelos geométricos com programa de simulação acústica**. In: I Congresso de Iniciação Científica e Pós- Graduação do Sul do Brasil, Florianópolis: 2010.
- MARROS, Fernanda. **Caracterização acústica de salas para prática e ensino musical**. 2011. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Universidade Federal de Santa Maria.
- MEHTA, Madan; JOHNSON, James; ROCAFORD, Jorge. **Architectural Acoustics: Principles and design**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.
- OLIVEIRA, Nádya Freire. **Avaliação acústica de salas de aula de dimensões reduzidas através da técnica impulsiva**. Campinas, SP: [s.n.], 2006.
- RINDEL, Jens H. **The Use of Computer Modeling in Room Acoustics**. Journal of VibroEngineering, no. 3(4) /Index 41-72 Paper of the International Conference BALTIC-ACOUSTIC 2000/ISSN 1392-8716, 2000.
- ROCHA, Letícia de Sá. **Acústica e educação em música: estudo qualitativo para sala de ensaio e prática de instrumento e canto**. 2010. Dissertação (Mestrado em construção civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- SILVA, Marcos Noé Pedro Da. **Área da Superfície de um Corpo Humano**; Brasil Escola. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/matematica/area-superficie-um-corpo-humano.htm>>. Acesso em 24 de março de 2016.
- SVENSSON, Peter. The early history of ray tracing in room acoustics. In: **Reflections on sound: In honour of Professor Emeritus Asbjørn Krokstad**. Norwegian University of Science and Technology, 2008.
- TAKAHASHI, Vanessa Fátima de Medeiros. **Influência das características arquitetônicas na qualidade acústica de salas de concerto**. Campinas, SP: [s.n.], 2010.
- VERGARA, E. F.; MARROS, F.; PAUL, S. **Caracterização da qualidade acústica de salas de aula para prática e ensino musical**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 23-37, jan./mar. 2017. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.
- VERGARA, Erasmo Felipe. Medições acústicas e simulação computacional de salas de aula. In: SCHMID, Aloísio Leoni. **Espaços para aprender e ensinar música: construção e adequação**. [s. L.]: Ministério da Cultura e Ministério da Educação, Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior - Capes, Programa Pró- Cultura, Pacto Ambiental, 2013. Cap. 6. p. 36-44
- VORLÄNDER, M.; SUMMERS, J. **Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms, and Acoustic Virtual Reality**. Berlin: Springer, 2008.