

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA E URBANISMO

ELBER NUNES DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE DUAS SALAS DE ENSAIO
MUSICAL EM ITABAIANA (SE)**

Laranjeiras/SE

2025

ELBER NUNES DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE DUAS SALAS DE ENSAIO
MUSICAL EM ITABAIANA (SE)**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Arquitetura e Urbanismo do Campus Laranjeiras da Universidade Federal de Sergipe como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Italo César Montalvão Guedes

Laranjeiras/SE

2025

ELBER NUNES DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE DUAS SALAS DE ENSAIO
MUSICAL EM ITABAIANA (SE)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Arquitetura e Urbanismo,
como um dos requisitos obrigatórios para
obtenção de grau de bacharel em Arquitetura e
Urbanismo, da Universidade Federal de
Sergipe – UFS.

Aprovado em 12 de Setembro de 2025

Banca Examinadora

Prof. Dr. Italo César Montalvão Guedes (DAU/UFS)
Orientador

Prof. Dr. Pedro Vitor Sousa Ribeiro (DAU/UFS)
Avaliador interno

Arq^a. Ma. Janaína Costa Lima
Avaliadora externa

Laranjeiras/SE

2025

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha família: Meu pai, Erivaldo dos Santos, minha mãe, Josilene Nunes e meu irmão Erick Nunes que sempre me apoiaram e são o motivo de eu ter conseguido chegar onde cheguei.

Aos muitos amigos que fiz durante o curso e que me acompanharam em toda essa jornada: Clara, Aline, Leandra, Thamires, João Paulo, Mayara, Vitória, Dalila, Alice, Lara, Matheus, João Victor, Bruna, Brenda, Júlia, Lizandra e Gilberto.

Agradeço também aos amigos que fiz durante a vida e continuam me acompanhando até hoje: Athos, Anniely, Milena, Janaína, Melissa, João Pedro, Luna, Lucas e Denilson.

Aos meus colegas de trabalho Liliane Alves e Gabriel Franco que me ajudou na escrita deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Italo César Montalvão por todo o acompanhamento e ensinamentos do início ao fim curso e que me apresentou o mundo da acústica.

Ao Prof. Pedro Ribeiro que foi meu avaliador interno e professor por todo o aprendizado que tive desde o início do curso.

À Janaina Costa por fazer parte da banca examinadora e que me ajudou com as medições acústicas e tirou minhas dúvidas durante a escrita deste trabalho.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2. ACÚSTICA DE AMBIENTES FECHADOS.....	20
2.1 CONCEITOS E ASPECTOS GERAIS DO SOM.....	20
2.2 ETAPAS DO PROJETO ACÚSTICO.....	26
2.2.1 Isolamento Acústico.....	27
2.2.2 Acústica Modal.....	33
2.2.3 Acústica Geométrica.....	41
2.2.4 Acústica Estatística.....	46
2.3 OUTROS PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJETIVOS.....	51
3. ACÚSTICA DE SALAS DE ENSAIO MUSICAL.....	55
3.1 DIRETRIZES ACÚSTICAS.....	55
3.2 NORMA ABNT NBR ISO 23591:2025.....	56
3.3 TRABALHOS CORRELATOS.....	60
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	66
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS SALAS AVALIADAS.....	68
4.2 ETAPAS DA ANÁLISE ACÚSTICA.....	72
4.2.1 Medições acústicas.....	72
4.2.2 Simulações acústicas.....	80
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	109
APÊNDICE A.....	114
APÊNDICE B.....	118

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo caracterizar e simular acusticamente duas salas de ensaio musical da Sociedade Filarmônica Nossa Senhora da Conceição em Itabaiana (SE). Os parâmetros acústicos T20, EDT, C80, D50 E G das salas foram medidos através do método da resposta impulsiva, guiado pela NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017) e analisados por meio da norma NBR ISO 23591 (ABNT, 2025). Os resultados demonstraram que a Sala de ensaio 01 apresentou valores positivos na maioria dos parâmetros, com alguns ajustes finos possíveis. Por outro lado, a Sala de ensaio 02 apresentou resultados que divergiam consideravelmente dos recomendados pela literatura. Diferentes alternativas foram propostas por meio da simulação computacional feita no software I-Simpa. Para a Sala de ensaio 01, a proposta acústica conseguiu promover melhoria pontual nos parâmetros avaliados e a proposta feita para a Sala de ensaio 02 obteve impacto positivo relevante que permitiu a adequação de todos os valores dentro dos limites revisados pela literatura. Medições de nível de pressão sonora também foram realizadas, seguindo indicações da norma NBR 10152 (ABNT, 2017), que permitiram avaliar que as duas salas possuem valores acima do recomendado pela norma. Além disso, problemas de isolamento foram encontrados em ambas as salas e algumas sugestões preliminares de adequação foram feitas. Esses resultados evidenciam a importância do uso da simulação computacional como ferramenta de apoio em projetos de condicionamento acústico, permitindo propor soluções práticas e acessíveis que, associadas a medidas de isolamento adequadas, podem promover ambientes mais confortáveis e adequados para a prática musical.

Palavras-chave: Acústica Arquitetônica, Salas de Ensaio Musical, Isolamento Acústico, Simulação Acústica

ABSTRACT

This study aimed to characterize and acoustically simulate two music rehearsal rooms of the Sociedade Filarmônica Nossa Senhora da Conceição in Itabaiana, Sergipe, Brazil. The main acoustic parameters T20, EDT, C80, D50, and G of the rooms were measured using the impulse response method, guided by NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017), and analyzed using the NBR ISO 23591 (ABNT, 2025) standard. The results showed that rehearsal room 01 presented positive values in most parameters, with some possible fine-tuning. On the other hand, rehearsal room 02 presented results that diverged considerably from those recommended in the literature. Different alternatives were proposed through computer simulation using the I-Simpa software. For room 01, the acoustic proposal managed to promote specific improvements in the evaluated parameters, and the proposal for room 02 had a significant positive impact, allowing all values to be adjusted within the limits reviewed in the literature. Sound pressure level measurements were also taken according to NBR 10152 (ABNT, 2017), which revealed that both rooms had values above those recommended by the standard. Furthermore, insulation problems were found in both rooms, and some preliminary suggestions for adjustments were made. These results highlight the importance of using computer simulation as a support tool in acoustic conditioning projects, allowing for the proposal of practical and affordable solutions that, combined with appropriate insulation measures, can promote more comfortable and suitable environments for musical practice.

Keywords: Architectural Acoustics, Music Rehearsal Rooms, Acoustic Insulation, Acoustic Simulation

Lista de Figuras

Figura 01 - Mapa de localização do município de Itabaiana e da capital Aracaju....	12
Figura 02 - Imagem de Satélite do Colégio Murilo Braga.....	13
Figura 03 - Entrada Instituto de Música Maestro João de Matos.....	14
Figura 04 - Sala de ensaio 01.....	14
Figura 05 - Sala de ensaio 02.....	15
Figura 06 - Curvas Isofônicas: Nível sonoro de intensidade em relação às frequências.....	19
Figura 07 - Níveis de pressão sonora, em Pascal e decibel.....	20
Figura 08 - Variação de pressão sonora em função do tempo para sons com períodos entre $T_1=50$ ms e $T_2= 50$ μ s.....	21
Figura 09 - Efeito de difração em diferentes tipos de frequência.....	22
Figura 10 - Reflexão de ondas sonoras em superfícies retas, côncavas e convexas... 22	
Figura 11 - Fatores que influenciam a absorção de materiais porosos/fibrosos:.....	23
Figura 12 - Relações entre ondas estacionárias.....	24
Figura 13 - Curva típica de perda na transmissão em função da frequência do som incidente de painéis sólidos e homogêneos.....	26
Figura 14 - Comparação de sistemas de isolamento.....	29
Figura 15 - Curvas de NC por nível de pressão sonora e frequência.....	31
Figura 16 - Divisão do espectro audível em regiões.....	32
Figura 17 - Esquematização de uma sala retangular.....	33
Figura 18 - FRF de um sistema sala-fonte-receptor e seu espectro em frequência..	33
Figura 19 - Tipos de modos acústicos.....	34
Figura 20 - Variação de pressão sonora em uma sala retangular de paredes rígidas (Dimensões: 6,16 m x 5,12 m x 4,00 m).....	35
Figura 21 - Variação de pressão sonora em uma sala retangular de paredes rígidas (Dimensões: 6,16 m x 5,12 m x 4,00 m).....	36
Figura 22 - Variação de pressão sonora em uma sala retangular de paredes rígidas (Dimensões: 6,16 m x 5,12 m x 4,00 m).....	36
Figura 23 - Proporções aceitáveis para uma boa distribuição das frequências modais segundo o diagrama de Bolt.....	37
Figura 24 - Número de modos pela frequência em três salas de dimensões diferentes.....	38
Figura 25 - Esquematização de um absorvedor de membrana.....	39
Figura 26 - Resultado da variação do sentido de um vetor afetado pelo espalhamento.....	42
Figura 27 - Conjuntos de coeficientes de espalhamento.....	43
Figura 28 - Exemplo de modelagem 3D de sala multiuso.....	43
Figura 29 - Exemplo de modelagem 3D de sala multiuso após modificações em sua malha.....	44
Figura 30 - Resposta ao impulso em dB.....	46
Figura 31 - Curva de decaimento de uma resposta impulsiva.....	46

Figura 32 - Esquematização de um painel perfurado sob material poroso.....	48
Figura 33 - Comparação entre absorvedores de membrana, porosos e painéis perfurados com material poroso.....	48
Figura 34 - Absorvedor de Helmholtz e relação dos fatores de qualidade com a frequência.....	49
Figura 35 - Força sonora, G, em função do volume líquido e da média do tempo de reverberação de frequência média.....	56
Fonte: NBR ISO 23591 (ABNT, 2025).....	57
Figura 36 - Duas das salas analisadas, de ensino à direita e de prática à esquerda	58
Figura 37 - Comparação dos valores de EDT para sala de estudo.....	61
Figura 38 - Planta da sala D-02, com pontos de medição de NPS.....	62
Figura 39 - Fluxograma das etapas da metodologia utilizada neste trabalho.....	65
Figura 40 - Sala de ensaio 01.....	67
Figura 41 - Porta e Janelas da Sala de ensaio 01.....	67
Figura 42 - Planta baixa da Sala de ensaio 01.....	68
Figura 43 - Sala de ensaio 02.....	69
Figura 44 - Janela e Porta da Sala de ensaio 02.....	69
Figura 45 - Planta baixa Sala de ensaio 02.....	70
Figura 46 - Fluxograma dos materiais e equipamentos utilizados para as gravações de resposta impulsiva.....	71
Figura 47 - Bexiga de látex nº 16 e molde de 45 cm de diâmetro.....	71
Figura 48 - Posicionamento dos pontos de microfones e fontes sonoras na Sala de ensaio 01 para as gravações de resposta impulsiva.....	73
Figura 49 - Posicionamento dos pontos de microfones e fontes sonoras na Sala de ensaio 02 para as gravações de respostas impulsivas.....	74
Figura 50 - Exemplo de posicionamento do sonômetro (Ponto 3 - Sala de ensaio 02). 75	
Figura 51 - Posicionamento dos pontos do sonômetro na Sala de ensaio 01 para as medições do nível de pressão sonora.....	75
Figura 52 - Posicionamento dos pontos do sonômetro na Sala de ensaio 02 para as medições do nível de pressão sonora.....	76
Figura 53 - HT-625B Termo-Higro-Anemômetro.....	77
Figura 54 - Modelagem 3D da Sala de ensaio 01 no SketchUp (acima) e no I-Simpa (abaixo).....	79
Figura 55 - Modelagem 3D da Sala de ensaio 02 no SketchUp (acima) e no I-Simpa (abaixo).....	80
Figura 56 - Curvas NC e LAeq médio por frequência nas Salas de ensaio 01 e 02..	83
Figura 57 - Gráfico do número de modos por banda na Sala de ensaio 01.....	84
Figura 58 - Gráfico do número de modos por banda na Sala de ensaio 02.....	85
Figura 59 - Proporções aceitáveis para uma boa distribuição das frequências modais segundo Bolt.....	85
Figura 60 - Intervalo de Tmid recomendado em comparação ao medido em função do volume.....	88
Figura 61 - Limites de tolerância do T20 baseados no Tmid da Sala de ensaio 01..	88

Figura 62 - Limites de tolerância do T20 baseados no Tmid da Sala de ensaio 02..	89
Figura 63 - Medição do EDT (s) médio por frequência na Sala de ensaio 01 e 02 e limites recomendados por Santana et al. (2013).....	89
Figura 64 - Medição do C80 médio por frequência nas Salas de ensaio 01 e 02 e limites recomendados por Beranek (1996).....	90
Figura 65 - D50 (%) médio por frequência na Sala de ensaio 01 e 02 e limites recomendados por Vergara, Marros, Paul (2016).....	91
Figura 66 - G (dB) médio por frequência na Sala de ensaio 01 e limites recomendados pela NBR ISO 23591 (ABNT, 2025).....	91
Figura 67 - G (dB) médio por frequência na Sala de ensaio 02 e limites recomendados pela NBR ISO 23591 (ABNT, 2025).....	92
Figura 68 - Locais de aplicação dos painéis de membrana e perfurado para o proposta acústico da Sala de ensaio 01.....	94
Figura 69 - Pannel vibrante Modex™ LF Panel.....	94
Figura 70 - Akustik™ Sonic.....	94
Figura 71- Comparação entre valores simulados e propostos e limites de tolerância do T20 baseados no Tmid da Sala de ensaio 01.....	95
Figura 72 - Comparação entre valores de EDT simulados e propostos na Sala de ensaio 01 e limites recomendados por Santana et al. (2013).....	95
Figura 73 - Comparação entre valores simulados e propostos do D50 médio por frequência na Sala de ensaio 01 e limites recomendados por Vergara, Marros, Paul (2016).....	96
Figura 74 - Comparação entre valores simulados e proposto do C80 médio por frequência nas salas de ensaio 01 e 02 e limites recomendados por Beranek (1996)..	96
Figura 75 - Comparação entre valores simulados e propostos do G (dB) médio por frequência na Sala de ensaio 01 e limites recomendados pela NBR ISO 23591 (ABNT, 2025).....	97
Figura 76 - Locais de aplicação do pannel perfurado e das cortinas para o proposta de condicionamento acústico da Sala de ensaio 02.....	97
Figura 77 - Esquema de instalação placa Knauf Cleaneo B4.....	98
Figura 78 - Comparação entre valores simulados e propostos do T20 e limites de tolerância baseados no Tmid da Sala de ensaio 02.....	98
Figura 79 - Comparação entre valores simulados e propostos na Sala de ensaio 02 e limites recomendados por Santana et al. (2013).....	99
Figura 80 - Comparação entre valores simulados e propostos do D50 na Sala de ensaio 02 e limites recomendados por Santana et al. (2013).....	99
Figura 81 - Comparação entre valores simulados e propostos do C80 médio por frequência na Sala de ensaio 02 e limites recomendados por Beranek (1996).....	100
Figura 82 - Comparação entre valores simulados e propostos do G (dB) médio por frequência na Sala de ensaio 02 e limites recomendados pela NBR ISO 23591 (ABNT, 2025).....	100
Figura 83 - Janela veneziana com frestas na Sala de ensaio 02.....	103
Figura 84 - À esquerda janela emperrada e à direita porta com fresta na Sala de ensaio 01.....	104

Figura 85 - Utilização de fitas de borrachas (em vermelho) e escova auto-adesiva (em azul) em portas. Sem escala.....	105
Figura 86 - Vista externa dos cobogós acima do forro da Sala de ensaio 01.....	106

Lista de quadros

Quadro 01 - Valores sugeridos para o coeficientes de espalhamento.....	42
Quadro 02 - Constantes a e b para diferentes tipos de salas de ensaio.....	57
Quadro 03- Variação em porcentagem dos limites máximos e mínimos em relação ao Tmid por frequência.....	57
Quadro 04 - TR médios para salas de prática e ensino musical.....	59
Quadro 05 - Valores de referência.....	60
Quadro 06 - Novo valor de referência proposto por Santana et al.....	61
Quadro 07 - Resultados das medições para as três situações analisadas.....	63
Quadro 08 - Valores de LAeq e LASmax por ponto de medição para a Sala de ensaio 01, em vermelho os resultados que ultrapassaram os valores recomendados pela NBR 10152 (ABNT, 2017).....	81
Quadro 09 - Valores de LAeq e LASmax para a Sala de ensaio 02, em vermelho os resultados que ultrapassaram os valores recomendados pela NBR 10152 (ABNT, 2017).....	82
Quadro 10 - Comparativo entre dimensões abaixo (em vermelho) e acima (em verde) do mínimo recomendado pela norma NBR ISO 23591 (ABNT, 2025) e medidas in loco.....	86
Quadro 11 - Valores do tempo de reverberação (T20) medido na Sala de ensaio 01 e 02.....	87
Quadro 12 - Comparação entre valores de Tmid recomendados e medidos.....	87
Quadro 13 - Valores de diferença perceptível (JND) por parâmetro objetivo - Sala de ensaio 01.....	92
Quadro 14 - Valores de diferença perceptível (JND) por parâmetro objetivo - Sala de ensaio 02.....	93
Quadro 15 - Coeficiente de absorção para diferentes materiais usados no proposta de condicionamento acústico da Sala de ensaio 01.....	93
Quadro 16 - Coeficiente de absorção para diferentes materiais usados no proposta de condicionamento acústico da Sala de ensaio 02.....	98
Quadro 17 - Estimativa do nível de pressão sonora Lp para 5 grupos musicais que utilizam a Sala de ensaio 01.....	101
Quadro 18 - Estimativa da pressão sonora Lp para 3 grupos musicais que utilizam a Sala de ensaio 02.....	102
Quadro 19 - Estratégias de isolamento acústico para cada sala de ensaio.....	106
Quadro A-1 - Coeficientes de absorção dos materiais por frequência na Sala de ensaio 01.....	112
Quadro A-2 - Coeficientes de absorção dos materiais por frequência na Sala de ensaio 02.....	113
Quadro A-3 - Coeficientes de espalhamento dos materiais por frequência na Sala de ensaio 01.....	114
Quadro A-4 - Coeficientes de espalhamento dos materiais por frequência na Sala de ensaio 02.....	114

1. INTRODUÇÃO

A escola como mediadora da musicalização de crianças e adolescentes pode ser responsável por auxiliar de diversas formas o desenvolvimento infantil, tanto socialmente, quanto psicologicamente e culturalmente. Segundo Loureiro (2001), além desses, outros elementos podem servir de suporte ao ensino, como o estímulo da criatividade, da socialização e da formação do indivíduo.

Segundo Pietrobon e Manzke (2021), houve duas alterações que trataram da Lei nº 9.394 de 20 de dezembro de 1996, que estabelece a Lei de Diretrizes e Bases da Educação, representando um marco histórico no que diz respeito ao ensino musical escolar. Primeiramente, pela Lei nº 11.769, de 18 de agosto de 2008, com o objetivo de definir a obrigatoriedade do ensino da música na educação básica e posteriormente pela Lei nº 13.278, de 2 de maio de 2016, que além de manter a música, fez a adição do teatro, artes visuais e dança. Porém, apesar dos avanços da legislação, ainda existem problemas que prejudicam o ensino de música nas escolas, como a falta de estrutura e salas adaptadas para a realização das atividades.

Esses problemas estruturais ocorrem muitas vezes por conta da negligência dada à qualidade acústica do espaço, que muitas vezes passa despercebida. Segundo Beranek (1993, p. 416), a acústica de um ambiente seja ele qual for, tem vital importância para satisfazer a necessidade da audição e conforto das pessoas, como por exemplo para a inteligibilidade da fala e para o controle do ruído. Desse modo, a vivência de quem experimenta um ambiente acusticamente inadequado ao uso pode comprometer a execução plena de suas atividades.

A avaliação acústica de uma sala considera parâmetros cujas respostas variam para diferentes utilizações do espaço físico, como por exemplo, se a atividade principal é a fala ou a música. O desenho geométrico da sala, suas dimensões (inclusive a relação entre elas), a área e o volume, os materiais construtivos e de revestimento, o mobiliário, o número de pessoas presentes, entre outros aspectos, influenciam a resposta acústica do espaço físico. (Schmid, 2013, pg. 32)

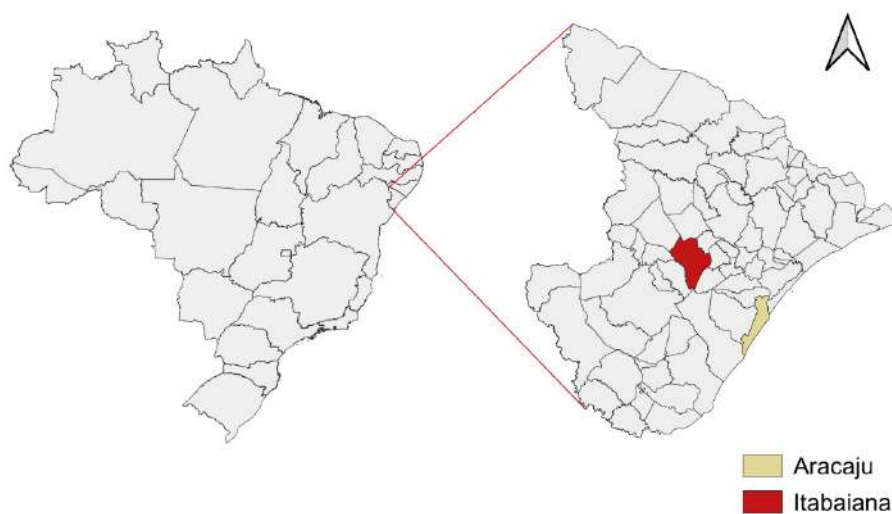
Assim, um ambiente escolar acusticamente adequado e equipado com recursos de qualidade é fundamental para o desenvolvimento técnico, artístico e sensível dos estudantes, uma vez que a percepção sonora é um elemento central no aprendizado musical. Quando isso não ocorre, a capacidade dos alunos de discernir nuances, afinações, timbres, dinâmicas e outros aspectos necessários para a

execução e interpretação musical pode ser prejudicada (Vergara, Marros e Paul, 2017; Schmid, 2013).

Além disso, para compensar as deficiências acústicas da sala onde se apresentam, os instrumentistas podem sentir a necessidade de alterar a forma com que tocam e às vezes acabam desenvolvendo variações na forma de tocar que resultam dessa adaptação da performance ao espaço (Beranek, 1996). Situação que pode prejudicar ambientes de ensino, tendo em vista que em sua maioria os integrantes são crianças e músicos em formação e essa adaptação pode atrapalhar o desenvolvimento da interpretação musical.

Iniciativas como a Sociedade Filarmônica Nossa Senhora da Conceição (SFNSC), destacam-se ao assumir um papel complementar e essencial na promoção do ensino musical. Fundada por volta de 1745, por iniciativa do Padre Francisco da Silva Lobo, no município de Vila de Santo Antônio e Almas de Itabaiana (Moreira, 2009), atual município de Itabaiana em Sergipe (Figura 01).

Figura 01 - Mapa de localização do município de Itabaiana e da capital Aracaju



Fonte: IBGE, 2024. Elaborado pelo autor

O município é o 3º mais populoso de Sergipe, com cerca de 103.440 habitantes e o 25º em área, com 337,348 km² e fica a cerca de 53 km de distância por estrada da capital Aracaju (IBGE, 2022). Itabaiana é conhecida historicamente em todo o estado e região pelo seu forte comércio e produção de alimentos que abastecem a capital e o interior do estado, além de possuir uma das maiores e mais antigas feiras de Sergipe, que funciona desde 1888, ocupando, atualmente, uma área de mais de 20 km² no centro da cidade (Itabaiana (SE), 2021).

A SFNSC contribui para a difusão do ensino musical infantil de forma gratuita não só no município de sua sede, mas para vários outros de Sergipe e hoje a instituição conta com, aproximadamente 350 alunos, divididos em 3 grupos de musicalização, 5 grupos sinfônicos e 3 grupos de câmara, que abrangem desde a orquestra sinfônica de Itabaiana, com aproximadamente 55 membros, até grupos menores de instrumentos específicos, como sopro, percussão e cordas.

Essas atividades ocorrem, em sua maioria, na cidade de Itabaiana, em um espaço oriundo de uma parceria iniciada em 2010 e de convênio firmado em 2013, com o Colégio Estadual Murilo Braga (Figura 02), onde uma ala do colégio foi cedida para a SFNSC para criação do espaço Instituto de Música Maestro João de Matos (Figuras 02 e 03) (SFNSC, 2025).

O Colégio Estadual Murilo Braga fica localizado no bairro Centro em Itabaiana e possui 709.531m² de área total e 540.241m² de área construída, com 40 salas de aula (Seduc, 2025) e cerca de 1700 alunos (Governo do Estado de Sergipe, 2024).

Figura 02 - Imagem de Satélite do Colégio Murilo Braga



Fonte: Google Earth, 2025. Modificado pelo Autor

O espaço do Instituto de Música Maestro João de Matos conta com 4 salas de aula, sendo uma utilizada para fins administrativos, uma para lutheria de instrumentos de corda, uma para depósito, e outra para guardar instrumentos e

realização de alguns ensaios menores. Além dessas, há também uma sala de ensaio musical onde ocorrem as principais atividades e práticas.

Figura 03 - Entrada Instituto de Música Maestro João de Matos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A Sala de ensaio musical 01 (Figura 04) foi reformada pela SFNSC em 2015, onde duas salas de aula menores foram integradas para a criação de uma sala maior que atendesse às necessidades espaciais da época. Nela, além do mobiliário usado pelos músicos, também são guardados alguns instrumentos de grande porte por questões de logística, como os instrumentos de percussão e o piano, o que acaba limitando o espaço da sala principalmente quando os grupos musicais com mais membros ensaiam.

Figura 04 - Sala de ensaio 01



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Apesar de ter tido um projeto arquitetônico que se preocupou com alguns princípios acústicos, como pode ser visto por exemplo nos painéis difusores no forro de gesso (Figura 04), não há a presença de materiais específicos voltados à absorção sonora que poderiam condicionar melhor o ambiente. Alguns materiais que exercem uma maior influência são as cortinas que cobrem as janelas da sala e o carpete que cobre até a altura de 1,74m do perímetro das paredes internas. Em visita prévia realizada ao local, foi relatado pelos músicos e professores que atualmente existem deficiências na performance do som que dificultam um melhor proveito das atividades.

A sala de ensaios 02 (Figura 05) é onde ocorrem as aulas individuais, de grupos musicais menores e de outras atividades que não podem ser realizadas em virtude da Sala de ensaio 01 já estar em uso no mesmo horário. A sala de ensaios 02 pode ser tipificada como uma sala de aula comum que não foi planejada para suprir as necessidades atuais de ensaio musical, sem aplicação de material ou solução acústica de condicionamento e isolamento .

Outra questão a ser levantada é que devido à falta de isolamento acústico adequado, o entorno escolar pode influenciar acusticamente as atividades das salas de ensaio, assim como elas podem causar impacto à escola pelo som dos momentos de prática musical, principalmente quando os grupos maiores, como a orquestra sinfônica, estão ensaiando.

Figura 05 - Sala de ensaio 02



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Dessa forma, a análise qualitativa do espaço de estudo musical, juntamente com a proposição de melhorias necessárias, oferece uma contribuição relevante não apenas para as atividades pedagógicas e práticas realizadas no local, mas também para a qualidade da formação dos futuros músicos. Ao avaliar as características acústicas do ambiente de ensino e identificar ajustes essenciais, promove-se a otimização das atividades desenvolvidas, criando condições mais adequadas para o aprendizado. Isso não só aprimora a experiência de estudantes e professores, como também fortalece a construção de uma base sólida para a prática musical profissional.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo Geral

Fazer a caracterização, simulação e proposta de adequação acústica de duas salas de ensaio musical da Sociedade Filarmônica Nossa Senhora da Conceição em Itabaiana-SE.

Objetivos Específicos

- Verificar o estado da arte no que se refere à bibliografia especializada em acústica de salas de ensaio musical
- Analisar o condicionamento e isolamento acústico do ambiente com base em parâmetros de desempenho acústico.
- Realizar a comparação dos dados coletados *in loco* com os padrões de referência obtidos em normas técnicas e na literatura especializada em acústica.
- Fazer a proposição de modificações projetuais necessárias ao espaço.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 1 - Introdução, é apresentada a motivação do estudo, destacando a importância da qualidade acústica em ambientes de ensino musical e a carência de espaços adequados no contexto educacional brasileiro. São também explicitados os objetivos geral e específicos que orientaram a pesquisa.

O Capítulo 2, Acústica de Ambientes Fechados, oferece a fundamentação teórica necessária, abordando conceitos básicos do som e etapas do projeto acústico: isolamento acústico modal, acústica geométrica e acústica estatística,

além de parâmetros objetivos para avaliação acústica de salas, como tempo de reverberação, clareza (C_{80}), definição (D_{50}) e força sonora (G).

O Capítulo 3, Acústica de Salas de Ensaio Musical, contextualiza a aplicação dos conceitos anteriores ao tipo de ambiente em estudo. São discutidas diretrizes de projeto, normas técnicas – com destaque para a NBR ISO 23591 (ABNT, 2025) – e trabalhos correlatos que embasam as análises realizadas.

No Capítulo 4, Materiais e Métodos, são detalhadas as etapas metodológicas adotadas, incluindo o levantamento arquitetônico das salas, os procedimentos de medição *in situ* (níveis de pressão sonora e gravação de respostas impulsivas) e a modelagem computacional no *software* I-Simpa para simulação acústica.

O Capítulo 5, Resultados e Discussão, apresenta e interpreta os dados coletados e simulados, comparando-os com valores de referência da literatura e normas. São analisados parâmetros como T_{20} , EDT, C_{80} , D_{50} e G , além de serem propostas melhorias com base nos déficits identificados.

Por fim, o Capítulo 6, Considerações Finais, sintetiza as principais conclusões e contribuições do estudo, retomando a problemática inicial e dos resultados obtidos.

2. ACÚSTICA DE AMBIENTES FECHADOS

A compreensão dos princípios fundamentais do som e do comportamento acústico é essencial para o desenvolvimento de ambientes destinados à prática e ao ensaio musical. Por isso, este trabalho inicia revisando conceitos básicos relacionados à natureza do som, suas propriedades físicas, percepção auditiva humana e os fenômenos que ocorrem durante sua propagação. Serão abordados aspectos como frequências, comprimentos de onda, intensidade, potência sonora e interação das ondas com superfícies, permitindo um entendimento prévio dos parâmetros que influenciam diretamente a qualidade acústica de um espaço.

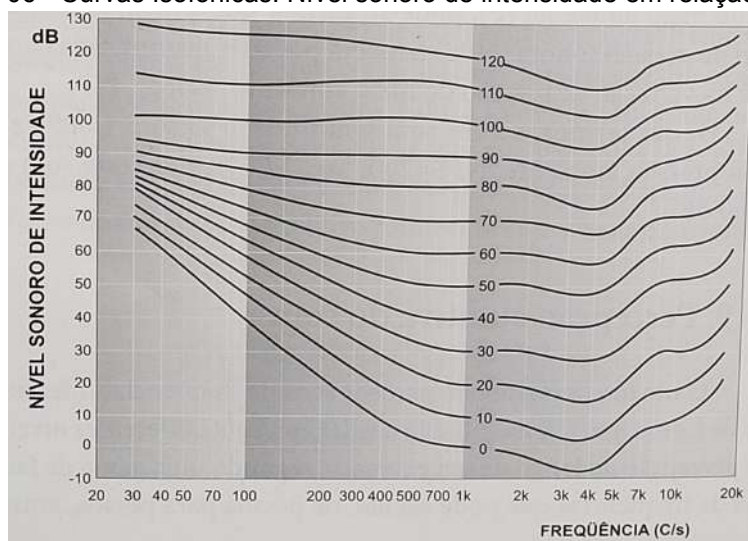
2.1 CONCEITOS E ASPECTOS GERAIS DO SOM

Tendo em vista a importância da acústica para salas de ensaio musical, se faz necessária a revisão de alguns aspectos e fundamentos do som, tanto objetivos quanto subjetivos. O primeiro deles se refere à definição do próprio som, segundo Bistafa (2011), está relacionado à variação cíclica da pressão sonora do ambiente que pode ser percebida pelo ouvido humano. Essa variação existe entre 2×10^{-5} Pa, onde se encontra o limiar da audição, o menor valor para que um som possa ser ouvido, e 200 Pa, onde se alcança o limiar da dor, ponto em que efeitos psicológicos e fisiológicos negativos ao ser humano podem ocorrer.

De acordo com Bistafa (2011), quando a pressão sonora no ambiente varia de forma cíclica, é possível representá-la por um Período (T), que corresponde ao intervalo de tempo necessário para a conclusão de um ciclo completo. Além disso, para ser audível o som precisa também estar dentro de uma faixa de frequências, que correspondem ao número de períodos existentes em um segundo. Segundo Gerges (2000), o intervalo entre 20 Hz e 20.000 Hz corresponde à faixa de audição humana típica. Sons abaixo de 20 Hz são chamados de infrassons, e sons acima de 20.000 Hz, de ultrassons.

Porém, nem todas as frequências são percebidas da mesma forma pelo ouvido humano, pois a sensibilidade auditiva à pressão sonora percebida é maior para frequências agudas do que para as graves (Figura 06) (Carvalho, 2010).

Figura 06 - Curvas Isofônicas: Nível sonoro de intensidade em relação às frequências



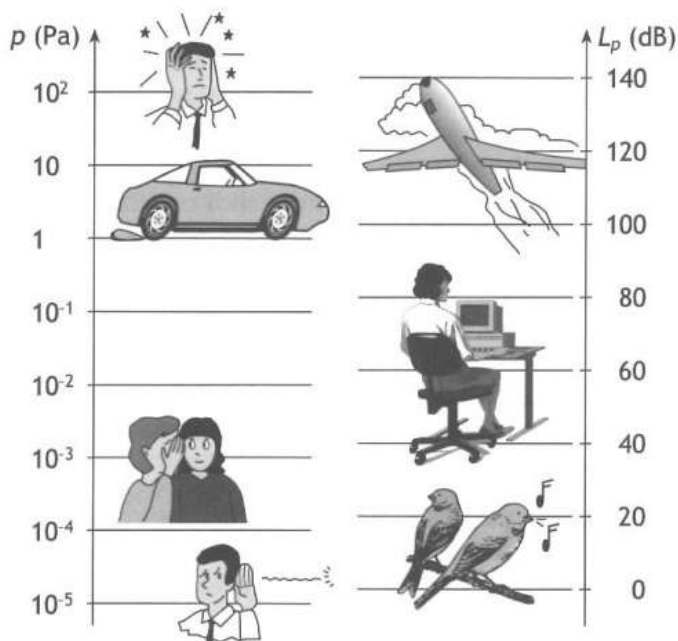
Fonte: Carvalho, 2010.

Além disso, quando há mais de uma frequência soando simultaneamente o efeito de mascaramento pode ocorrer. Ele se caracteriza pela influência que um som tem em relação a outro, alterando a forma como ele é percebido pelo ouvido humano, onde os tons de alta frequência podem ser menos percebidos por conta da influência dos sons de baixa frequência (Bistafa 2011, pg 79).

Segundo Gerges (2000), para facilitar a representação linear de números com grandezas tão diversas, tornou-se indispensável o uso de uma escala logarítmica, o decibel, representado pela sigla dB. Dessa forma, a representação da diferença de pressão sonora entre o limiar da audição e o limiar da dor pode ser descrita no intervalo de 0 dB a 120 dB (Figura 07).

Para se propagar, o som precisa de um meio físico, como o ar, onde a energia transmitida através da colisão das moléculas na forma de onda passa por um constante processo de rarefação e compressão até chegarem ao ouvido humano. A velocidade com que essa propagação ocorre varia de acordo com as propriedades do meio: no ar, por exemplo, a velocidade é de, aproximadamente, 340 m/s, enquanto em outros fluidos, como a água, essa velocidade pode chegar a aproximadamente 1500 m/s (Bistafa 2011).

Figura 07 - Níveis de pressão sonora, em Pascal e decibel.



Fonte: Bistafa, 2010 apud Brüel & Kjaer, Lecture guide n. 310

O comprimento de onda (λ), segundo Bistafa (2011, pg. 9), é definido como “a distância, a partir de qualquer valor de pressão sonora, para que um ciclo se complete na curva de pressão sonora versus distância”. Dessa forma, é possível relacionar o comprimento de onda com a velocidade do som e a frequência usando a seguinte fórmula:

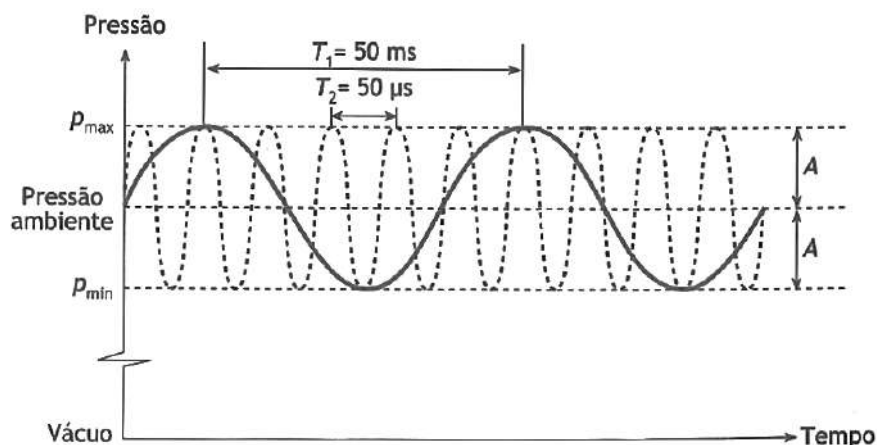
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Equação 01})$$

onde:

- λ é o comprimento de onda em metros.
- c é a velocidade do som em metros por segundo.
- f é a frequência do som em Hertz.

Nota-se que a relação entre a frequência e o comprimento de onda se dá de forma inversamente proporcional, visto que se a velocidade da onda for constante, uma onda terá um comprimento menor quanto maior for a sua frequência (Figura 08).

Figura 08 - Variação de pressão sonora em função do tempo para sons com períodos entre $T_1=50\text{ ms}$ e $T_2=50\text{ }\mu\text{s}$



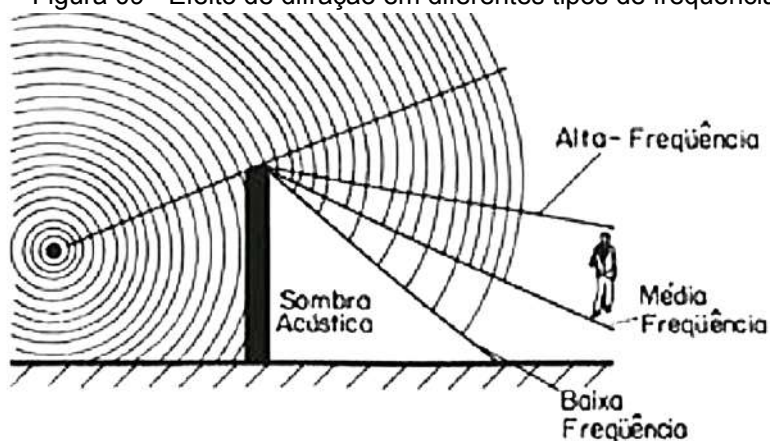
Fonte: Bistafa, 2011

Além da pressão sonora, há outros parâmetros básicos do som que podem ser destacados: a intensidade sonora e a potência sonora. O primeiro pode ser definido como “a quantidade média de energia, na unidade de tempo, que atravessa uma área unitária perpendicular à direção de propagação da onda.” (Bistafa, 2011, pg. 13). Relaciona-se dessa forma a energia emitida pela fonte e a área de abrangência, sentido e direção da fonte, onde o Watt por metro quadrado (W/m^2) é a unidade de medida utilizada para medição da intensidade sonora.

Por outro lado, segundo Bistafa (2011, pg. 14) a potência sonora está ligada diretamente às características próprias da fonte sonora, onde o ambiente e outras características variáveis não são levadas em consideração, apenas a quantidade de energia sonora que uma fonte é capaz de emitir.

Conforme Souza, Almeida, Bragança, (2012), a partir do comprimento de onda é possível analisar também como as ondas são afetadas por barreiras físicas, como a superfície da parede de uma sala. Quando o comprimento de onda é muito grande em relação à área de uma superfície, a onda tende a contornar o obstáculo ou ignorá-lo, e se reconstitui como se a emissão da onda tivesse em uma posição diferente da original, ocorrendo assim a difração (Figura 09).

Figura 09 - Efeito de difração em diferentes tipos de frequência

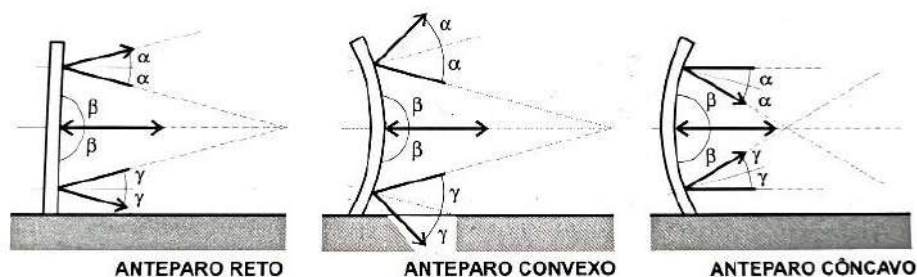


Fonte: Gerges, 2000

Porém, quando o comprimento de onda é menor do que a área da superfície, ocorre a reflexão da onda, que terá um ângulo de reflexão igual ao de incidência (Figura 10). Também é necessário avaliar que a previsibilidade desse processo pode ser prejudicada por conta da difusão criada por algumas superfícies não planas, onde os raios sonoros sofrem espalhamento e uma perda maior de energia, comparado a superfícies planas (Souza; Almeida; Bragança; 2012).

Figura 10 - Reflexão de ondas sonoras em superfícies retas, côncavas e convexas

ângulo de incidência = ângulo de reflexão



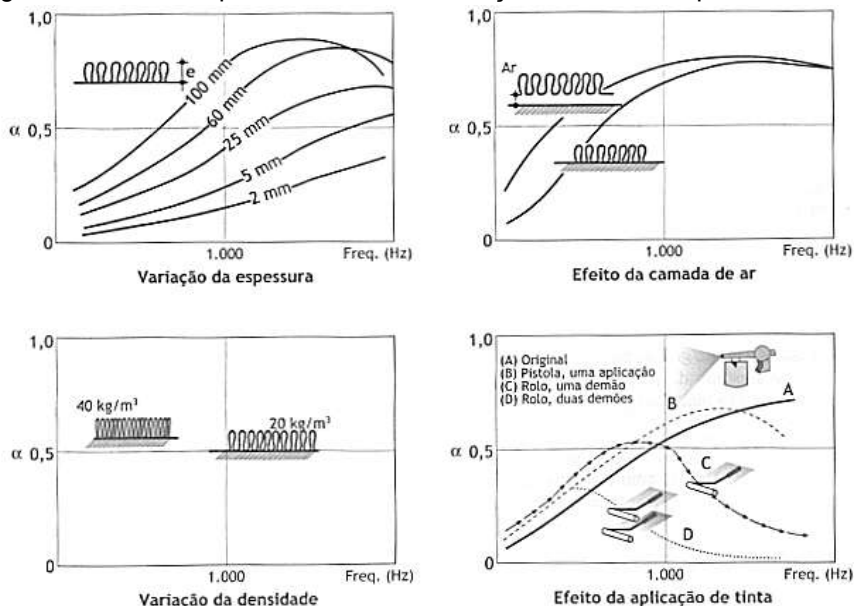
Fonte: Carvalho, 2010

De acordo com Carvalho (2010) e Souza, Almeida, Bragança, (2012), a interação da onda com uma superfície pode acontecer, pelo menos, por outras três formas. Enquanto parte da energia da onda pode ser refletida, outra parte poderá ser transmitida através do material (como um som que atravessa uma parede e chega até outro ambiente), propagar-se (usando o material como um novo meio para se distribuir) ou ser absorvida por ele. Ademais, um material que reflete ou absorve maior parte da energia incidente é considerado um mau ou bom absorvedor acústico, respectivamente.

Conforme Bistafa (2011), o processo de absorção pode ser quantificado a partir da análise do coeficiente de absorção sonora de cada material (α), valor que

varia entre 0 e 1 e dependerá de alguns aspectos físicos do material como: espessura, densidade, camada de ar e aplicação de tinta (Figura 11).

Figura 11 - Fatores que influenciam a absorção de materiais porosos/fibrosos:



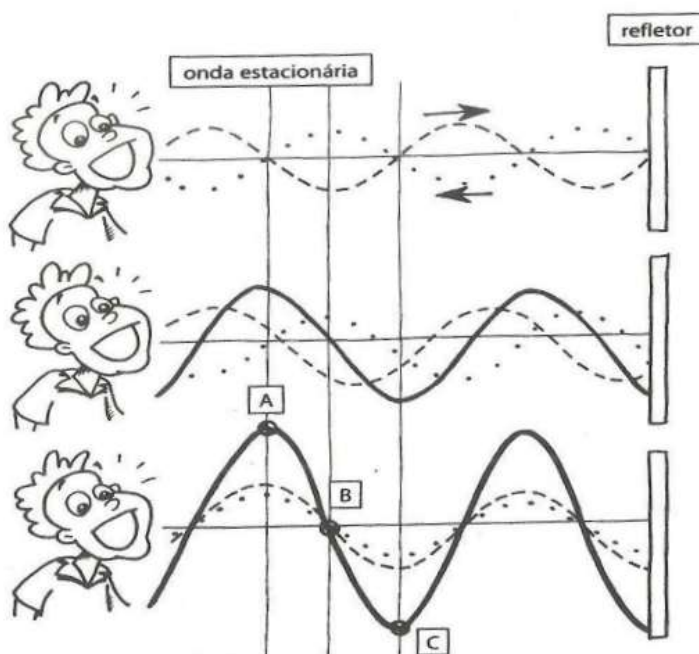
Fonte: Bistafa, 2011.

De acordo com Carvalho (2010, pg. 34) e Souza, Almeida, Bragança, (2012), quando em um ambiente fechado as superfícies são planas, paralelas entre si, a reflexão de duas ondas que possuem as mesmas características de comprimento de onda, frequência, amplitude e direção e que se propagam em sentidos contrários podem gerar ondas estacionárias, que podem causar um efeito de desconforto auditivo.

Para Souza, Almeida, Bragança (2012), esse desconforto se deve à variação de pressão sonora entre as reflexões, dependendo da posição do ouvinte, além de que podem existir locais onde a pressão é nula, como em pontos onde os nós das ondas coincidem (Ponto B na Figura 12), ou em pontos onde a onda emitida e onda refletida possuem fases inversas e acabam se anulando.

O resultado sonoro dessas sobreposições também pode se dar de forma aditiva, onde a pressão sonora das duas ondas pode se combinar e criar a percepção de uma onda de maior pressão sonora (Pontos A e C na Figura 12). Neste sentido, segundo Bistafa (2011, pg. 22) um som pode ser considerado estacionário “quando as condições de geração e de transmissão não variam durante o intervalo de tempo do registro”.

Figura 12 - Relações entre ondas estacionárias



Fonte: Souza, Almeida, Bragança, (2012); apud Moore, 1988

Segundo Costa (2003, pg. 44), “a persistência do som residual no ambiente, depois que a fonte tenha cessado de emití-lo, toma o nome de reverberação [...]”. Esse efeito é responsável por permitir que um som seja reforçado e que possa ser ouvido a uma distância maior em comparação a um ambiente aberto e sem reverberação. Isso é possível por conta da capacidade integradora do ouvido, onde a percepção do som é gerada pela combinação de todos os estímulos sonoros que alcançam o ouvido, seja por reflexões ou por diferentes origens, em um período de 1/15 de segundo. Quando as reflexões do prolongamento do som acontecem além do intervalo de 1/15 de segundo, haverá uma percepção distinta entre o som direto e suas reflexões, criando assim, o eco.

2.2 ETAPAS DO PROJETO ACÚSTICO

Na sequência, o estudo se aprofunda em estratégias específicas voltadas ao projeto acústico, contemplando temas como isolamento acústico, análise modal, acústica geométrica e acústica estatística. Serão apresentadas as principais abordagens, métodos de cálculo e ferramentas utilizadas na avaliação e no dimensionamento acústico de salas de ensaio, desde os aspectos relacionados à escolha de materiais até a aplicação de técnicas de simulação.

2.2.1 Isolamento Acústico

Para Ermann (2015, pg. 133), a capacidade de isolamento acústico de um sistema construtivo está muito mais fundamentada no tratamento dos pontos mais problemáticos do que no seu desempenho médio. Em outras palavras, um ponto falho no planejamento, por menor que possa parecer, pode comprometer todo o projeto. Além disso, Schmid (2013, pg. 24), reforça a importância da preocupação com o isolamento, de forma que “a falta de isolamento sonoro entre espaços internos e externos torna o edifício um agente causador do ruído, uma vítima do ruído, ou ambos.”

Causado por diferentes fontes sonoras, como por exemplo, o som de pessoas falando, tráfego, equipamentos de som e tv, máquinas, etc., o ruído aéreo incide sobre as paredes e pisos e a partir deles irradia para outras salas e ambientes, apesar de que a energia que chega ao outro lado é sempre menor (Ermann, 2015). Dessa forma, o entendimento e quantificação desse processo é fundamental.

Segundo Ermann (2015, p. 140), a perda de transmissão sonora (PT) é um parâmetro que quantifica a capacidade de isolamento acústico de um elemento construtivo. A Equação 02 dada por Bistafa (2011) e Ermann (2015) explica a relação do resultado da perda de transmissão sonora (PT) com a razão entre a energia transmitida e a incidente, ou seja, com o coeficiente de transmissão sonora (τ).

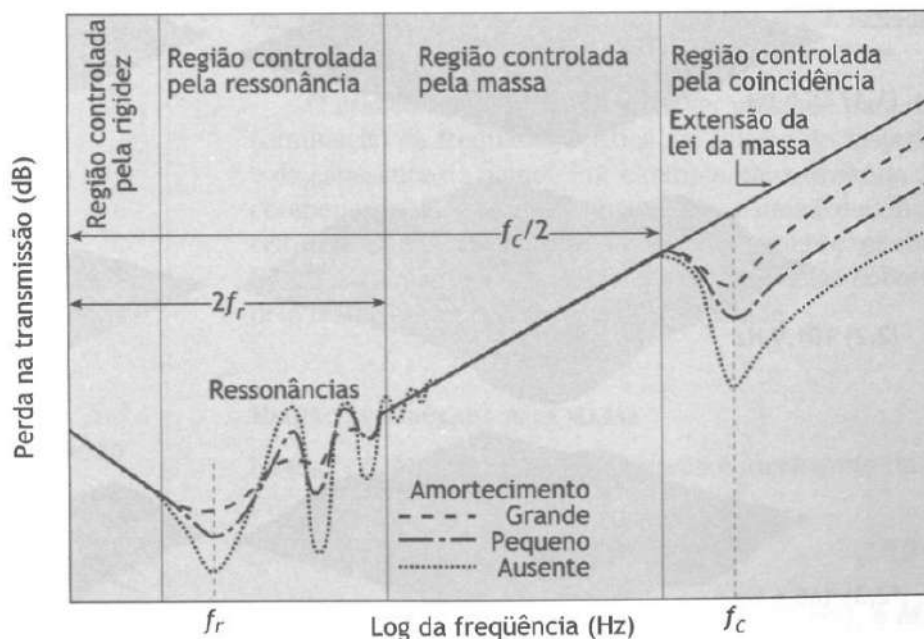
$$PT = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (\text{Equação 02})$$

Onde:

- PT é a perda de transmissão sonora em decibels.
- τ coeficiente de transmissão sonora em decibels.

A Perda de Transmissão Sonora (PT) é estabelecida com base na frequência sonora, pois o desempenho de isolamento acústico do material pode variar, conforme a característica espectral do ruído. A Figura 13 mostra como esse desempenho do isolamento acústico por frequência pode ser compreendida, havendo a subdivisão em quatro regiões: Região controlada pela rigidez, região controlada pela ressonância, região controlada pela massa e região controlada pela coincidência.

Figura 13 - Curva típica de perda na transmissão em função da frequência do som incidente de painéis sólidos e homogêneos.



Fonte: Bistafa, 2010 apud Lord et al. 1980

A região controlada pela ressonância “é controlada pelas ressonâncias mecânicas do painel no movimento de flexão” (Bistafa 2011, pg. 268), de forma que a incidência sonora de uma onda que possua uma frequência que ressoe com o painel vai fazer com que a onda seja amplificada e por conseguinte diminua a perda de transmissão.

Como pode ser visto na Figura 13, o ponto f_r define a frequência de ressonância onde a perda na transmissão é menor, e a partir dele a ressonância se repete em outras frequências, embora a diminuição seja proporcionalmente inferior, de acordo com os modos de ressonância de cada frequência, que podem ser encontradas através da equação 03 dada por Bistafa (2011)

$$f_r = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B}{M}} \left(\frac{i}{a^2} + \frac{j}{b^2} \right) \quad (\text{Equação 03})$$

Onde:

- f_r é a frequência de ressonância em Hertz
- B é a rigidez à flexão em Newton metros
- M é a densidade superficial em Kg/m²
- a e b são as dimensões de largura e comprimento do painel
- i e j são números naturais

Para uma região controlada pela massa e por uma determinada densidade superficial, a PT aumenta 6 dB para cada oitava (duplicação da frequência) e também para cada vez que a densidade superficial do painel é duplicada (quando a duplicação ocorre dentro da faixa de frequências da região controlada pela massa) (Bistafa, 2011, pg. 270; Carvalho, 2006).

A expressão geral do isolamento dentro da região controlada pela massa é dada pela equação 04:

$$PT = 20 \log (f \times M) - 47 \text{ dB} \quad (\text{Equação 04})$$

Onde:

- PT é a perda de transmissão sonora em decibels.
- f é a frequência em Hertz
- M é a densidade superficial Kg/m^2

Em uma região controlada pela coincidência, o som atinge a superfície do painel com uma onda cuja frequência é semelhante à onda de flexão do material, em que a coincidência ocorre quando o comprimento da onda de flexão λ_b é igual a $\lambda/\sin \theta$ (Bistafa, 2011; Gerges 2000). Além disso, segundo Gerges (2000), as ondas de flexão são consideradas dispersivas por conta da sua velocidade de propagação no material depender da frequência da onda. Dessa forma, além da coincidência do comprimento de onda citado anteriormente, outro requerimento para o efeito acontecer é que a velocidade da onda de flexão no painel seja (Equação 05):

$$c_b = \frac{c}{\sin \theta} \quad (\text{Equação 05})$$

Onde:

- c_b é a velocidade da onda de flexão no painel em metros por segundo
- c é a velocidade da onda no ar em metros por segundo

Sob essas circunstâncias, ocorre uma amplificação do movimento de flexão do painel, permitindo que o som atravessasse a estrutura com mais facilidade e como consequência, há uma diminuição na capacidade de isolamento acústico do material. O ponto onde esse efeito é maior, é chamado de frequência crítica, onde também é a menor frequência de coincidência (Figura 13) (Bistafa, 2011, pg. 269).

A frequência crítica é dada pela equação 06:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{M}{B}} \quad (\text{Equação 06})$$

Onde:

- f_c é a frequência crítica em Hertz
- B é a rigidez à flexão Newton metros
- M é a densidade superficial em Kg/m²
- c é a velocidade da onda no ar em metros por segundo

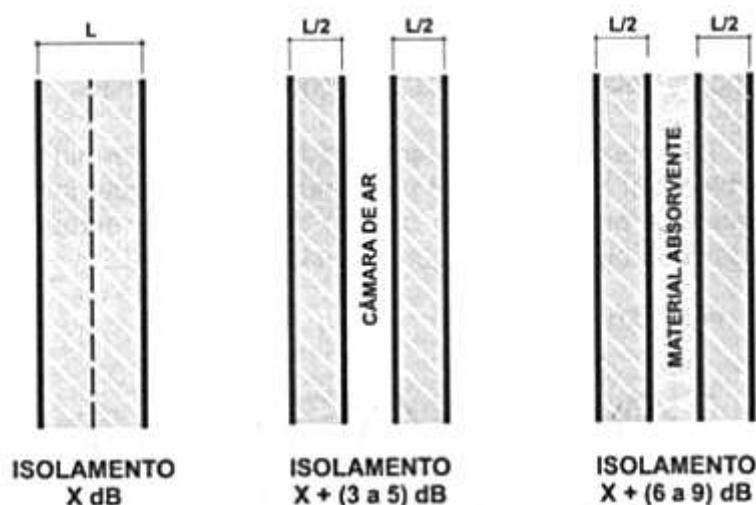
Segundo Bistafa (2011), na região controlada pela rigidez, abaixo da frequência de ressonância f_r (Figura 13), a perda de transmissão sonora diminui progressivamente, apresentando um decaimento de, aproximadamente, 6 dB para cada redução à metade da frequência. Esse comportamento segue uma tendência que poderia ser vista como inversa à região controlada pela massa, onde a influência do aumento da frequência seria diretamente proporcional ao aumento da PT.

Essas três regiões podem ser utilizadas nas etapas iniciais de projeto para que a escolha de materiais possa ser melhor fundamentada e que não haja, ou pelo menos sejam minimizados, possíveis problemas de isolamento acústico.

Além dos materiais, outras estratégias projetuais podem ser incorporadas para que o isolamento contra ruídos aéreos possa alcançar os níveis desejados. Uma delas é a utilização de paredes duplas onde o efeito de massa - mola - massa pode ser aplicado (Carvalho, 2006).

Ele consiste em criar uma camada de ar ou material que seja um bom absorvente acústico entre as camadas de uma parede, de forma a garantir uma maior absorção sem que grandes dimensões de espessura ou peso sejam aplicadas nas paredes. Além disso, a capacidade de isolamento será diretamente proporcional à distância entre as placas externas e à massa da mola (Carvalho, 2006). A Figura 34 demonstra a disposição do sistema:

Figura 14 - Comparação de sistemas de isolamento



Fonte: Carvalho, 2006

Ermann (2015) e Bistafa (2011) elencam também outras estratégias de controle do ruído aéreo, como, o desacoplamento de elementos construtivos de forma a evitar que as ondas sonoras sejam transmitidas de forma contínua através dos materiais. Por exemplo, em paredes duplas deve-se impedir que as estruturas que sustentam cada parte da parede estejam conectadas entre si para evitar a formação de pontes acústicas entre essas partes.

Outra indicação dada por Ermann (2015) em sintonia com um dos princípios do isolamento dado por ele, citado no Subcapítulo 2.2.1 - Isolamento Acústico, onde o isolamento acústico depende sensivelmente da prevenção de cavidades (furos ou frestas), uma vez que mesmo pequenas frestas, como as encontradas sob portas, podem ter impacto negativo significativo na perda de transmissão.

Outro parâmetro usado no estudo do isolamento acústico é o da Classe de Transmissão Sonora, STC (*Sound Transmission Class*), que, ao invés de utilizar um valor em dB para cada banda de oitava da PT de um material, utiliza um valor único, resultado da comparação de vários valores de banda individuais e sintetizados posteriormente (Ermann, 2015).

Dessa forma, segundo o mesmo autor, a comparação entre materiais e elementos construtivos é facilitada, porém com o ônus de não ser tão precisa em faixas de frequências graves e em sistemas compostos como o de massa-mola-massa, que possuem uma relação de isolamento maior quando comparados com sistemas de parede sem cavidade interna.

Apesar de ter sua utilidade, o parâmetro de PT muitas vezes pode não traduzir a eficiência real do isolamento sonoro em uma sala, pois, segundo Ermann (2015), outros fatores vão influenciar o resultado final do isolamento em salas adjacentes à produção de ruído que vão além dos valores de PT em elementos construtivos isolados.

Ermann (2015) traz outras condições a serem levadas em conta, por exemplo, o tamanho da área de contato compartilhada entre as salas, a absorção sonora na sala receptora do ruído, tendo em vista que salas com maior reflexão vão permitir que o som se propague por muito tempo dentro do ambiente. Dessa forma, uma abordagem complementar é a de redução de ruído, NR (*noise reduction*), que leva em conta as condições citadas anteriormente e pode ser expressada na Equação 07.

$$NR = PT + 10\log\frac{A}{S} \quad (\text{Equação 07})$$

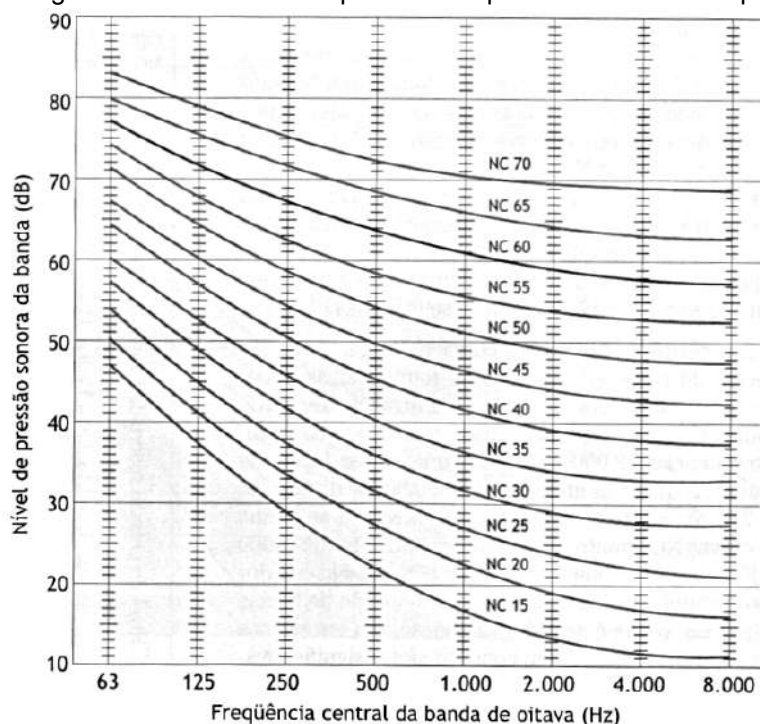
Onde:

- NR é a redução de ruído em decibels
- A é a absorção total da sala receptora em sabins
- S é a área de superfície da divisória em comum em metros quadrados
- PT é a perda de transmissão de material em decibels

Importante lembrar que dependendo da fonte sonora, a redução de ruído predita pode divergir do resultado real, principalmente devido às frequências graves que podem atravessar a barreira com mais facilidade e dos materiais e sistemas construtivos que compõem a divisória.

Para avaliar o ruído de um ambiente interno, o critério de ruído NC (*Noise Criteria*) pode ser utilizado para relacionar o nível de pressão sonora em dB com a sensibilidade do ouvido humano a cada frequência de banda de oitava, organizados em um gráfico (Ermann, 2015 e Bistafa, 2011) (Figura 15).

Figura 15 - Curvas de NC por nível de pressão sonora e frequência



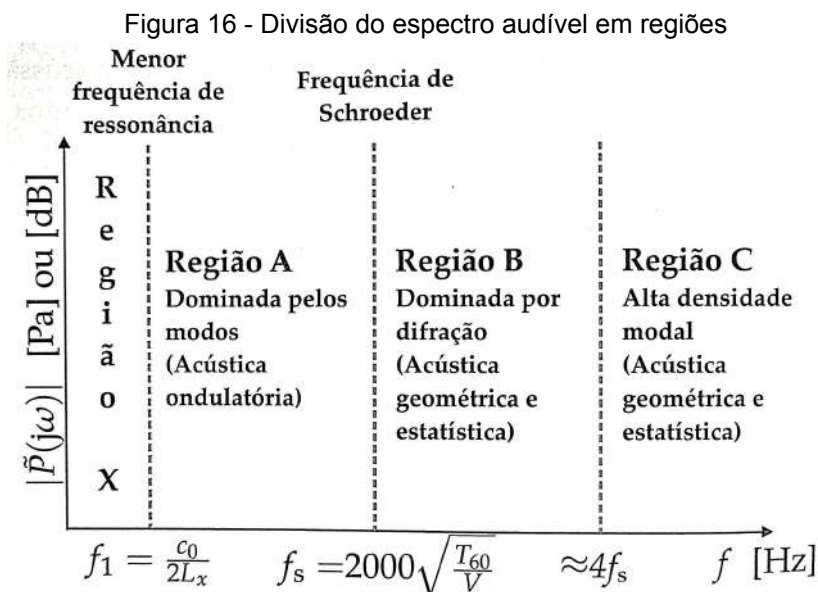
Fonte: Bistafa, 2011

É possível notar no gráfico da Figura 15 que as curvas possuem comportamento diferente quanto às frequências graves e agudas, pois, como foi citado anteriormente no Subcapítulo 2.1 - CONCEITOS E ASPECTOS GERAIS DO SOM, o ouvido humano é menos sensível às frequências graves, comparado às frequências agudas, e dessa forma as curvas de NC já fazem essa compensação.

Outras estratégias de isolamento acústico específicas às salas de ensaio serão apresentadas com melhor contextualização no Subcapítulo 3.1. - DIRETRIZES ACÚSTICAS

2.2.2 Acústica Modal

O estudo da acústica de ambientes fechados pode ser iniciado a partir de modelos matemáticos e teorias que caracterizam esse tipo de espaço, tanto para projetos futuros, como também para o estudo de edificações existentes. Segundo Brandão (2016), o espectro audível pode ser dividido por frequência em quatro regiões (Figura 16) que, por conta do comprimento de onda e das dimensões do objeto analisado, vão apresentar abordagens, métodos de análise e de cálculo diferentes.



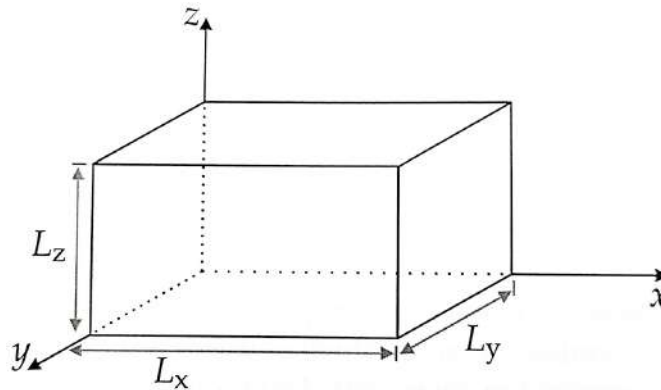
Fonte: Brandão, 2016

A região X “é aquela na qual os comprimentos de onda são maiores que o dobro da maior dimensão da sala.” (Brandão, 2016, pg. 287). Dessa forma, segundo o mesmo autor, a sala não dá as condições necessárias para suportar a propagação da onda no ambiente. Isso ocorre principalmente por conta da área das superfícies não ser grande o suficiente para realizar reflexão, como visto anteriormente no Subcapítulo 2.1 - CONCEITOS E ASPECTOS GERAIS DO SOM.

Segundo Brandão (2016) e Gerges (2000), no que se diz respeito às frequências características de cada sala e sua ressonância, o método de análise mais adequado dentro da faixa de frequência grave é o modal. Interpretando a sala como um grande ressonador complexo, ele parte do princípio de que essas ressonâncias seguem um padrão ou “modo”.

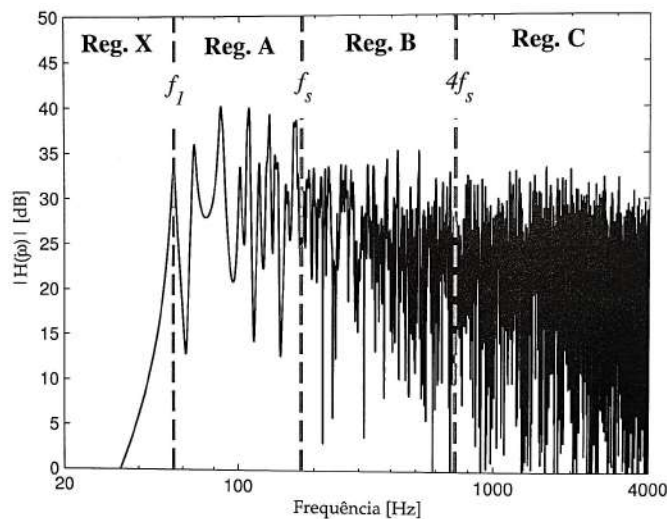
Brandão (2016, pg 288), traz um exemplo de sala retangular (em formato de paralelepípedo, como na Figura 17) de paredes rígidas (simplificação matemática para paredes de grande massa, como alvenaria e concreto e que possuem absorção mínima) onde ao analisar o seu gráfico de função resposta em frequência (FRF) (Figura 18) é possível notar que na região X não há ressonâncias. Além disso, elas começam a aparecer a partir da fronteira f_1 e se apresentam de forma pontual e dispersa na região A e ao longo das regiões B e C a quantidade de ressonâncias aumenta.

Figura 17 - Esquematização de uma sala retangular



Fonte: Brandão, 2016

Figura 18 - FRF de um sistema sala-fonte-receptor e seu espectro em frequência



Fonte: Brandão, 2016

A fronteira f_1 pode ser calculada pela seguinte equação:

$$f_1 = \frac{c_0}{2L_x} \quad (\text{Equação 08})$$

onde:

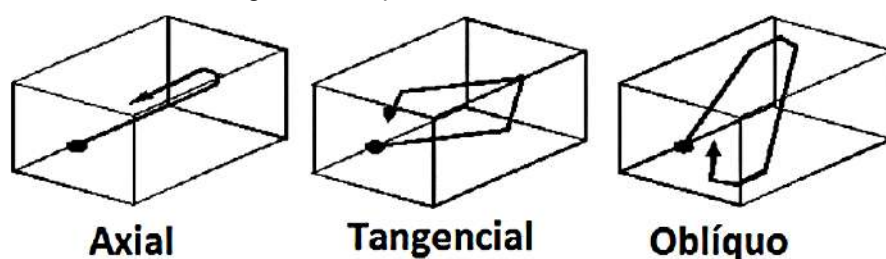
- f_1 é a frequência (em Hertz) da fronteira entre as regiões X e A
- c é a velocidade do som no ar em metros por segundo
- $2L_x$ é o comprimento da sala em metros (como convenção é considerado como a maior dimensão de uma sala)

É importante enfatizar que o gráfico da Figura 18 é apenas um exemplo, salas diferentes e com diferentes pontos de posição de fonte sonora e receptor resultarão em respostas distintas.

Segundo Brandão (2016, pg 298), a equação 08 revela problemas que podem surgir quando uma sala possui medidas iguais, sendo $L_x = L_y = L_z$, ou quando as dimensões de uma parede da sala é um múltiplo inteiro de outra parede ou múltiplo inteiro do mínimo divisor comum (MDC) entre as dimensões da sala. Nestes cenários, haverá uma coincidência de modos para as mesmas frequências, o que pode trazer prejuízos para a distribuição da energia sonora no ambiente, contendo regiões com excesso e outras com redução da energia sonora.

Segundo Gerges (2000) e Brandão (2016), os modos acústicos podem ser categorizados de acordo com os eixos de sentido da propagação da onda, sendo eles x , y e z . O primeiro tipo de modo é o axial, onde a onda se move paralela ao eixo x ou y ou z ; o segundo tipo de modo é o tangencial, onde as ondas se movem paralelas a um plano (xy ou yz ou zx); e o terceiro tipo de modo é o oblíquo, em que a onda se move nos três eixos (x , y e z) (Figura 19).

Figura 19 - Tipos de modos acústicos



Fonte: Mannis, Mattos (2021)

Segundo Brandão (2016), a expressão geral para a onda estacionária em qualquer ponto (x , y e z) (Equação 09), produzida em uma sala retangular com paredes rígidas pode ser definida como:

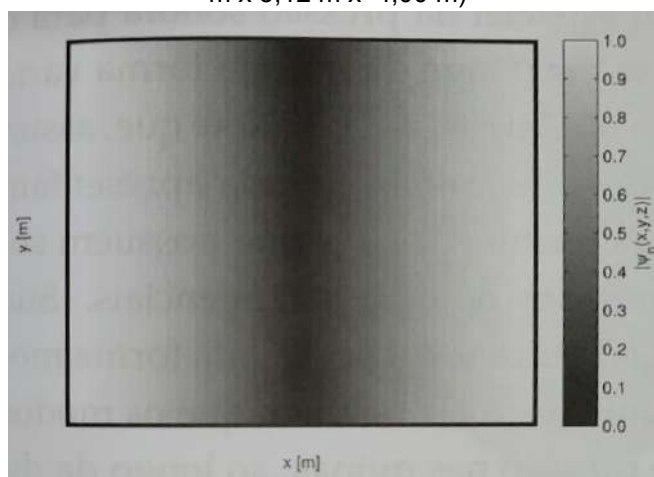
$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (\text{Equação 09})$$

Onde:

- f é a frequência em Hertz característica de cada modo acústico
- c é a velocidade de propagação da onda no ar em metros por segundo
- n é o número ($\in N$) da ordem do modo e pelo menos um deles não deve ser nulo
- L é a dimensão de determinada parte da sala retangular em metros

Dessa forma, pode-se analisar graficamente como a variação de pressão sonora acontece de acordo com cada tipo e configuração modal. Por exemplo: para o modo axial $n_x=1$, $n_y=0$ e $n_z=0$ de uma sala de medidas 6,16 x 5,12 x 4 m (Figura 20) haverá uma faixa localizada ao centro onde a pressão sonora será mínima, enquanto nas extremidades da sala a pressão será máxima (Brandão, 2016).

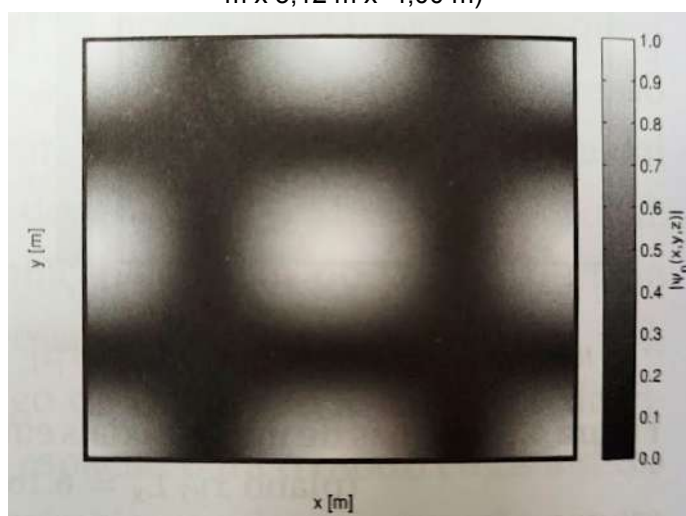
Figura 20 - Variação de pressão sonora em uma sala retangular de paredes rígidas (Dimensões: 6,16 m x 5,12 m x 4,00 m)



Fonte: Brandão, 2016

Em outro exemplo, para um modo Tangencial $n_x=2$, $n_y=2$ e $n_z=0$ (Figura 21) na mesma sala do exemplo anterior, haverá dois eixos transversais e dois longitudinais onde a pressão será mínima, enquanto os pontos de pressão sonora máxima serão os mais distantes possíveis desses mesmos eixos e também nas quinas da sala (Brandão, 2016).

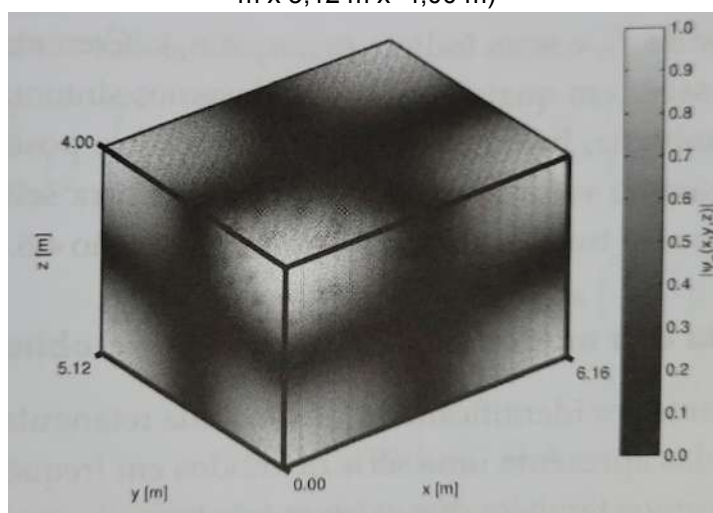
Figura 21 - Variação de pressão sonora em uma sala retangular de paredes rígidas (Dimensões: 6,16 m x 5,12 m x 4,00 m)



Fonte: Brandão, 2016

Para um modo oblíquo $n_x=1$, $n_y=1$ e $n_z=1$ (Figura 22) o resultado é parecido com o modo tangencial, com a diferença de que a variação de pressão sonora acontecerá também em uma terceira dimensão, com pontos de pressão máxima nas esquinas da sala (Brandão, 2016).

Figura 22 - Variação de pressão sonora em uma sala retangular de paredes rígidas (Dimensões: 6,16 m x 5,12 m x 4,00 m)

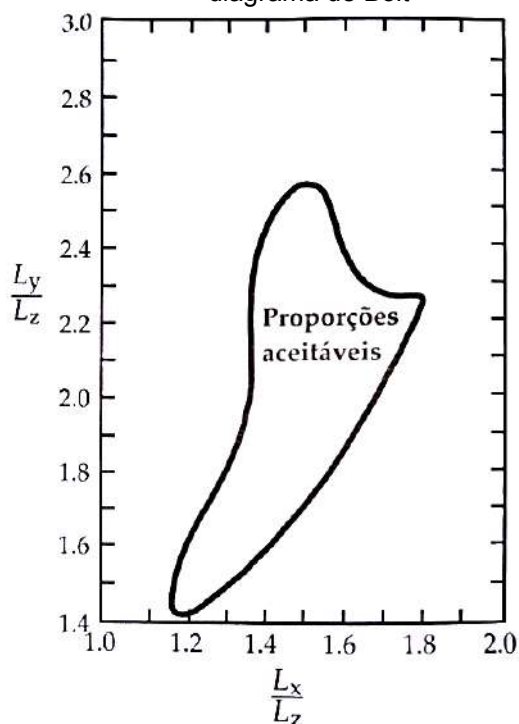


Fonte: Brandão, 2016

Aplicando a equação 09, a frequência obtida no exemplo da Figura 20 é de 27,6 Hz, enquanto no segundo exemplo (Figura 21), a frequência obtida é de 86,4 Hz e o terceiro exemplo (Figura 22), a frequência é de 60,6 Hz. A partir desse estudo, é possível não só caracterizar as frequências, mas também, localizar e entender seus pontos e eixos de maior influência na sala, o que poderá influenciar desde as fases iniciais de avaliação acústica da sala, como, evitar a colocação dos microfones de medição nos pontos de pressão sonora nula e até nas etapas de projeto, como na posição e dimensionamento de absorvedores sonoros de membrana caso necessário (Brandão, 2016).

Voltando a falar das proporções da sala, Brandão (2016) traz algumas recomendações dadas com base no Diagrama de Bolt para o projeto de salas retangulares, a fim de serem distribuídas, de forma mais uniforme, as frequências modais no espectro, evitando a sobreposição de modos nas mesmas frequências ou tornando o espaçamento entre os modos menor. O gráfico da Figura 23 mostra que a partir da razão entre as medidas dos lados de uma sala, caso o resultado esteja dentro da área demarcada, os critérios de distribuição citados anteriormente serão melhor alcançados.

Figura 23 - Proporções aceitáveis para uma boa distribuição das frequências modais segundo o diagrama de Bolt



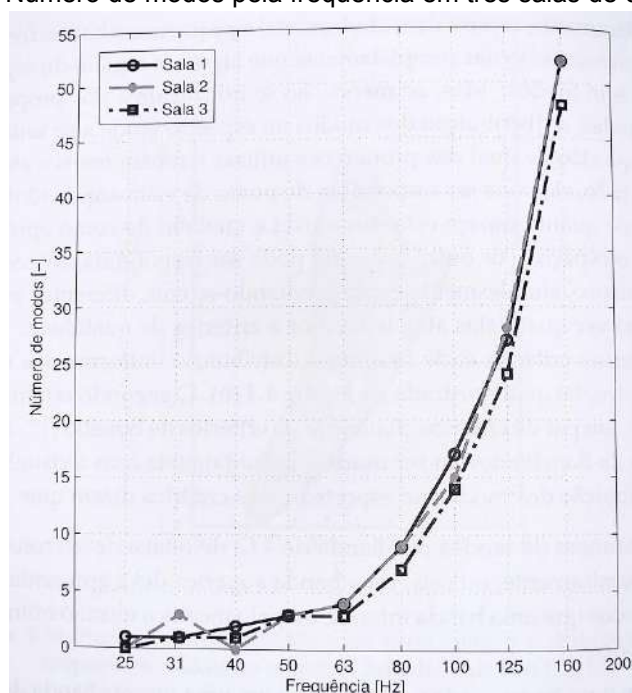
Fonte: Brandão, 2016

Outros critérios que podem ser utilizados no estudo da distribuição dos modos em uma sala são os chamados critérios de Bonello, onde:

- “1. O número de modos por banda de 1/3 de oitava deve crescer monotonicamente, ou seja, uma banda superior deve apresentar mais modos que uma banda inferior, ou pelo menos o mesmo número de modos.
2. Não deve haver modos coincidentes em uma mesma banda de terço de oitava, e se houver, essa banda deve conter 5 ou mais modos”.(Brandão, 2016, pg. 330)

A Figura 24 traz exemplo de um gráfico de função resposta em frequência de três salas de medidas: Sala 1 (Dimensões: 6,12 m x 5,12 m x 4,00 m); Sala 2 (Dimensões: 5,00 m x 5,00 m x 5,00 m); Sala 3 (Dimensões: 6,00 m x 4,80 m x 4,00 m). Pode-se notar a partir da Figura 24 que a única sala que atende aos dois critérios é a sala 1.

Figura 24 - Número de modos pela frequência em três salas de dimensões diferentes

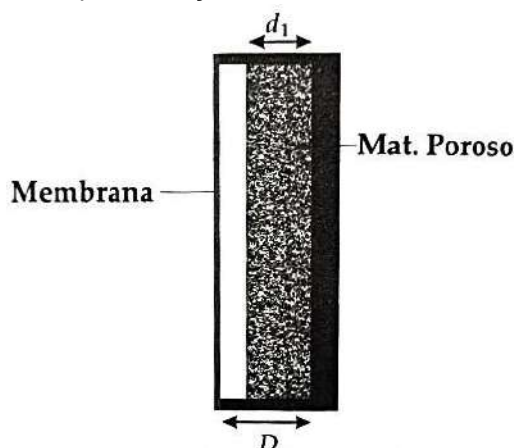


Fonte: Brandão, 2016

Nos casos onde uma sala não atende os critérios descritos anteriormente, se ela ainda estiver em estágio de projeto, é necessário que suas dimensões sejam revistas. Porém, caso seja uma sala que foi construída sem essa preocupação, ou como nos casos citados anteriormente, uma sala que foi adaptada para o novo uso pensado na música, essas modificações não são possíveis ou pelo menos pouco práticas. Brandão (2016) cita como um dos métodos possíveis no tratamento acústico desses casos é o uso de absorvedores de membrana.

Segundo o autor, esse tipo de absorvedor funciona a partir de uma cavidade preenchida com ar ou um material absorvente e fechada por uma membrana flexível (Figura 25) que ressoa com frequências específicas e é capaz de diminuir a energia localizada em regiões específicas de frequência onde os modos precisam ser controlados.

Figura 25 - Esquematização de um absorvedor de membrana



Fonte: Brandão, 2016

Como citado anteriormente, a análise modal é mais indicada para estudos na região A, porém entre ela e a região B existe uma fronteira que é definida pela equação de Schroeder (Equação 10) (Brandão, 2016; Gerges, 2000):

$$f_s = 2000\sqrt{\frac{T}{V}} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

- f é a frequência de Schroeder em Hertz
- T é o tempo de reverberação em segundos
- V é o volume da sala em metros cúbicos

A partir do resultado da frequência dada pela equação 10, as ondas sonoras são relativamente menores e, por isso, outros métodos de análise são preferíveis, como o da acústica geométrica e o da acústica estatística (Brandão, 2016; Gerges, 2000).

2.2.3 Acústica Geométrica

Apesar de suas capacidades, a teoria ondulatória apresenta algumas limitações, entre elas está a rigidez quanto ao tipo de sala que pode ser trabalhada por ela. Salas não retangulares e principalmente se possuírem uma geometria mais complexa apresentam dificuldade por conta do cálculo computacional mais custoso, além de que essa teoria não considera os objetos presentes dentro da sala e sua interferência nos modos acústicos (Brandão, 2016).

Segundo o mesmo autor, esse método tem suas origens que remetem à Idade Antiga, por exemplo, na Grécia e Roma, onde através do desenho eram feitas linhas

que ligavam geometricamente as posições entre as fontes sonoras e os ouvintes do teatro. Com o passar do tempo, novas formas de estudo foram criadas e aperfeiçoadas, a exemplo do uso de modelos em escala que possuíam fontes e microfones aliados inicialmente à técnicas de fotografia e posteriormente com o uso de ultrassom e laser. Atualmente, os modelos em escala foram substituídos pela utilização de *softwares* computacionais, que possuem a vantagem de serem menos custosos e mais rápidos, tanto na modelagem, quanto ao se fazer modificações.

A abordagem da acústica geométrica representa uma possibilidade de melhor lidar com essas restrições, pois no estudo de ambientes fechados essa abordagem baseia-se em uma idealização, na qual se considera que o comprimento de onda é bastante pequeno quando comparado com as dimensões da sala (Gerges, 2000). Esse procedimento assemelha-se à óptica geométrica, onde feixes de luz são representados por linhas retas que transportam energia. Analogamente, na acústica geométrica, os raios sonoros carregam energia e sofrem reflexões e difrações, permitindo que diferentes tipos de geometria possam ser utilizados na análise (Vorländer, 2008).

Segundo Gerges (2000), ao cumprir a condição necessária de estar acima do limite da frequência de Schroeder (Equação 10), uma resposta impulsiva aproximada pode ser gerada a partir de algoritmos computacionais. Um deles é o da Fonte Imagem Especular, que parte do princípio de que cada onda refletida pode ser representada como uma fonte sonora virtual, localizada no exterior do ambiente. Essa fonte virtual corresponde ao reflexo da fonte original em relação à superfície da parede, e sua energia acústica, ao penetrar no recinto, é atenuada de acordo com o coeficiente de absorção da sala.

O outro método é o de traçado de raios (*“ray-tracing”*) onde a partir da reflexão especular, um algoritmo consegue definir o caminho desenhado pelo raio sonoro dentro da sala, permitindo que a complexidade da difusão dos raios possa ser calculada (Gerges, 2000).

Segundo Vorländer (2008) e Brandão (2016), o método de traçado de raios, devido a sua natureza probabilística, pode ser considerado como estocástico, onde as partículas (ou raios) são emitidas a partir da fonte sonora em direções aleatórias, seguindo uma distribuição probabilística que modela o comportamento real do som. Isso simula a natureza difusa da radiação sonora, onde a energia acústica se propaga em múltiplas direções.

Quando um raio, que carrega determinada quantidade de energia e se move na velocidade do som, atinge uma superfície ou parede, ele é refletido em direção às outras superfícies da sala, perdendo energia de acordo com a absorção promovida pelos materiais que as compõem (Vorländer, 2008; Brandão, 2016).

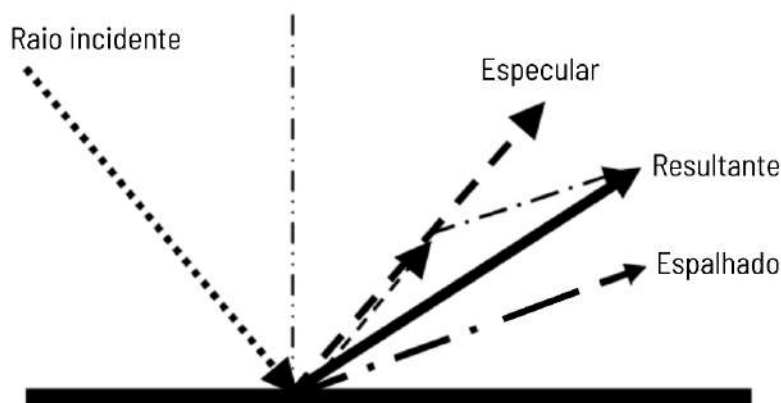
Segundo os mesmos autores, outros aspectos que vão influenciar a quantidade de energia que chega ao receptor podem ser a absorção promovida pelo ar, a quantidade de energia emitida pela fonte sonora, a direção da emissão sonora e a distância percorrida pelos raios e suas reflexões. Além disso, o aumento da quantidade de raios pode proporcionar maior precisão dos cálculos da simulação, com o ônus de um maior tempo para a sua realização.

Todas essas variáveis geram um custo computacional maior e, dessa forma, o trabalho de simulação acústica fica mais complexo, tornando algumas estratégias necessárias.

Segundo Vorländer (2008), uma das principais estratégias no processo de simulação computacional diz respeito à maneira de realizar a modelagem e a sua relação com os comprimentos de onda analisados. Como já mencionado, os efeitos de reflexão e espalhamento só acontecem quando as dimensões dos objetos são da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda do som analisado. Em outras palavras, se um obstáculo ou superfície for muito pequeno em relação ao comprimento de onda, ele não causará reflexões ou espalhamento significativos. Por outro lado, se for grande o suficiente, influenciará diretamente na propagação da onda sonora.

O espalhamento é também um relevante fenômeno acústico a ser levado em conta na simulação acústica. O coeficiente de espalhamento varia de um valor entre 0 e 1, sendo 0, correspondente a uma reflexão especular, enquanto que valores maiores indicam a ocorrência de uma variação cada vez maior do ângulo de reflexão, chegando a 1, onde a partícula será refletida em um sentido aleatório (Figura 26) (Christensen, Rindel, 2005).

Figura 26 - Resultado da variação do sentido de um vetor afetado pelo espalhamento



Fonte: Christensen, Rindel, 2005. Adaptado pelo Autor, 2025

Com base nessa relação, Andrade (2020), traz como metodologia para obtenção dos coeficientes de espalhamento para diferentes tipos de materiais a utilização dos dados fornecidos pelo *software* de simulação Odeon (Quadro 01).

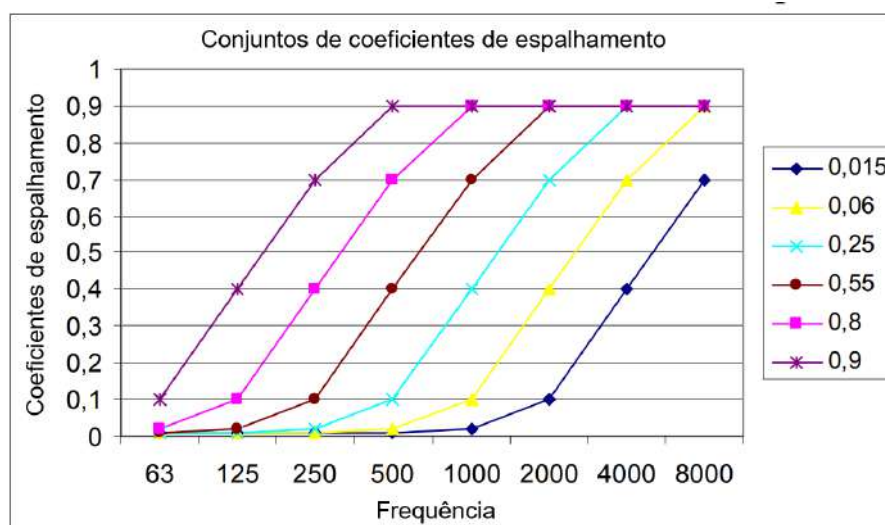
Quadro 01 - Valores sugeridos para o coeficientes de espalhamento

Material	Coeficiente de espalhamento à frequência de 707 Hz
Concreto aparente pintado	0,005 – 0,02
Superfícies lisas em geral	0,02 – 0,05
Alvenaria com juntas feitas, porém, sem revestimento argamassado	0,05 – 0,1
Alvenaria com juntas aparentes	0,1 – 0,2
Estantes de livros, com alguns livros	0,3
Estruturas irregulares de edifícios (0,3 a 0,5m de profundidade)	0,4 – 0,5
Área de audiência	0,6 – 0,7

Fonte: Manual do Usuário Odeon, 2018 (Tradução pelo autor)

O Quadro 01 se relaciona com a Figura 27 elaborada por Christensen, Rindel (2005) por servir de guia para a obtenção dos valores de coeficiente de espalhamento para as outras frequências, usando como referência a frequência de 707 Hz.

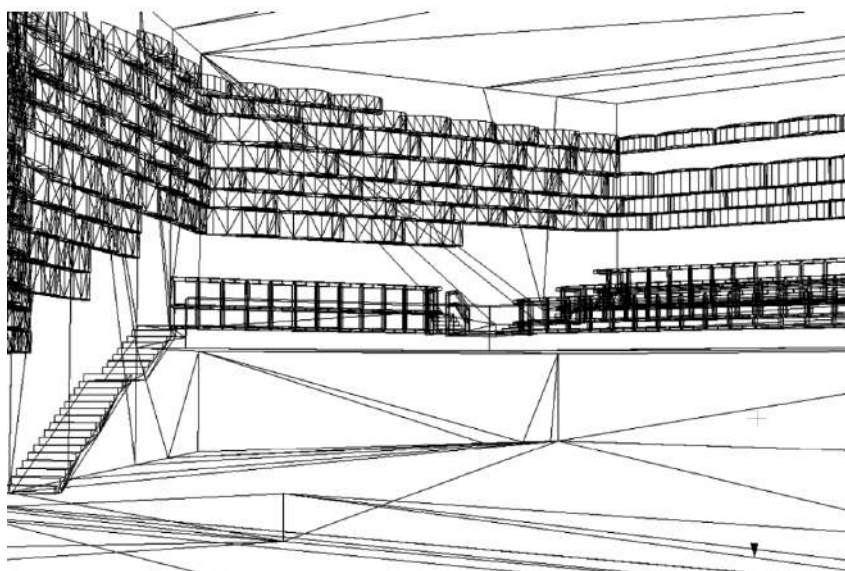
Figura 27 - Conjuntos de coeficientes de espalhamento



Fonte: Christensen, Rindel, 2005. (Tradução pelo autor)

Dessa forma, Vorländer (2008) indica que ao invés de representar todos os elementos de uma sala com seus detalhes, é preciso que seja feita uma simplificação do modelo. A Figura 28 mostra um exemplo de sala modelada em um software 3D e com a visão de sua “malha” (ela é a junção de vários polígonos que constroem e compõem as superfícies e objetos da modelagem).

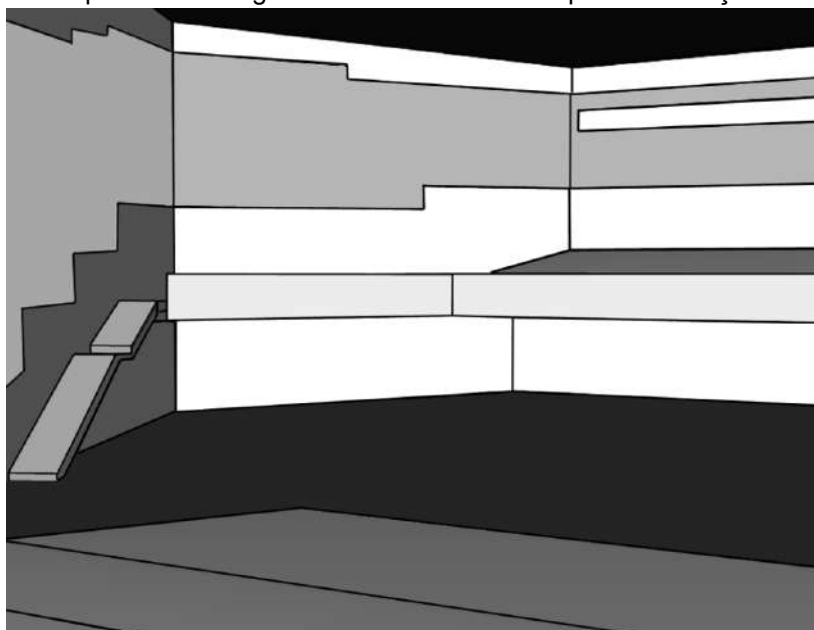
Figura 28 - Exemplo de modelagem 3D de sala multiuso



Fonte: Vorländer, 2008

A Figura 29 mostra como a modelagem anterior pode ser simplificada para que o objetivo da simulação computacional seja alcançado.

Figura 29 - Exemplo de modelagem 3D de sala multiuso após modificações em sua malha



Fonte: Vorländer, 2008

O nível de detalhe será definido de acordo com o objetivo da simulação, frequências analisadas, capacidade computacional, tempo e complexidade do modelo (Vorländer, 2008).

Com a modelagem finalizada, é preciso atribuir materiais às superfícies criadas e adicionar propriedades acústicas para a simulação, como, os coeficientes de absorção e espalhamento, além da caracterização do tipo de fonte sonora e de receptor, bem como, suas localizações na sala (Brandão, 2016).

2.2.4 Acústica Estatística

Segundo Brandão (2016), esse é o método de análise utilizado na região B e principalmente na região C (Figura 16), onde o comprimento de onda é muito menor que as superfícies e objetos presentes na sala. A divisa entre a região B e C é feita pelo múltiplo da frequência de Schroeder, sendo: $f_B = 4 f_s$. Essa teoria tem como vantagem a simplicidade e velocidade com que os cálculos podem ser efetuados, além de permitir modificações com a mesma facilidade, porém, por sua natureza estatística ela não considera a geometria da sala, o que a torna uma importante ferramenta para análises mais elementares e complementares às outras teorias.

Vorländer (2008) complementa ainda, afirmando que a acústica estatística utiliza como pressuposto geral o conceito de campo difuso, onde se assume que o som se propaga pelo ambiente em todas as direções de forma igualitária em

intensidade e distribuição. Assim, a partir dessa aproximação é possível interpretar o som de maneira probabilística ao estimar o resultado da intensidade sonora na sala após o acontecimento das reflexões.

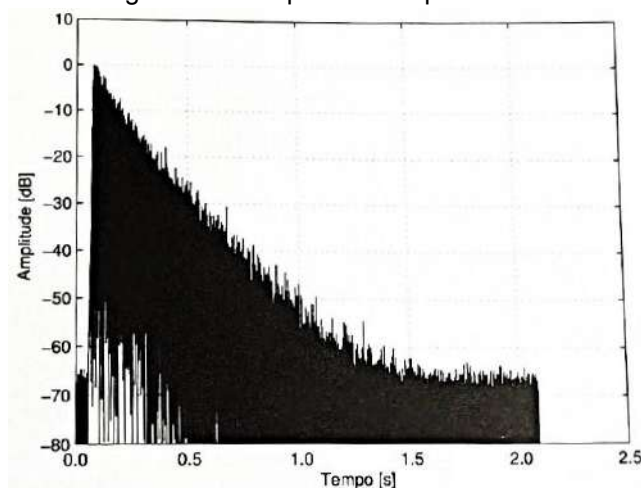
Conforme Brandão (2016, pg. 427), as fases temporais pelas quais um som passa ao ser emitido por uma fonte sonora dentro de uma sala podem ser divididas em três: Ataque, Estado estacionário e Decaimento. A primeira ocorre logo após a irradiação sonora, onde o receptor identifica o som direto e posteriormente as suas reflexões. Neste período, a densidade energética aumenta e, por conta do tempo que leva até as ondas sonoras se espalharem pela sala e atingirem outras superfícies, a quantidade de energia absorvida pelas superfícies da sala é menor que a emitida.

De acordo com o mesmo autor, a segunda fase, chamada de estado estacionário, ocorre enquanto a fonte sonora permanece ligada, porém a quantidade de energia absorvida se equipara à energia gerada pela fonte. Gerges (2000, pg. 261) complementa afirmando que, dessa forma, quando o nível de absorção sonora das paredes é elevado, o estado estacionário das ondas na sala é equilibrado mais rapidamente, enquanto nos casos onde a absorção de energia é menor, o aumento da intensidade sonora ocorre de forma mais demorada.

Posteriormente, acontece a terceira fase, o decaimento. Nesta fase, quando a fonte cessar a produção sonora, o som permanecerá no ambiente por um tempo e logo em seguida a densidade energética das frentes de onda começará a diminuir conforme as últimas ondas chegarem ao receptor (Brandão, 2016, pg. 427). O decaimento do som em um ambiente fechado pode ser explicado pelo tempo de reverberação. Ele pode ser definido como “o intervalo de tempo necessário para que o nível de intensidade de um determinado som decresça 60 dB após o término da emissão de sua fonte” (Carvalho, 2010, pg. 93).

O tempo de reverberação pode ser calculado a partir da análise de um gráfico de resposta impulsiva (Figura 30), onde uma fonte sonora gera um som transiente de curta duração, como o estouro de um balão, e esse som é captado por um microfone (NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017)).

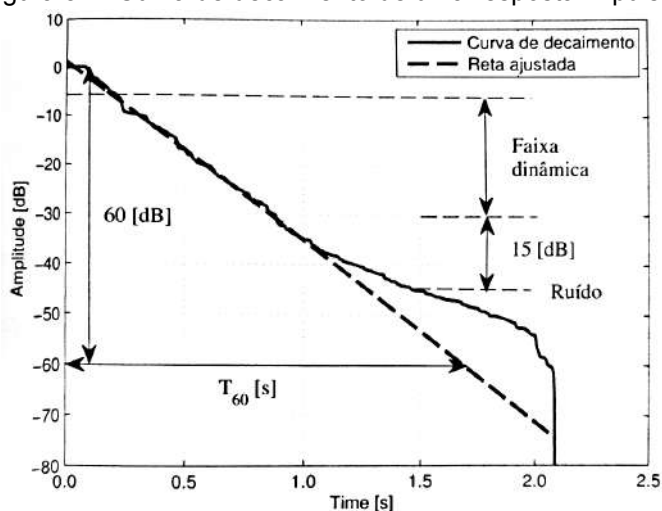
Figura 30 - Resposta ao impulso em dB



Fonte: Brandão, 2016

A partir do gráfico gerado é observado o tempo de duração da faixa dinâmica, situada após o decaimento dos primeiros 5 dB da resposta impulsiva e se estende até o momento anterior à distância de 15 dB acima do ruído residual (Figura 31) (Brandão, 2016)

Figura 31 - Curva de decaimento de uma resposta impulsiva



Fonte: Brandão, 2016

Segundo Carvalho (2010), o físico norte-americano Wallace Sabine, a partir dos seus estudos em salas de aula, fez a proposição de uma fórmula que pudesse explicar o fenômeno da relação entre a absorção sonora dos materiais e a reverberação de uma sala. Ele percebeu que a acústica da sala era mais satisfatória quando ela estava com janelas abertas e ocupada por alunos ou almofadas sobre as carteiras, e dessa forma, o tempo de reverberação era inversamente proporcional à absorção da sala.

A fórmula proposta por Sabine foi:

$$T_{60} = \frac{0,161V}{A} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

- V é o volume da sala em metros cúbicos
- A é a absorção total da sala em sabines por metro quadrado expressa pela equação:

$$A = \sum S_i \alpha_i \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

- S é a área de cada componente das superfícies em metros quadrados
- α é o coeficiente de absorção

Posteriormente, segundo Gerges (2000, pg. 265), Eyring propôs uma nova fórmula para calcular o tempo de reverberação em salas quando o coeficiente médio de absorção for superior a 0,2:

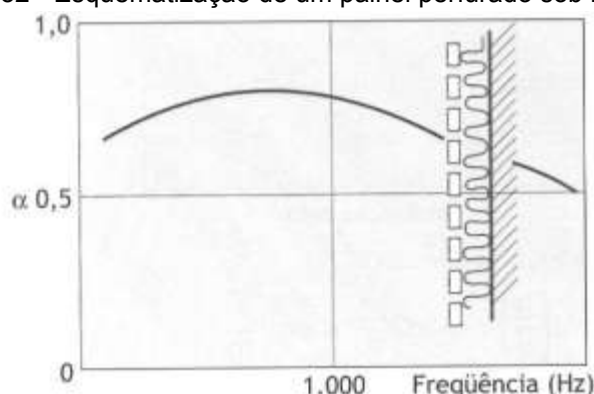
$$T_{60} = \frac{0,161V}{-S \ln(1 - \alpha)} \quad (\text{Equação 13})$$

O coeficiente de absorção dos materiais de uma sala pode ser encontrado na bibliografia especializada da área como artigos, ensaios e catálogos de fabricantes. Ele geralmente é organizado em listas que relacionam cada coeficiente com uma frequência específica, geralmente 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz (Brandão, 2016).

Além dos materiais já presentes em uma sala, outras estratégias e sistemas podem ser utilizadas para o controle do tempo de reverberação. A primeira delas é a de painel perfurado (Figura 32) de madeira, plástico ou metal sobre material poroso/fibroso, permitindo que dessa forma o material absorvente terá uma proteção mecânica (Bistafa, 2011, pg. 239).

Ermann (2015, pg. 30) aponta que para esse tipo de sistema, quando a área aberta das perfurações equivale a 11% da área do painel, a absorção do sistema tem maior performance nas frequências baixas do que nas agudas, por conta do espaço entre as aberturas ser comparável ao comprimento de onda de altas frequências. Porém, quando esse valor ultrapassa os 20% a absorção do conjunto se aproxima da de um material poroso sem a proteção.

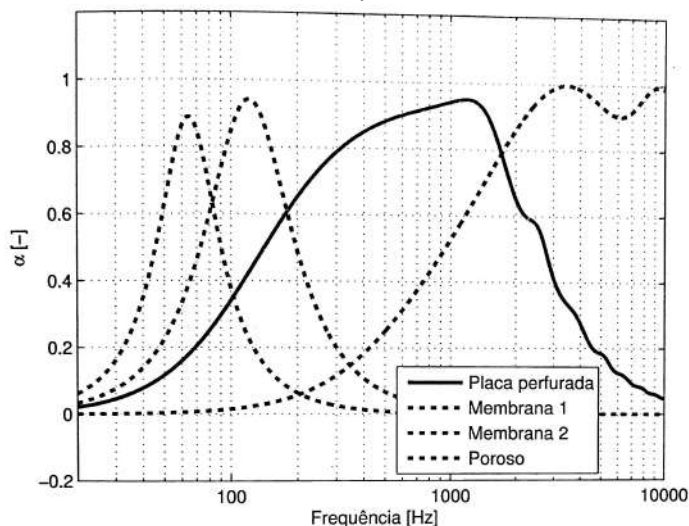
Figura 32 - Esquemática de um painel perfurado sob material poroso



Fonte: Bistafa, 2011

Além da proteção mecânica, outro fator relevante para o sistema de painel perfurado com material absorvente é que ele, caso seja bem dimensionado, pode possuir uma área de influência do seu coeficiente de absorção nas frequências médias mais abrangente e mais acentuado quando comparado à absorvedores porosos sozinhos ou absorvedores de membrana (Figura 33) (Brandão, 2016, pg. 174).

Figura 33 - Comparação entre absorvedores de membrana, porosos e painéis perfurados com material poroso

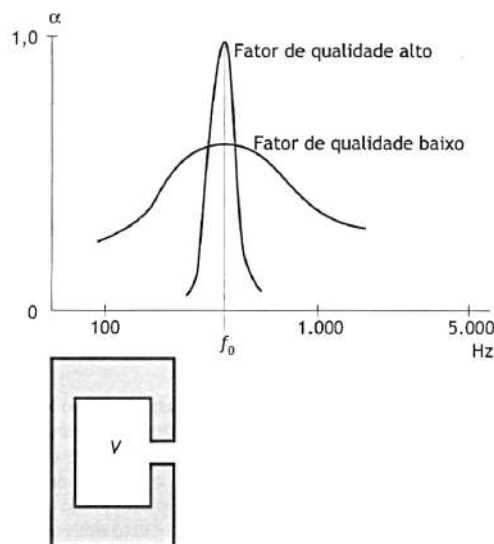


Fonte: Brandão, 2016

Outro tipo de absorvedor que pode ser utilizado em salas, como as de ensaio e apresentação musical, é o de Helmholtz (Figura 34), onde ele é composto de uma cavidade colocada, por exemplo, na parede com apenas ar em seu interior, onde ele reage às ondas sonoras de forma elástica, como se fosse uma mola, sendo pressionado pelas variações de pressão e, dessa forma, a energia sonora é dissipada principalmente pelo atrito do ar com as paredes internas, o que resulta na absorção do som (Bistafa, 2011, pg. 244).

Seu principal diferencial é a capacidade de impactar regiões estreitas de frequências, dependendo do seu fator de qualidade (Figura 34), parâmetro que mede justamente o quão abrangente é sua ação. Quanto mais estreito, maior o seu fator de qualidade e quanto mais abrangente, menor (Bistafa, 2016, pg. 245).

Figura 34 - Absorvedor de Helmholtz e relação dos fatores de qualidade com a frequência



Fonte: Bistafa, 2011

O controle do tempo de reverberação de um ambiente se faz necessário para que as condições acústicas de seu uso sejam atendidas e a inteligibilidade e o alcance do som sejam alcançados de forma satisfatória.

“Se o tempo de reverberação for muito longo haverá sobreposição de sons, o que acabará dificultando a inteligibilidade. [...] se ocorrer o contrário, ou seja, o som desaparecer imediatamente após a sua emissão, sua percepção tornar-se-á difícil em pontos mais afastados da fonte”. (Carvalho, 2010, pg. 94)

2.3 OUTROS PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJETIVOS

Para além do Tempo de Reverberação, existem outros parâmetros acústicos objetivos para avaliação de acústica de salas, sendo alguns deles abordados a seguir. O Tempo de Decaimento Inicial (EDT - *Early Decay Time*), que segundo Beranek (1996, pg. 23), é definido como o tempo necessário para que o nível de pressão sonora seja atenuado 10 dB, após a fonte sonora cessar a produção do som. Conforme Vorländer (2008), a maior parte da energia de um som está contida na parte inicial da sua reverberação, onde a segunda metade do tempo total contém apenas 22% da energia emitida.

Musicalmente esse parâmetro engloba a fase inicial do som produzido pelas notas de um instrumento musical, como um violino sendo tocado de forma rápida, e por isso muitas vezes ele pode definir a qualidade acústica da sala melhor do que o T_{60} (Beranek 1996, pg. 23).

De acordo com Brandão (2016) e Vorländer (2008), a Clareza é o parâmetro ligado à definição do som e a sua inteligibilidade, que quando se apresenta de forma favorável às atividades exercidas em uma sala, ela garante que a música possa ser ouvida com boa definição e que os vocábulos sejam bem articulados. A reverberação da sala é o fator de principal influência desse parâmetro. Em uma sala com elevado tempo de reverberação, por exemplo, se um músico toca seu instrumento com alta velocidade, o resultado pode ser percebido como tendo baixa clareza por conta do mascaramento causado de uma nota sobre a outra (Beranek, 1996, pg. 25).

A clareza pode ser definida pelo parâmetro C_{80} e C_{50} sendo o primeiro utilizado para música e o segundo para fala. C_{80} é definido pela razão logarítmica da energia sonora que chega nos primeiros 80 milissegundos e a energia restante a partir desse tempo, enquanto o C_{50} segue a mesma conceituação, porém dentro de um tempo de 50 milissegundos (Vorländer, 2008, pg. 97).

Analogamente, conforme Brandão (2016), existe também o parâmetro de Definição, que também pode ser utilizado para caracterização da música e da fala, usando os parâmetros de D_{80} e D_{50} , respectivamente. Não há impedimento para utilizar um ou outro, porém, há a diferença de que os parâmetros de C_{50} e C_{80} dão grandezas em dB, enquanto D_{50} e D_{80} se apresentam de forma linear. Além disso, C_{80} e D_{50} são os parâmetros mais comuns, podendo o uso de C_{50} e D_{80} ser considerado redundante.

C_{80} pode ser expressa pela Equação 14:

$$C_{80} = 10 \log \left[\frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} h^2(t) dt} \right] \quad (\text{Equação 14})$$

onde:

- $h^2(t)$ é a energia da resposta impulsiva da sala

- C_{80} é a clareza em decibels

Enquanto C_{50} pode ser expressa pela Equação 15:

$$C_{50} = 10 \log \left[\frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} h^2(t) dt} \right] \quad (\text{Equação 15})$$

D_{50} pode ser expressa pela Equação 16:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (\text{Equação 16})$$

D_{80} pode ser expressa pela Equação 17:

$$D_{80} = \frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (\text{Equação 17})$$

Outro parâmetro utilizado na análise de salas voltadas à música é o Fator de força (G), em que Vorländer (2008) o define como a razão entre a energia de um som emitido a uma distância de 10 m do receptor em um ambiente fechado e um som emitido em campo aberto na mesma distância. Dessa forma, é possível entender como a acústica de uma sala pode dar suporte à propagação das ondas sonoras e modificar a percepção subjetiva de volume (sonoro) percebido. A Equação 18 demonstra como o parâmetro de força (G) pode ser calculado.

$$G = 10 \log \left[\frac{\int_{t_0}^{\infty} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h_{10}^2(t) dt} \right] \quad (\text{Equação 18})$$

onde:

- $h^2(t)$ é a energia da resposta impulsiva da sala
- $h^2_{10}(t)$ é a energia da resposta impulsiva da sala de referência a 10 m de distância com a mesma fonte.

O Fator de força (G), de acordo com Brandão (2016), é beneficiado pelo aumento do tempo de reverberação, pois um maior valor de TR implica em uma maior quantidade de energia causada pelo reforço sonoro das reflexões. Desse modo, é importante avaliar que enquanto a Clareza e a Definição possuem uma relação inversamente proporcional ao TR, o parâmetro G tem uma relação diretamente proporcional, o que exige do projeto acústico um equilíbrio ao lidar com esses parâmetros.

3. ACÚSTICA DE SALAS DE ENSAIO MUSICAL

Uma das principais dificuldades encontradas no estudo de salas de ensaio, segundo Schmid (2013, pg. 23), está na falta de consenso entre pesquisadores da área sobre os valores e critérios que possam ser utilizados como boas referências para salas do tipo, em contraste com a quantidade de estudos relacionados à salas de aula comuns. Além disso, de acordo com o mesmo autor, entre os músicos também existem diferentes opiniões sobre como uma sala de ensaio deveria se comportar acusticamente, o que aumenta a complexidade da questão quando são considerados também os diferentes tipos de instrumentos musicais e suas características individuais.

Como citado anteriormente no Capítulo 1 - Introdução deste trabalho, muitas das salas utilizadas para ensaio não foram pensadas originalmente para esse tipo de uso e por isso os problemas tanto de condicionamento acústico (como a falta de materiais acústicos corretos e volume suficiente) quanto de isolamento acústico, prejudicam a qualidade do ensino e estudo musical. O próximo subcapítulo tratará de algumas recomendações projetuais para melhor pensar a acústica desse tipo de sala.

3.1 DIRETRIZES ACÚSTICAS

As primeiras recomendações feitas por Schmid (2013) dizem respeito ao tamanho da sala, tanto em área quanto em volume. No primeiro caso, deve-se ter em conta a área ocupada por alunos, seus respectivos instrumentos e estante musical, além do espaço de circulação. No segundo caso, quando se analisa as necessidades impostas pelo volume, é preciso se atentar para a demanda por um volume que seja suficiente para a realização das atividades.

Segundo o autor, quando o volume é insuficiente, alguns problemas podem surgir, como: intensidade sonora em excesso por conta do reforço dado pelas superfícies muito próximas, que pode prejudicar a audição dos músicos, além do som “seco” na sala, caracterizado por um baixo valor de tempo de reverberação, que pode ser considerado um fator negativo, a partir da opinião subjetiva de alguns músicos.

Um valor recomendado encontrado por Schmid (2013) para o volume por pessoa em salas de concerto é de 15 m³, ordem de grandeza que, como citado anteriormente no Capítulo 1 - Introdução, seria impraticável na maioria das escolas

brasileiras, haja visto os problemas relacionados à falta de estrutura e de salas projetadas para esse uso específico. Dessa forma, o autor considera que valores intermediários entre os de salas de concerto e salas de aula (3 m³ por aluno) são almejados.

Toda essa questão entre a área e volume precisa ser levada em consideração durante o projeto, porém, quando se trata de uma edificação existente, algumas alternativas podem ser pensadas. Schmid (2013) traz algumas alternativas para aumentar a área e o volume. No primeiro caso, é possível a junção de duas salas e a criação de uma sala maior, já no segundo, quando em edificações sem pavimentos superiores e laje de cobertura, é possível aumentar a altura do telhado para conseguir um volume mais próximo do desejado.

Uma necessidade que pode surgir é a de contemplar mais de um uso do espaço, seja para diferentes tipos de grupos musicais, de instrumentos ou até de atividades não relacionadas à música. Nesses casos, Schmid (2013) traz algumas soluções que podem ser implementadas para que o uso da sala seja mais flexível, como: uso de painéis removíveis ou giratórios com materiais de diferentes tipos de coeficiente de absorção, para controlar o tempo de reverberação de acordo com a necessidade e a de colocação de cortinas de tecido pesado e que possam ser recolhidas em nichos quando não houver mais utilidade.

Em um contexto escolar, a localização da sala de ensaio pode interferir nas salas vizinhas e vice-versa, de forma que ela pode gerar ruído que prejudica as atividades escolares adjacentes e também pode ser prejudicada por conta dessa mesma proximidade (Schmid, 2013).

Um exemplo dado pelo autor é o ruído gerado pelos alunos nos corredores, onde é possível trabalhar com painéis absorvedores acústicos que possam diminuir a energia sonora que se propaga ao longo da circulação. Além disso, dependendo da posição em que se encontra a sala, o próprio corredor pode ser adaptado para servir como antecâmara para a sala de ensaio, promovendo dessa forma um desacoplamento das demais áreas da escola ou das áreas mais ruidosas.

3.2 NORMA ABNT NBR ISO 23591:2025

Esta normativa, nomeada “Critérios de qualidade acústica para salas e espaços de ensaio musical”, é uma das principais referências para o presente trabalho de conclusão de curso, trazendo orientações para o projeto acústico de

salas de ensaio musical, independente do tipo de edifício onde os espaços estão localizados, servindo tanto para espaços onde os ensaios são o uso principal, quanto para espaços que têm caráter multifuncional, desde que não tenham finalidade como espaço de apresentação, como salas de concerto e ópera.

Os critérios elencados por esta norma estão ligados ao tipo de música, sendo eles: música acústica (não amplificada) suave, música acústica intensa e música amplificada (com alto falantes, caixas de som, etc.).

A música acústica suave se refere à performances que utilizam instrumentos que emitem até 95 dB, como instrumentos de cordas, de sopro (madeiras como flauta, oboé e saxofone), canto e corais. Por outro lado, a música acústica intensa é caracterizada por instrumentos que passam dos 95 dB, como o piano, instrumentos do grupo dos metais como trombone e trompete, percussão, orquestras e ópera.

A terceira e última classificação aborda instrumentos amplificados e sistemas de reprodução sonora que, por conta das especificidades deste trabalho, não serão abordadas ao longo deste texto.

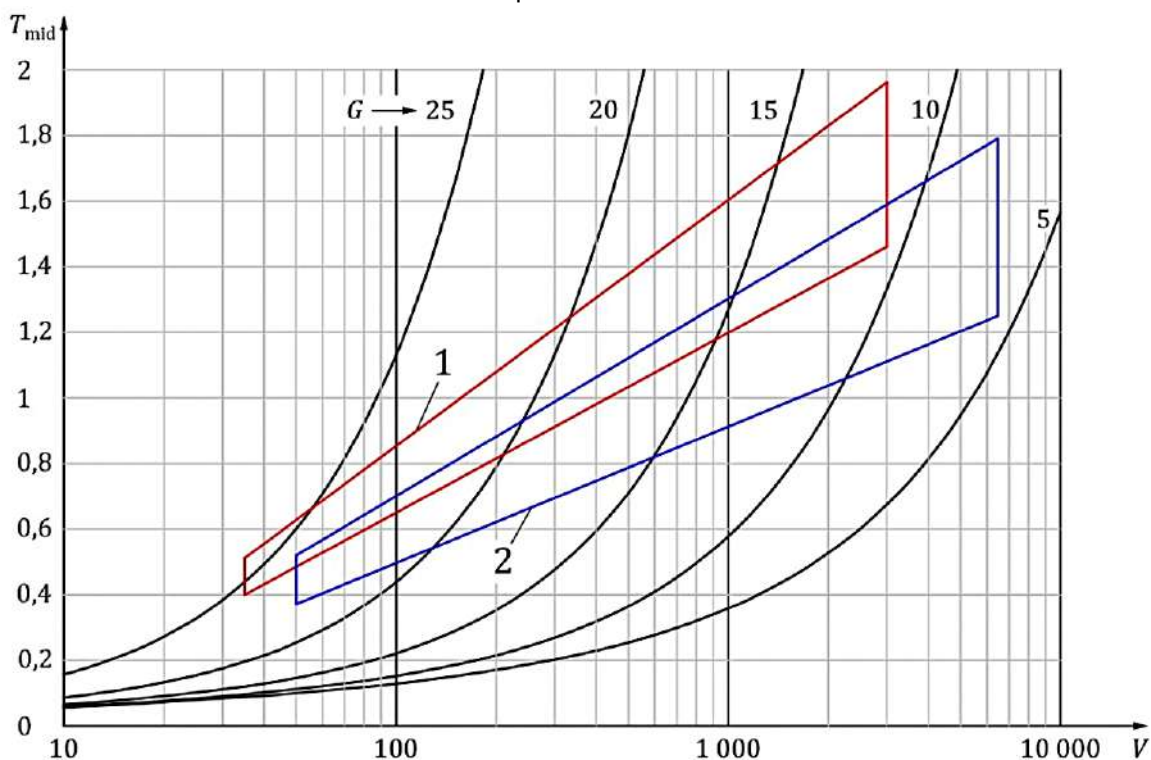
Para as duas primeiras classificações, a norma NBR ISO 23591 (ABNT, 2025) traz algumas preocupações a serem levadas em consideração devido ao seu impacto nesse tipo de sala, sendo:

- Tamanho apropriado da sala (volume e área líquidos).
- Altura adequada da sala (pé-direito).
- Reverberação adaptada à finalidade.
- Controle de reflexões repetidas, inclinação de superfícies, difusão sonora e elementos difusores de som para evitar eco flutuante.
- Intensidade sonora adaptada à potência sonora do conjunto.
- Nível de ruído residual controlado.

Um dos parâmetros que se destacam nas orientações dadas pela norma é o de Fator de força sonora (G) em que, além das questões mostradas no Subcapítulo 2.3 OUTROS PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJETIVOS. Esta norma levanta uma preocupação com a saúde auditiva dos músicos, haja visto que valores muito altos de G podem significar dano ou perda auditiva.

A NBR ISO 23591 (ABNT, 2025) também traz valores ideais de tempo de reverberação relacionados ao volume da sala e ao Fator de força sonora (G) (Figura 35)

Figura 35 - Força sonora, G , em função do volume líquido e da média do tempo de reverberação de frequência média



Fonte: NBR ISO 23591 (ABNT, 2025)

Onde:

- V é o volume, expresso em metros cúbicos
- T_{mid} é a média do tempo de reverberação em frequências médias, expressa em segundos
- G é intensidade sonora em dB em intervalos de 5 dB
- 1 (linhas em vermelho) é limite superior e inferior para música acústica de baixa intensidade sonora em salas de ensaio
- 2 (linhas em azul) é limite superior e inferior para música acústica de alta intensidade sonora em salas de ensaio

Conforme a NBR ISO 23591 (ABNT, 2025), o tempo de reverberação deve ser ajustado ao tipo de música e ao tamanho da sala. Um tempo de reverberação excessivo torna o som confuso e denso, enquanto um tempo muito curto faz com que a música pareça seca e sem brilho, afetando especialmente vozes, instrumentos de sopro e metais. Salas pequenas com reverberação longa geram som excessivamente intenso e desconfortável; já salas grandes com reverberação curta produzem som fraco.

Para utilizar o gráfico da Figura 35 é preciso calcular o T_{mid} , que é a média aritmética dos tempos de reverberação nas frequências de 500 Hz e 1000 Hz. É possível encontrar os limites inferiores e superiores para o T_{mid} de uma sala, aplicando a Equação 19, extraída da NBR ISO 23591 (ABNT, 2025).

$$T_{mid} = a * \text{Log}(V) - b (s) \quad (\text{Equação 19})$$

onde:

- V é o volume livre da sala em metros cúbicos.
- a e b são constantes.

Já o Quadro 02 apresenta os valores das constantes a e b para diferentes tipos de salas de ensaio.

Quadro 02 - Constantes a e b para diferentes tipos de salas de ensaio

Salas de Ensaio	Constante a	Constante b
Música acústica intensa, limite inferior	0,415	0,335
Música acústica intensa, limite superior	0,600	0,500
Música acústica suave, limite inferior	0,550	0,450
Música acústica suave, limite superior	0,750	0,650

Fonte: NBR ISO 23591 (ABNT, 2025)

A partir dos valores de T_{mid} é possível também estimar qual a variação recomendada pela norma para as outras frequências, utilizando os valores em porcentagem do Quadro 03.

Quadro 03- Variação em porcentagem dos limites máximos e mínimos em relação ao T_{mid} por frequência

f (Hz)	Pmin %	Pmáx
63	80	140
125	85	120
250	90	110
500	95	105
1000	95	105
2000	85	105
4000	75	105

Fonte: NBR ISO 23591 (ABNT, 2025)

3.3 TRABALHOS CORRELATOS

Para maior embasamento deste trabalho de conclusão de curso, foi realizada uma pesquisa bibliográfica em artigos científicos, com vistas a identificar principais questões, envolvendo a acústica de salas de ensaio musical, além de metodologias, abordagens e dificuldades enfrentadas no estudo desta área.

A pesquisa de Vergara, Marros, Paul (2016) teve como objetivo caracterizar acusticamente, através de medições sonoras, três salas de estudo individual e três salas de aula coletiva de ensino musical em uma universidade (Figura 36), bem como compreender a percepção subjetiva dos músicos que as utilizavam através de questionários. Intitulado “Caracterização da qualidade acústica de salas de aula para prática e ensino musical”, este estudo teve como um dos destaques a sua revisão bibliográfica no que diz respeito aos valores recomendados de tempo de reverberação por vários autores diferentes (Quadro 04).

Figura 36 - Duas das salas analisadas, de ensino à direita e de prática à esquerda



Fonte: Vergara, Marros, Paul (2016)

A pesquisa subjetiva buscou, através de questionários, entender quais as preferências dos músicos quanto às salas de ensino que eles utilizavam, quais as três melhores e as três piores, qual a formação musical e instrumentos utilizados. As medições acústicas aconteceram através da aferição da resposta impulsiva nas três melhores e três piores salas avaliadas pelos alunos, seguindo os processos definidos pela norma ISO 3382-1 (ISO, 2009)

Quadro 04 - TR médios para salas de prática e ensino musical

Referência	Prática/ensaio conjunto	Prática/ensaio individual	Ensino (teoria musical)	Frequência [Hz]
Lane e Mikeska (1955)	-	0,4 a 0,7 s	0,55 a 0,8 s	100
Karsai (1974)	-	0,8 s (105 m³) 0,4 s (105 m³)		125-500
Lamberty (1980)	-	0,5 a 0,9 s (33-154 m³)	-	500
Nagata (1989)	-	0,3 a 0,5 s (100 m³)	-	125-4.000
Cohen (1992)	0,3 a 0,5 s (30-40 m³)	-	-	125-4.000
Teuber e Vöelker (1993)	0,2 a 0,6 s (30-200 m³)	0,2 a 0,6 s (30-200 m³)	0,2 a 0,6 s (30-200 m³)	63-10.000
American National Standards Institute (2002)	< 0,6 s (38-150 m³)	< 0,6 s (14-30 m³)	< 0,6 s (120-210 m³)	500-2.000
Building Bulletin 93 (2002)	0,5 a 1,0 s (38-150 m³)	0,3 a 0,6 s (14-30 m³)	0,4 a 0,8 s (120-210 m³)	500-2.000
Building Bulletin 93 (2003)	0,6 a 1,2 s (38-150 m³)	< 0,8 s (14-30 m³)	< 1,0 s (120-210 m³)	500-2.000
Lokki e Salmensaari (2007)	0,7 s (246 m³)	0,5 a 0,6 s (10-120 m³)	0,5 a 0,6 s (10-120 m³)	1.000
Ryherd (2008)	0,8 a 1,0 s	-	0,4 a 0,5 s	-

Fonte: Vergara, Marros, Paul (2016)

Os resultados obtidos por Vergara, Marros, Paul (2016) mostraram que, em sua maioria, as salas com tratamento acústico tiveram os melhores resultados tanto das medições acústicas quanto dos questionários, além de que as salas preferidas foram associadas a reverberação equilibrada, enquanto as salas consideradas inadequadas apresentavam reverberação insuficiente ou excessiva. As medições acústicas corroboraram essas impressões: salas “secas” apresentaram tempos de reverberação muito baixos (cerca de 0,3 s entre 500 - 1.000 Hz), e as salas com reverberação excessiva tiveram valores mais elevados (aproximadamente 1,5 s).

A pesquisa de Santana *et al.* (2013) teve como objetivo estudar e propor modelo de sala de aula com um *design* acústico apropriado para o ensino de música em instituições escolares. O objeto de estudo analisado foi uma sala de aula comum que era utilizada para o ensino de música, mas que não possuía nenhum tipo de adaptação acústica para o seu uso.

Os parâmetros analisados foram o tempo de reverberação (T_{30}), o tempo de Decaimento Inicial (EDT) e a Clareza (C_{80}) e as medições seguiram as recomendações da norma Internacional ISO 3382-1 (ISO, 2009). Depois foi feita a

simulação computacional para comparar os valores medidos e simulados dentro do intervalo de JND (*just noticeable difference*), que estipula o limite mínimo e máximo de variação. Apenas os valores para T_{30} estiveram dentro do intervalo esperado, apesar de que os valores de EDT e C_{80} apresentaram a mesma tendência da curva esperada.

Foi feita por Santana *et al.* (2013) uma revisão bibliográfica em que foram compilados alguns parâmetros de referência considerados ideais segundo os autores revisados (Quadro 05). O destaque se dá aos valores de T_{30} que divergiram em relação a cada tipo de instrumento, o que fez com que os três grupos fossem utilizados para a análise, o que pode denotar a complexidade de se atingir valores ideais para grupos de instrumentos com características tão diferentes.

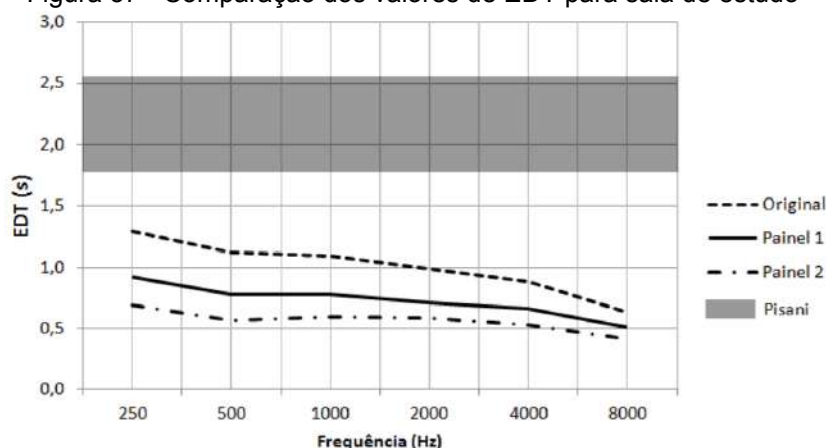
Quadro 05 - Valores de referência

Parâmetro	Autor	Instrumento	Referência
T30 - 1º grupo	Osaki e Schmid (2009)	Teoria musical	0,4 a 0,8 s
T30 - 2º grupo	Cohen (1992)/Ryherd (2008)/Geerds (1996)	Piano/Sopro/Percussão	0,8 a 0,9 s
T30 - 3º grupo	Boner e Coffen (2000)	Coral/Orquestra	0,9 a 1,5 s
EDT	Pisani (2001)	-	1,8 a 2,6 s
C80	Beranek (2004)	-	1 a 5 dB

Fonte: Santana *et al.* (2013)

Segundo Santana *et al.* (2013), as análises destacaram que o parâmetro EDT apresentou divergências significativas entre as simulações de auralização e os valores de referência. O comportamento da curva EDT foi proporcional à do T_{30} , evidenciando que a adição de materiais de absorção na sala afastou ainda mais os valores de referência estipulados por Pisani (Figura 37).

Figura 37 - Comparação dos valores de EDT para sala de estudo

Fonte: Santana *et al.* (2013)

Além disso, foi observado que os valores de EDT e T_{30} são próximos, mas com uma leve variação positiva dos valores de T_{30} e como as referências para o T_{30} ideal e EDT são diferentes, sugeriu-se que os valores de EDT recomendados não consideraram adequadamente o tipo de uso de pequenas salas e instrumentos que exigem suporte acústico específico, tornando esses valores inapropriados para tais contextos. Dessa forma, foi proposto um novo valor de EDT, a partir dos resultados da auralização (Quadro 06).

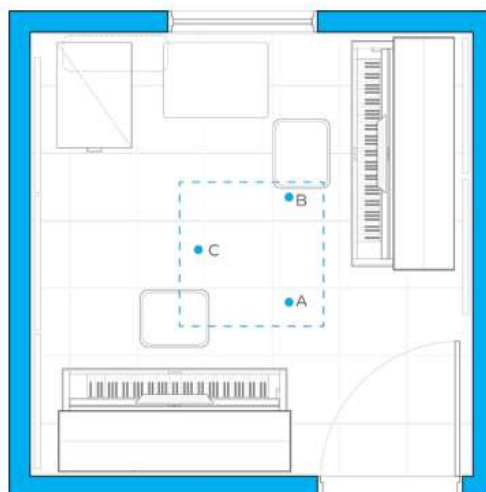
Quadro 06 - Novo valor de referência proposto por Santana *et al.*

Parâmetro	Autor	Instrumento	Referência
T30 - 1º grupo	Osaki e Schmid (2009)	Teoria musical	0,4 a 0,8 s
T30 - 2º grupo	Cohen (1992)/Ryherd (2008)/Geerds (1996)	Piano/Sopro/Percussão	0,8 a 0,9 s
T30 - 3º grupo	Boner e Coffen (2000)	Coral/Orquestra	0,9 a 1,5 s
EDT	Santana <i>et al.</i> (2013)	-	0,57 a 1,20 s
C80	Beranek (1996)	-	1 a 5 dB

Fonte: Santana *et al.* (2013)

A pesquisa de Lima e Lima (2023) analisou acusticamente uma sala de estudo do núcleo de piano da Escola de Música de Brasília (Figura 38) com 24,53 m³. Este estudo teve como objetivo avaliar os parâmetros de nível de pressão sonora e o tempo de reverberação, além de propor estratégias de controle de ruído e de tempo de reverberação aplicáveis ao ambiente analisado.

Figura 38 - Planta da sala D-02, com pontos de medição de NPS



Fonte: Lima, Lima (2023)

O método utilizado para as medições seguiu as recomendações da norma NBR 10152 (ABNT, 2017), onde, segundo Lima e Lima (2023), foram verificadas as fontes sonoras mais relevantes que determinaram os três cenários de medição: 1. Apenas ruído de fundo (ou residual); 2. Com o aparelho de ar-condicionado ligado; 3. Com o piano sendo tocado na sala diretamente adjacente e o ar-condicionado desligado.

De acordo com os resultados adquiridos por Lima e Lima (2023), a sala cumpre os requisitos estabelecidos pela norma NBR 10152 (ABNT, 2017) e segue as recomendações presentes na literatura para todos os três cenários analisados (Quadro 07). Porém, verificou-se que, nas situações 2 e 3, os níveis de L_{Aeq} ultrapassam o ruído de fundo (ou residual) (cenário 1) em 8 dB e 11 dB, respectivamente.

Além disso, o ar-condicionado gera um ruído relevante nas frequências mais graves. Na situação 3, praticamente todas as frequências fundamentais do piano são transmitidas. Apesar de estar em conformidade com a norma NBR 10152 (ABNT, 2017), segundo Lima, Lima (2023) o ruído intrusivo representa uma relevante fonte de desconforto para os usuários devido à sua elevada intensidade e à semelhança com os sons produzidos dentro do próprio ambiente.

Quadro 07 - Resultados das medições para as três situações analisadas.

Parâmetro	Situação 1	Situação 2	Situação 3	Valores de Referência ABNT 10152 (2017)
L_{Aeq} (dB)	17,9	26,3	29,2	35
L_{ASmax} (dB)	18,4	28,1	33,9	40
L_{NC}	20	25	30	30

Fonte: Lima e Lima (2023)

Lima e Lima (2023) apresentam também uma análise do isolamento acústico da sala, considerando não apenas o atendimento às normas, mas também o conforto real dos usuários. Embora os níveis de ruído estejam dentro dos limites estabelecidos pela NBR 10152 (ABNT, 2017), constatou-se que fontes externas, como o ar-condicionado e a transmissão sonora entre salas, comprometem a qualidade acústica.

Foram identificados quatro principais caminhos de transmissão sonora: paredes, portas e janelas, forro e piso. Para cada um deles foram propostas soluções de melhoria, desde o reforço da massa e vedação das divisórias até a substituição de portas e janelas por modelos adequados, adoção de forros e lajes mais isolantes e, em último caso, intervenções no piso. O estudo destaca a necessidade de estratégias integradas de isolamento para reduzir o ruído intrusivo e garantir um ambiente de prática musical mais adequado.

A pesquisa de Bueno e Lopes (2021) teve como objetivo avaliar a qualidade acústica de salas destinadas ao ensino coletivo de instrumentos musicais, destacando a utilização do *software* I-Simpa como ferramenta de simulação computacional. O estudo partiu da constatação de que salas de aula muitas vezes não apresentam as condições acústicas necessárias para o aprendizado musical, o que pode comprometer tanto a percepção sonora dos alunos quanto a saúde auditiva dos professores.

Foram elaborados dois modelos virtuais de salas de aula com dimensões distintas, nos quais se inseriram fontes sonoras que representavam os alunos tocando instrumentos. As simulações realizadas no I-Simpa possibilitaram o cálculo do tempo de reverberação, da intensidade sonora durante as aulas e do equilíbrio sonoro entre os estudantes. Os resultados iniciais demonstraram que salas menores e sem tratamento acústico apresentaram níveis excessivos de reverberação e intensidade sonora acima dos limites recomendados.

Os resultados obtidos por Bueno e Lopes (2021) mostraram que, antes das intervenções, os tempos de reverberação simulados no I-Simpa estavam significativamente acima do ideal para o ensino coletivo de música, alcançando valores de 2,09 s na sala menor e 3,49 s na sala maior. Após a aplicação de diferentes tratamentos acústicos, verificou-se uma redução expressiva desses valores. Na sala menor, a inserção de Espuma acústica Sonique 20 mm Classic reduziu o tempo de reverberação para 0,97 s. Já na sala maior, os tempos de reverberação passaram para 1,94 s com a utilização da mesma espuma acústica.

No que se refere à exposição sonora, as simulações realizadas por Bueno e Lopes (2021) demonstraram que, nas salas sem tratamento, os níveis de intensidade ultrapassaram os limites seguros recomendados, restringindo o tempo máximo de permanência do professor a apenas 2 horas diárias na sala menor e 3 horas na sala maior. Com a aplicação de tratamentos acústicos, esses valores de tempo de permanência na sala foram ampliados de forma significativa: o uso de Espuma acústica Sonique 20 mm Classic elevou a exposição tolerada para cerca de 3 a 4 horas, enquanto o forro possibilitou até 4 horas e 30 minutos, e a combinação de ambos permitiu alcançar até 6 horas diárias.

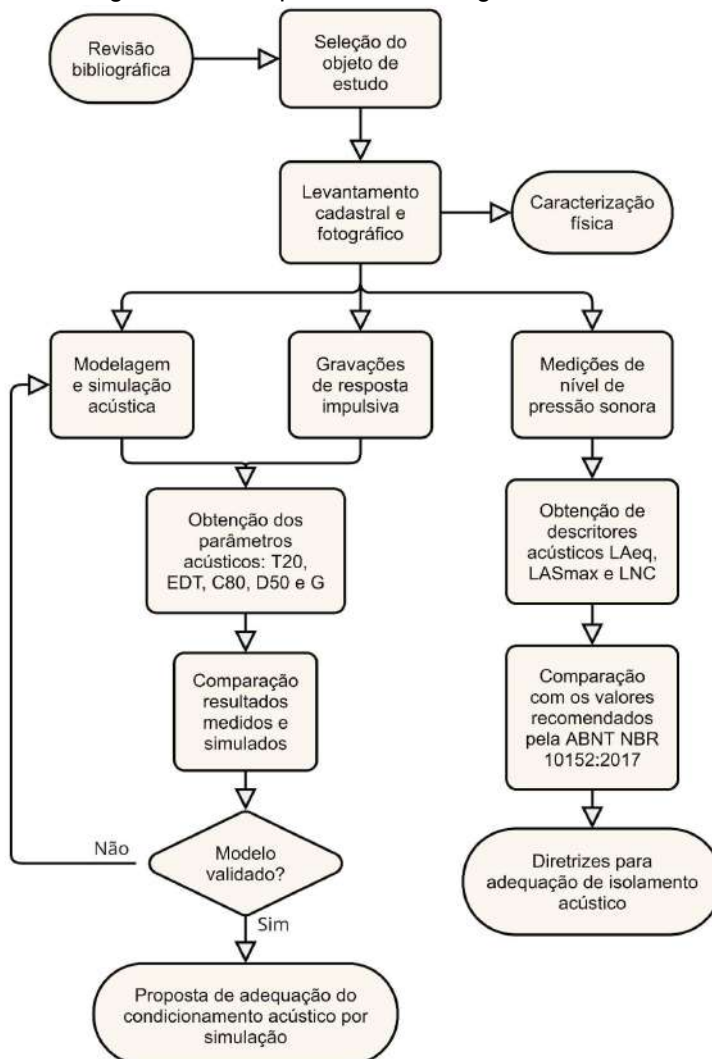
Em uma segunda etapa, o I-Simpa foi utilizado para simular salas mais amplas, com maior volume por aluno. Nessa condição, observou-se que ambientes com pelo menos 26 m³ por estudante foram capazes de reduzir significativamente a intensidade sonora, mantendo-a próxima ao limite de 85 dB(A) estabelecido como seguro, ao mesmo tempo em que preservaram valores adequados de tempo de reverberação.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho foi sintetizada no fluxograma mostrado pela Figura 39, em que a etapa inicial foi uma revisão bibliográfica em anais de congressos nacionais e revistas científicas, com o objetivo de verificar o estado da arte no que se refere à literatura especializada em acústica de salas de ensaio musical, ou seja, possibilitado o levantamento e a análise crítica do conhecimento já produzido sobre o tema, além de metodologias adotadas e avanços recentes na área.

Depois foi feita a seleção do objeto de estudo (duas salas de ensaio musical), a partir do tema e sua relevância, como foi explicado no Capítulo 1 - Introdução. Com a realização de visitas técnicas foi feito um levantamento arquitetônico e fotográfico das salas de ensaio, a fim de fazer a caracterização física da geometria e dos materiais constituintes dos dois espaços selecionados como objeto de estudo.

Figura 39 - Fluxograma das etapas da metodologia utilizada neste trabalho



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em seguida foram feitas medições de nível de pressão sonora, seguindo indicações da norma NBR 10152 (ABNT, 2017). Para tanto, foi usado um sonômetro posicionado em vários pontos marcados em cada sala, o que permitiu analisar não só o nível do ruído residual presente na sala, como também caracterizar o isolamento de cada uma. Os parâmetros aferidos foram: Nível de pressão sonora contínua equivalente ponderada em A - L_{Aeq} , Nível máximo de pressão sonora ponderada em A e ponderado em S - L_{ASmax} e do nível NC representativo de um ambiente. Esses resultados foram sintetizados em um quadro, contribuindo para definição de diretrizes para adequação do isolamento acústico.

As gravações de resposta impulsiva foram desenvolvidas, seguindo as indicações da norma NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017), aplicando o método de precisão. O procedimento considerou a realização de estouros de bexigas (bolas de assopro) de látex, que foram gravados por um microfone específico em diferentes posições em cada sala de ensaio. Essas gravações foram posteriormente processadas em um *software* para obtenção dos parâmetros acústicos de T_{20} , EDT, C_{80} , D_{50} e G.

Esses mesmos parâmetros foram analisados a partir da modelagem 3D de cada sala de ensaio através do *software SketchUp* (versão de teste) que foi inserida no *software* I-Simpa, onde foi realizada a simulação acústica. Com os dados da simulação e das gravações foi possível fazer testes e comparações para que os valores dos parâmetros dos resultados medidos e simulados fossem próximos o bastante para que o modelo fosse validado.

Dessa forma, foi possível comparar os valores dos parâmetros de T_{20} , EDT, C_{80} , D_{50} e G com os valores indicados na bibliografia e criar uma proposta de adequação acústica por meio da simulação.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS SALAS AVALIADAS

A partir de visitas ao local de estudo, realizou-se o levantamento das dimensões das salas, registros fotográficos e caracterização dos materiais que compõem a arquitetura e o mobiliário. A Sala de ensaio 01 (Figura 40) possui 93,73 m² de área e 298,30 m³ de volume, tem piso laminado de madeira, paredes de blocos cerâmicos rebocados e pintados, revestidos de carpete até a altura de 1,74 m, exceto quando localizado abaixo das janelas. A sala também é usada para guardar instrumentos musicais e seu *layout* não possui forma definida, pois ela se

adapta ao tipo de ensaio que vai ocorrer no local. O mobiliário é composto por cadeiras de plástico e estrutura tubular de aço, estantes de partitura, um piano de cauda e um armário de madeira envernizada. Possui quatro aparelhos de ar-condicionado.

Figura 40 - Sala de ensaio 01



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

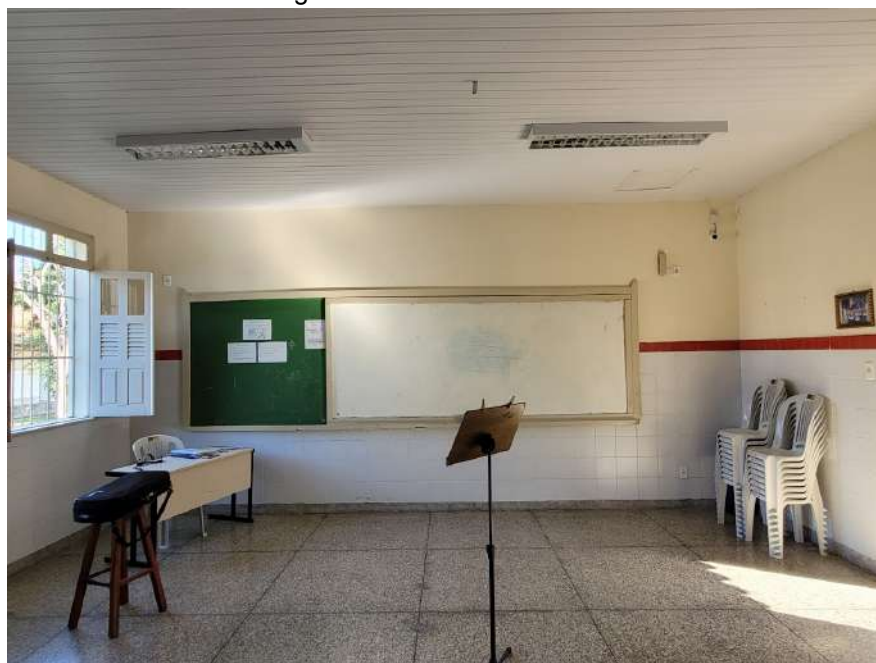
O teto possui forro de gesso, com dois agrupamentos de painéis difusores, sem laje. As duas portas são de madeira maciça e possuem aproximadamente 1 m de largura e 3 cm de espessura. As janelas são do tipo basculante com painéis de vidro e caixilhos de madeira pintada e, durante o uso da sala, todas ficam cobertas por cortinas de tecido pesado (Figura 41).

Figura 41 - Porta e Janelas da Sala de ensaio 01



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 43 - Sala de ensaio 02



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A Sala de ensaio 02 possui uma porta de madeira maciça de 0,87 m e três janelas de madeira pintada do tipo de giro simples com, aproximadamente, 1,10 m de largura (Figura 44).

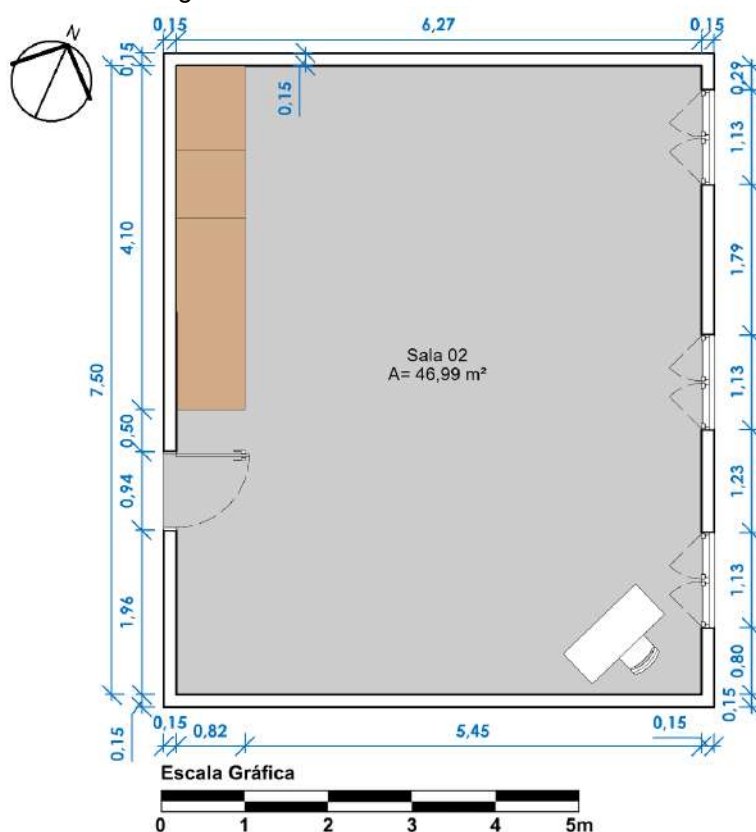
Figura 44 - Janela e Porta da Sala de ensaio 02



Fonte: Elaborado pelo autor

Após o levantamento arquitetônico, foi feita a planta baixa da Sala de ensaio 02, sendo representada na Figura 45.

Figura 45 - Planta baixa Sala de ensaio 02



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Com a caracterização física das duas Salas de ensaio realizada foi dada continuidade às outras etapas da metodologia deste trabalho.

4.2 ETAPAS DA ANÁLISE ACÚSTICA

As próximas subseções apresentam um aprofundamento das etapas da análise acústica, detalhando os métodos e materiais utilizados para as medições de nível de pressão sonora, gravações de resposta impulsiva e simulações acústicas.

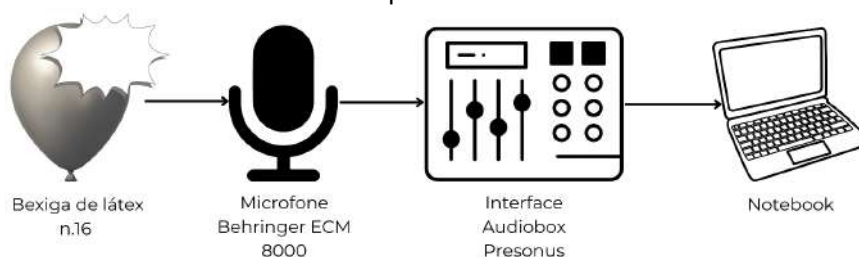
4.2.1 Medições acústicas

A partir das orientações da norma NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017), foram realizadas as gravações de resposta impulsiva, definindo-se os pontos de gravação em cada sala, com base nas recomendações do método de precisão.

A Figura 46 organiza os materiais e equipamentos utilizados para as gravações de resposta impulsiva, onde primeiramente foi utilizada uma fonte sonora impulsiva criada por meio do estouro de uma bexiga (bola de assopro) de látex de nº16 (seu tamanho foi padronizado, utilizando um molde com circunferência de 45 cm de diâmetro)¹ (Figura 47).

¹ Este molde foi confeccionado e gentilmente cedido pela discente Aline de Oliveira Barbosa, do Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Ambientais (PPGECIA/UFS).

Figura 46 - Fluxograma dos materiais e equipamentos utilizados para as gravações de resposta impulsiva



Fonte: Elaborado pelo autor

O som foi captado por um microfone condensador behringer ECM 8000 que foi posicionado em um tripé e conectado a uma Interface de audio Audiobox Presonus para conversão do sinal sonoro analógico em sinal digital a ser recebido por um notebook e gravado no *software* Audacity 2.3.2 (<https://www.audacityteam.org/>).

Figura 47 - Bexiga de látex nº 16 e molde de 45 cm de diâmetro



Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, as respostas de áudio gravadas passaram por análise no programa *Room EQ Wizard Software* - REW versão 5.31.3 (<https://www.roomeqwizard.com>), onde foram obtidos o valor de tempo de reverberação (T_{20}), clareza (C_{80}), tempo de decaimento inicial (EDT), definição (D_{50}) e força sonora (G).

Esses dados foram utilizados para validar o modelo computacional no ambiente do *software* I-Simpa, para realização de simulações acústicas com o objetivo de propor ajustes e melhorias para as deficiências identificadas no condicionamento acústico das salas analisadas.

Para as medições do nível de pressão sonora equivalente ponderado em A – L_{Aeq} foi consultada a norma NBR 10152 (ABNT, 2017). As medições foram executadas, usando um sonômetro da marca Larson Davis, classe 1, modelo:

SoundTrack LXT, seguindo as recomendações normativas de ajustes sonoros com uso do calibrador acústico da marca Larson Davis, classe 1, modelo: Cal 200. Durante essas campanhas de medição acústica, foi realizado monitoramento de temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do ar, usando um termo-higro-anemômetro, modelo: HT-625B (Figura 53).

Para as medições internas de níveis de pressão sonora (NPS), os pontos foram distribuídos uniformemente nas salas de ensaio, obedecendo a recomendação normativa de haver pelo menos três pontos de medição quando a sala tiver até 30 m², sendo um ponto a cada 30 m² adicionais. O método utilizado foi o detalhado, com base na análise dos níveis de pressão sonora global e espectrais nas bandas de 1/1 de oitava e com tempo de medição de um minuto em cada registro por ponto. Os resultados dos descritores acústicos adotados L_{Aeq} , L_{ASmax} e L_{NC}) foram obtidos pela média logarítmica dos níveis de pressão sonora, a partir de três registros realizados por ponto nas mesmas condições.

Para a caracterização do isolamento nas salas foram utilizados os parâmetros presentes na norma NBR 10152 (ABNT, 2017), onde foi feita a comparação dos valores medidos de nível de pressão sonora internamente e a sua relação com a influência sonora externa à sala.

Para as gravações das respostas impulsivas, foram feitas as marcações dos pontos na Sala de ensaio 01 (Figura 48) e na Sala de ensaio 02 (Figura 49), seguindo as indicações da norma NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017). Para a Sala de ensaio 01, foram escolhidas duas posições de fonte sonora, localizadas nos cantos da sala para que elas possam excitar um maior número de modos, conforme indicação da norma NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017), uma vez que por conta do *layout* versátil, a sala não possui um ponto específico para produção sonora no seu uso do dia-a-dia.

Os pontos de fonte sonora foram estabelecidos a uma altura de 1,50 m de distância do chão, 1,00 m de distância de qualquer superfície refletora e, com base na Equação 20, extraída pela NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017), a pelo menos 1,07 m de distância dos pontos de microfones.

$$d = 2\sqrt{\frac{V}{cT}} \quad (\text{Equação 20})$$

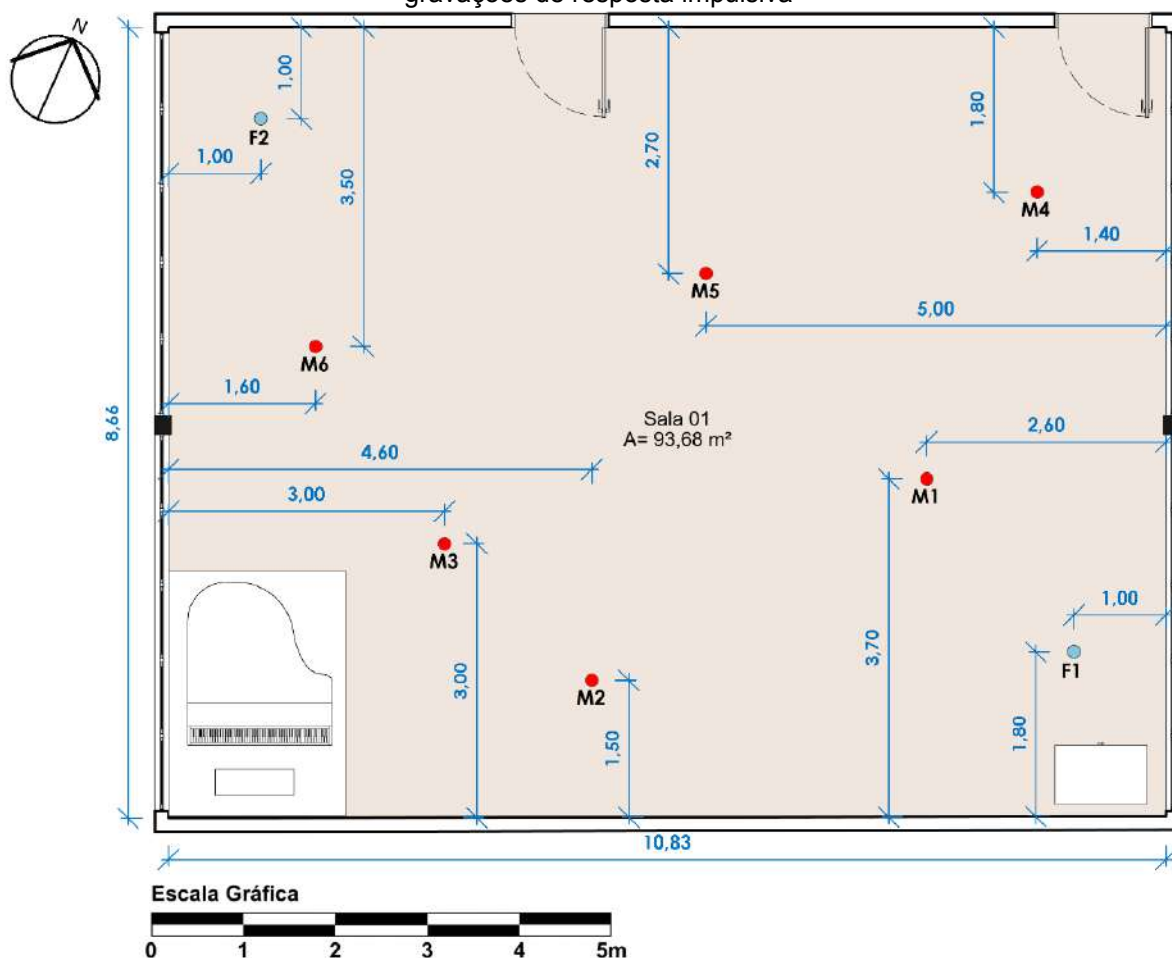
onde:

- V é o volume, em metros cúbicos.

- c é a velocidade do som, em metros por segundo;
- T é uma estimativa do tempo de reverberação esperado, em segundos.

Os microfones foram distribuídos de forma a evitar alinhamentos e simetrias entre si e suas posições seguiram as determinações de estarem a 1,00 m de distância de qualquer superfície refletora, a 2,00 m de distância de outros microfones e a 1,20 m de altura do chão, para alinhamento com a altura de uma pessoa sentada. A quantidade de microfones usada foi definida pelo método detalhado da norma NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017), que determina que devem existir pelo menos 12 combinações independentes de fonte-microfone, o que levou a uma combinação de 2 posições de fontes sonoras (F1 e F2) e 6 posições de microfones (M1, M2, M3, M4, M5, e M6) espalhados pela sala (Figura 48).

Figura 48 - Posicionamento dos pontos de microfones e fontes sonoras na Sala de ensaio 01 para as gravações de resposta impulsiva

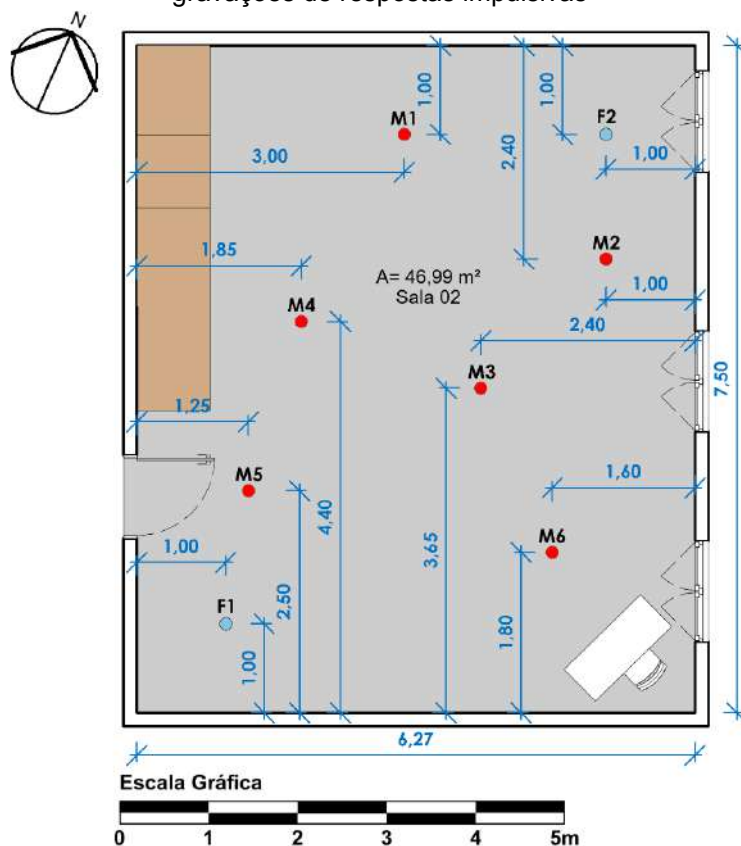


Fonte: Elaborado pelo autor

Para as gravações de resposta impulsiva da Sala de ensaio 02, os pontos de microfone e fontes sonoras (Figura 49) foram determinados seguindo, em sua maioria, os mesmos critérios de posicionamento de fontes e microfones da Sala de

ensaio 01, com a diferença de que a distância mínima entre microfone e fonte sonora dada pela Equação 20 foi de 1,34 m.

Figura 49 - Posicionamento dos pontos de microfones e fontes sonoras na Sala de ensaio 02 para as gravações de respostas impulsivas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Para a marcação dos pontos para medição de nível de pressão sonora da Sala de ensaio 01 foram utilizadas as recomendações da norma NBR 10152 (ABNT, 2017), onde é definido que os pontos devem estar pelo menos a 0,70 m distantes entre si e 1,00 m de superfícies refletoras como pisos, móveis, paredes e de elementos que possuam considerável transmissão sonora, como portas e janelas (Figura 50).

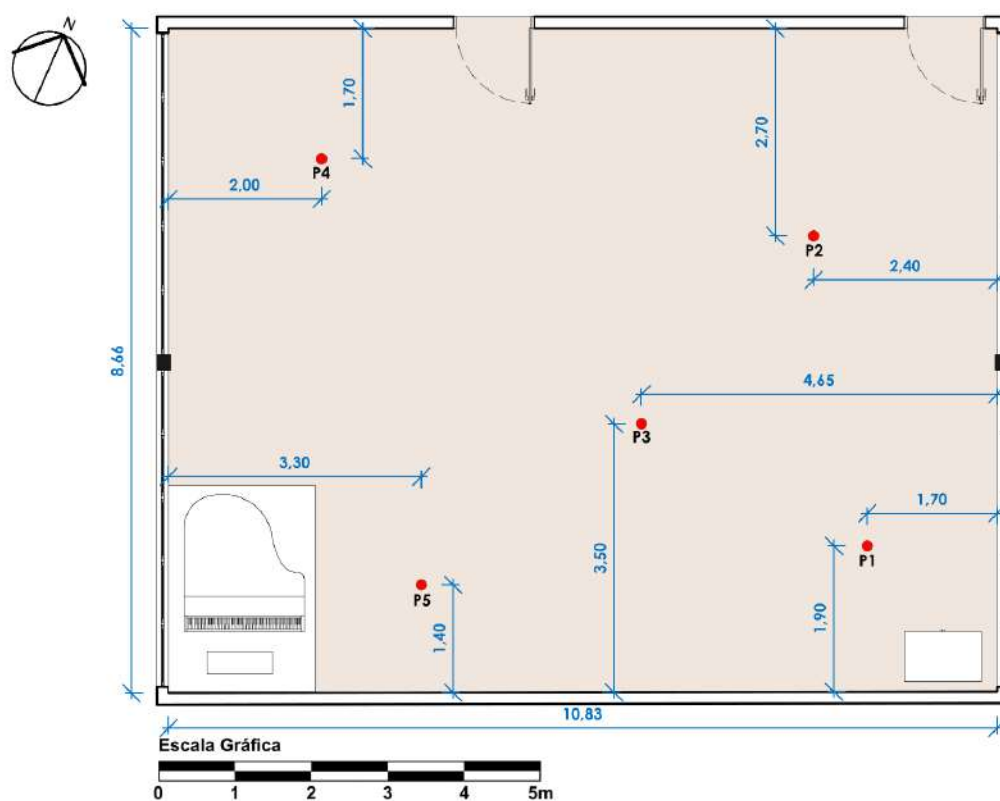
Além disso, a norma também define que a quantidade mínima de pontos de medição para salas de até 30 m^2 deve ser de três pontos, podendo aumentar um ponto para cada 30 m^2 adicionais da sala, conforme já mencionado. Dessa forma, por seu tamanho, foram demarcados cinco pontos na Sala de ensaio 01 (P1, P2, P3, P4 e P5) (Figura 51).

Figura 50 - Exemplo de posicionamento do sonômetro (Ponto 3 - Sala de ensaio 02)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 51 - Posicionamento dos pontos do sonômetro na Sala de ensaio 01 para as medições do nível de pressão sonora

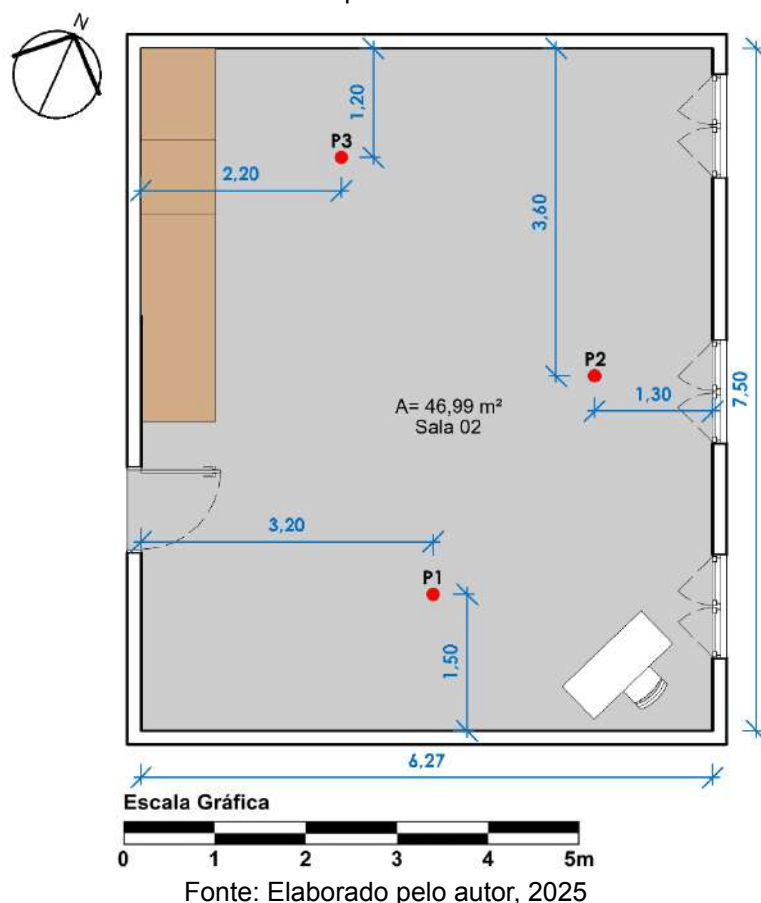


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Para a Sala de ensaio 02 foram usados quase todos os mesmos parâmetros de demarcação da Sala de ensaio 01, sendo a única diferença a quantidade de

pontos menor por conta da área também menor da sala. Assim, foram demarcados três pontos diferentes, sendo eles P1, P2 e P3 (Figura 52).

Figura 52 - Posicionamento dos pontos do sonômetro na Sala de ensaio 02 para as medições do nível de pressão sonora



As medições do nível de pressão sonora foram realizadas em dois dias diferentes para cada sala. A primeira aconteceu no dia 01/08/2025 (terça-feira) na Sala de ensaio 02 às 15h30, horário de uso rotineiro para as aulas e ensaios e também para as atividades do Colégio Estadual Murilo Braga. Esse horário foi escolhido a fim de melhor representar o uso real da sala, averiguando as qualidades e os possíveis problemas que pudessem ser verificados.

Para aferir as condições ambientais, foi utilizado um Termo-Higro-Anemômetro digital de modelo HT-625B (Figura 53), onde para cada mudança de ponto foi feita uma medição da temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do ar e depois foram calculadas as médias de cada parâmetro, sendo, 88% de umidade relativa do ar, temperatura de 26 °C e velocidade do ar de 0 m/s. A Sala de ensaio 02 possui ventilador, mas ele não foi ligado em nenhum momento das medições de NPS e da resposta impulsiva.

Figura 53 - HT-625B Termo-Higro-Anemômetro



Fonte: Elaborado pelo Autor

Por conta do entorno e horário, algumas perturbações ocorreram durante as medições, por exemplo: evento esportivo ocorrendo em ginásio próximo à sala, carros passando nas ruas adjacentes, aulas e ensaios musicais de trompete e de bateria em salas próximas. Além disso, houve influência do próprio movimento e atividades dos alunos do colégio, que apesar de não terem acesso livre à ala onde os ensaios ocorrem, o seu grande número foi suficiente para ser notado.

As medições ocorreram com a presença de três pessoas que estavam realizando o experimento e com todas as janelas e porta fechadas. Foram realizados três registros de NPS para cada um dos três pontos, com duração de um minuto cada.

As gravações de resposta impulsiva foram feitas logo em seguida, nas mesmas condições ambientais. Enquanto estavam sendo realizadas uma aula de violão em grupo em um corredor próximo e com o som de pessoas falando do lado de fora da sala.

As medições de NPS da Sala de ensaio 01 aconteceram no dia 11/08/2025 às 15h25 com quatro pessoas presentes na sala e em condições de uso parecidas com as registradas na Sala de ensaio 02 anteriormente, com uma aula de violino e de saxofone ocorrendo em salas próximas. Por estar mais recuada na ala onde se encontra e por não estarem acontecendo atividades no ginásio ao lado, não foram percebidos esses tipos de sons dos alunos do colégio durante o experimento. Porém, a Sala de ensaio 01 fica próxima da rua e portanto alguns carros e motos que passavam podiam ser ouvidos com maior intensidade.

As condições ambientais durante as medições de NPS na Sala de ensaio 01 foram caracterizadas por uma temperatura média de 25,65 °C, umidade relativa do ar média de 57,4% e velocidade do ar média de 0 m/s, com dois aparelhos de ar-condicionado ligados.

As gravações de resposta impulsiva foram feitas e logo após as medições de NPS sob as condições ambientais médias de 23,75 °C de temperatura do ar, umidade relativa do ar de 60,8% e velocidade do ar de 0 m/s, com nenhum aparelho de ar-condicionado ligado.

4.2.2 Simulações acústicas

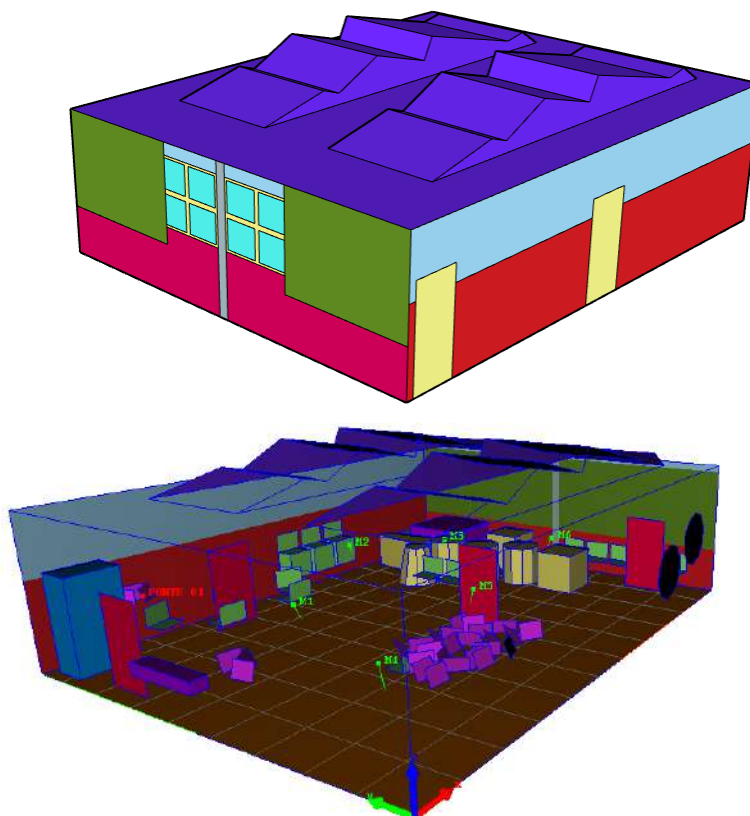
Com as informações obtidas no levantamento arquitetônico, foi feita a modelagem 3D das Salas de ensaio 01 (Figura 54) e 02 (Figura 55) no *software* SketchUp (versão de teste), seguindo as premissas de simplificação da geometria comentadas no Subcapítulo 2.2.2 (Acústica geométrica).

Cada cor mostrada nas Figuras 54 e 55 representa um material diferente, onde ao exportar o modelo para o *software* I-Simpa, elas serviram de referência para diferenciar cada material, e recebendo as informações de coeficiente de absorção e de espalhamento por frequência, que foram organizados em quadros no Apêndice A. Além disso, as salas foram organizadas com um *layout* compatível com a organização encontrada no dia das gravações das respostas impulsivas.

Os pontos de fonte sonora e de microfones foram colocados nas mesmas posições que serão usadas nas gravações das respostas impulsivas, para que dessa forma as duas situações possam ser comparadas e a simulação possa ser validada e alinhada pelos resultados reais observados nas salas de ensaio.

Em razão dos 12 pares independentes de fonte e microfone das gravações das respostas impulsivas e da consideração de duas fontes sonoras, foram feitas duas simulações para cada sala onde a ativação das fontes foi alternada em cada simulação. Por conseguinte, para os resultados obtidos em cada ponto foi feita média aritmética dos valores dos parâmetros em escala linear (T_{20} e D_{50}), e média logarítmica, quando os parâmetros medidos estavam em dB, como o C_{80} e G, por exemplo.

Figura 54 - Modelagem 3D da Sala de ensaio 01 no SketchUp (acima) e no I-Simpa (abaixo)

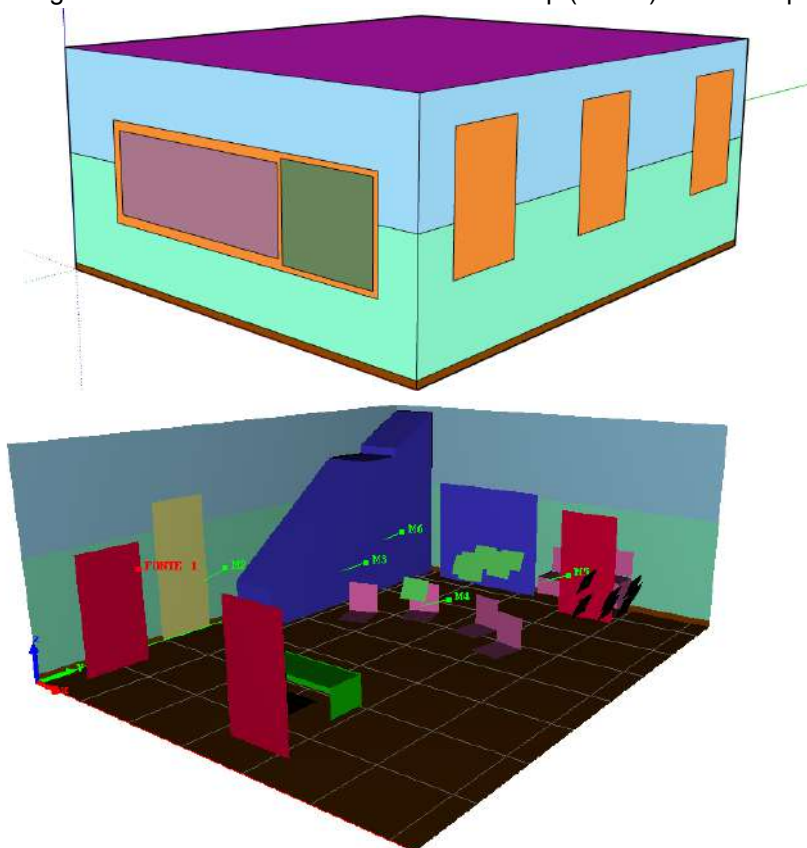


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

O algoritmo utilizado pelo I-Simpa é o SPPS, em francês: "*Simulation de la Propagation de Particules Sonores*", em tradução livre, "Simulação da propagação de partículas sonoras". Ele funciona acompanhando o movimento de partículas sonoras, cada uma contendo uma quantidade de energia ε , emitidas por uma fonte sonora dentro de um espaço tridimensional. Essas partículas se deslocam em trajetórias retilíneas entre dois instantes de tempo Δt até que encontrem um obstáculo. Ao colidir com um objeto, as partículas podem sofrer absorção, reflexão, espalhamento, difusão ou transmissão, dependendo das características físicas do material atingido (I-Simpa User Guide, 2022).

Para as duas salas foram utilizados os mesmos valores de temperatura e umidade relativa do ar, aferidos em cada dia de coleta de dados (gravação de respostas impulsivas), pressão atmosférica de 101.325 Pa, raio de recepção de 0,31 m para os microfones e número de partículas por fonte sonora de 1.000.000, conforme indicado pelo guia do usuário do I-Simpa (I-Simpa User Guide, 2022).

Figura 55 - Modelagem 3D da Sala de ensaio 02 no SketchUp (acima) e no I-Simpa (abaixo)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Para as simulações foi utilizado o método energético, onde o algoritmo utilizado pelo I-Simpa considera que cada partícula mantém sua energia constante enquanto se desloca pela sala e quando encontra uma superfície perde energia de acordo com a absorção sonora do material. Isso ocorre até que essa partícula seja totalmente absorvida e com isso, ao longo do tempo, a quantidade de partículas sonoras presentes no sistema vai diminuindo (I-Simpa User Guide, 2022).

Além do método SPPS, para comparação e norteamto dos resultados da simulação foram também utilizadas, por meio do próprio I-Simpa, as equações da acústica estatística de Sabine (Equação 11) e Eyring (Equação 13) para cálculo do tempo de reverberação. A escolha entre um ou outro se deu pelo resultado do coeficiente médio de absorção das superfícies presentes em cada sala, em que quando os valores eram maiores que 0,2 foi utilizada a equação de Eyring e quando não, foi utilizada a equação dada por Sabine.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os primeiros resultados apresentados a seguir foram os das medições de nível de pressão sonora para cada sala de ensaio, assim como as curvas de NC. Em seguida será apresentada a análise modal através dos critérios de Bonello e do diagrama de Bolt.

Posteriormente serão apresentados os resultados das gravações das respostas impulsivas e das simulações que nortearam a proposta de adequação de condicionamento acústico na sequência. Por fim, serão apresentadas as indicações de adequação do isolamento acústico das salas de ensaio musical avaliadas.

Os resultados das medições de NPS da Sala de ensaio 01 foram condensados no Quadro 08, sendo possível observar que a média de L_{Aeq} foi de 51,5 dB está acima do limite máximo de 35 dB, recomendado pela NBR 10152 (ABNT, 2017) para salas de música. Como relatado no capítulo anterior, parte da explicação desse valor medido pode ser atribuída aos aparelhos de ar-condicionado, bem como, dos problemas de isolamento acústico.

Quadro 08 - Valores de L_{Aeq} e L_{ASmax} por ponto de medição para a Sala de ensaio 01, em vermelho os resultados que ultrapassaram os valores recomendados pela NBR 10152 (ABNT, 2017)

Código Medição	Ponto	LAeq (dB)	LASmax (dB)
167	1	51,9	55,1
168		51,7	58,6
169		54,3	59,5
170	2	50,8	53,7
172		51,7	55,6
173		52,2	57,3
174	3	50	55,2
175		49,3	54,7
176		46,7	47,3
177	4	48,5	55,2
178		47,6	51,5
179		52	58,9
180	5	57,1	61,6
181		56,3	62,7
182		52,5	58,2
Média:		51,51	56,34

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados da Sala de ensaio 02 também apresentaram inconformidade com a NBR 10152 (ABNT, 2017), onde mesmo com a ausência de aparelhos produtores de ruído (os ventiladores estavam desligados o momento das medições acústicas), os resultados estavam acima do que recomendado, com L_{Aeq} de 47,9 dB.

Os Quadros 08 e 09 mostram também que os valores de L_{ASmax} da Sala de ensaio 01 e 02 (respectivamente), estão acima do que seria recomendado pela NBR 10152 (ABNT, 2017), apresentando médias de 56,3 dB e 53,8 dB, respectivamente, quando o máximo estipulado pela norma para salas de música é de 40 dB. Esse resultado mostra que foram medidos picos de pressão sonora, provavelmente derivados dos instrumentos musicais de salas vizinhas.

Quadro 09 - Valores de L_{Aeq} e L_{ASmax} para a Sala de ensaio 02, em vermelho os resultados que ultrapassaram os valores recomendados pela NBR 10152 (ABNT, 2017)

Código Medição	Ponto	L_{Aeq} (dB)	L_{ASmax} (dB)
156	1	49,5	59,2
157		49,2	53,4
158		50,6	56,4
159	2	46,8	52,3
160		48,4	52,2
161		45,8	49,6
162	3	45,6	52,8
163		49,1	57,3
164		46,4	51,0
Total:		47,9	53,8

Fonte: Elaborado pelo Autor

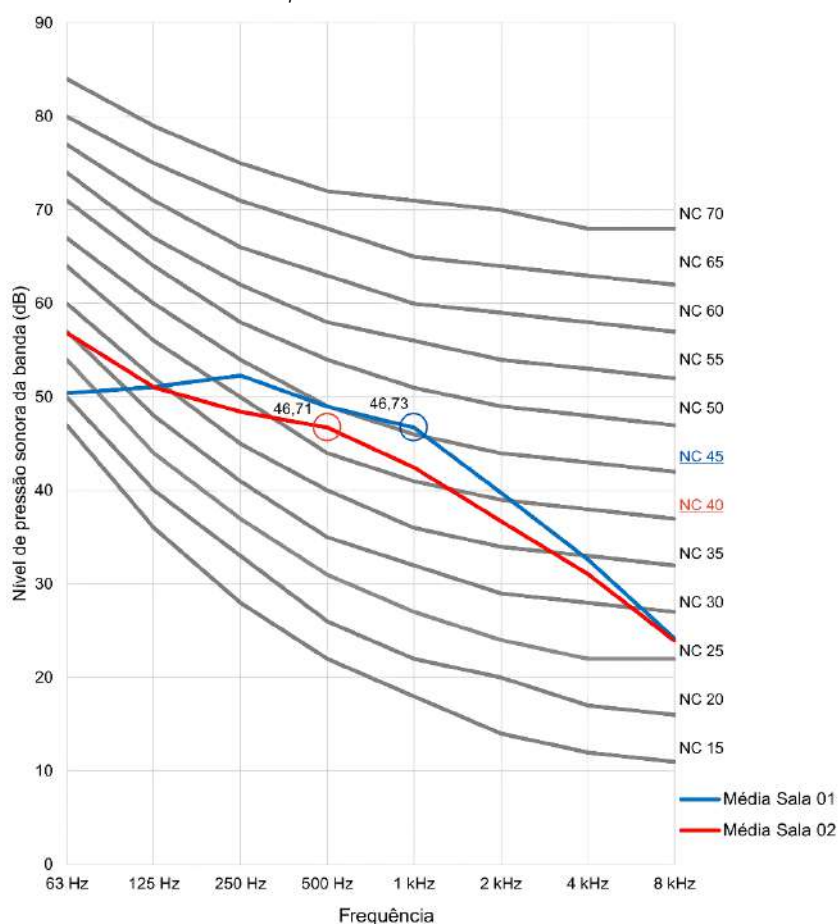
Outra análise que reforça o cenário retratado pode ser observada ao analisar as curvas NC para a Sala de ensaio 01 (Figura 56) com NC 46,7 dB na frequência de 1000 Hz, estando assim na faixa de LNC (valor representativo de NC) de 45 NC, quando a faixa recomendada pela NBR 10152 (ABNT, 2017) é a de 30 dB.

Para fins de comparação, segundo a mesma norma, a faixa de 45 NC é representada, por exemplo, por circulações de ambientes escolares e de escritórios, o que contrasta com o uso atual da sala de ensaio.

A Sala de ensaio 02 possui resultados similares, com o maior pico nas curvas NC em 46,7 dB em 500 Hz (Figura 56), caracterizando assim a faixa de 40 NC, atribuída pela NBR 10152 (ABNT, 2017) a restaurantes e escritórios coletivos, por exemplo.

As análises quantitativa e qualitativa desses resultados podem indicar a necessidade de melhoria no que diz respeito ao isolamento acústico para ambas as salas, tendo em vista que o excesso do nível de ruído pode atrapalhar diretamente a plena execução das atividades das salas de ensaio e, para tanto, algumas soluções projetuais preliminares serão exemplificadas ainda neste capítulo, após apresentação dos demais resultados.

Figura 56 - Curvas NC e L_{Aeq} médio por frequência nas Salas de ensaio 01 e 02



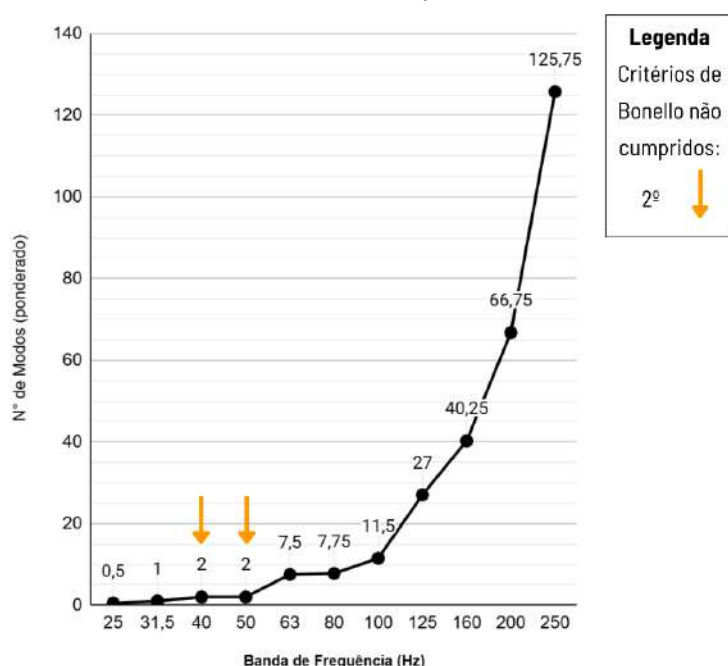
Fonte: Elaborado pelo Autor

No que se refere à avaliação do condicionamento acústico, para a análise modal foi feita a contagem de modos acústicos por meio de uma planilha que se baseia na equação 09, sendo foi possível elaborar gráfico de número de modos por

banda de cada uma das salas. Os cálculos foram realizados com condicionantes ambientais de temperatura de 23 °C e velocidade do som no ar de 345,1 m/s.

Para a Sala de ensaio 01, os critérios de Bonello foram utilizados para o estudo do gráfico (Figura 57), onde o primeiro critério foi atendido, tendo em vista que o número de modos aumenta monotonicamente. Quanto ao segundo critério, foram observadas algumas sobreposições de modos de quantidade inferior a 5, como nas bandas de 40 e 50 Hz.

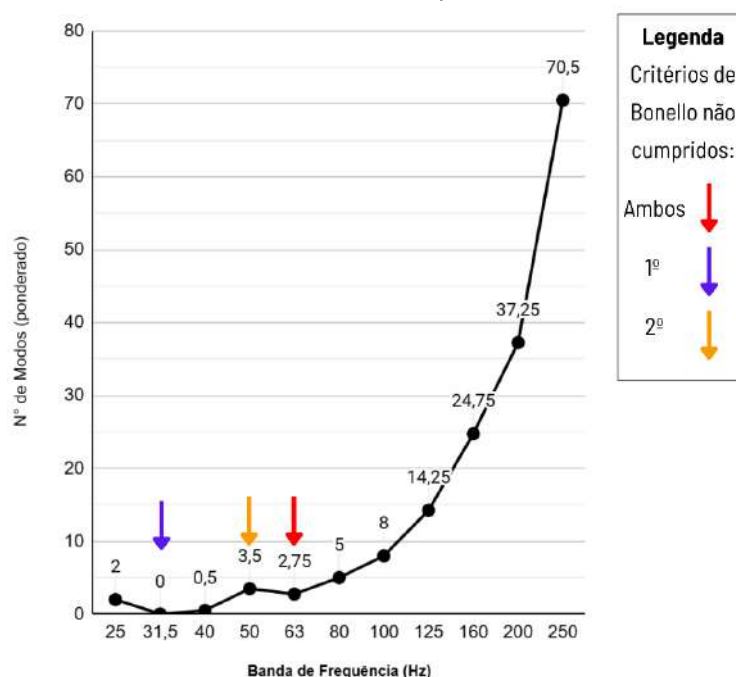
Figura 57 - Gráfico do número de modos por banda na Sala de ensaio 01



Fonte: Elaborado pelo autor

Já para a Sala de ensaio 02, os dois critérios não foram atendidos (Figura 58). Foi observada uma queda no número de modos na frequência de 40 Hz, além de existirem sobreposições abaixo de 5 modos nas frequências de 25, 50 e 63 Hz. Ressalta-se que na próxima etapa deste trabalho, é apresentado o estudo quanto à possibilidade de uso de absorvedores nas regiões problemáticas encontradas e seus impactos práticos na acústica modal das salas de ensaio avaliadas.

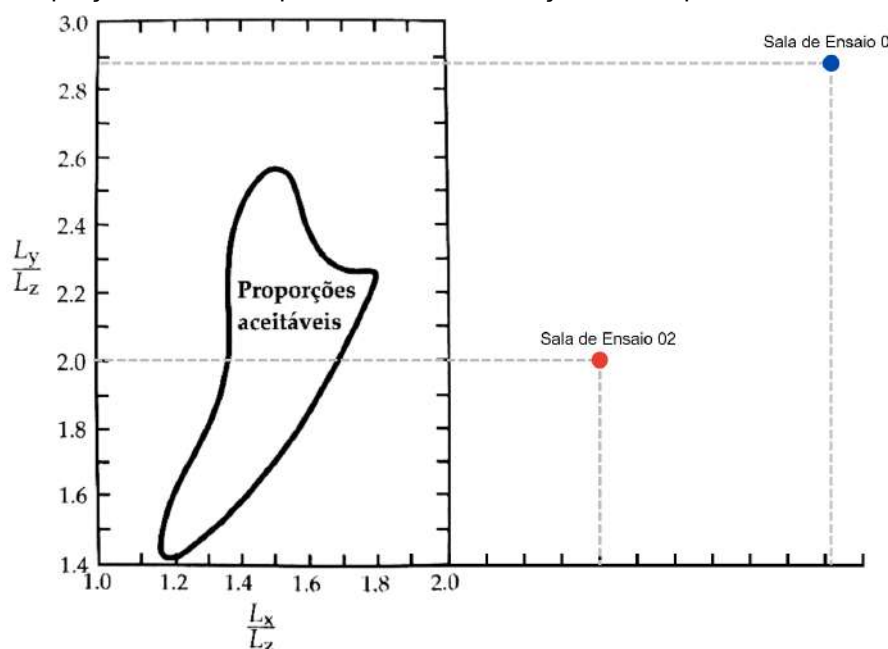
Figura 58 - Gráfico do número de modos por banda na Sala de ensaio 02



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao utilizar o Diagrama de Bolt que foi comentado no Subcapítulo 2.2.2 (Acústica modal) é possível notar o quanto as proporções que as Salas de ensaio 01 e 02 estão fora da área que seria recomendada pelo diagrama (Figura 59).

Figura 59 - Proporções aceitáveis para uma boa distribuição das frequências modais segundo Bolt



Fonte: Brandão, 2016. Adaptado pelo autor.

Utilizando as recomendações de dimensões dadas pela NBR ISO 23591 (ABNT, 2025) foi possível organizar os dados no Quadro 10 e compará-los com os

aferidos *in loco*. É possível notar que existem algumas insuficiências presentes nas duas salas. Na Sala de ensaio 02, os valores mínimos recomendados para a altura e volume estão um pouco abaixo do ideal.

Quadro 10 - Comparativo entre dimensões abaixo (em vermelho) e acima (em verde) do mínimo recomendado pela norma NBR ISO 23591 (ABNT, 2025) e medidas *in loco*.

Sala	Altura útil mínima recomendada	Altura útil medida	Área útil mínima recomendada	Área útil medida	Volume útil recomendado	Volume útil medido
Sala de ensaio 01 (música acústica intensa)	5 m	3 m	200 m ²	93,68 m ²	2400 m ³	298,3 m ³
Sala de ensaio 02 (música acústica suave)	3,5 m	3,14 m	20 - 40 m ²	46,99 m ²	180 m ³	147,4 m ³

Fonte: NBR ISO 23591 (ABNT, 2025). Elaborado pelo autor.

Por outro lado, a Sala de ensaio 01 obteve resultados muito abaixo dos valores mínimos recomendados em altura, área e principalmente volume, que se encontra com considerável divergência.

Os resultados dos parâmetros objetivos obtidos no *software* REW foram sintetizados em uma planilha para cálculo das médias de cada parâmetro por pontos em cada sala, o que permitiu a organização dos dados nos gráficos e quadros que serão apresentados a seguir.

O tempo de reverberação (T_{20}) medido nas Salas de ensaio 01 e 02 (Quadro 11) foi utilizado para o cálculo do T_{mid} , seguindo as indicações dadas pela NBR ISO 23591 (ABNT, 2025), obtendo-se os valores dos limites máximo e mínimo recomendados para as duas salas.

Quadro 11 - Valores do tempo de reverberação (T_{20}) medido na Sala de ensaio 01 e 02

	Sala de ensaio 01	Sala de ensaio 02
Frequência	Valores de T_{20} (s) medidos	Valores de T_{20} (s) medidos
125 Hz	1,16	0,99
250 Hz	1,08	1,12
500 Hz	0,90	1,32
1000 Hz	0,93	1,47
2000 Hz	0,94	1,48
4000 Hz	0,85	1,32

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos dados mostrados no Quadro 12 foi feita uma adaptação do gráfico dado pela NBR ISO 23591 (ABNT, 2025) (Figura 60) para fins de comparação e melhor entendimento.

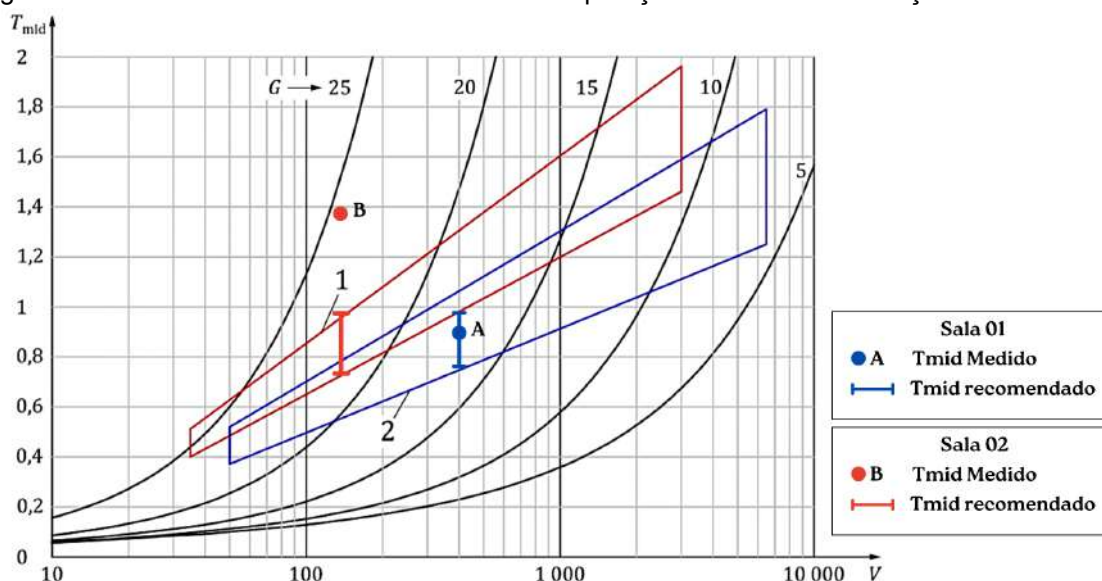
Quadro 12 - Comparação entre valores de T_{mid} recomendados e medidos

	T_{mid} (s) recomendado	T_{mid} (s) medido
Sala de ensaio 01	0,69-0,98	0,90
Sala de ensaio 02	0,74-0,97	1,39

Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser visto na Figura 60, o valor de T_{mid} para a Sala de ensaio 01 está dentro do que é recomendado pela norma específica, porém, o mesmo não pode ser dito da Sala de ensaio 02, onde existe uma variação considerável. A partir dos valores de T_{mid} , é possível analisar como as outras frequências se comportam proporcionalmente em relação a ele.

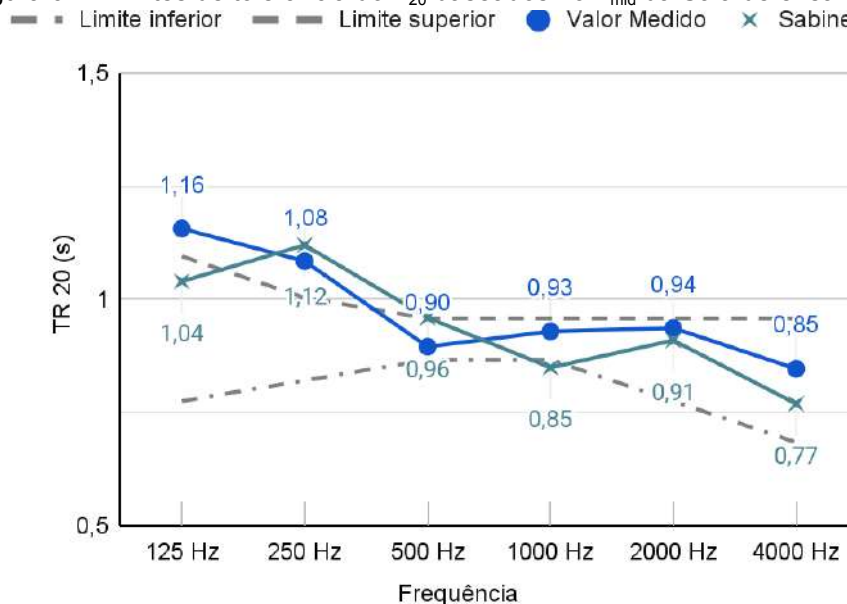
Figura 60 - Intervalo de T_{mid} recomendado em comparação ao medido em função do volume



Fonte: NBR ISO 23591 (ABNT, 2025), adaptado pelo autor

Dessa forma, a Figura 61 mostra como se comportam as outras frequências medidas em relação ao T_{mid} para a Sala de ensaio 01 e a comparação feita com a fórmula de Sabine.

Figura 61 - Limites de tolerância do T_{20} baseados no T_{mid} da Sala de ensaio 01

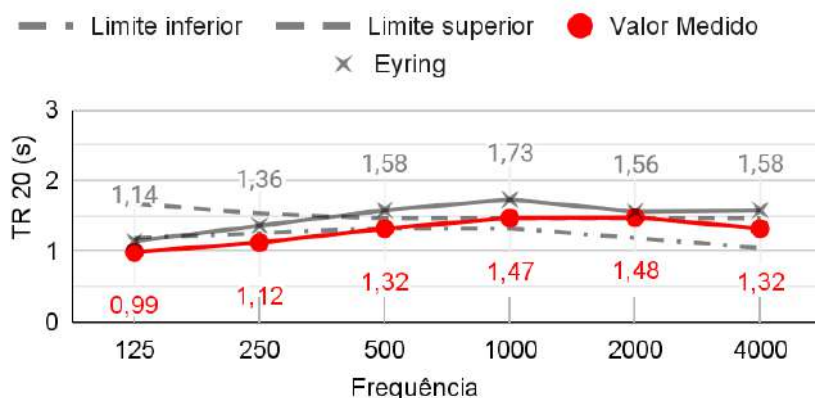


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

É possível verificar que a maioria dos valores se encontram dentro dos limites propostos pela proporção dada pela NBR ISO 23591 (ABNT, 2025), com exceção das frequências graves de 125 e 250 Hz, que possuem uma leve variação de 5,57% e 8,01%, respectivamente, acima do limite proposto.

Para Sala de ensaio 02, a Figura 62 mostra que os valores de T_{20} nas frequências graves se encontram abaixo do recomendado para a proporção dada em relação ao T_{mid} , além dos valores dados pela equação de Eyring seguirem a mesma tendência, apesar de existir uma variação considerável.

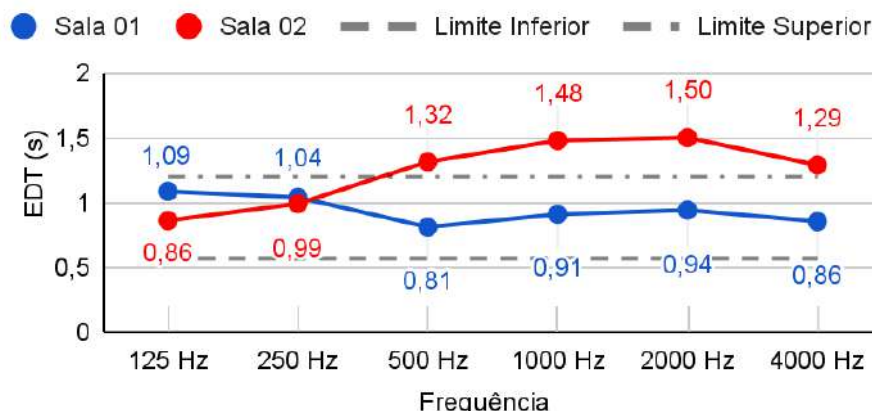
Figura 62 - Limites de tolerância do T_{20} baseados no T_{mid} da Sala de ensaio 02



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Para o EDT da Sala de ensaio 01, foram utilizados para análise, os valores recomendados por Santana *et al.* (2013) de variação entre 0,57 e 1,2 s, onde todos os valores mostrados na Figura 63 estão dentro da variação proposta.

Figura 63 - Medição do EDT (s) médio por frequência na Sala de ensaio 01 e 02 e limites recomendados por Santana *et al.* (2013)



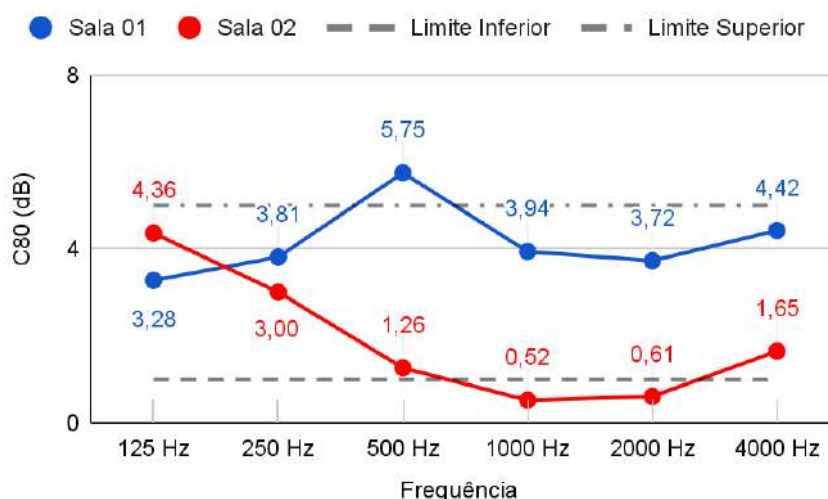
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Para a Sala de ensaio 02, o EDT medido permaneceu dentro da margem mostrada pela literatura apenas nas frequências mais graves, enquanto a partir de 250 Hz os valores a ultrapassam, confirmando a necessidade de aumentar a absorção da sala nos médios e agudos (Figura 63).

Seguindo com os outros parâmetros objetivos, o C_{80} medido na Sala de ensaio 01 (Figura 64) apresenta quase todos os valores dentro da recomendação dada por Beranek (1996) em que os valores de C_{80} devem variar entre +1 dB e +5

dB, o que caracteriza a sala positivamente em sua maior parte por conta dos valores positivos de dB, que permitem um melhor entendimento da música em um ensaio, apesar de ser um pouco “seca” (pouca reverberação) para a música em 500 Hz.

Figura 64 - Medição do C_{80} médio por frequência nas Salas de ensaio 01 e 02 e limites recomendados por Beranek (1996)

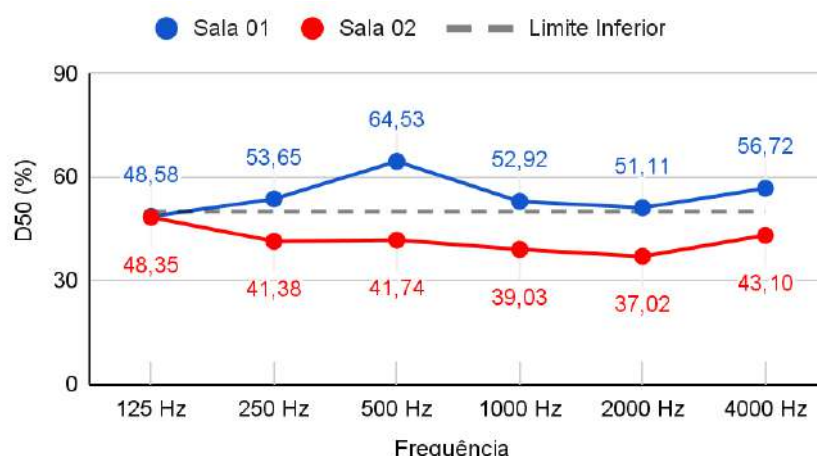


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A Sala de ensaio 02 apresentou valores de C_{80} com uma variação maior ao longo das frequências, com uma tendência inversa aos valores encontrados para T_{20} na Figura 64, o que sugere que o tempo de reverberação precisa ser reduzido nas frequências acima de 250 Hz. Quanto às indicações da literatura, os valores das frequências de 1000 e 2000 Hz estão um pouco abaixo dos limites estimados por Beranek (1996).

Os valores de D_{50} medidos na Sala de ensaio 01 estão em sua maioria dentro da variação de 50% e 65% recomendada por Vergara, Marros, Paul (2016), com exceção pela frequência de 125 Hz que está 2,93% abaixo do valor mínimo (Figura 65).

Figura 65 - D_{50} (%) médio por frequência na Sala de ensaio 01 e 02 e limites recomendados por Vergara, Marros, Paul (2016)

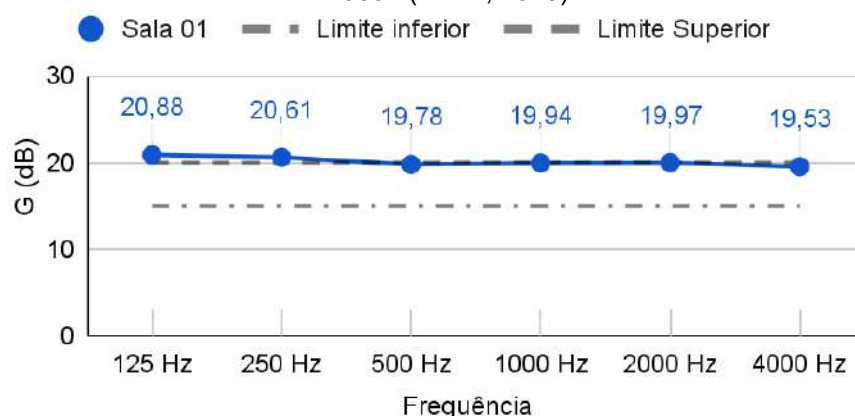


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Por outro lado, a Sala de ensaio 02 apresentou todos os valores de D_{50} por frequência abaixo das recomendações da literatura, o que pode indicar problemas na inteligibilidade da fala (Figura 65).

Os valores do fator força sonora da Sala de ensaio 01, apesar de pequenas variações acima do limite em 125 e 250 Hz, a maioria das frequências se encontra dentro das recomendações da NBR ISO 23591 (ABNT, 2025) para uma sala com o volume que ela apresenta (Figura 66).

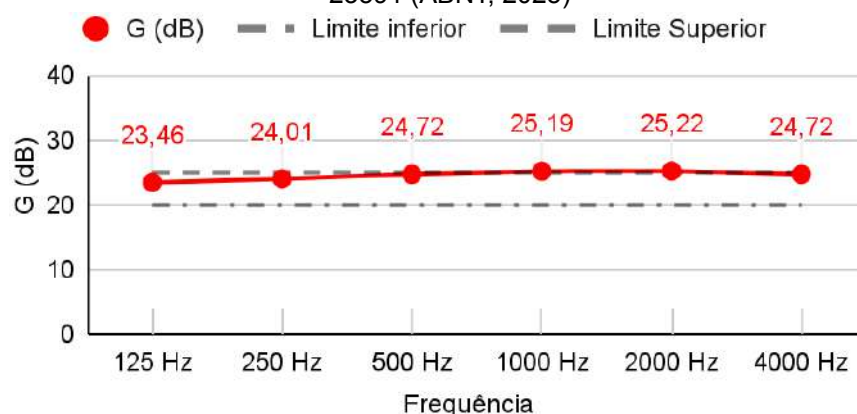
Figura 66 - G (dB) médio por frequência na Sala de ensaio 01 e limites recomendados pela NBR ISO 23591 (ABNT, 2025)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Similarmente, a Sala de ensaio 02 apresenta apenas pequenas variações para o parâmetro de força sonora (G) em 1000 e 2000 Hz (Figura 67), onde para uma sala de seu volume, a NBR ISO 23591 (ABNT, 2025) indica valores entre 20 e 25 dB.

Figura 67 - G (dB) médio por frequência na Sala de ensaio 02 e limites recomendados pela NBR ISO 23591 (ABNT, 2025)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

5.1 PROPOSTA DE ADEQUAÇÃO

Para o início da proposta de adequação acústica, foram considerados os valores do *Just Noticeable Difference* (JND) (Hak. et al. (2012) apud Brandão, 2016), que indicam diferença perceptível ao ouvido humano entre resultados distintos (NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017)). Esses valores serviram de referência para a comparação entre os dados medidos e simulados, apresentados nos Quadros 13 e 14, referentes a cada sala e a cada um dos parâmetros previamente analisados. A comparação dos parâmetros medidos e simulados das duas salas nas outras frequências pode ser vista no Apêndice B.

Quadro 13 - Valores de diferença perceptível (JND) por parâmetro objetivo - Sala de ensaio 01

Parâmetro Objetivo	Frequência Média (Hz)	JND*	Medido	Simulado	Variação
T ₂₀	500 a 1000	5%	0,91	0,88	-3,24
EDT	500 a 1000	5%	0,86	0,90	4,26
D ₅₀	500 a 1000	5%	58,73	56,90	-3,10
C ₈₀	500 a 1000	1 dB	4,84	3,67	-0,24
G	500 a 1000	1 dB	19,86	19,19	-0,03

Fonte: *Hak. et al. (2012) apud Brandão, 2016. Elaborado pelo Autor, 2025

Quadro 14 - Valores de diferença perceptível (JND) por parâmetro objetivo - Sala de ensaio 02

Parâmetro Objetivo	Frequência Média (Hz)	JND*	Medido	Simulado	Variação
T_{20}	500 a 1000	5%	1,39	1,41	1,24
EDT	500 a 1000	5%	1,40	1,39	-0,28
D_{50}	500 a 1000	5%	40,39	41,70	3,25
C_{80}	500 a 1000	1 dB	0,89	0,93	0,04
G	500 a 1000	1 dB	24,96	24,64	-0,01

Fonte: *Hak. et al. (2012) *apud* Brandão, 2016. Elaborado pelo Autor, 2025

Como citado anteriormente, na medição houve picos na frequência de 500 Hz da Sala de ensaio 01 para o parâmetro de C_{80} (Figura 03, Apêndice B), porém a simulação feita não foi capaz de reproduzir esse cenário e houve diferença entre as duas modalidades. Apesar da variação, por se tratar de uma média, o JND calculado ficou contido dentro da margem limite definida de 1 dB, então foi dada continuidade às próximas etapas do trabalho, considerando os modelos acústico-geométricos de ambas as salas de ensaio (objeto de estudo) validados.

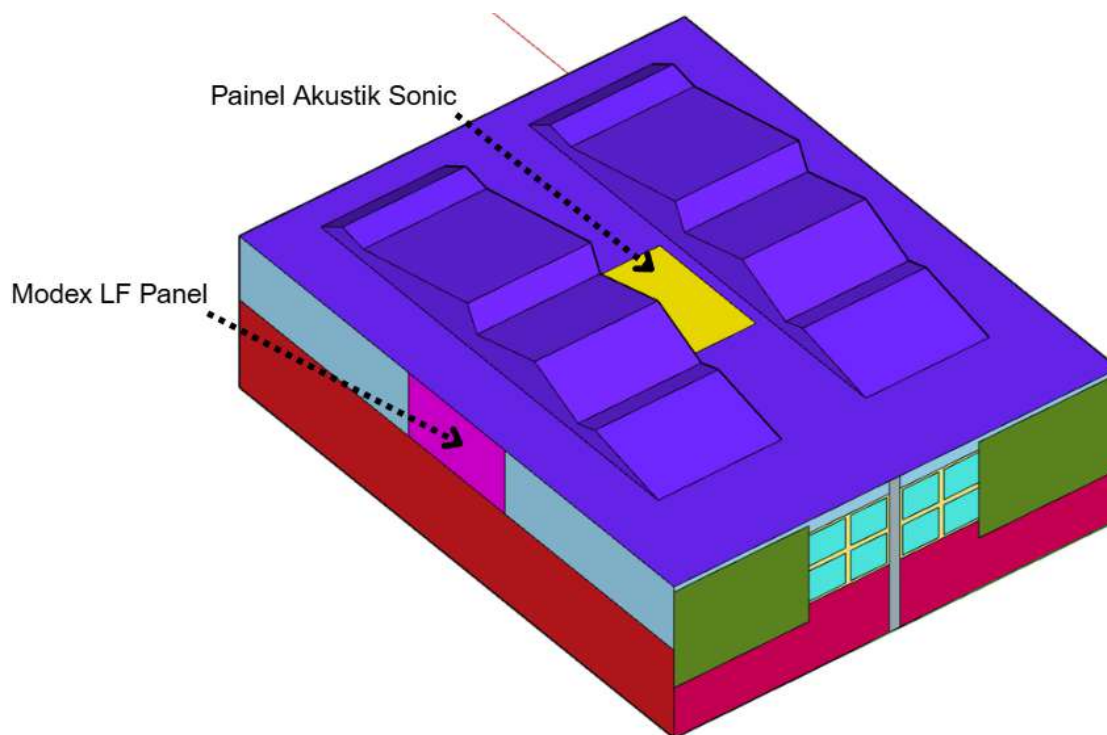
Com a simulação ajustada foram feitos diversos testes para cada sala, tratando as deficiências de condicionamento acústico conforme a necessidade, buscando por soluções práticas e acessíveis. Para a Sala de ensaio 01, o objetivo foi diminuir o tempo de reverberação (T_{20}) nas frequências graves de 125 Hz e 250 Hz e para isso foram posicionados (Figura 68) em uma das paredes da sala um painel de membrana reverberante *Modex™ LF Panel* (Figura 69) para controle direcionado aos graves e a substituição de uma pequena área do forro para a colocação de painéis perfurados *Akustic Sonic™* com plenum de 200 mm e 50 mm de lã de rocha (Figura 70) para maior absorção dos graves e médios (Quadro 15).

Quadro 15 - Coeficiente de absorção para diferentes materiais usados no proposta de condicionamento acústico da Sala de ensaio 01

Absorvedor	Área (m²)	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	NRC
<i>Modex™ LF Panel</i> ¹	3,00	0,98	0,27	0,09	0,09	0,04	0,08	0,15
<i>Akustic Sonic™</i> ²	2,88	0,80	0,70	0,50	0,30	0,10	0,05	0,40

Fonte: ¹RPG Acoustical Systems, LLC., 2024. ²Catálogo Karikal Akustik Sonic, 2025. Elaborado pelo Autor, 2025

Figura 68 - Locais de aplicação dos painéis de membrana e perfurado para o proposta acústico da Sala de ensaio 01



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Figura 69 - Painel vibrante *Modex™ LF Panel*



Fonte: RPG Acoustical Systems, LLC., 2024.

Figura 70 - Akustik™ Sonic

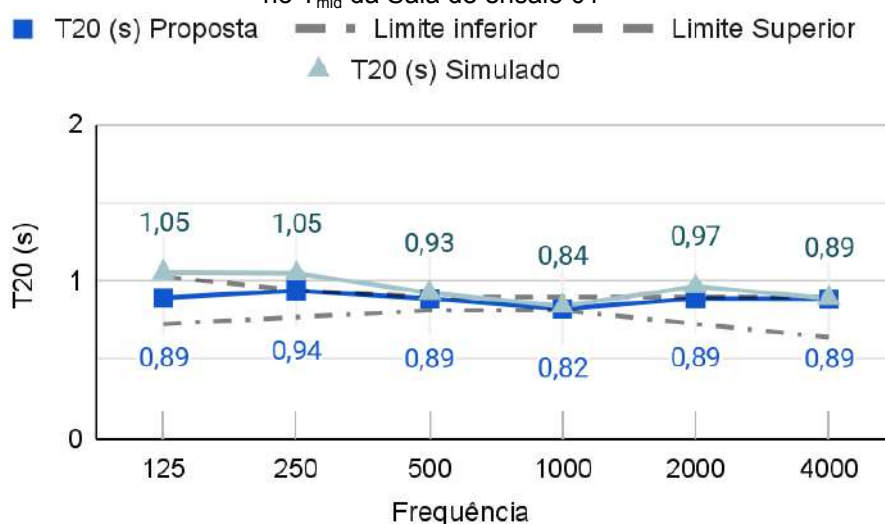


Fonte: Catálogo Karikal Akustik Sonic, 2025

Ressalta-se que os valores definidos como “Proposta” e “Simulado” nas figuras a seguir são ambos resultados de simulações acústicas, porém, o primeiro se refere ao cenário simulado da proposta de condicionamento acústico e o segundo, ao cenário simulado da situação existente.

Como resultado foi possível diminuir o tempo de reverberação nas frequências desejadas, além de melhorar a proporção entre as frequências dentro da variação estimada pelo T_{mid} (Figura 71). Por não necessitar de maiores correções e receber apenas uma intervenção pontual, os outros parâmetros objetivos, apesar de sofrerem uma consequente melhoria, não sofreram grande variação.

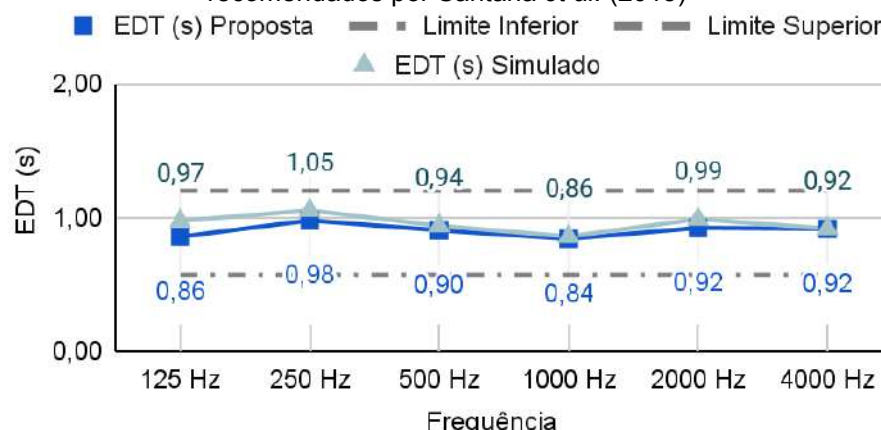
Figura 71- Comparação entre valores simulados e propostos e limites de tolerância do T_{20} baseados no T_{mid} da Sala de ensaio 01



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Os valores do tempo de decaimento inicial (EDT) apresentaram redução nas baixas frequências, comportamento esperado em função das alterações propostas. Observou-se também uma ligeira diminuição nos valores nas frequências de 500 Hz e 2000 Hz (Figura 72).

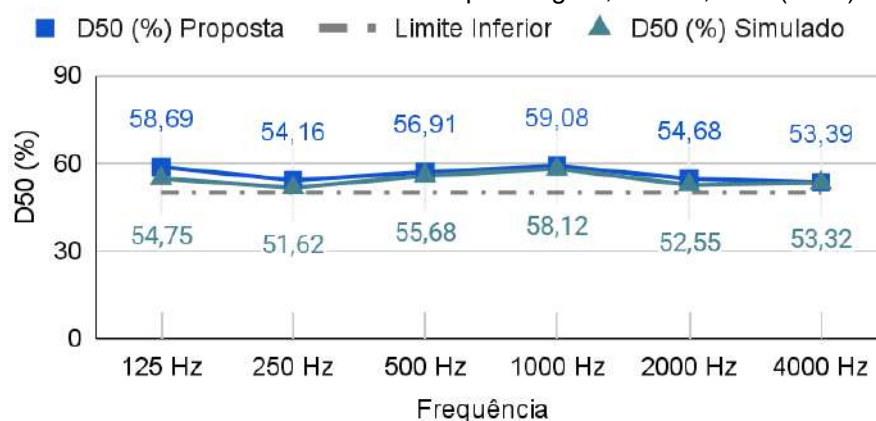
Figura 72 - Comparação entre valores de EDT simulados e propostos na Sala de ensaio 01 e limites recomendados por Santana *et al.* (2013)



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

De forma semelhante, os valores de D_{50} apresentaram melhorias em todas as frequências (Figura 73), em especial nos graves que receberam maior enfoque na proposta apresentada. Embora alguns valores ainda se mantenham ligeiramente abaixo do patamar de 65% (considerado ideal), tal condição não compromete a qualidade dos resultados, o desempenho observado é suficiente para atender ao objetivo do espaço musical.

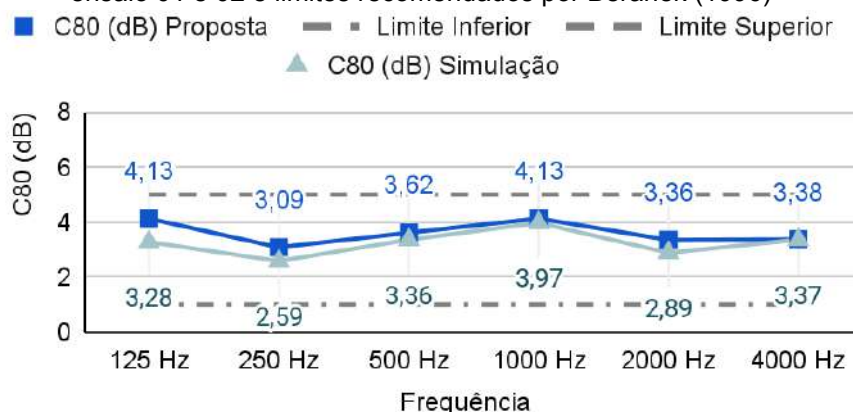
Figura 73 - Comparação entre valores simulados e propostos do D_{50} médio por frequência na Sala de ensaio 01 e limites recomendados por Vergara, Marros, Paul (2016)



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Quanto aos valores de Clareza para a música (C_{80}) o impacto das alterações propostas se mostrou maior (Figura 74), mais uma vez, principalmente nas frequências graves, além de apresentar melhorias também em 500 e 2000 Hz, promovendo um cenário de maior nitidez do som aos ensaios realizados.

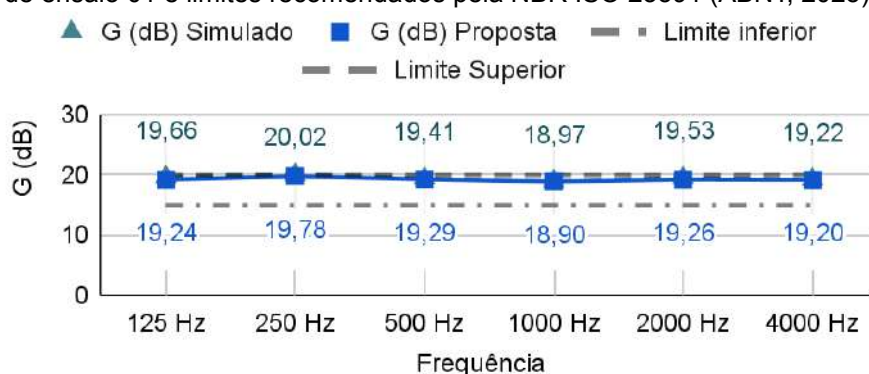
Figura 74 - Comparação entre valores simulados e proposto do C_{80} médio por frequência nas salas de ensaio 01 e 02 e limites recomendados por Beranek (1996)



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Por fim, o fator de força (G) sofreu poucas mudanças, porém positivas. A partir da proposta de adequação acústica, todos os valores deste parâmetro estão contidos dentro dos limites estimados pela NBR ISO 23591 (ABNT, 2025) (Figura 75), considerando o volume existente na Sala de ensaio 01.

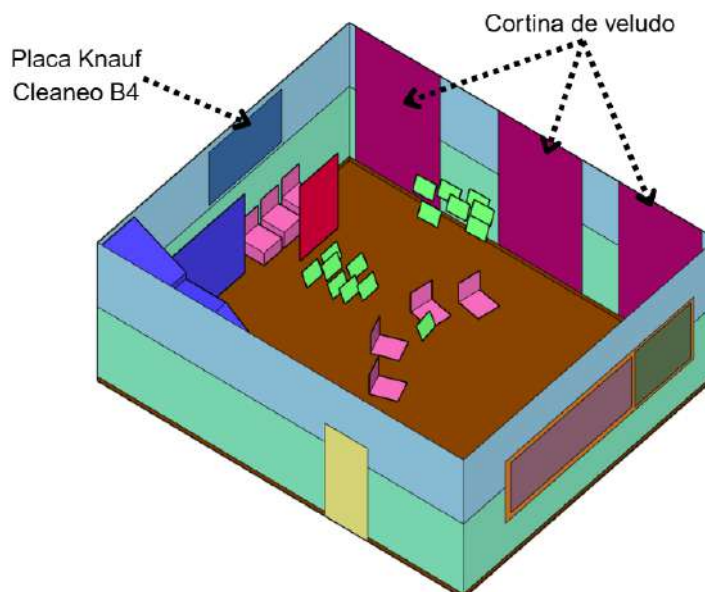
Figura 75 - Comparação entre valores simulados e propostos do G (dB) médio por frequência na Sala de ensaio 01 e limites recomendados pela NBR ISO 23591 (ABNT, 2025)



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Como foi visto na etapa de medições, a Sala de ensaio 02 apresentou resultados insatisfatórios em muitos parâmetros e portanto precisou receber uma proposta acústica mais robusta. Para tanto, foi especificada a colocação de cortinas de veludo (Figura 76) em frente às janelas para absorção principalmente das frequências médias e agudas. Além disso, foi proposto o uso de uma placa de gesso perfurado Knauf Cleaneo B4 com 60 mm de distância entre placa e parede e preenchimento de lã mineral (Figura 77), em uma das paredes da sala para aumento da absorção nas frequências de 125 e 250 Hz (Quadro 16).

Figura 76 - Locais de aplicação do painel perfurado e das cortinas para o proposta de condicionamento acústico da Sala de ensaio 02



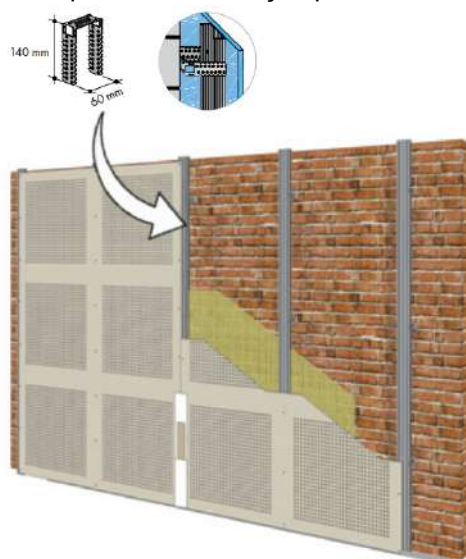
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Quadro 16 - Coeficiente de absorção para diferentes materiais usados no proposta de condicionamento acústico da Sala de ensaio 02

Absorvedor	Área (m ²)	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	NRC
¹ Placa Knauf Cleaneo B4	2,4	0,37	0,80	0,83	0,78	0,44	0,42	0,71
² Cortina de veludo com dobras em 50% de sua área - 0,6 Kg/m ²	15,6	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65	0,6

Fonte: ¹Knauf, 2023; ²Carvalho, 2010. Elaborado pelo Autor, 2025

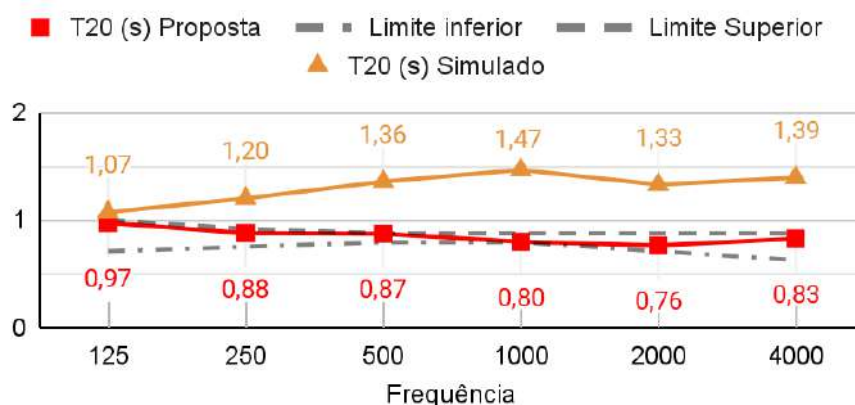
Figura 77 - Esquema de instalação placa Knauf Cleaneo B4



Fonte: Knauf, 2023

Começando pelo tempo de reverberação, é possível observar na Figura 78 que houve grande impacto nas frequências de 250 Hz em diante, alcançando a intenção inicial da proposta. Além disso, todos os valores se encontram dentro dos limites estipulados pela proporção dada pelo T_{mid} , o que ajuda a garantir um bom equilíbrio da reverberação entre as frequências.

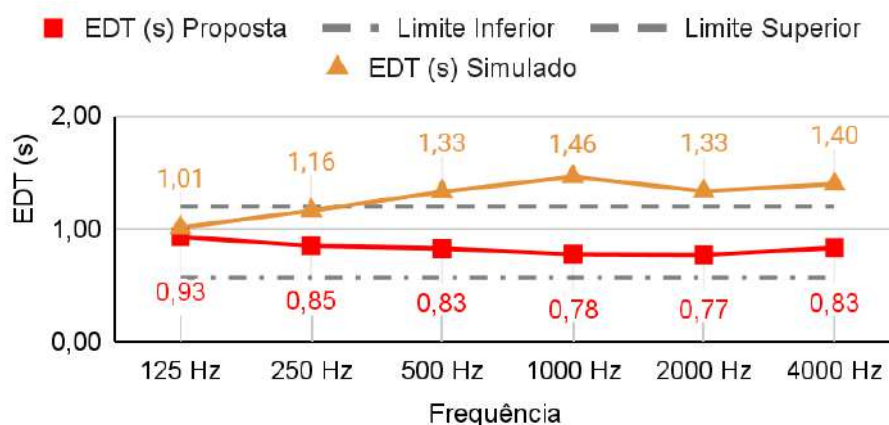
Figura 78 - Comparação entre valores simulados e propostos do T_{20} e limites de tolerância baseados no T_{mid} da Sala de ensaio 02



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Seguindo a mesma tendência, os valores de EDT apresentaram uma redução significativa, comportamento esperado após a aplicação das intervenções propostas. Nesse cenário, todas as médias por frequência passaram a se enquadrar nos limites recomendados pela literatura (Figura 79).

Figura 79 - Comparação entre valores simulados e propostos na Sala de ensaio 02 e limites recomendados por Santana *et al.* (2013)

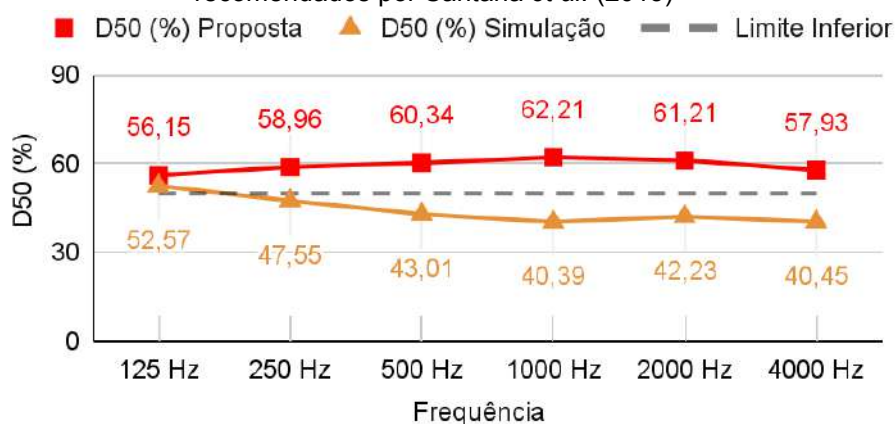


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

No que se refere à definição da fala (D_{50}), observou-se um aumento expressivo em grande parte das frequências, com valores atingindo aproximadamente 60% ou se mantendo bastante próximos desse patamar.

Desempenho que garante que o índice de definição da fala alcance uma condição mais favorável em comparação ao cenário anterior (Figura 80).

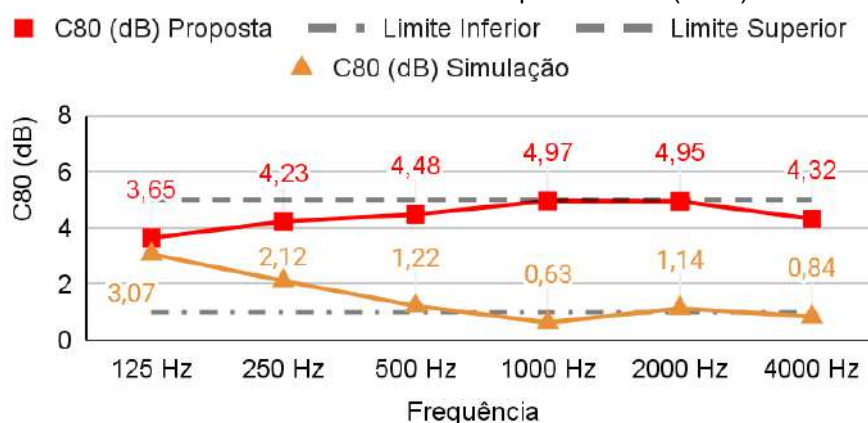
Figura 80 - Comparação entre valores simulados e propostos do D_{50} na Sala de ensaio 02 e limites recomendados por Santana *et al.* (2013)



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Os valores da clareza musical (C_{80}) mostraram importante aumento em comparação aos valores simulados (sem adequação acústica) (Figura 81). Tendo em vista o principal uso exercido na sala, essa mudança se mostra significativa por influenciar diretamente a nitidez e a percepção da articulação musical.

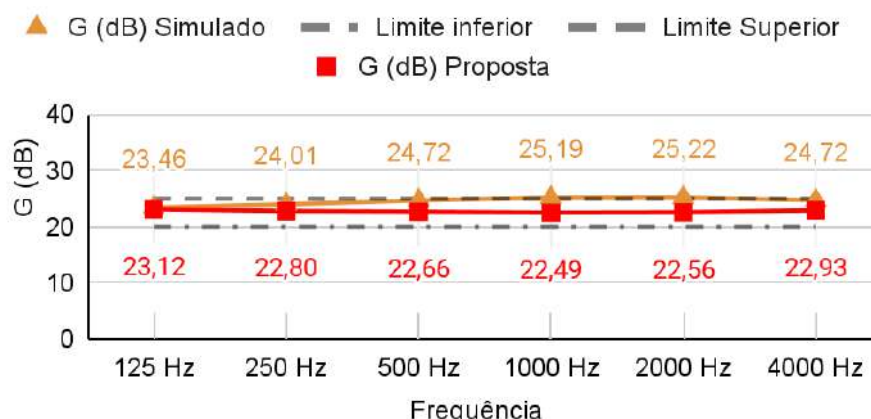
Figura 81 - Comparação entre valores simulados e propostos do C_{80} médio por frequência na Sala de ensaio 02 e limites recomendados por Beranek (1996)



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Por fim, verificou-se que todos os valores de força sonora (G) no cenário projetado passaram a estar contidos dentro da faixa considerada adequada para o volume da sala. Essa adequação mostra que o equilíbrio entre energia sonora e volume espacial foi alcançado de maneira satisfatória, em conformidade com os parâmetros normativos estabelecidos (Figura 82).

Figura 82 - Comparação entre valores simulados e propostos do G (dB) médio por frequência na Sala de ensaio 02 e limites recomendados pela NBR ISO 23591 (ABNT, 2025)



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Por questões logísticas e compatibilidade entre agenda da escola e cronograma das atividades deste estudo, não foi possível fazer a medição do nível de pressão sonora em cada sala durante os ensaios dos diversos grupos que as utilizam. Porém, através da NBR ISO 23591 (ABNT, 2025), foi possível estimar o nível de pressão sonora por meio da equação 21:

$$L_p = G + 59 + 10 \lg \frac{\sum_i n_i P_i}{mW} \text{ (dB)} \quad \text{(Equação 21)}$$

Onde:

G é o fator de força da sala em decibels

n_i é o número de instrumentos do tipo i

P_i é a potência sonora de um instrumento do tipo i em Watts

Dessa forma foi montado o Quadro 17, que organiza os grupos musicais e os instrumentos utilizados na Sala de ensaio 01, suas quantidades e respectivas potências sonoras.

Quadro 17 - Estimativa do nível de pressão sonora L_p para 5 grupos musicais que utilizam a Sala de ensaio 01

Instrumentos	Potência sonora P (mW)	Música acústica intensa			Música acústica Suave	
		Orquestra Sinfônica de Itabaiana	Banda Sinfônica da SFNSC	Banda Infanto-Juvenil	Orquestra Experimental de Cordas	Orquestra Preparatória de Cordas
Violino	0,8	10	-	-	12	7
Viola	0,5	2	-	-	4	3
Violoncelo	1	3	-	-	1	4
Contrabaixo	1,6	4	-	-	1	1
Fagote	2	1	-	-	-	-
Trompa	15,8	2	3	-	-	-
Trombone	25,1	2	3	-	-	-
Trombonito	25,1	-	-	1	-	-
Flauta Transversal	1,3	3	2	10	-	-
Trompete	12,6	2	3	2	-	-
Xilofone	0,8	1	1	1	-	-
Tímpano	12,6	3	3	3	-	-
Pratos	6,3	1	2	1	-	-
Clarinete	2	4	6	6	-	-
Oboé	2	2	-	3	-	-
Saxofone Alto	6,3	-	2	-	-	-
Saxofone Tenor	6,3	-	3	1	-	-
Saxofone Barítono	6,3	-	1	-	-	-
Tuba	25,1	-	2	1	-	-
L_p (dB) =		101,5	103,7	100,7	90,3	89,8

Fonte: Elaborado pelo Autor

Obs: O valor de G utilizado foi de 19,7 dB, uma média entre 500 e 1000 Hz medida na sala.

Os valores indicados pela norma NBR ISO 23591 (ABNT, 2025) mostram que os resultados de L_p para Orquestra Sinfônica de Itabaiana, Banda Sinfônica da SFNSC e Banda Infanto-Juvenil foram elevados, todos acima de 100 dB, correndo risco de danos auditivos. Os resultados para a Orquestra Experimental de Cordas e Orquestra Preparatória de Cordas estão numa margem menos perigosa e compatível com o esperado para música acústica suave.

Outra questão a se avaliar está no tempo de duração de cada ensaio/aula, onde Bistafa (2011) e Carvalho (2010) trazem como limite de tolerância o tempo máximo de 1 hora de exposição para ruídos acima de 110 dB. Analisando os

horários de uso da Sala de ensaio 01, foi possível notar que a duração do ensaio, que por sua vez ocorre uma vez na semana, da Banda Infanto-Juvenil, dura exatamente o tempo máximo recomendado pela literatura.

Porém, a Orquestra Sinfônica de Itabaiana e a Banda Sinfônica da SFNSC ensaiam por 4 e 3 horas seguidas, respectivamente, o que levanta preocupação. Bistafa (pg. 128, 2011) traz como indicação a adoção de intervalos que podem subdividir a carga horária com o objetivo de evitar a exposição contínua ao som, mas estudos aprofundados e multidisciplinares que caracterizem melhor o cenário podem ser feitos para que haja maior rigor na avaliação e possíveis correções e adaptações.

Para a Sala de ensaio 02, algumas estimativas foram feitas (Quadro 18), porém, as configurações do tipo de uso da sala não são tão previsíveis e muitas aulas e ensaios de diferentes combinações podem ocorrer. Dessa forma, foram feitas estimativas para grupos comuns de música acústica suave.

Quadro 18 - Estimativa da pressão sonora L_p para 3 grupos musicais que utilizam a Sala de ensaio 02

		Música acústica Suave		
Instrumentos	Potência sonora P (mW)	Grupo 01	Grupo 02	Grupo 02
Violino	0,8	5	-	-
Saxofone	6,3	-	2	-
Violão	0,4	-	-	6
L_p (dB) =		89,9	94,9	87,7

Fonte: Elaborado pelo Autor

Obs: O valor de G utilizado foi de 24,9 dB, uma média entre 500 e 1000 Hz medida na sala.

Os grupos analisados estão dentro do esperado para uma sala de música acústica suave (menos de 95 dB, segundo NBR ISO 23591 (ABNT, 2025) , além de não apresentaram valores preocupantes de nível de pressão sonora e tempo de exposição no que se refere ao impacto à saúde dos usuários.

Quanto às recomendações para adequação do isolamento acústico, e com base em Schmid (2013), sugere-se em um primeiro momento, revisar a qualidade do fechamento de todas as esquadrias e investir no reparo e manutenção das janelas e portas tanto da Sala de ensaio 01 (Figura 83), que possuem problemas de

fechamento e frestas que comprometem a eficiência do isolamento acústico quanto da Sala de ensaio 02 (Figura 84).

Figura 83 - Janela veneziana com frestas na Sala de ensaio 02



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Figura 84 - À esquerda janela emperrada e à direita porta com fresta na Sala de ensaio 01

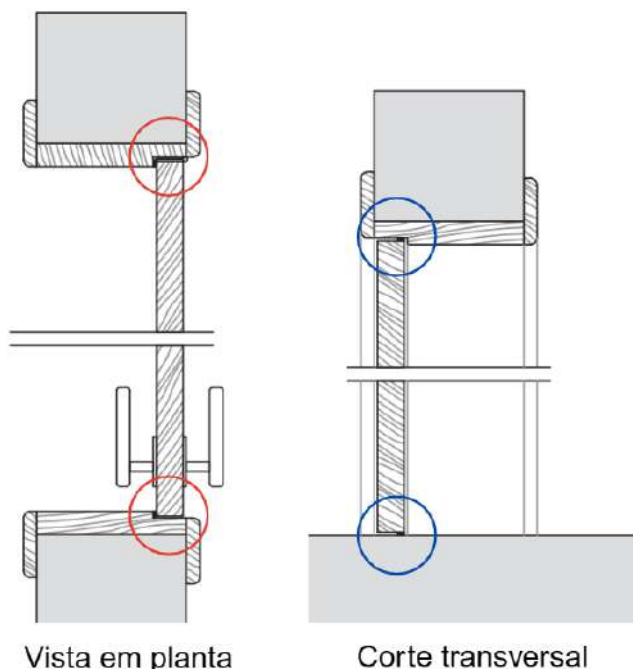


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Para uma melhor performance no isolamento acústico, além de reparos em sua estrutura e alinhamentos, Schmid (2013) traz como recomendação a utilização de fitas de borracha nas laterais internas das portas e escovas auto-adesivas no topo e base (Figura 85), além fitas de elastômero adesivo que podem ser utilizadas nos batentes das janelas. O autor indica também como possibilidade a modificação de portas com reforços de chapas de madeira ou aço para uma maior capacidade de

isolamento acústico, soluções que podem ser consideradas nas salas de ensaio musical avaliadas neste trabalho de conclusão de curso.

Figura 85 - Utilização de fitas de borrachas (em vermelho) e escova auto-adesiva (em azul) em portas. Sem escala.



Fonte: Schmid, 2013. Modificado pelo Autor

Além dessas medidas, é possível também dobrar a quantidade de esquadrias por abertura na parede, ou seja, colocar uma outra janela/porta sobreposta às esquadrias originais, o que permitiria uma melhoria no isolamento acústico das partições verticais. Contudo, Caso seja necessário, tendo em vista as estimativas de nível de pressão sonora calculadas anteriormente e maior aprofundamento destas análises, pode-se recorrer a adoção de novas esquadrias, como portas acústicas reforçadas e, principalmente na Sala de ensaio 02, que possui janelas do tipo veneziana, a substituição ou sobreposição por janelas de vidro duplo, com camada de ar entre folhas (Schmid, 2016) e vidros de diferentes espessuras para evitar problemas de perda de transmissão por ressonância do vidro (Bistafa, 2011).

Outro problema de isolamento acústico encontrado está relacionado com o forro da Sala de ensaio 01, que além de não existir laje acima dele por conta dos painéis difusores, foram encontrados cobogós em algumas paredes (acima do forro de gesso) (Figura 86), o que compromete a capacidade de isolamento da sala.

Figura 86 - Vista externa dos cobogós acima do forro da Sala de ensaio 01



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Situação parecida pode ser encontrada na Sala de ensaio 02 que também não possui laje acima do forro de PVC. Como solução para melhoria deste problema, sugere-se a instalação de um forro isolante composto de chapa dupla de gesso acartonado com lã de rocha acima do forro existente, seguindo a inclinação do telhado. As soluções aqui propostas foram condensadas no Quadro 19 para melhor visualização.

Quadro 19 - Estratégias de isolamento acústico para cada sala de ensaio

Elemento	Sala de Ensaio 01	Sala de Ensaio 02
Esquadrias (janelas e portas)	- Revisão e reparo das janelas e portas com falhas de fechamento.	
	- Aplicação de fitas de borracha, escovas auto-adesivas e fitas de elastômero adesivo nos batentes.	
	- Reforço estrutural das portas por meio de chapas de madeira ou aço.	
	- Implementação de esquadrias duplas (sobreposição de janelas/portas).	
	- Substituição por portas acústicas reforçadas, se necessário.	
	-	- Substituição das janelas do tipo veneziana por modelos de vidro duplo, com camada de ar e vidros de diferentes espessuras.
Forro	- Adição de sistema de forro isolante composto por chapas duplas de gesso acartonado associadas à lã mineral, acompanhando a inclinação do telhado de telha cerâmica.	
	- Vedação dos cobogós acima do forro de gesso, utilizando o mesmo método do forro isolamento de chapas duplas e lã mineral	-

Fonte: Elaborado pelo Autor

As medidas aqui propostas devem ser acompanhadas por uma análise estrutural criteriosa quanto ao suporte a sobrecarga destas soluções na estrutura existente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho demonstrou a importância da caracterização acústica e da simulação computacional como ferramentas essenciais para a adequação de salas multiuso destinadas ao ensino e à prática musical. As medições *in loco* evidenciaram que ambas as salas avaliadas apresentavam condições iniciais fora dos limites recomendados, especialmente em relação aos níveis de pressão sonora e aos parâmetros de definição e clareza.

A modelagem computacional, validada a partir dos dados experimentais, possibilitou o teste de diferentes alternativas de tratamento acústico, resultando em propostas de intervenção que mostraram melhorias relevantes nos parâmetros objetivos. Na Sala de ensaio 01, observou-se a redução do tempo de reverberação nas frequências graves, aliada ao aumento de C_{80} e D_{50} , alcançando valores compatíveis com os requisitos para prática musical. Na Sala de ensaio 02, as soluções propostas reduziram de forma consistente o tempo de reverberação e o EDT, além de elevarem a clareza e a definição sonora, trazendo os parâmetros para faixas dentro dos limites estabelecidos pela literatura e normas vigentes.

Assim, verificou-se que a aplicação da simulação acústica constitui um recurso eficaz e acessível para orientar projetos de adaptação acústica em ambientes existentes, permitindo o uso mais qualificado de salas multiuso. Os resultados alcançados reforçam a relevância de soluções de tratamento simples e de baixo impacto construtivo, que contribuem diretamente para a qualidade da experiência musical de estudantes e músicos.

As medições de nível de pressão sonora demonstraram que ambas as salas apresentaram valores acima do recomendado pela NBR 10152 (ABNT, 2017), com valores médios de 51,5 dB e 47,9 dB, indicando insuficiência no isolamento acústico. Essa condição, pode prejudicar a execução das atividades e gerar dificuldade de concentração. Os resultados reforçam que intervenções voltadas ao isolamento acústico e à redução do ruído residual são essenciais para garantir não apenas a adequação normativa, mas também o bem-estar dos músicos e estudantes. Outros estudos mais aprofundados no tema podem ser feitos, a fim de caracterizar e propor soluções com maior precisão e detalhamento.

Referências Bibliográficas

ANDRADE, Fernanda Horst. **AVALIAÇÃO ACÚSTICA DOS AMBIENTES DE RESTAURAÇÃO DO INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA – CAMPUS DE SANTA APOLÔNIA**. 2020. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia da Construção, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10152: Acústica – Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 23591: Critérios de qualidade acústica para salas e espaços de ensaio musical**. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3382-2: Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas – Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BERANEK, Leo. **Concert Halls and Opera Houses: music, acoustics, and architecture**. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1996.

BERANEK, Leo. **Acoustics**. 2. ed. New York: Acoustical Society Of America, 1993.

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 2. Ed. S/I: Blucher, 2011

BRANDÃO, Eric. **Acústica de salas: projeto e modelagem**. São Paulo: Blucher, 2016.

BONER, C. K.; COFFEN, R. C. **Acoustics for performance, rehearsal, and practice facilities: a primer for administrators and faculties**. National Association of Scholls of Music, set. 2000.

BUENO, Davi Correa; LOPES, Dra. Betania Jacob Stange. **Qualidades acústicas da sala de aula para ensino coletivo de música: uso do programa I-Simpa**. REVISTA DA ABEM, [S. I.], v. 29, 2022. Disponível em: <https://abem.emnuvens.com.br/revistaabem/article/view/990>. Acesso em: 19 set. 2025.

CARVALHO, Régio Paniago. **Acústica arquitetônica**. 2. ed. Brasília: Theasurus, 2010.

CHRISTENSEN, Claus Lynge; RINDEL, Jens Holger. **A new scattering method that combines roughness and diffraction effects**. In: Forum Acousticum, Budapest, Hungary. 2005. p. 344- 352.

COSTA, Ennio Cruz da. **Acústica Técnica**. São Paulo: Blucher, 2003.

ERMANN, Michael. **Architectural acoustics illustrated**. Hoboken: Wiley, 2015.

GEERDES, H. P. **Tips: Improving Acoustics for Music Teaching**. In: MUSIC EDUCATORS NATIONAL CONFERENCE, Reston, VA, 1991.

Governo de Sergipe. **Inauguração do complexo esportivo no Colégio Estadual Murilo Braga fortalecerá o desporto escolar no agreste sergipano**. 2024.

Disponível em:

https://www.se.gov.br/noticias/educacao-cultura/inauguracao_do_complexo_esportivo_no_colegio_estadual_murilo_braga_fortalecera_o_desporto_escolar_no_agreste_sergipano. Acesso em: 12 fev. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3382-1: acoustics: measurement of room acoustic parameters: part 1: performance spaces**. Switzerland, 2009.

ITABAIANA (SE). Prefeitura. **História do Município**. 2021. Disponível em: http://www.itabaiana.se.gov.br/?_p=conheca-itabaiana. Acesso em: jun. 2025.

I-Simpa User Guide. 2022. Disponível em: <https://i-simpa-wiki.readthedocs.io/fr/latest/index.html>. Acesso em: 20 maio 2025.

KARIKAL. **Acustik Sonic**. 2025. Disponível em: <https://karikal.com.br/wp-content/uploads/2025/06/27-Folder-Acustik-Sonic.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2025.

KNAUF (Rio de Janeiro). **Catálogo de Produtos Knauf do Brasil**. 2023. Disponível em: <https://knauf.com/api/download-center/v1/assets/fbe39e04-4a26-422c-b26b-58aac2815200?download=true&country=br&locale=pt-BR>. Acesso em: 18 ago. 2025.

LOUREIRO, Alícia Maria Almeida. **O ENSINO DA MÚSICA NA ESCOLA FUNDAMENTAL: UM ESTUDO EXPLORATÓRIO**. 2001. 241 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Educação, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

LIMA, Victor Henrique Costa; LIMA, Ana Carolina Cordeiro Correia. **Análise acústica de uma sala de prática musical**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2023. Anais [...]. [S. l.], 2023. p. 1–10. DOI: 10.46421/encac.v17i1.3806. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/3806>. Acesso em: 24 mar. 2025.

MANNIS, José Augusto; MATTOS, Tiago Ferreira. Análise Modal e Representação Musical Aplicadas ao Design de Estúdios de Produção Fonográfica. In: HOLZMANN, Henrique Ajuz; DALLAMUTA, João (org.). **Engenharias: da genialidade à profissão e seu desenvolvimento 2**. Ponta Grossa (PR): Atena, 2021. Cap. 1. p. 01-32. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/ebook/engenharias-da-genialidade-a-profissao-e-seu-desenvolvimento-2>. Acesso em: 05 maio 2025.

MOREIRA, Marcos. **Filarmônica Nossa Senhora da Conceição (Itabaiana-SE): estudo musicológico-histórico sobre a origem dos seus antecedentes**. ETD - Educação Temática Digital, Campinas, SP, v. 10, n. 1, p. 133–143, 2009. DOI: 10.20396/etd.v10i1.1020. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/etd/article/view/1020>. Acesso em: 7 fev. 2025.

ODEON A/S (Kongens Lyngby). **ODEON Room Acoustics Software User Manual**. 2023. Disponível em: <https://odeon.dk/download/Version18/OdeonManual.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2025.

OSAKI, A. G.; SCHMID, A. L. **Tempo de reverberação de sala de música**. In: EVINCI, 17., 2009, Curitiba.

PIETROBON, Mateus; MANZKE, Vitor Hugo Rodrigues. **Impacto das leis 11.769/2008 e 13.278/2016: pesquisa exploratória nos anais da ABEM de 2009 a 2019**. In: CONGRESSO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EDUCAÇÃO MUSICAL, 25., 2021, Online. Disponível em: <https://www.abem-submissoes.com.br/index.php/xxvcongresso/2021/paper/viewFile/813/680>. Acesso em: 11 fev. 2025.

RYHERD, E. **Acoustic Design of Music Rehearsal Rooms**. Physics Today, v.61, n.8, p.68-69, Aug. 2008.

SANTANA, A. L. S.; OHANA, G. J.; MELO, G. da S. V. de; SOEIRO, N. S. **Estudo da Acústica de Salas Voltadas ao Ensino de Música em Belém-Pa**. Acústica e Vibrações, [S. l.], v. 28, n. 45, p. 23–32, 2013. DOI: 10.55753/aev.v28e45.148. Disponível em: https://revista.acustica.org.br/acustica/article/view/aev45_salas. Acesso em: 21 mar

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.

Secretaria de Estado da Educação. **Colégio Estadual Murilo Braga - Dados Da Escola**. 2024. Disponível em: <https://seduc.se.gov.br/dre03-itabaiana-colegio-estadual-murilo-braga/>. Acesso em: 12 fev. 2025.

SFNSC - SOCIEDADE FILARMÔNICA NOSSA SENHORA DA CONCEIÇÃO (Itabaiana). **QUEM SOMOS**. 2025. Disponível em: <https://www.filarmonicansc.art.br/>. Acesso em: 11 fev. 2025.

VERGARA, Erasmo Felipe; MARROS, Fernanda; PAUL, Stephan. **Caracterização da qualidade acústica de salas de aula para prática e ensino musical**. Ambiente Construído, v. 17, n. 1, p. 23-37, mar. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000100121>. Acesso em: 11 fev. 2025.

VÖRLANDER, Michael. **Auralization: Fundamentals of acoustic, Modeling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality**. 1. ed. Berlim, Alemanha: Springer, 2008.

APÊNDICE A

Quadro A-1 - Coeficientes de absorção dos materiais por frequência na Sala de ensaio 01

Materiais	Área (m²)	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	NRC	Fonte
Cortina	25,8	0,07	0,31	0,49	0,81	0,53	0,4	0,54	Carvalho, 2010
Porta de Madeira	4,14	0,24	0,19	0,14	0,8	0,13	0,1	0,32	Bistafa, 2011
Piso Laminado de Madeira	94,34	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	Bistafa, 2011
Parede	29,16	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	Bistafa, 2011
Forro	111,37	0,2	0,15	0,1	0,08	0,04	0,02	0,09	Vörlander, 2008.
Carpete	52,35	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,5	0,21	Carvalho, 2010
Banco Piano	0,44	0,13	0,67	0,2	0,22	0,3	0,3	0,35	Carvalho, 2010
Tablado	5,79	0,04	0,04	0,15	0,29	0,52	0,59	0,25	Carvalho, 2010
Piano	8,7	0,2	0,52	0,6	0,57	0,52	0,43	0,55	Carvalho, 2010
Estante de Partitura	3,48	0,28	0,1	0,06	0,05	0,04	0,11	0,06	Ermann, 2015
Armário de Madeira	6,82	0,24	0,19	0,14	0,8	0,13	0,1	0,32	Bistafa, 2011
Cadeira de Plástico	10,68	0,6	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	Vörlander, 2008.
Pessoas em pé	6,46	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37	0,41	Bistafa, 2011
Bateria	9,72	0,1	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	Carvalho, 2010
Vidro Janela	3,35	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,16	Bistafa, 2011
Pilar	1,26	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	Bistafa, 2011
Instrumentos (Sob capa)	20,94	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	Carvalho, 2010

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro A-2 - Coeficientes de absorção dos materiais por frequência na Sala de ensaio 02

Materiais	Área (m²)	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	NRC	Fonte
Armário de Madeira	12,72	0,24	0,19	0,14	0,8	0,13	0,1	0,32	Bistafa, 2011
Azulejo	43,99	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	Bistafa, 2011
Biombo	3,62	0,24	0,19	0,14	0,8	0,13	0,1	0,32	Bistafa, 2011
Cadeira de Plástico	4,65	0,06	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,18	Vörlander, 2008.
Estante de Partitura	1,8	0,28	0,1	0,06	0,05	0,04	0,11	0,06	Ermann, 2015
Janela de Madeira	6,94	0,24	0,19	0,14	0,8	0,13	0,1	0,32	Bistafa, 2011
Mesa Professor	1,43	0,42	0,21	0,1	0,08	0,06	0,06	0,11	Vörlander, 2008.
Parede Carvalho	36,27	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06	0,02	Carvalho, 2010
Porta de Madeira	1,84	0,24	0,19	0,14	0,8	0,13	0,1	0,32	Bistafa, 2011
Quadro Branco	3,41	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,04	Carvalho, 2010
Quadro Negro	1,76	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	Carvalho, 2010
Pessoas em pé	4,84	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37	0,41	Bistafa, 2011
Forro PVC	47,08	0,20	0,15	0,10	0,08	0,04	0,02	0,09	Vörlander, 2008.
Piso Granilite	49,75	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	Bistafa, 2011

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro A-3 - Coeficientes de espalhamento dos materiais por frequência na Sala de ensaio 01

Materiais	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Fonte
Cortina	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Porta de Madeira	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Piso Laminado de Madeira	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Parede	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Forro de gesso	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Carpete	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Banco Piano	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Tablado	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Piano	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Estante de Partitura	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Armário de Madeira	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Cadeira de Plástico	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Pessoas em pé	0,1	0,4	0,7	0,9	0,9	0,9	1
Bateria	0,1	0,4	0,7	0,9	0,9	0,9	1
Vidro Janela	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Pilar	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Instrumentos (sob capa)	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1

Fonte: 1Christensen, Rindel, 2005.

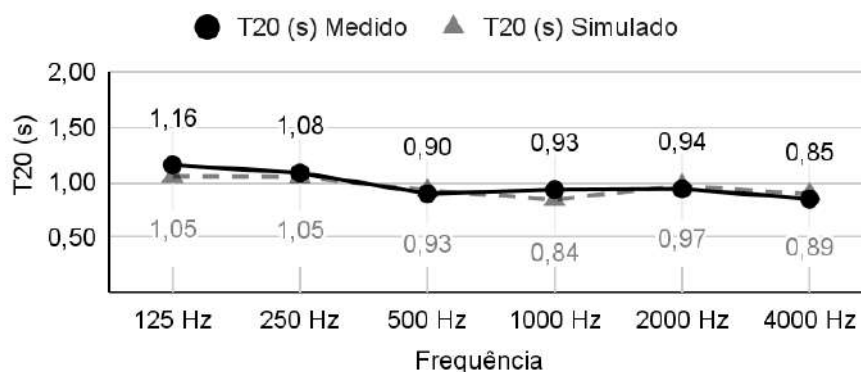
Quadro A-4 - Coeficientes de espalhamento dos materiais por frequência na Sala de ensaio 02

Materiais	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Fonte
Armário de Madeira	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Azulejo	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Biombo	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Cadeira de Plástico	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Estante de Partitura	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Janela de Madeira	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Mesa Professor	0,1	0,4	0,7	0,9	0,9	0,9	1
Parede Carvalho	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Porta de Madeira	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Quadro Branco	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Quadro Negro	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Pessoas em pé	0,1	0,4	0,7	0,9	0,9	0,9	1
Forro PVC	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1
Piso Granilite	0,05	0,05	0,05	0,1	0,4	0,7	1

Fonte: 1Christensen, Rindel, 2005.

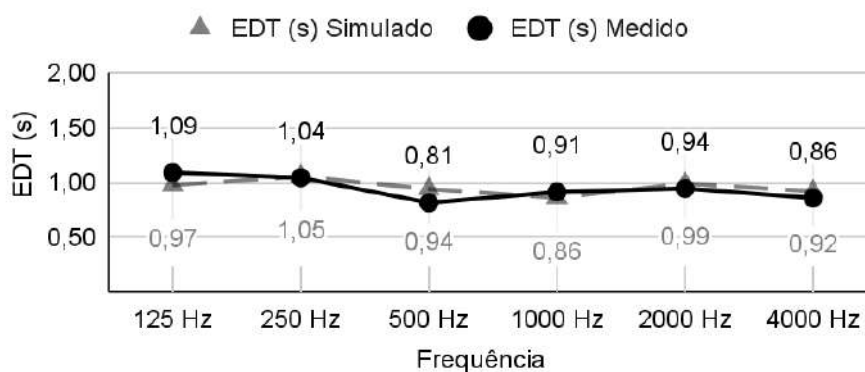
APÊNDICE B

Figura B-1 - Comparativo entre valores de T20 (s) medidos e simulados para a sala de ensaio 01



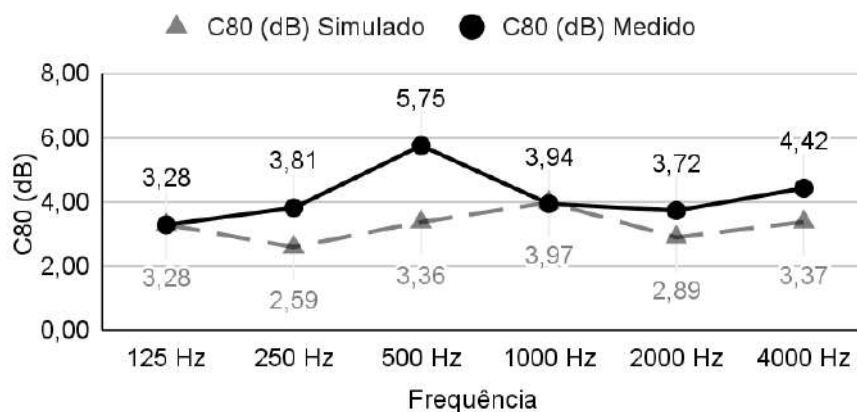
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Figura B-2 - Comparativo entre valores de EDT (s) medidos e simulados para a sala de ensaio 01



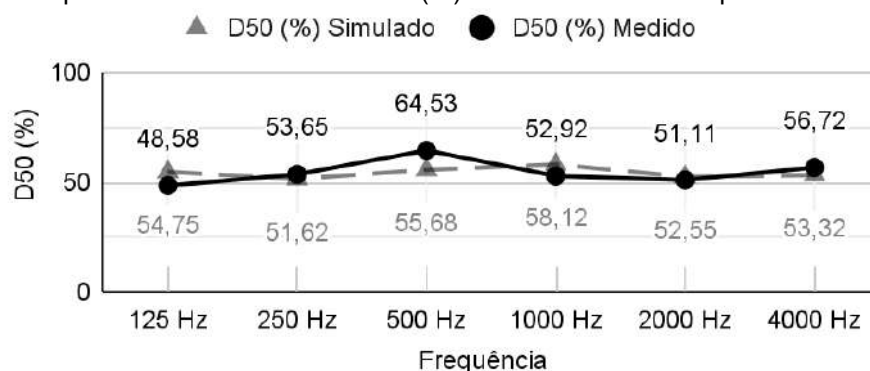
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Figura B-3 - Comparativo entre valores de C80 (dB) medidos e simulados para a sala de ensaio 01



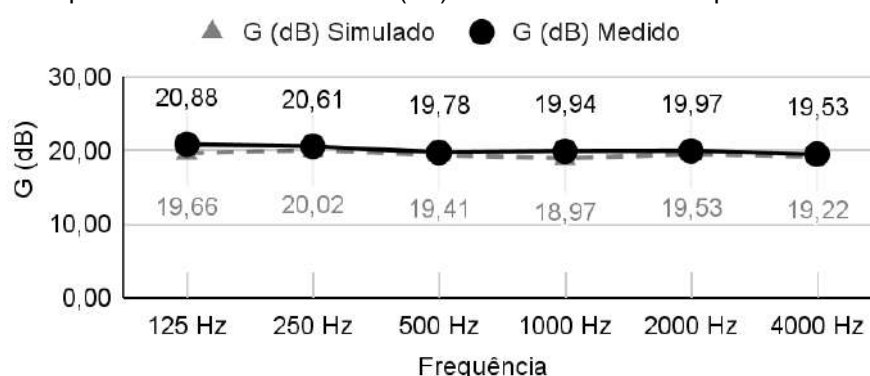
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Figura B-4 - Comparativo entre valores de D50 (%) medidos e simulados para a sala de ensaio 01



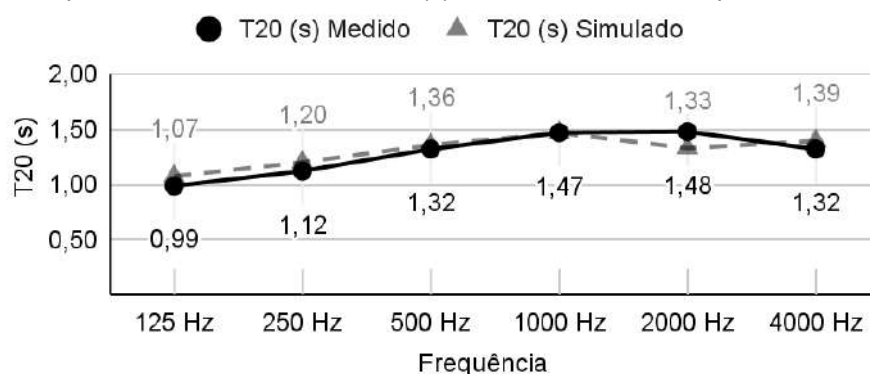
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Figura B-5 - Comparativo entre valores de G (dB) medidos e simulados para a sala de ensaio 01



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Figura B-6 - Comparativo entre valores de T20 (s) medidos e simulados para a sala de ensaio 02



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025

Figura B-7 - Comparativo entre valores de EDT (s) medidos e simulados para a sala de ensaio 02

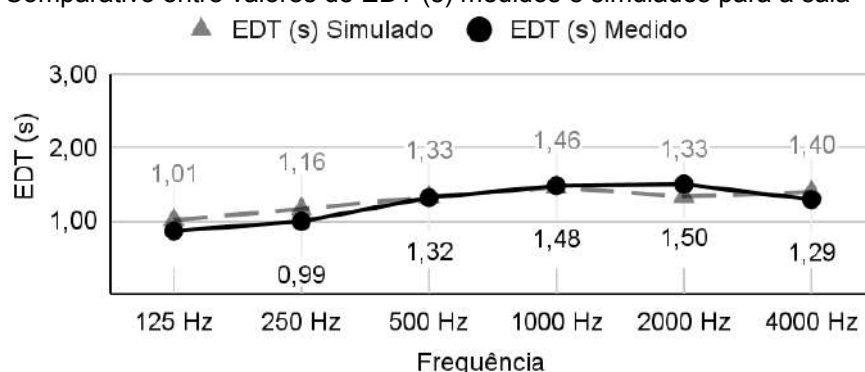


Figura B-8 - Comparativo entre valores de C80 (dB) medidos e simulados para a sala de ensaio 02

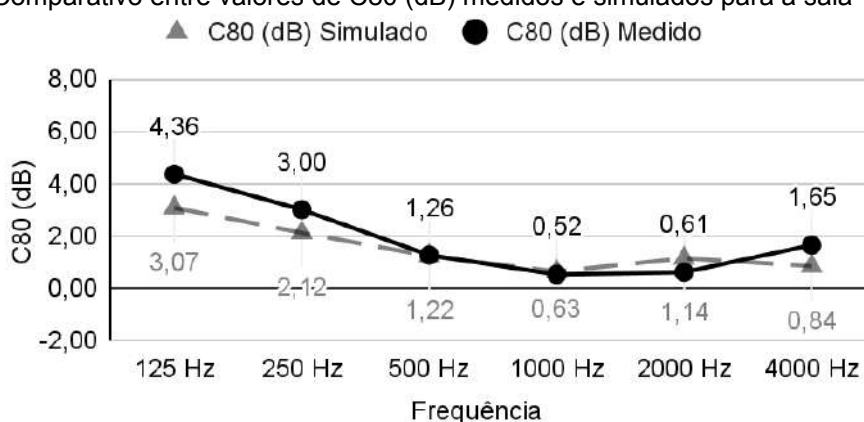


Figura B-9 - Comparativo entre valores de D50 (%) medidos e simulados para a sala de ensaio 02

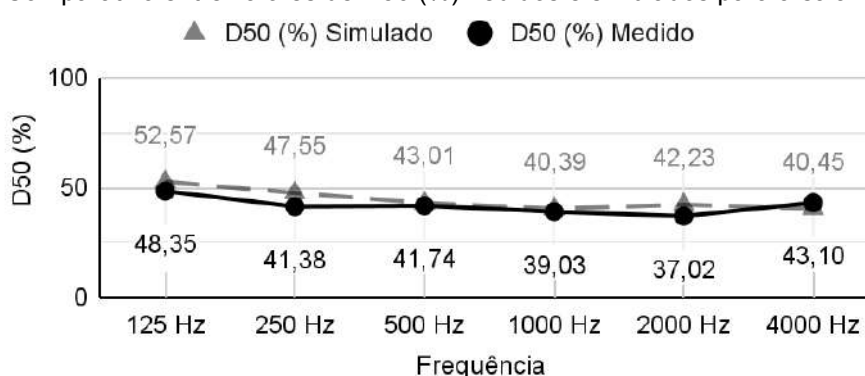


Figura B-10 - Comparativo entre valores de G (dB) medidos e simulados para a sala de ensaio 02

