ANÁLISE ACÚSTICA DE UMA SALA DE PRÁTICA MUSICAL

Victor Lima (1); Ana Carolina Cordeiro Correia Lima (2)
(1) Graduando em Arquitetura e Urbanismo, victorhcl.arq@gmail.com, Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, ICC Norte, FAU, 61 98249-5297
(2) Doutora, professora do Magistério Superior da FAU-UnB, ana.ana@unb.br, Campus Darcy Ribeiro, ICC Norte, FAU, 61 99284-6498

RESUMO
O conforto sonoro é um fator extremamente importante em projetos de conservatórios, escolas e departamentos de música. Neste contexto, este estudo trata da análise de problemas acústicos em pequenas salas de prática e ensaio para instrumentistas. Como metodologia, esta análise foi desenvolvida a partir de um estudo de caso realizado em uma sala de estudo do núcleo de piano da Escola de Música de Brasília (EMB), localizada em Brasília, Brasil. Os níveis internos de pressão sonora do ambiente foram medidos de acordo com a NBR 10152:2020 e o tempo de reverberação foi estimado de acordo com a fórmula de Norris-Eyring, utilizando o software Reverb. Os dados obtidos foram então utilizados para o desenvolvimento de estratégias de controle de ruído e tempo de reverberação aplicáveis ao ambiente analisado. Os resultados obtidos no recinto estudado, apesar de estarem dentro das recomendações normativas e da literatura, não foram considerados adequados devido à alta sensibilidade da tarefa desenvolvida no espaço.

Palavras-chave: tempo de reverberação, controle de ruídos, conforto sonoro, ensino musical.

ABSTRACT
Acoustic comfort is an extremely important factor in the design of conservatories, music schools and music departments. In this context, this study seeks to analyse acoustic problems in small practice and rehearsal rooms for instrumentalists. The method chosen for this analysis was a case study undertaken at one of the practice rooms located in the piano department at the Escola de Música de Brasília (Brasília Music School), located in Brasília, Brazil. The internal sound pressure levels were measured according to NBR 10152:2020 and the reverberation time was estimated according to the Norris-Eyring formula, using the Reverb software. The data obtained in the case study was then used to develop suitable noise and reverberation control strategies for the room in question. The results obtained in the study, although entirely within the ranges recommended by the literature and technical standards, were considered inadequate due to the highly sensitive nature of the work performed in the room.

Keywords: reverberation time, noise control, acoustic comfort, musical education.

1. INTRODUÇÃO

No projeto arquitetônico de qualquer conservatório, escola ou departamento de música, pequenas salas de prática e ensaio para instrumentistas são essenciais no programa de necessidades. Esses ambientes podem ser usados para prática, ensino e estudo individual, bem como para ensaios de pequenos grupos. Trata-se de ambientes de audição crítica, que precisam atender a uma variada gama de estilos musicais e comportar tanto instrumentos amplificados quanto acústicos – estes muitas vezes capazes de produzir sons bastante intensos em um vasto espectro de frequências, como pianos e instrumentos de percussão (DPA MICROPHONES, 2016). Posto isso, esses ambientes requerem condições acústicas adequadas que muitas vezes não são atingidas, seja por questões orçamentárias ou por não terem sido desenhados para esse fim (SCHMID, 2013).

A discussão dos fatores que influenciam a qualidade acústica da tipologia analisada pode ser encontrada, no âmbito brasileiro, em *Espaços para aprender e ensinar música: construção e adequação* (SCHMID, 2013). Além disso, a tipologia foi discutida internacionalmente na última década em artigos por Olsen e Rindel (2017), Pop et al. (2019), e Chou (2019). Outro trabalho que se destaca na área foi o desenvolvido pelo compositor e ex-professor da UnB Conrado Silva de Marco, intitulado *Análise acústica de auditórios musicais depois de construídos* (SILVA DE MARCO, 2009). Apesar do objeto de estudo dissimilar, sua metodologia de análise e propostas de solução em ambientes construídos muito influenciou a desta pesquisa. Dentre os fatores que influenciam o sucesso de um ambiente de audição crítica podem ser destacados o tempo de reverberação e o controle bem-sucedido de ruídos. O tempo de reverberação foi apontado por Brandão (2016, p. 551) como ponto de partida do projeto acústico de ambientes, sendo o parâmetro mais antigo e estudado do campo de acústica de edificações. Este é determinado pela absorção das superfícies e elementos internos do espaço, os quais podem impactar diretamente a habilidade de se ouvir e aprender as diferenças sutis de afinação, dinâmicas, articulações e equilíbrio que tanto importam à atividade musical (WENGER CORPORATION, 2022). Já a importância do controle de ruídos em um ambiente de audição crítica é auto evidente, porém não pode deixar de ser ressaltada. Como colocado por Schmid (2013, p. 24) "A falta de isolamento sonoro entre espaços internos e externos torna o edifício um agente causador do ruído, uma vítima do ruído, ou ambos.". No caso em questão, a falta de isolamento entre salas de estudo – que são frequentemente dispostas em bloco ou em linha, compartilhando paredes – provoca um incômodo cruzado entre os usuários.

Tendo em vista a importância de tais parâmetros para a tipologia de ambiente em foco, nota-se que a criação de um espaço acusticamente bem-sucedido depende sobretudo de um projeto bem concebido e corretamente executado. Quando a obtenção desse tipo de ambiente não se encontra de forma prioritária nas diretrizes projetuais, resta ao edifício construído ser adaptado por estratégias de tratamento acústico manifestamente remediativas e de efetividade limitada. Este último caso é o encontrado na Escola de Música de Brasília (EMB), onde questões orçamentárias e de racionalização construtiva levaram à criação de ambientes com estratégias de tratamento acústico e isolamento sonoro parcas ou inexistentes.

A EMB é uma das instituições de educação musical e profissional mais conceituadas da América Latina, e por ela já passaram diversos grandes nomes da música brasileira. É a única escola pública do Distrito Federal (DF) a oferecer o ensino de musicalização e profissionalizante em música. Foi fundada pelo maestro Levino de Alcântara em 11 de março de 1974, sendo mantida pelo Governo do Distrito Federal (BRASIL, 2017). O edifício da EMB se encontra às margens da Via L2 Sul, no Setor de Grandes Áreas, Quadra 602 (Figura 1). A escola é organizada em pequenos blocos destacados com até 11 salas de aula, dois banheiros e um pátio ou corredor central. Algumas das salas dos oito blocos de ensino instrumental podem ser emprestadas aos alunos para prática individual quando não estão sendo utilizadas para aulas.

Os blocos da escola são organizados de A a M, e é no Bloco D que se encontra o núcleo de piano (Figura 2). Uma das salas, próxima à entrada do bloco, foi tomada como caso típico para o desenvolvimento de uma análise de tempo de reverberação e níveis de pressão sonora.



Figura 1 - Localização da EMB em Brasília, DF. Fonte: adaptado da IDE-DF (2023).



Figura 2 - Vista aérea com o bloco D em destaque. Fonte: adaptado de Google Earth (2023).

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é analisar, por meio de medição *in loco* e cálculo pelo software Reverb, o tempo de reverberação e os níveis internos de pressão sonora de uma sala de aula e prática do núcleo de piano da Escola de Música de Brasília.

3. MÉTODO

A análise da sala em foco se deu em duas partes:

1. Medição e avaliação dos níveis internos de pressão sonora, de acordo com os métodos detalhados da *NBR 10152: Acústica - Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações* (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020);
2. Estimativa do tempo de reverberação pela fórmula de Norris-Eyring, calculada através do software Reverb.

Para ambas as etapas, os resultados encontrados foram comparados com os estabelecidos pelas normas aplicáveis ou literatura relevante e, em caso de inadequação, foram propostas possíveis soluções de tratamento acústico.

Todas as onze salas do bloco D possuem pelo menos um piano acústico vertical ou de 1/4 de cauda, banquetas e cadeiras de materiais e construções diversos, uma mesa de apoio e um arquivo de metal para o armazenamento de partituras e materiais didáticos. Algumas das salas possuem um segundo piano vertical ou teclado digital, uma poltrona ou cortinas e traçado regular. O ambiente escolhido para as análises deste trabalho foi a sala D-02, próxima à entrada do bloco (Figura 3).

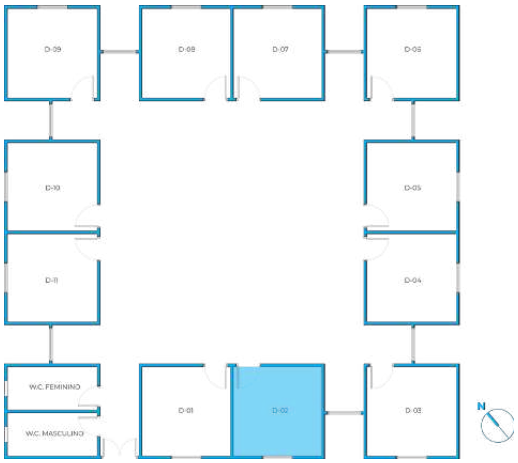


Figura 3 - Planta esquemática do bloco D, com sala D-02 em destaque. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.1. Medição dos níveis de pressão sonora

Para a primeira parte deste estudo de caso, os níveis de pressão sonora foram medidos e avaliados de acordo com os métodos detalhados da NBR 10152:2020. As fontes de ruído identificadas como mais relevantes ao ambiente foram:

- Alunos e funcionários praticando e conversando nos corredores externos ao bloco;
- O aparelho de ar-condicionado interno à sala e sua condensadora externa;
- O tráfego de carros nas vias mais próximas (a aproximadamente 75 m e 105 m da sala);
- A prática de alunos em outras salas, especialmente na D-01 (diretamente adjacente).

Dessas fontes, as que mais afetam o ambiente são 1) a prática de alunos na sala D-01; e 2) o aparelho de ar-condicionado – cuja evaporadora é do modelo Springer Midea 42MACA09S5, com capacidade nominal de 2,64 kW (9000 BTU/h) e vazão de ar de 497 m³/h. A medição foi efetuada ao fim da tarde de 13 de janeiro de 2023 – dia em que a escola não estava funcionando – para três situações comuns no dia a dia dos alunos:

1. Apenas ruído de fundo;
2. Com o aparelho de ar-condicionado ligado;
3. Com o piano sendo tocado na sala D-01 e o ar-condicionado desligado.

Em todas as situações havia um clarinetista praticando nas imediações do recinto, o que foi considerado como ruído de fundo por fazer parte do ambiente sonoro comum do local. A peça tocada no piano da sala D-01 para a situação 3 foi sempre *mezzo-forte* (moderadamente intensa), com a tampa aberta e explorando todas as oitavas do instrumento.

A sala foi medida com mobiliário usual: dois pianos de armário, duas banquetas, aparelho de ar-condicionado, arquivo de metal e mesa de apoio. Nas paredes, encontram-se 5 painéis absortivos, que serão relevantes à análise do tempo de reverberação. O ambiente mede 2,96 x 2,96 m, com 2,80 m de pé-direito (área = 8,76 m², volume = 24,53 m³). Os pontos de medição A, B e C (Figura 4) foram posicionados a uma distância maior que 1 m da porta, janela e paredes, com 0,7 m de distância entre si. As medições foram feitas em alturas diferentes para cada ponto – h_A = 1,63 m, h_B = 1,36 m e h_C = 1,07 m. Seguindo a convenção estabelecida na NBR 10152, as medições serão referenciadas por sua nomenclatura de ponto e situação - e.g. $L_{eq,30s,1kHz\ (1/1),\ A1}$ = medição no ponto A, situação 1. Os símbolos para níveis de pressão sonora utilizados são, como definidos pela NBR 10152: 1) $L_{Aeq,T}$, que representa o nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em A e integrado em um intervalo de tempo *T*; e 2) $L_{eq,T,fHz\ (1/1)}$, que representa o nível de pressão sonora contínuo equivalente na banda de 1/1 de oitava de frequência nominal *f* Hz e integrado em um intervalo de tempo *T*.

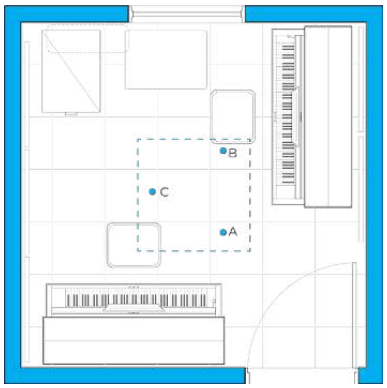


Figura 4 - Planta da sala D-02, com pontos de medição e afastamento de 1 m das paredes. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O sonômetro utilizado foi da marca 01dB, modelo FUSION. Este foi ativado remotamente, sem a presença de pessoas na sala, com as portas e janelas sendo mantidas fechadas. O instrumento foi calibrado em 17/12/2019 pelo laboratório membro da RBC Total Safety/Calilab – CAL 307 (Certificado: RBC3-10942-649, Nº de série: 12260). As calibrações de fábrica do equipamento, de 29/08/2019 (microfone) e 16/10/2019 (sonômetro) atendem às normas IEC 61094-4 e 61672-3, respectivamente. Para a situação 3, a porta e janela da sala D-01 também foram mantidas fechadas. O tempo de integração para todas as medições foi de aproximadamente 30 s, obtido pela média logarítmica de resultados integrados a cada 1 s. O L_{Aeq} foi obtido a partir da média logarítmica dos resultados em cada ponto (e.g. para a situação 1, dos resultados $L_{Aeq,32s,\ A1}$, $L_{Aeq,33s,\ B1}$ e $L_{Aeq,32s,\ C1}$).

As soluções construtivas das paredes, teto, forro e esquadrias serão abordadas mais profundamente na seção de resultados. Pode-se antecipar que as esquadrias utilizadas são de metal e vidro simples, com diversas frestas e sem estratégias maiores de isolamento sonoro. As paredes possuem ≈ 14 cm de espessura, de composição indeterminada – aparentam ser compostas por alvenaria de vedação revestida por plaquetas cerâmicas. As salas possuem forros individuais de gesso com espessura indeterminada, compartilhando um único telhado por sobre todo o bloco D.

3.2. Estimativa do tempo de reverberação

Na segunda parte do estudo, o tempo de reverberação da sala foi estimado pela fórmula de Norris-Eyring, calculada através do software Reverb – software livre de autoria de João Roberto Gomes de Faria, professor

da FAAC-UNESP. O tempo de reverberação é definido como o tempo necessário para que o som deixe de ser ouvido após a extinção da fonte sonora inicial, expresso em segundos (ABNT, 1992). A medição do tempo de reverberação (T_{60} ou RT_{60}) se dá pelo tempo necessário para que o nível de pressão sonora provocado por uma fonte impulsiva de determinado espectro de frequências no ambiente decaia 10^6 vezes, o que implica uma queda de 60 dB. Para sua estimativa, a fórmula de Norris-Eyring foi escolhida – esta é ligeiramente mais precisa que a de Sabine em salas menos vivas (STRUTT ACOUSTICS, 2022). O cálculo feito posteriormente com a fórmula de Sabine revelou resultados idênticos ou discrepantes em até 0.1 segundo para ambas as situações – valor que não altera a análise significantemente. Considerou-se a temperatura ambiente de 25°C e umidade relativa do ar de 70%. Os painéis absorvedores presentes na sala medem 2400 mm x 900 mm x 40 mm, com um espaçamento de 30 mm até a parede. Estes são de composição desconhecida, porém aparentam ser de construção artesanal. Assim, foram considerados como sendo compostos de um núcleo de lã mineral de média densidade, enquadramento em perfis metálicos e revestimento em tecido. Seus coeficientes de absorção foram adaptados de um modelo comercial de painel absorvedor de médios-agudos de baixo custo, com construção e dimensões similares. As superfícies consideradas para o cálculo e seus coeficientes de absorção estão listadas na Tabela 1. Os elementos absorvedores internos à sala (pessoas, mobiliário) não foram considerados para fins de cálculo.

Tabela 1 - Superfícies de revestimento consideradas no cálculo do T60.

Nome	Área [m²]	Material da superfície	Coeficientes de absorção por banda de oitava					
			125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Paredes Expostas	17.1	Tijolo cerâmico não vidrado pintado	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Painéis Absorvedores	10.8	Painel absorvedor em lã mineral de média densidade, revestido com tecido.	0.07	0.28	0.68	0.94	0.95	0.97
Piso	8.8	Ladrilho cerâmico com superfície lisa (SBI)	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Forro	8.8	Forro de gesso acartonado com ou sem enchimento (Bistafa)	0.1	0.08	0.05	0.03	0.03	0.03
Vidros	3	Vidro simples, superfície - 3 mm (SBI)	0.1	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02
Porta	2.2	Aço (M. Egan)	0.05	0.1	0.1	0.1	0.07	0.02

4. RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados das medições e estimativas. Serão também apresentadas possíveis soluções remediativas de tratamento acústico.

4.1. Medição dos níveis de pressão sonora

Para as três situações mensuradas, foram obtidos os valores exibidos na Tabela 2, juntamente aos valores de referência estabelecidos para salas de música na NBR 10152 (ABNT, 2020, p. 13). As curvas NC das três situações são mostradas na Figura 5.

Tabela 2 - Resultados das medições para as três situações analisadas.

Situação	1	2	3	Valores de referência
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

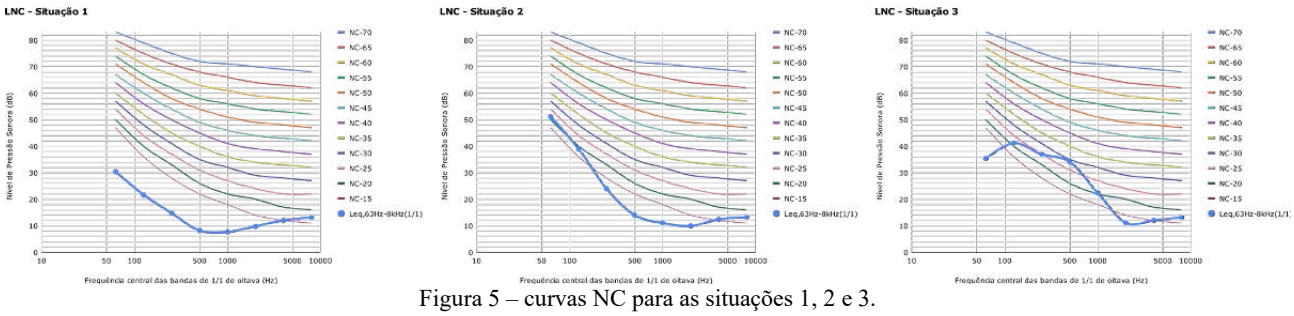


Figura 5 – curvas NC para as situações 1, 2 e 3.

A sala atende às determinações da norma e às recomendações da literatura (EGAN, 2007, p. 233) para todos os casos. No entanto, percebe-se que as situações 2 e 3 apresentam níveis de L_{Aeq} 8 dB e 11 dB acima do ruído de fundo. Percebe-se, também, que o ar-condicionado gera um ruído bastante intenso nas regiões mais graves, enquanto quase todas as frequências fundamentais do piano (a saber, 27.5 Hz/A0 a 4186 Hz/C8)

são transmitidas na situação 3. As frequências muito agudas, como esperado, não são transmitidas – estas são facilmente refletidas pelas paredes ou absorvidas pelos painéis da própria sala D-01. Apesar do atendimento à norma, o ruído intrusivo é uma considerável fonte de incômodo aos usuários do ambiente devido à alta intensidade e similaridade com o som que é produzido dentro da própria sala. Aqui importa notar que a qualidade acústica de um ambiente não pode ser julgada por mero atendimento a exigências normativas. Como colocado no guia de planejamento para instalações musicais em escolas da empresa norte-americana Wenger (2022): "O aprendizado [...] é realizado através da audição crítica; o sucesso do projeto é medido por quão bem os professores e estudantes podem ouvir neste ambiente especial. Cada aspecto das áreas de prática e ensaio deve ser projetado para promover a audição clara." (WENGER, 2022, p. 4, tradução nossa).

Tomando em consideração os fatores apresentados, considerou-se o ambiente insuficiente em seu controle de ruídos, incitando uma análise mais profunda de suas estratégias de controle atuais e possíveis melhorias que poderiam ser implementadas. Os caminhos de transmissão sonora entre dois ambientes, como explicado anteriormente, são múltiplos e requerem estratégias variadas de controle. Para o ambiente em estudo podem ser listados:

1. Transmissão pelas paredes;
2. Vazamento pelas janelas e portas;
3. Vazamento pelo forro;
4. Transmissão pelo piso (vibrações estruturais).

O primeiro caminho trata da incidência direta do som sobre a divisória comum às salas e sua subsequente transmissão ao outro ambiente. Para que seja proposta uma melhoria, devem ser analisados dois aspectos da divisória: sua massa e sua composição. Todas as paredes do bloco possuem ≈ 14 cm de espessura, de composição indeterminada. Pela espessura, supõe-se que a parede é composta por alvenaria de vedação revestida por plaquetas cerâmicas simulando tijolos aparentes. Sabe-se que as plaquetas utilizadas não são maciças (Figura 6), mas não se sabe exatamente qual tipo de alvenaria foi utilizada.

Para aumentar o nível de perda de transmissão da parede já construída existem estratégias de aumento de sua massa e complexidade, que pode ser obtida por preenchimento com substrato isolante ou grauteamento, porém esse procedimento é impossível após a construção. Existem as alternativas de aumento de camadas apresentadas por Egan (2007) e Long (2014), com alto nível de perda de transmissão, porém com espessuras elevadas, utilizadas em paredes duplas desacopladas. Tal estratégia seria desaconselhada para ambientes pequenos, pois diminuiria a área útil disponível. Já a alternativa apresentada por Egan (2007, p. 213) na Figura 7 seria adaptável à situação, e consiste em selar hermeticamente uma das faces com filler de látex ou tinta epóxi, acrescentando placas de gesso acartonado apoiadas em sarrafos de madeira ou metal, com fibra de vidro ou mineral de baixa densidade na cavidade (> 2.5 cm).



Figura 6 – Furo no revestimento em uma das paredes do Bloco D. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

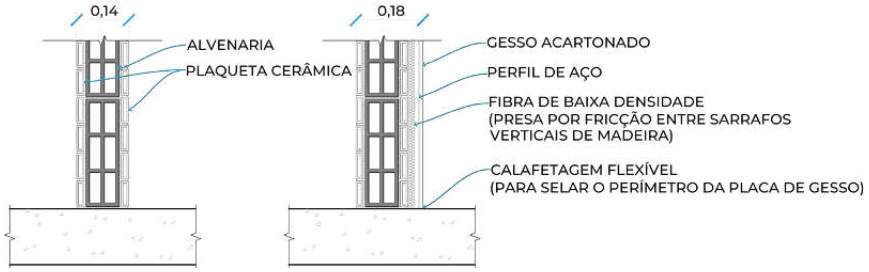


Figura 7 – Antes e depois – possível melhoria de uma parede de alvenaria. Fonte: adaptado de Egan (2007).

O próximo caminho de transmissão merece atenção especial na análise por se tratar de um ponto fraco no invólucro do ambiente. As portas e janelas utilizadas no ambiente são simples, e não possuem as características necessárias para se obter isolamento acústico apropriado (Figura 8 e Figura 9). A porta utilizada é oca ou semioca, de metal, com um visor de vidro simples e nenhuma fresta vedada – sendo que a

fresta inferior possui uma abertura de ≈ 2 cm. A janela é basculante, de vidro simples e perfil metálico, também sem frestas vedadas.

Neste caso, é cabível a substituição da porta por um modelo de folha maciça ou de composição proprietária equivalente com vedação em todo o perímetro e visor de folha dupla ou folha simples de vidro laminado com espessura ≥ 25 mm (EGAN, 2007, p. 184, 220-222; LONG, 2014, p. 375). A parte superior da porta possui uma folha de vidro fixa voltada ao pátio interno, que não serve qualquer propósito de ventilação ou iluminação significativo o suficiente para justificar sua presença. A continuação da alvenaria neste caso poderia aumentar significativamente a perda de transmissão total da parede (EGAN, 2007, p. 188, 189). A janela poderia ser substituída por um modelo com folha dupla de vidros com espessuras diferentes, com a maior cavidade possível entre as duas folhas. Aqui, um cuidado especial deve ser tomado para que as folhas 1) não possuam espessuras idênticas; e 2) não possuam um espaço pequeno entre si. Essa configuração, devido a efeitos de ressonância, possui uma perda de transmissão menor que as de vidro simples (EGAN, 2007, p. 223; LONG, 2014, p.339). Batente, montante, peitoril, verga, caixilharias e guarnição, assim como todo o perímetro da folha móvel devem ser completamente vedados com selantes flexíveis, e as folhas devem ser assentadas em Neoprene. O perímetro das cavidades em todas as caixilharias deve ser revestido com material absortivo (EGAN, 2007, p. 223-224; LONG, 2014, p. 338). O vidro utilizado pode ser laminado com uma camada de PVB com espessura entre 0,7 e 1,4 mm (LONG, 2014, p. 332, 339).



Figura 8 – Fresta na porta da sala D-02. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).



Figura 9 – Detalhe da janela da sala D-02. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O terceiro caminho a ser analisado é o de vazamento pelo forro. Como demonstrado na Figura 10 e Figura 11, o bloco possui uma grande cobertura em telhas calhetão destacada dos volumes das salas, com um forro individual em cada ambiente. Enquanto a composição do forro é desconhecida, sabe-se que a ausência de uma laje sólida e pesada - contra a qual a parede seria encunhada - permite a passagem flanqueada do som pelo entreforro de uma sala para outra (EGAN, 2007, p. 218; LONG, 2014, p. 564-567). Uma solução possível, caso a estrutura metálica do edifício permita, seria a construção de uma laje maciça em concreto armado, laje em steel deck ou laje seca que ofereça perda de transmissão equivalente em espectro amplo - tomando-se o devido cuidado para que o encunhamento seja perfeitamente isolado em caso de encontro da parede com vãos e superfícies irregulares (e.g. LONG, 2014, p. 521). O novo forro deve ser fabricado em material absortivo (EGAN, 2007, p. 219). Long (2014) recomenda placas de fibra de vidro de 25 mm de espessura (p. 764).



Figura 10 – Vista do entreforro das salas. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).



Figura 11 – Vista do entreforro das salas. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O quarto caminho de transmissão se dá pelo sistema de piso comum às duas salas. Apesar de ser possivelmente o caminho de transmissão menos direto e relevante em face aos anteriores, é possível que algum ruído de impacto seja transmitido de forma horizontal ou que as frequências mais graves dos pianos gerem vibrações mecânicas que podem ser transmitidas pelos rodízios ao chão. As soluções para este tipo de transmissão envolvem a construção de um contrapiso ou laje secundária elevada em isoladores de Neoprene, com bordas desacopladas das paredes (EGAN, 2007, p. 246-248; LONG, 2014, p. 428). Tal solução seria custosa e complexa, envolvendo não só a construção nos pares de salas como o renivelamento de todo o bloco e subsequente adaptação de acessibilidade ao nível do resto da escola. Sendo assim, foi incluída aqui apenas para propósito de integridade da análise. Um sumário das possíveis adaptações em resposta aos três últimos caminhos de transmissão pode ser observado em corte na Figura 12.

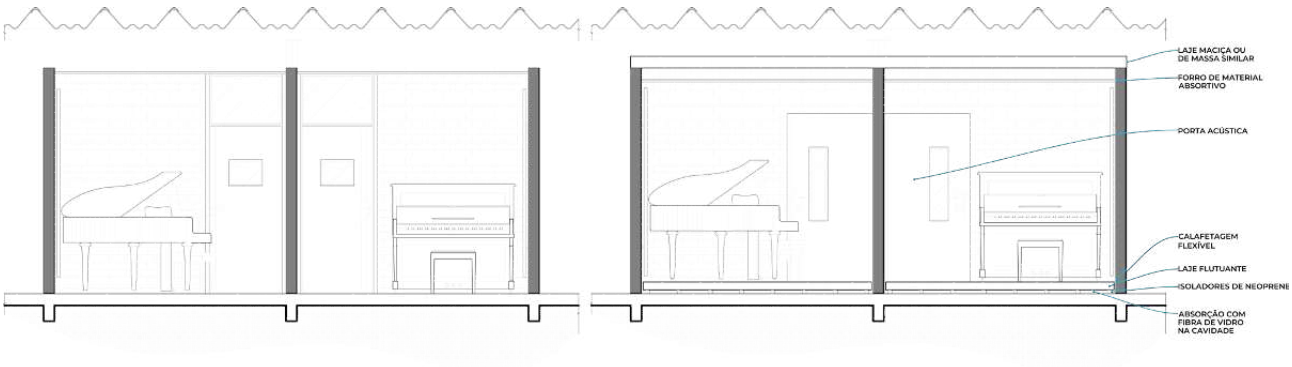


Figura 12 – Salas D-01 e D-02, antes e depois com possíveis adaptações. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.2. Estimativa do tempo de reverberação

Os resultados de T_{60} calculados para cada banda de oitava estão demonstrados na Figura 13. Nota-se a maior reverberação dos graves – fenômeno esperado devido à presença exclusiva de elementos absorvedores de médios-agudos no ambiente.

O T_{60} estimado da sala pode ser considerado como adequado de acordo com a literatura, que indica tempos ótimos de reverberação a 500 Hz entre 0,3 e 1,2 segundos, como demonstrado na Tabela 3. Para efeitos de redução da intensidade sonora, um baixo tempo de reverberação é bem-vindo na tipologia estudada devido ao baixo volume cúbico (WENGER, 2022, p. 10). Ademais, os estilos musicais comumente praticados no ambiente do estudo de caso não englobam música sinfônica, coral ou litúrgica, tornando favorável a conservação do tempo de reverberação próxima a valores mais baixos. Vale notar, ainda, que essa tipologia de ambiente não só pode atender a diversos estilos musicais como também ser utilizada para a fala em momentos de aula.

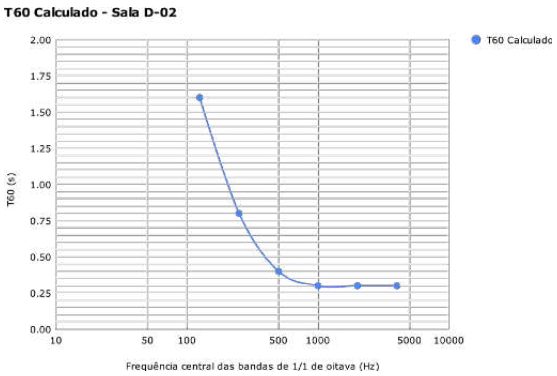


Figura 13 – T60 calculado por banda de oitava.

Tabela 3 – T60 (500 Hz) recomendado para diversas tipologias de sala de prática. Fonte: Adaptado de Schmid (2013)

Autor		Pequenas salas de prática	Prática de piano	Ensaio individual
Lane e Mikeska (1955)	mín.	0,4	-	-
	máx.	0,5		
Blankenship, Fitzgerald e Lane (1955)	mín.	-		0,4
	máx.			0,5
Cohen (1992)	mín.	0,3	0,4	-
	máx.	0,4	0,5	
Seep et al. (2000)	mín.	-	-	0,6
	máx.			1,2
BB93 (2003)	mín.			-
	máx.	0,8		

A pronunciada reverberação dos graves não é necessariamente um problema - sendo inclusive desejável no projeto de auditórios (NAVE, 2017) – e seu tempo de reverberação não é particularmente alto, considerando-se o uso musical. Caso se considere, no entanto, que a diferença brusca entre o tempo de reverberação dos graves e agudos acaba por desequilibrar demasiadamente o som da sala – esta pode ser suavizada com a introdução de absorvedores afinados de membrana (COX, 2004, p. 159). Com a inserção de três absorvedores de membrana afinados em 125 Hz e a retirada de um dos absorvedores porosos (Tabela 4), obtém-se os resultados demonstrados na Figura 14. O posicionamento dos absorvedores de membrana nos pontos de maior pressão sonora pode ser observado na Figura 15.

Tabela 4 - Superfícies de revestimento consideradas no cálculo do T60.

Nome	Área [m²]	Material da superfície	Coeficientes de absorção por banda de oitava					
			125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Paredes Expostas	16	Tijolo cerâmico não vidrado pintado	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Absorvedores Porosos	8.6	Painel absorvedor em lã mineral de média densidade, revestido com tecido.	0.07	0.28	0.68	0.94	0.95	0.97
Absorvedores de Membrana	1.1	Absorvedor de Membrana Afinado em 125 Hz.	0.85	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Piso	8.8	Ladrilho cerâmico com superfície lisa (SBI)	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Forro	8.8	Forro de gesso acartonado com ou sem enchimento (Bistafa)	0.1	0.08	0.05	0.03	0.03	0.03
Vidros	3	Vidro simples, superfície - 3 mm (SBI)	0.1	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02
Porta	2.2	Aço (M. Egan)	0.05	0.1	0.1	0.1	0.07	0.02

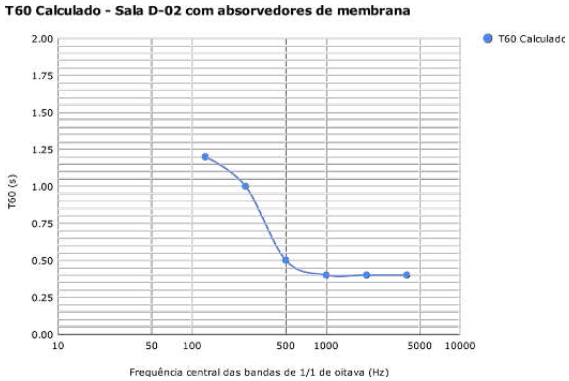


Figura 14 – T60 calculado por banda de oitava.

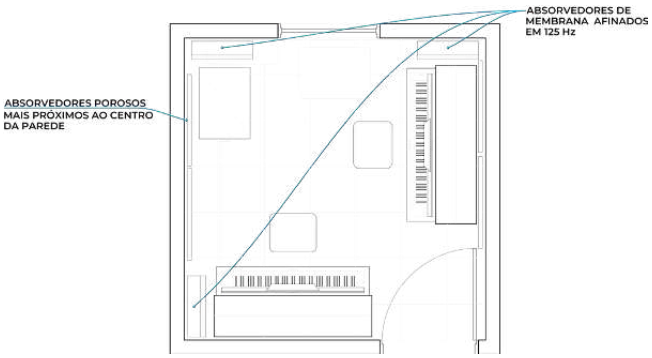


Figura 15 – Posicionamento dos absorvedores de membrana. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5. CONCLUSÕES

Enquanto este trabalho se voltou especificamente às áreas de controle de ruído e otimização do tempo de reverberação, com suas soluções projetuais empregando estratégias remediativas em um ambiente construído, espera-se que estas sirvam para ilustrar a importância da consideração integrada do condicionamento e isolamento acústico na fase de projeto, evitando que os problemas observados no estudo de caso se repitam em futuras construções. Também se espera que este trabalho tenha demonstrado o equívoco em se tomar a mera adequação normativa como palavra final em análises de qualidade acústica, posto que tal abordagem reducionista ignora a importância da percepção subjetiva dos usuários em ambientes de audição crítica. A análise dos resultados dos níveis de pressão sonora – quando contrastados com a vivência do espaço e seu uso – revelam a existência de brechas normativas que podem ser exploradas mais a fundo em estudos futuros por meio de entrevistas com os usuários e medições realizadas sob diferentes condições.

Para a continuação deste trabalho, visando englobar todos os possíveis fatores que afetam o projeto da tipologia analisada – tendo em vista não só uma análise do ambiente construído como a possível criação de uma cartilha de diretrizes projetuais para ambientes de prática musical – seriam discutidas ainda estratégias de dimensionamento para a obtenção de um volume cúbico ideal e uma distribuição modal adequada, além de considerações a respeito do projeto de sistemas de ventilação central e isolamento vibracional para equipamentos mecânicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12179**: Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, 1992.

BRANDÃO, Eric. **Acústica de Salas**: projeto e modelagem. São Paulo: Blücher, 2016.

BRASIL. Ministério Da Educação. **Escola de Brasília é referência no mundo em educação musical**. Dia do Estudante, 11 ago. 2017. Disponível em: http://archive.today/bPkTF. Acesso em: 15 jan. 2023.

CHOU, Yu-Tien. **Practice Room Acoustics**: What Matters to Musicians About the Practice Space. 2019. 47 f. Dissertação, Division of Science, Bard College, Annandale-on-Hudson, Nova Iorque, 2019.

COX, T. J.; D'ANTONIO, P. **Acoustic Absorbers and Diffusers**: Theory, Design and Application. Londres: Spon Press, 2004.

DPA MICROPHONES. **Acoustical Characteristics of Musical Instruments**. Mic University, 03 abr. 2016. Disponível em: http://archive.today/X3iB0. Acesso em: 03 jan. 2023.

EGAN, M. D. **Architectural Acoustics**. Fort Lauderdale: J. Ross Publishing, 2007.

LONG, Marshall. **Architectural Acoustics**. 2. ed. Oxford: Academic Press, 2014.

NAVE, C. R. **Longer Reverberation Times for Low Frequencies**. HyperPhysics Concepts, 2017. Disponível em: http://archive.today/dsTVE. Acesso em: 08 fev. 2023.

OLSEN, J. G.; RINDEL, J. H. The acoustics of rooms for music rehearsal and performance –the Norwegian approach. In: Boston acoustics '17, 3., 2017, Boston. **Proceedings…** Boston: Acoustical Society of America and the European Acoustics Association, 2017.

POP, C.; OSMAN, R.; KNIGHT, J. Music practice rooms: Ambitions, limitations and practical acoustic design. In: International Symposium on Music Acoustics, 2019, Detmold, Alemanha. **Proceedings…** Detmold: ISMA, 2019.

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.

SILVA DE MARCO, Conrado. **Análise acústica de auditórios musicais depois de construídos**. 2009. 115 p. Dissertação (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009.

STRUTT ACOUSTICS. **Reverberation Time**. Strutt Help, 20 jan. 2022. Disponível em: http://archive.today/KQphm. Acesso em: 03 jun. 2023.

WENGER CORPORATION. **Planning Guide for School Music Facilities**. Owatonna, Minnesota: Wenger Corporation, 2022.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à direção, supervisão administrativa e secretaria da Escola de Música de Brasília pela cessão do espaço e apoio durante as medições.