XXXI ENCONTRO SOBRAC
SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA
Ouro Preto - MG 2026

Análise da qualidade acústica de uma sala de aula em escola municipal de Aracaju/SE

Souza, A. C. A.[1]; Barbosa, A. O.[2]; Guedes, I. C. M.[3]; Sena, T. R. R.[4]

[1] Departamento. de Arquitetura e Urbanismo, UFS, Laranjeiras, Sergipe, Brasil, annacarolinaamp@academico.ufs.br
[2] Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, UFS, São Cristóvão, Sergipe, Brasil, alinebozinh@hotmail.com
[3] Departamento de Arquitetura e Urbanismo, UFS, Laranjeiras, Sergipe, Brasil, italomontalvao@academico.ufs.br
[4] Departamento de Fonoaudiologia, UFS, São Cristóvão, Sergipe, Brasil, trsena@academico.ufs.br

Resumo

Este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade acústica de uma sala de aula em uma escola municipal de Aracaju/SE, considerando parâmetros de desempenho acústico. A metodologia incluiu medições de níveis de pressão sonora e tempo de reverberação, além de simulações acústicas no *software* I-Simpa para análise do cenário existente e de cenários com adequação. Os resultados mostraram que os níveis de pressão sonora ultrapassaram os limites normativos, alcançando valores incompatíveis com o conforto e desempenho acústico para a atividade de ensino e aprendizagem. Os parâmetros Tempo de Reverberação (TR) e Definição (D_{50}) do cenário existente estiveram fora dos seus intervalos de referência, podendo acarretar dificuldades na transmissão clara da voz e prejuízos no processo de ensino e aprendizado. As simulações avaliaram duas propostas: a primeira consistiu na substituição do forro de PVC por painéis absorventes de lã de poliéster (PET); a segunda combinou esses painéis nas regiões perimetrais com uma faixa central refletora em gesso acartonado no forro e um painel absorvente na parede de fundo, com redução do volume da sala. As adequações contribuíram para o controle da reverberação e a melhoria da inteligibilidade da fala, evidenciando a viabilidade das intervenções para a qualificação acústica do ambiente.

Palavras-chave: condicionamento acústico, inteligibilidade da fala, simulação computacional.

Acoustic quality assessment of a classroom in a public school in Aracaju, Brazil

Abstract

This study aimed to evaluate the acoustic quality of a classroom in a public school in Aracaju, Brazil, based on objective acoustic performance parameters. The methodology comprised sound pressure level and reverberation time measurements, as well as acoustic simulations using the I-Simpa software to assess both the existing condition and proposed acoustic treatment scenarios. The results showed that sound pressure levels exceeded the limits established by the applicable standards, reaching values incompatible with the acoustic comfort required for teaching and learning activities. The Reverberation Time (RT) and Definition (D_{50}) values obtained for the existing condition were not in accordance with the recommended reference ranges, indicating potential impairments to speech transmission and the teaching-learning process. The simulations evaluated two intervention strategies. The first consisted of replacing the PVC ceiling with polyester (PET) wool sound-absorbing panels. The second combined these panels along the perimeter of the ceiling with a central reflective gypsum plasterboard strip and an additional sound-absorbing panel on the rear wall, while also reducing the room volume. Both interventions contributed to controlling reverberation and improving speech intelligibility, demonstrating the feasibility of these strategies for enhancing the acoustic quality of the classroom.

Keywords: *acoustic conditioning, speech intelligibility, computer simulation.*

1. Introdução

A qualidade acústica em ambientes escolares tem recebido crescente atenção nas últimas décadas em razão de sua influência direta sobre o processo de ensino-aprendizagem, o bem-estar dos usuários e a saúde ocupacional dos profissionais da educação. Em ambientes destinados predominantemente à comunicação oral, como salas de aula, a inteligibilidade da fala constitui um requisito essencial para o desenvolvimento das atividades pedagógicas. Nesse contexto, o ruído excessivo configura-se como um dos principais fatores limitantes do desempenho acústico desses espaços, pois compromete a compreensão da fala, reduz a concentração dos estudantes e aumenta o esforço vocal dos professores, favorecendo o desenvolvimento de distúrbios vocais [1].

A ABNT NBR 10152 [2], principal referência brasileira para avaliação dos níveis de ruído em ambientes internos, recomenda valores de RL_{Aeq} = 35 dB, RL_{ASmax}= 40 dB e RL_{NC} = 30 para salas de aula, aceitando-se uma tolerância de até 5 dB para RL_{Aeq} e RL_{ASmax} e até 5 para RL_{NC} . Entretanto, estudos evidenciam que os níveis de ruído em salas de aula podem ultrapassar os limites recomendados, comprometendo o conforto acústico e a inteligibilidade da fala durante as atividades escolares [3]. Em situações mais críticas, foram registrados níveis de pressão sonora entre 71 e 98 dB em salas de aula, evidenciando cenários de elevada exposição ao ruído e distantes dos parâmetros recomendados pelas normas técnicas [4].

Os impactos da inadequação acústica extrapolam o desconforto auditivo e atingem diretamente a saúde dos profissionais da educação. Professores constituem uma das categorias ocupacionais mais suscetíveis ao desenvolvimento de distúrbios vocais em decorrência da elevada demanda vocal e da necessidade de competir continuamente com o ruído residual em ambientes escolares [5]. Estudos nacionais apontam prevalência de queixas vocais entre 47% e 80% [6], enquanto Valente *et al*. [7] verificaram que 81% dos professores avaliados em Cuiabá (MT) apresentavam algum tipo de alteração vocal. Entre os sintomas mais frequentes destacam-se disfonia, rouquidão, fadiga vocal, dores cervicais e afastamentos do trabalho [8]. Assim, o ruído ambiental deve ser compreendido não apenas como um problema de conforto acústico, mas também como um fator de risco ocupacional que compromete a saúde docente e a qualidade do processo de ensino-aprendizagem [9].

Além do controle das fontes sonoras, a qualidade acústica de salas de aula está diretamente relacionada às características arquitetônicas do ambiente. Espaços destinados à comunicação oral devem ser concebidos de acordo com sua finalidade, considerando aspectos como volume, geometria, materiais de revestimento e isolamento acústico, uma vez que esses fatores influenciam a distribuição da energia sonora, o comportamento das reflexões e a inteligibilidade da fala. Dessa forma, o ambiente construído deve proporcionar condições que favoreçam o conforto acústico, preservem a saúde auditiva dos usuários e promovam o adequado desempenho das atividades educacionais [10, 11]. Nesse sentido, parâmetros acústicos, como o tempo de reverberação, são fortemente influenciados pela configuração espacial e pelas propriedades acústicas dos materiais, exercendo impacto direto sobre a clareza da fala e a eficiência da comunicação entre professores e estudantes [9].

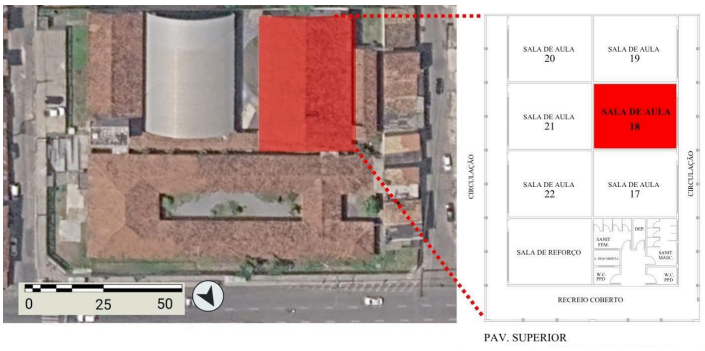
A avaliação da qualidade acústica em ambientes escolares pode ser realizada por meio de abordagens complementares. Sob a perspectiva objetiva, utilizam-se parâmetros físicos como o nível de pressão sonora (NPS), o tempo de reverberação (TR) e o índice de definição da fala (D_{50}), capazes de caracterizar quantitativamente o desempenho acústico do ambiente. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade acústica de uma sala de aula em uma escola municipal de Aracaju/SE, por meio da análise de parâmetros objetivos de desempenho acústico, buscando identificar as principais inadequações do ambiente e subsidiar propostas de intervenção capazes de promover melhores condições de conforto acústico, comunicação oral e ensino-aprendizagem.

2. Materiais e métodos

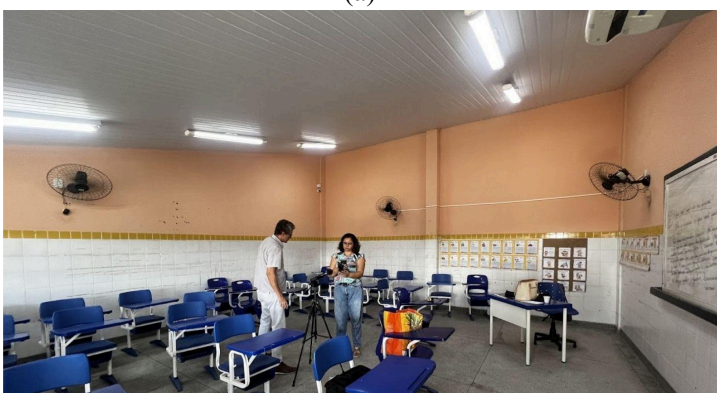
O desenvolvimento do trabalho envolveu as seguintes etapas: caracterização física da sala de aula (objeto de estudo) através de levantamento cadastral, coleta de dados acústicos (medições de níveis de pressão sonora, gravação de resposta impulsiva para obtenção dos parâmetros acústicos - TR e D_{50}), modelagem acústica-geométrica e simulação da situação existente e de cenários hipotéticos para adequação acústica. Os dados obtidos experimentalmente subsidiaram a calibração do modelo acústico-geométrico, possibilitando a análise comparativa entre os cenários supracitados e os valores de referência dos parâmetros de qualidade acústica de salas. A seguir são apresentados o objeto de estudo e os procedimentos metodológicos adotados neste trabalho.

2.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo deste trabalho foi a sala de aula 18 da Escola Municipal Oviêdo Teixeira, situada no bairro Olaria, na cidade de Aracaju, Sergipe. Doravante, o ambiente será denominado "Sala 18". Este artigo tem como objetivo analisar as condições acústicas da Sala 18 e propor melhorias para essa tipologia de sala de aula (Figura 1). Este estudo integra pesquisas de iniciação científica[1] e de mestrado acadêmico[2] voltadas à avaliação da qualidade acústica de salas de aula e de suas possíveis implicações para a saúde dos professores.



(a)



(b)

Figura 1: (a) Imagem aérea da escola Oviêdo Teixeira, adaptada do Google Earth (à esquerda) e planta baixa do pav. superior (à direita) - Sala 18 em destaque e (b) Foto interna da Sala 18 (acervo do grupo de pesquisa).

A Sala 18 possui 8,00 m de largura e 6,40 m de profundidade, totalizando uma área de 51,20 m² e volume de 159,00 m³, com pé-direito variável de 2,20 m a 4,00 m. A ocupação típica desta sala é de, aproximadamente, 40 alunos. A sala de aula é equipada com quadro de giz, monitor interativo digital,

[1] Pesquisa de Iniciação Científica "Qualidade acústica e percepção do ruído pelo professor em ambientes de salas de aula".
[2] Mestrado acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais (PPGECIA/UFS) desenvolvido pela segunda autora deste artigo.

três ventiladores de parede e cadeiras com mesa acoplada. As superfícies internas são constituídas por piso em granilite, paredes em alvenaria rebocada e pintada, revestidas com material cerâmico até 1,40 m de altura do piso, forro de policloreto de vinila (PVC), esquadrias de vidro com estrutura de alumínio e porta de madeira (Figura 1).

2.2 Coleta de dados acústicos

Nesta etapa, realizaram-se medições de níveis de pressão sonora (NPS) e gravação de Respostas Impulsivas (RIs) para determinação dos parâmetros acústicos adotados neste estudo (TR e D_{50}), cujos procedimentos são descritos a seguir. Nas medições de NPS, foram definidos três pontos para aquisição dos dados, os quais foram distribuídos de acordo com a ABNT NBR 10152 [2]. Os equipamentos usados nessas campanhas de medição acústica foram: sonômetro digital (modelo SoundTrack LxT) e calibrador acústico (modelo CAL 200), ambos da marca Larson Davis e classe 1 de precisão. O sonômetro foi apoiado em tripé (altura de 1,20 m em relação ao piso), ajustado na escala de compensação "A" e modo *Slow*. O sonômetro foi ainda configurado para medir NPS nas bandas de 1/1 oitava, na escala linear "Z" de ponderação, cujos dados foram posteriormente usados na análise da curva L_{NC}. O tempo de cada medição foi de 1 minuto, sendo realizados três registros por ponto, em condição de uso típico da sala, ou seja, com a porta e as janelas abertas, e os três ventiladores ligados. Durante as medições de NPS, apenas três pessoas, responsáveis pela execução do ensaio, estavam presentes na sala. Ressalta-se que optou-se também por realizar um registro de NPS em cada ponto na situação de sala com os ventiladores desligados, a fim de verificar a influência do ruído desses equipamentos no ruído residual da sala investigada.

As gravações das Respostas Impulsivas (RIs) foram executadas com base na ABNT NBR ISO 3382-2 [12], método de engenharia, considerando duas posições para a fonte de excitação sonora e três pontos receptores, perfazendo um total de seis combinações de Fonte-Receptor (F-M). Essas gravações foram feitas com a porta e as janelas abertas (situação de uso normal da sala), em período noturno (fora das atividades normais da escola), com o intuito de buscar melhor condição de relação sinal - ruído. Ainda nesse sentido, os ventiladores foram mantidos desligados durante essas gravações. Os materiais e equipamentos utilizados nas gravações das RIs foram: bolas de assopro (látex nº 16), um microfone (modelo ECM 8000, marca: Behringer) apoiado em tripé, cabo para microfone balanceado blindado XLR – Amphenol, interface de áudio Usb Solid State Logic SSL 12, calibrador acústico (marca: Larson Davis, mod. Cal-200, classe 1), notebook e *software* livre e de código aberto (Audacity). Para o pós-tratamento dos sinais de áudios das RIs foi usado o *software* Room Eq Wizard (REW 5.31). A Figura 2 (a) mostra a disposição dos pontos de medição de NPS e a Figura 2 (b) indica as posições adotadas para a fonte de excitação sonora e dos pontos receptores nas gravações das RIs.

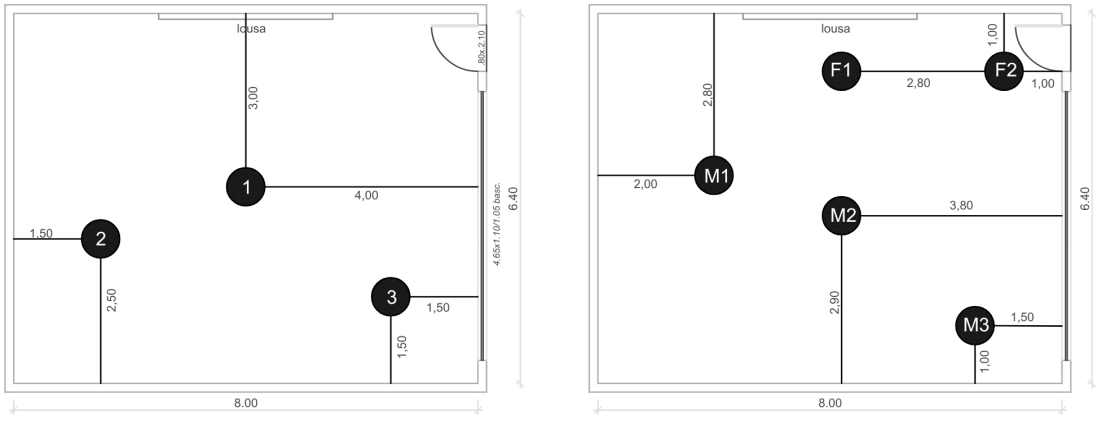
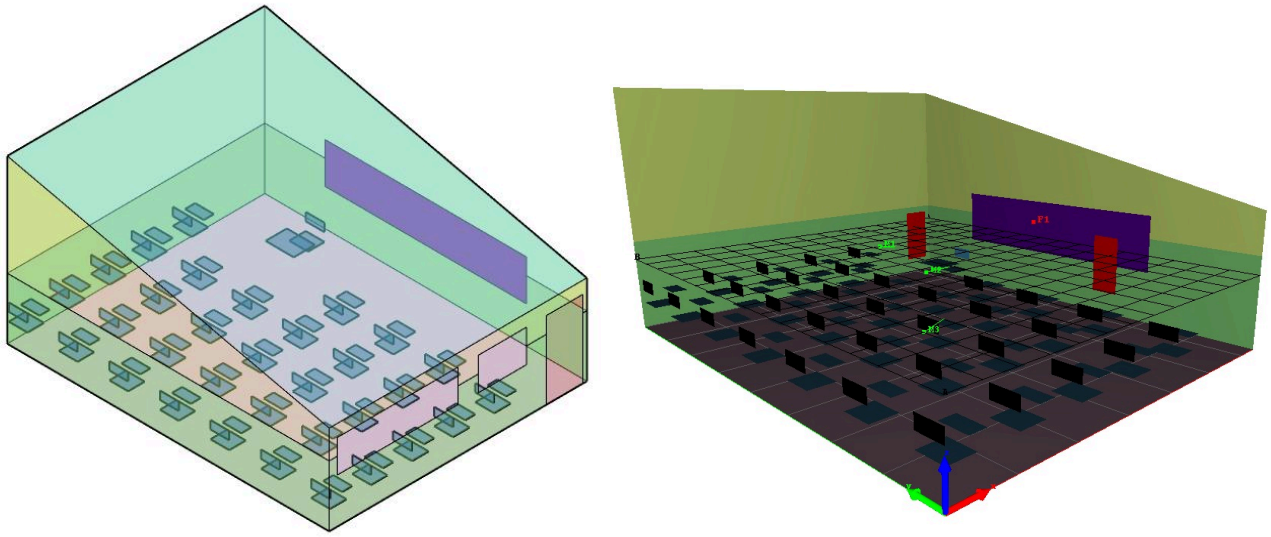


Figura 2: (a) Localização dos pontos de medição de NPS e (b) Localização das fontes de excitação sonora e dos pontos receptores nas gravações das RIs.

2.3 Modelagem e simulação acústica

A etapa de modelagem e simulação acústica foi desenvolvida a partir dos dados levantados em campo. Inicialmente, a geometria da sala foi modelada no *software* SketchUp® (versão gratuita), seguindo as recomendações da literatura quanto à simplificação dos elementos construtivos. Dessa forma, piso, paredes, forro, porta/janelas (vãos abertos) e mobiliários foram representados por superfícies planas, reduzindo a complexidade do modelo para minimizar possíveis erros nas simulações.

Em seguida, o modelo geométrico foi importado para o *software* de simulação acústica I-Simpa, onde foram inseridas as duas fontes sonoras (F1 e F2), posicionadas na região frontal da sala (região típica de permanência do professor) e os três pontos receptores (M1, M2 e M3), distribuídos na área ocupada pelos estudantes (Figuras 2 e 3). Também foram atribuídas às superfícies do modelo, as propriedades acústicas dos seus materiais constituintes, ou seja, os valores de coeficientes de absorção sonora e de espalhamento extraídos da literatura especializada e em especificações técnicas de fabricantes.



(a) (b)

Figura 3: (a) Modelo geométrico da Sala 18, criado no SketchUp e (b) Modelo acústico-geométrico no I-Simpa.

Os coeficientes de absorção sonora adotados para os materiais convencionais são apresentados no Tabela 1, enquanto os coeficientes de espalhamento foram definidos de acordo com o tipo de superfície, seguindo o procedimento adotado por Andrade [13].

Tabela 1: Valores dos coeficientes de absorção sonora das superfícies internas por material.

Superfícies	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Referência
Piso (granilite)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	[14]
Paredes (alvenaria rebocada)	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	[14]
Revestimento cerâmico	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	[14]
Forro de PVC	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	[15]
Mesas e cadeiras	0,02	0,02	0,04	0,06	0,06	0,08	[14]
Portas e janelas (vãos abertos)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	[16]

Nas simulações acústicas, adotou-se o método de cálculo “energético”, o número de partículas por fonte sonora de 1.000.000, segundo orientações do manual do I-SIMPA e raio de recepção de 0,31 m para os microfones. Quanto aos parâmetros ambientais inseridos, têm-se: Temperatura do ar (Tar) = 28,7 ºC, Umidade relativa (UR) = 84,7 %, Pressão atmosférica (P_{atm}) = 101.325 Pa, sendo estes dados colhidos durante as gravações das RIs na sala.

Durante a etapa de calibração do modelo, verificou-se que os coeficientes de absorção disponíveis na literatura não reproduziram satisfatoriamente o valor de tempo de reverberação (T_{20}) obtido experimentalmente. Dessa forma, optou-se por ajustar os coeficientes de absorção do forro de PVC, por se tratar de um dos elementos do modelo com potencial de incerteza devido a presença de um colchão de ar entre o forro e a cobertura, característica construtiva que pode aumentar a absorção sonora nas baixas e médias frequências. Os ajustes foram realizados de forma gradual até que os resultados simulados apresentassem concordância com os valores medidos em campo. Os coeficientes finais adotados para o forro são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores dos coeficientes de absorção sonora modificados.

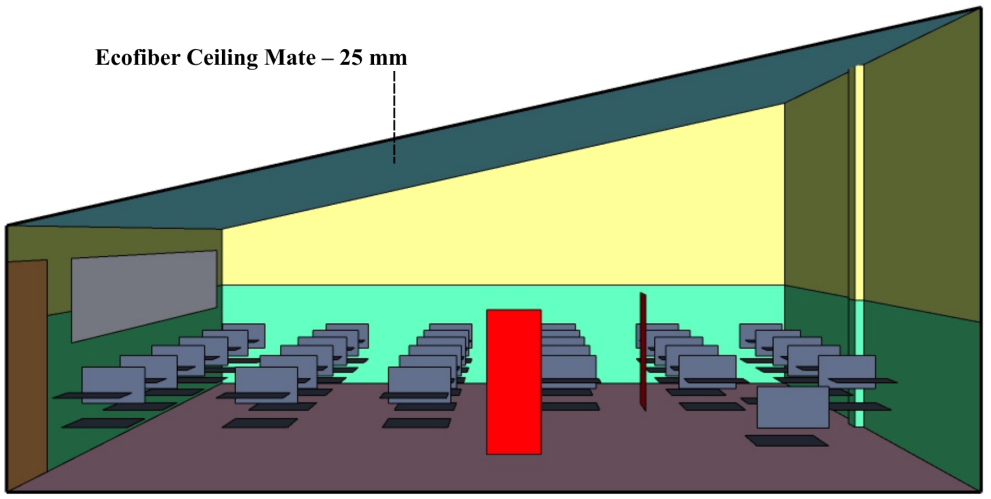
Superfície	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Referência
Forro de PVC	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	[15]
Forro de PVC (ajustado)	0,02	0,10	0,06	0,04	0,07	0,07	Os autores

Após a calibração do modelo acústico, foram simulados dois cenários de intervenção com vistas à melhoria do condicionamento acústico da sala. A análise do cenário existente evidenciou elevados tempos de reverberação e indicou que o forro exercia influência importante sobre o comportamento acústico do ambiente em razão de sua extensa área superficial. Dessa forma, as propostas de adequação concentraram-se inicialmente nessa superfície. A Adequação 1 consistiu na substituição do forro de PVC existente por painéis absorventes de lã de poliéster (PET), modelo Ecofiber Ceiling Mate (25 mm), mantendo-se inalteradas as demais características geométricas e construtivas da sala, mantendo o seu volume original de 159,00 m³.

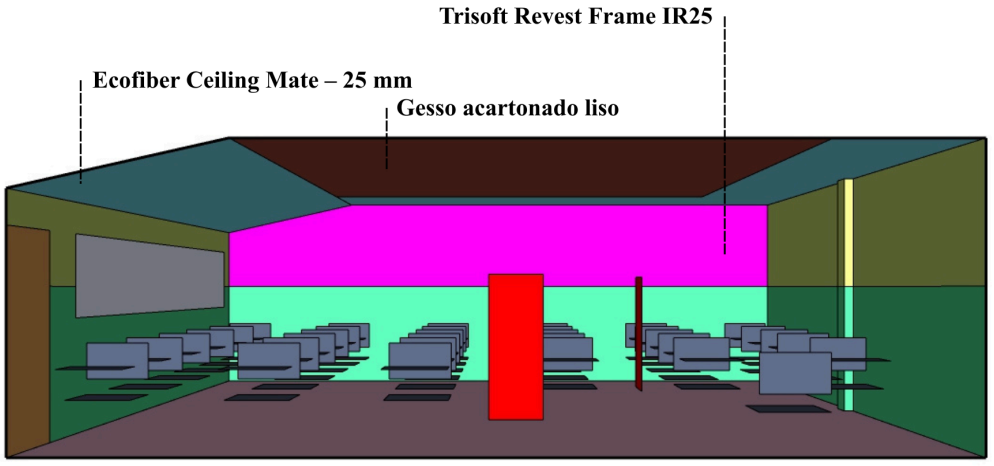
Já a Adequação 2 consistiu na reconfiguração do sistema de forro, com redução do pé-direito e do volume da sala (volume de 131,20 m³), adotando uma composição mista de materiais com aplicação de painéis absorventes Ecofiber Ceiling Mate (25 mm) nas regiões perimetrais e uma faixa central em gesso acartonado liso (a partir da parede frontal da sala), destinada para atuar como superfície refletora. Adicionalmente, foi instalado um painel absorvente Trisoft Revest Frame IR25 na parede de fundo da sala, com o objetivo de atenuar as reflexões tardias provenientes dessa superfície. Essa configuração buscou equilibrar superfícies absorventes e refletoras, favorecendo o controle da reverberação, a distribuição da energia sonora no ambiente e o reforço sonoro da voz do professor, proporcionado pela faixa central em gesso acartonado.

Os coeficientes de absorção sonora dos materiais foram obtidos das especificações técnicas dos fabricantes, enquanto que os coeficientes de espalhamento foram definidos com base em Andrade [13], conforme já mencionado. Os resultados dos parâmetros acústicos (T_{20} e D_{50}) dos cenários de adequação acústica foram comparados com os do cenário existente, e com valores de referência para verificação do desempenho acústico da sala de aula após as intervenções propostas.

Os modelos acústico-geométricos elaborados para os dois cenários de adequação são apresentados na Figura 4, permitindo visualizar as intervenções propostas e as diferenças entre as configurações simuladas.



(a)



(b)

Figura 4: Modelos acústico-geométricos dos cenários de adequação simulados - (a) Adequação 1, com substituição do forro de PVC por painéis absorventes Ecofiber Ceiling Mate (25 mm) e (b) Adequação 2, com reconfiguração do sistema de forro por meio da combinação de painéis absorventes Ecofiber Ceiling Mate (25 mm), faixa central em gesso acartonado liso e painel absorvente Trisoft Revest Frame IR25 na parede de fundo.

3. Resultados e discussão

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos, optando-se por distribuir o conteúdo em duas subseções que abordarão a avaliação dos níveis de pressão sonora (NPS) e a avaliação do condicionamento acústico do cenário existente e das intervenções propostas na Sala 18.

3.1 Avaliação dos níveis de pressão sonora (NPS)

A Tabela 3 apresenta os valores dos descritores acústicos $L_{\mathrm{Aeq,1min}}$ e L_{ASmax} obtidos das medições de níveis de pressão sonora nas situações com os ventiladores ligados e desligados. Os resultados desses descritores acústicos foram comparados com os valores de referência estabelecidos pela ABNT NBR 10152 [2] para ambientes educacionais do tipo sala de aula, a fim de avaliar as condições de nível sonoro residual do ambiente interno da Sala 18, observadas nos contextos das medições acústicas realizadas nesse estudo, sendo um indicativo da realidade vivenciada por professores e alunos durante as atividades acadêmicas nesta sala de aula.

Tabela 3: Valores de L_{Aeq} e L_{ASmax} da Sala 18, com ventiladores ligados e desligados.

Situação	$L_{Aeq,1min}$ (dB)	L_{ASmax} (dB)
Ventiladores ligados	68	75
Ventiladores desligados	60	65

Com base nos resultados da Tabela 3, fica evidente que, mesmo com os ventiladores desligados, a Sala 18 apresentou valores dos descritores acústicos ($L_{Aeq,1min}$ e L_{ASmax}) bem superiores aos limites aceitáveis de RL_{Aeq} = 35 dB e de RL_{ASmax} = 40 dB estabelecidos pela ABNT NBR 10152 [2]. Este resultado pode prejudicar o processo de ensino e aprendizagem na medida que dificultam a inteligibilidade da fala, bem como, pode impactar a saúde do professor, que precisará elevar o nível de sua voz, e dos próprios alunos.

Esta situação crítica é corroborada com a análise do gráfico de curva NC (Figura 5), a partir dos dados medidos de níveis de pressão sonora (NPS) em bandas de frequência de 1/1 oitava (espectro sonoro) mostrados na Tabela 4. Os resultados desta análise indicam que o ruído residual da Sala 18 é caracterizado pela curva L_{NC} 65 para uma referência normativa de RL_{NC} 30.

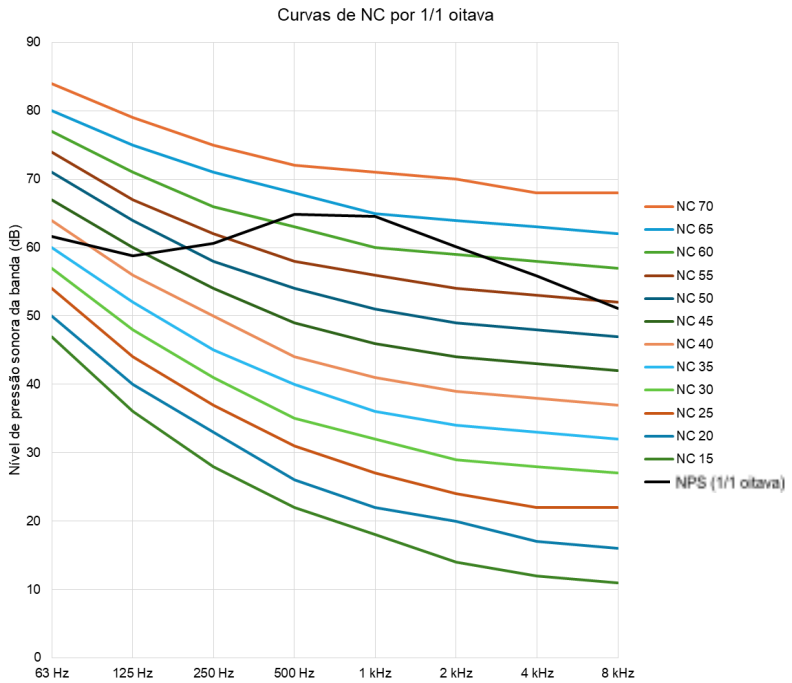


Figura 5: Gráfico para verificação do L_{NC} da Sala 18.

Tabela 4: Valores de NPS (dB) em função da frequência (1/1 oitava) e valor de L_{NC}

63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	L_{NC}
62	59	61	65	65	60	56	51	65

3.2 Avaliação do condicionamento acústico

A avaliação do condicionamento acústico da Sala 18 foi realizada com base nos parâmetros acústicos objetivos T_{20} e D_{50}, comparando os resultados obtidos experimentalmente com os valores de referência recomendados na literatura técnica. No Brasil, não há uma norma específica que estabeleça limites para o tempo de reverberação em salas de aula. Assim, adotou-se como referência a ABNT NBR 12179 [17], que permite determinar o tempo ótimo de reverberação em 500 Hz em função do volume e do uso da sala. Para salas destinadas à palavra falada, tomando-se a sala de conferência como

referência por sua similaridade de uso com a sala de aula, e considerando o volume da Sala 18, o tempo ótimo de reverberação é de aproximadamente 0,60 s. Segundo a literatura técnica, esse valor é aproximadamente mantido constante nas bandas de oitava superiores a 500 Hz, enquanto, nas bandas de 125 e 250 Hz, aplicam-se fatores de correção, resultando em TR ótimos de 0,87 e 0,69 s, respectivamente [14, 16]. Neste trabalho, a análise do condicionamento acústico considerou especialmente as bandas de oitava de 500 Hz e 1 kHz por serem representativas da faixa de frequências relevantes para a fala. Em relação à D_{50}, Brandão [18] observa que este parâmetro representa a razão entre a energia contida nos primeiros 50 ms e a energia total da Resposta Impulsiva (RI), indicando que os seus valores devem ser superiores a 0,50 (50%). Dessa forma, considerou-se, neste trabalho, o critério de $D_{50} > 0,50$ (50%) para a avaliação desse parâmetro.

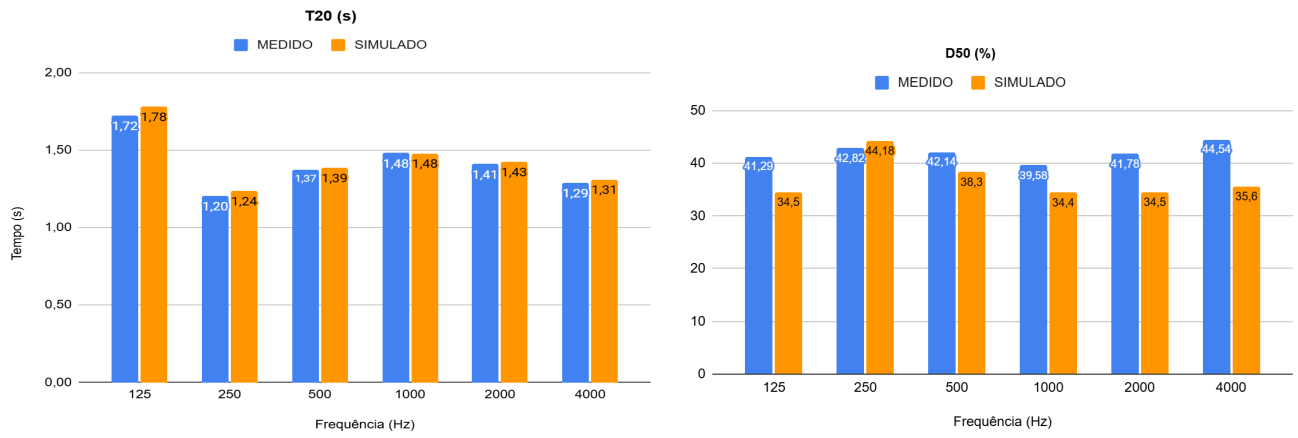
A Tabela 5 reúne os valores de T_{20} e D_{50} da Sala 18 por banda de oitava, correspondentes às médias dos resultados obtidos desses parâmetros nas seis combinações fonte–receptor das gravações das RIs.

Tabela 5: Valores médios de T_{20} e D_{50} da Sala 18 por banda de oitava, obtidos das gravações das RIs.

Parâmetro acústico	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
T_{20} (s)	1,72	1,20	1,37	1,48	1,41	1,29
D_{50} (%)	41,29	42,82	42,14	39,58	41,78	44,54

A Tabela 5 evidencia que os valores medidos de T_{20} superam os valores de referência supracitados em todas as bandas de frequência, enquanto os de D_{50} permanecem abaixo do recomendado pela literatura. Esses resultados evidenciam o desempenho acústico insatisfatório da Sala 18 e apontam para a necessidade de proposição de cenários para adequação do condicionamento acústico da sala.

A Figura 6 apresenta a comparação entre os valores medidos e simulados do cenário existente para os parâmetros T_{20} e D_{50}, nas bandas de frequência de 125 Hz a 4 kHz. Neste estudo, foram adotados como critérios de concordância diferenças relativas máximas de 5% para T_{20} e diferenças absolutas máximas de 5 pontos percentuais para D_{50}. O parâmetro T_{20} atendeu ao critério em todas as bandas, com diferenças de 0,00% a 3,49%, enquanto o D_{50} apresentou concordância apenas em 250 e 500 Hz. Considerando a concordância obtida, especialmente, para o T_{20}, parâmetro relevante na caracterização acústica de salas, o modelo foi considerado adequado para as análises subsequentes das propostas de adequação acústica.



(a) (b)

Figura 6: (a) Comparativo entre valores de T_{20} medidos e simulados e (b) Comparativo entre valores de D_{50} medidos e simulados.

Após a validação do modelo acústico, foram simulados dois cenários de intervenção, correspondentes às adequações 1 e 2, com o objetivo de melhorar o condicionamento acústico da sala. A Figura 7 apresenta a comparação dos valores de tempo de reverberação (T_{20}) simulados obtidos para o cenário existente e para os dois cenários de adequação acústica.

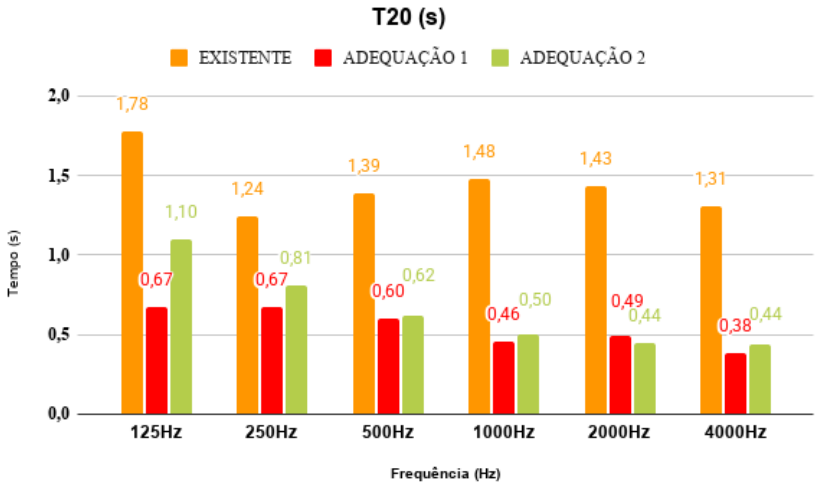


Figura 7: Comparativo entre T_{20} simulado no cenário existente e nas adequações 1 e 2.

Observa-se que ambas as propostas de adequação promoveram redução do tempo de reverberação em todas as bandas de frequência analisadas quando comparadas ao cenário existente. Na Adequação 1, os valores de T_{20} variaram de 0,67 s, na banda de 125 Hz, a 0,38 s, em 4 kHz, apresentando comportamento decrescente ao longo do espectro de frequências. Na Adequação 2, os valores oscilaram entre 1,10 s, em 125 Hz, e 0,44 s, nas bandas de 2 kHz e 4 kHz, também evidenciando redução significativa da reverberação em relação à situação existente. Essa redução aproxima o ambiente dos valores recomendados pela ABNT NBR 12179 [17] para salas de aula, indicando melhoria das condições acústicas do ambiente, especialmente, nas frequências centrais da voz humana (500 Hz e 1 kHz). Já a Figura 8 apresenta os valores simulados de definição da fala (D_{50}) obtidos para os três cenários analisados.

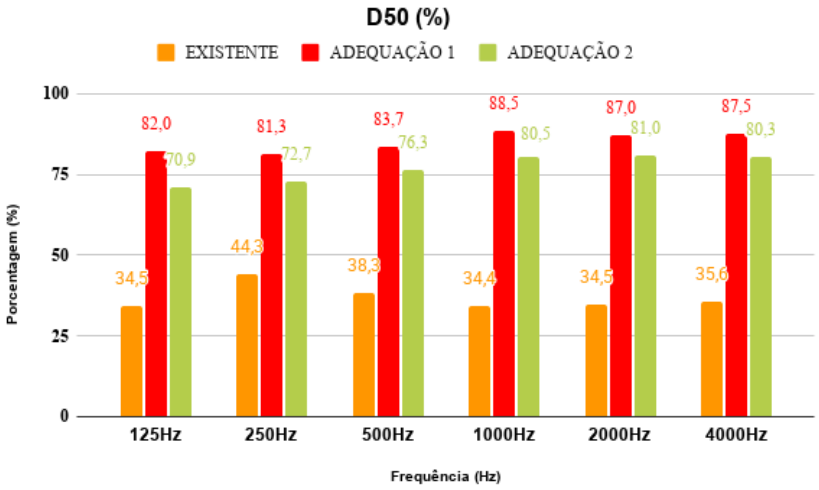


Figura 8: Comparativo entre D_{50} (%) simulado no cenário existente e nas adequações 1 e 2.

Os resultados do parâmetro D_{50} indicam que ambas as propostas de adequação proporcionaram aumento significativo da definição da fala em relação ao cenário existente, com valores superiores ao

limite mínimo de 50 % para ambientes de ensino. Na Adequação 1, os valores de D_{50} variaram entre 82,0 %, na banda de 125 Hz, e 87,5 %, em 4 kHz, enquanto na Adequação 2 oscilaram entre 70,9 % e 81,0 % nas mesmas bandas de frequência. Esses resultados evidenciam que as duas intervenções promoveram aumento da proporção de energia sonora útil em relação à energia total recebida pelos receptores, contribuindo para a melhoria da inteligibilidade da fala no ambiente. Entretanto, a Adequação 2 representa uma opção de projeto que possibilita melhor equilíbrio e posicionamento adequado das superfícies absorvedoras e refletoras na sala de aula, obedecendo as diretrizes da acústica geométrica.

4. Conclusões

Este estudo avaliou a qualidade acústica de uma sala de aula de uma escola da rede municipal de Aracaju/SE, com base em medições de níveis de pressão sonora, do tempo de reverberação e da definição da fala, e propôs cenários de adequação acústica por modelagem e simulação acústica computacional. A partir dos resultados, foi possível concluir que, os níveis de pressão sonora ultrapassaram os limites recomendados pela ABNT NBR 10152 [2], sendo os ventiladores existentes na sala um dos principais contribuintes na elevação do ruído residual.

Além disso, observou-se que os valores de tempo de reverberação (T_{20}) da situação existente mostraram-se superiores aos recomendados para ambientes destinados à comunicação oral, enquanto os índices de definição da fala (D_{50}) permaneceram abaixo dos valores de referência, evidenciando condições acústicas inadequadas para o processo de ensino-aprendizagem.

A modelagem acústica permitiu avaliar duas propostas de intervenção, contemplando diferentes estratégias de condicionamento acústico por meio da reconfiguração do sistema de forro, ampliando a sua capacidade de absorção sonora em ambas as propostas de adequação, e promovendo melhor equilíbrio e posicionamento de materiais absorvedores e refletoras nas superfícies internas da sala (forro e parede de fundo), seguindo diretrizes da acústica geométrica, na segunda proposta de adequação. Por esta razão, a segunda proposta se mostra mais recomendada em termos de solução projetual, ainda que ambas tenham demonstrado redução dos tempos de reverberação (T_{20}) e aumento dos valores de D_{50} em todas as bandas de frequência analisadas, contribuindo para melhor inteligibilidade da fala e desempenho acústico do ambiente.

5. Agradecimentos

Agradecemos à COPES/POSGRAP/UFS pela bolsa remunerada de iniciação científica da primeira autora deste artigo.

Referências

1. GUIDINI, R. F.; BERTONCELLO, F; ZANCHETTA, S.; DRAGONE, M. L. S. Correlações entre ruído ambiental em sala de aula e voz do professor. *Revista da Sociedade Brasileira de Fonoaudiologia*, 2012, doi: 10.1590/S1516-80342012000400006. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1516-80342012000400006.

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 10152: Acústica – Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações*. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

3. GONÇALVES, V. de S. B.; SILVA, L. B. da; COUTINHO, A. S. Ruído como agente comprometedor da inteligibilidade de fala dos professores. *Produção*, v. 19, n. 3, p. 466–476, 2009, doi: 10.1590/S0103-65132009000300005. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0103-65132009000300005.

4. KLOCK, M. C. L.; MALHEIROS, T. S.; MODESTO, Z.; FREITAS, M. C.; KLOCK, B. A. T. Qualidade de vida acústica em ambientes escolares – um desafio à educação moderna. *Divers@ Revista Eletrônica Interdisciplinar*, Matinhos, v. 9, n. 1–2, p. 14–19, jan./dez. 2016, doi: 10.5380/diver.v9i1/2.50073. Disponível em: https://doi.org/10.5380/diver.v9i1/2.50073.

5. ANGELILLO, M.; MAIO, G. D.; ANGELILLO, G. D. N.; BARILLARI, U. Prevalence of occupational voice disorders in teachers. *Journal of Preventive Medicine and Hygiene*, Ospedaletto, v. 50, n. 1, p. 26–32, 2009. PMID: 19771757.

6. PIZOLATO, R. A.; MIALHE, F. L.; CORTELLAZZI, K. L.; AMBROSANO, G. M. B.; CORNACCHIONI-REHDER, M. I. B.; PEREIRA, A. C. Avaliação dos fatores de risco para distúrbios de voz em professores e análise acústica vocal como instrumento de avaliação epidemiológica. *Revista CEFAC*, v. 15, p. 957-966, 2013, doi:10.1590/S1516-18462013000400025. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1516-18462013000400025.

7. VALENTE, A. M. S. L.; BOTELHO, C.; SILVA, A. M. C. da. Distúrbio de voz e fatores associados em professores da rede pública. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, São Paulo, v. 40, n. 132, p. 183–195, 2015, doi: 10.1590/0303-7657000093814. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0303-7657000093814.

8. BEHLAU, M.; ZAMBON, F.; GUERRIERI, A. C.; ROY, N. Epidemiology of voice disorders in teachers and nonteachers in Brazil: prevalence and adverse effects. *Journal of Voice*, Philadelphia, v. 26, n. 5, p. 665.e9–665.e18, 2012, doi: 10.1016/j.jvoice.2011.09.010. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2011.09.010.

9. DAGA, C. C. *Avaliação do conforto acústico em ambientes de ensino e aprendizagem:* estudo de caso de salas de aula do Instituto Central de Ciências – ICC. 2019. 106 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

10. DIAZ, M.; GONZALEZ-CACERES, A.; ATTIA, S. *Multicriteria Design: Optimizing Thermal, Acoustic, and Visual Comfort and Indoor Air Quality in Classrooms*. In: MARÍN-RESTREPO, L.; *et al.* (eds.). Removing Barriers to Environmental Comfort in the Global South. Green Energy and Technology. Cham: Springer, p. 435–449, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-24208-330. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-24208-3_30.

11. YANG, W.; JEON, J. Y. Design strategies and elements of building envelope for urban acoustic environment. *Building and Environment*, v. 182, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107121. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107121

12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. A*BNT 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.

13. ANDRADE, F. H. *Avaliação acústica dos ambientes de restauração do Instituto Politécnico de Bragança – Campus de Santa Apolónia*. 2020. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2020.

14. BISTAFA, S. R. *Acústica aplicada ao controle do ruído*. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

15. ANSAY, S.; ZANNIN, P. H. T. Using the parameters of definition, D50, and reverberation time, RT, to investigate the acoustic quality of classrooms. *Canadian Acoustics*, v. 44, n. 4, p. 6–11, 2016. Disponível em: https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/2653.

16. CARVALHO, R. P. *Acústica arquitetônica*. 2. ed. Brasília: Thesaurus, 2010.

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

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