



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Avaliação de condições acústicas relacionadas a ruído de tráfego em sala de aula virtual

Alves, L. R.¹; Araújo, B. C. D.²

^{1,2} Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil,
luciana_ralves@hotmail.com, dantasbianca@gmail.com

Resumo

O projeto arquitetônico de uma escola é multidisciplinar, mas deve ter por objetivo auxiliar a função do ensino-aprendizado. Alunos desempenham suas funções cognitivas de melhor maneira quando a sala de aula é otimizada acusticamente. Para auxiliar arquitetos e pesquisadores, recursos de realidade virtual podem ser utilizados para simular condições reais. O objetivo deste trabalho é avaliar como se dá a percepção de usuários ao ruído de tráfego em diferentes condições acústicas de uma sala de aula virtual. Para tal, utilizou-se uma sala de aula em ambiente virtual e um teste cognitivo de repetição seriada a fim de avaliar o desempenho dos participantes em salas de aula com condições simuladas de boa e má qualidade acústica e isolamento sonoro combinadas, de modo que se possa analisar qual requisito acústico influencia mais quanto à perturbação causada pelo ruído residual. Foi aplicado também um breve questionário sobre a percepção do participante a fim de avaliar qualitativamente o resultado dos testes, principalmente nível de incômodo. As salas cujo isolamento sonoro estava dentro da recomendação normativa tiveram melhores resultados e os usuários não perceberam diferença significativa no tempo de reverberação entre as condições boa e ruim, visto que o sinal era um ruído de tráfego contínuo.

Palavras-chave: acústica de salas de aula, teste de escuta, teste cognitivo, auralização, realidade virtual.

PACS:

43. 50. Qp; 43. 55; 43. 55. Hy; 43. 66. Lj

Evaluation of acoustic conditions related to traffic noise in the virtual classroom

Abstract

The architectural design of a school is multidisciplinary, but should aim to assist the teaching-learning function. Students perform their cognitive functions best when the classroom is acoustically optimized. To assist architects and researchers, virtual reality features can be used to simulate real conditions. The objective of this work is to evaluate how Brazilians perceive traffic noise in different acoustic conditions of a classroom. For this purpose, we used a classroom in a virtual environment and a serial repetition cognitive test in order to evaluate the performance of participants in classrooms with simulated conditions of good and poor acoustic quality and sound insulation combined, so that it can be analyzed which acoustic requirement influences more regarding the disturbance caused by residual noise. A brief questionnaire was also applied on the participant's perception in order to qualitatively evaluate the test results, especially the level of discomfort. The rooms whose sound isolation was within the normative recommendation had better results and users did not notice a significant difference in reverberation time between good and bad conditions, since the signal was a continuous traffic noise.

Keywords: classroom acoustic, listening test, cognitive test, auralization, virtual reality.



1. INTRODUÇÃO

O ensino-aprendizado é o processo de maior importância em escolas e deve ser suportado por um ambiente escolar que o estimule e facilite. O projeto arquitetônico de uma escola envolve diversas disciplinas, que podem se integrar e propiciar um melhor ambiente para os estudantes e professores. A complexidade do projeto escolar não está ligada somente à integração das disciplinas da arquitetura, mas ao próprio uso, que é diverso e demanda constante atualização. Kowaltowski, Moreira e Deliberador [1] defendem que os diversos tipos de usuários também aumentam a complexidade do projeto escolar, visto que a escola abriga alunos, professores, funcionários, pais, dentre outros, em diferentes períodos da vida e situações, como a chegada de um novo aluno à escola ou a saída após a conclusão dos estudos.

Em se tratando da educação pública, o Brasil enfrenta o dilema entre construir um ambiente robusto e durável para crianças e jovens e a ausência de condições que propiciem uma infraestrutura adequada e orçamento para manutenção destas construções [1]. Além disso, estudos sobre Avaliações Pós-Ocupação (APO) em escolas sugerem que os edifícios escolares são, em geral, precários quanto ao conforto ambiental. Dentre eles, o conforto acústico é considerado um problema crônico, geralmente não correspondendo às expectativas dos usuários [1].

O problema do conforto acústico em salas de aula corresponde tanto à falta de isolamento acústico adequado para reduzir o nível de ruídos provenientes de outros ambientes ou externos à edificação quanto à má adequação do condicionamento acústico, que prejudica a qualidade do som produzido dentro da sala, geralmente pelo professor, e a inteligibilidade desse. Desta forma, é satisfatória uma acústica para salas de aula quando uma boa inteligibilidade da fala é garantida, bem como um baixo nível de ruído residual.

No entanto, apesar de serem premissas básicas normalmente recomendadas por normativas e regulamentações, a ausência destes fatores em projetos arquitetônicos de salas de aula pode

impactar em outros aspectos do processo de aprendizado. Os processos cognitivos, como o uso da memória, por exemplo, podem ser prejudicados em ambientes com baixa qualidade acústica [2].

Para Prodi e Visentin [2], informações sobre o nível de dificuldade na audição de sons em salas de aula disponibilizadas por usuários através de experimentos podem complementar os resultados alcançados através de parâmetros objetivos que tratem de inteligibilidade da fala. Alguns estudos relacionaram o esforço auditivo com o Índice de Transmissibilidade da Fala (em inglês, *Speech Transmission Index* – STI) em adultos, mostrando que a sensação subjetiva avaliada quanto ao nível de dificuldade na audição se mostrou mais efetiva quando a Razão Sinal-ruído (*Signal-to-noise Ratio*, em inglês – SNR) era favorável [2].

Em crianças, salas de aula barulhentas podem afetar a audição, o entendimento e o comportamento. Quando expostas a ruídos continuamente, há uma tendência no detrimento da memória e habilidades de leitura, bem como diminuição da atenção e motivação, ao longo do tempo. Esses fatores impactam diretamente no aprendizado das crianças [2].

Para a avaliação objetiva dos parâmetros acústicos de uma sala de aula, a inteligibilidade da fala pode ser medida através de palavras ou frases, levando-se em consideração o nível de pressão sonora do orador e do ruído residual, bem como as características acústicas da sala. De modo geral, para uma SNR constante, o aumento do tempo de reverberação prejudica a inteligibilidade da fala [3].

Brill e Wang [3] defendem que, com o avanço dos *softwares* e análises que estes possibilitam, o uso de técnicas de auralização tem sido útil para testes subjetivos, visto que permitem aos pesquisadores ampla testagem de diferentes ambientes acústicos em situação controlada a fim de avaliar o impacto de tais diferenças na percepção do usuário.

Segundo Vorländer [4], “a auralização é a técnica de criar arquivos de som audíveis a partir de dados numéricos (simulados, medidos, sintetizados)”. A auralização pode ser usada

tanto para criação de sons que avaliem a qualidade interna do ambiente, como para simular diferentes níveis de isolamento acústico. Estudos conduzidos por Schlittmeier et al. [5] mostraram que o uso de sons auralizados em testes de audição de repetição seriada pode auxiliar na avaliação de diferentes condições acústicas sem a necessidade de construção ou adequação de uma sala real.

Considerando o exposto, o objetivo deste trabalho é avaliar como se dá a percepção de usuários ao ruído de tráfego em diferentes condições acústicas de uma sala de aula virtual.

2. METODOLOGIA

A fim de cumprir o objetivo deste trabalho, metodologia semelhante à apresentada em [6] foi utilizada. O experimento detalhado neste estudo foi realizado no Institute for Hearing Technology and Acoustics (IHTA), da RWTH Aachen University. Todos os *softwares* e equipamentos são pertencentes ao referido instituto. A seguir são descritas as etapas de modelagem virtual e auralização, bem como o teste auditivo realizado.

2.1 Criação do ambiente em realidade virtual

Uma sala de aula virtual baseada em sala real da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) foi modelada no *software* Sketchup® e importada no *software* Unity® para criação de ambiente de realidade virtual. A sala virtual possuía as mesmas dimensões e características físicas da sala real, como quantidade de cadeiras estudantis e materiais aplicados.

Neste ambiente, o participante era localizado virtualmente em uma cadeira estudantil a cerca de 2,00 m da parede esquerda, que continha janelas, e olhava diretamente para um quadro branco no qual um teste cognitivo era projetado (Figura 1). Não era possível o deslocamento do participante no ambiente virtual, porém o movimento de cabeça era livre, permitindo-o ver todo o ambiente.



Figura 1: Visão do participante do ambiente virtual durante o teste cognitivo

2.2 Medição, simulação e auralização

A sala de aula localizada no setor de aulas do Centro de Tecnologia da UFRN teve a resposta impulsiva medida a fim de analisar a qualidade acústica da sala. Foram utilizados os equipamentos da Brüel&Kjær pertencentes ao Laboratório de Conforto Ambiental da UFRN. Esta resposta impulsiva foi utilizada como parâmetro base para a simulação da sala de aula realizada no RAVEN e conseguinte adequação dos coeficientes de absorção dos materiais aplicados.

Após adequação da resposta impulsiva da sala de aula simulada no RAVEN, outra resposta impulsiva foi gerada através da mudança do material aplicado ao forro, de modo que o tempo de reverberação da sala fosse satisfatório diante dos valores recomendados pelo boletim técnico britânico Building Bulletin 93 (BB 93) [7], que trata de acústica em salas de aula. Este boletim, vigente em outro país, foi utilizado em função do cancelamento da NBR 12.179 (1992), norma brasileira que apresentava sugestões de valores de tempo de reverberação para ambientes fechados.

O tempo de reverberação simulado baseado na resposta impulsiva real da sala foi considerado como a “condição ruim” (RI_ruim) e o tempo de reverberação simulado baseado nas recomendações da BB 93 como a “condição boa” (RI_boa). Os valores utilizados são mostrados no gráfico da Figura 2.

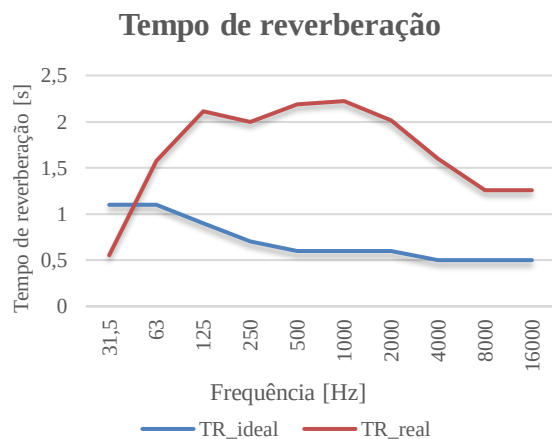


Figura 2: Gráfico do tempo de reverberação utilizados nas simulações acústicas.

Tendo em vista que o objetivo do experimento considerava uma fonte sonora externa, o tráfego, foram simuladas também duas condições de isolamento sonoro da parede de fachada, localizada à esquerda do participante no ambiente virtual.

O filtro gerado para a “condição ruim” (IS_ruim) foi calculado baseado nos materiais da sala real de acordo com os cálculos da ISO 12354-3 [8]. Após aplicação do filtro, o Nível de Pressão Sonora Equivalente (L_{Aeq}) foi calibrado para 50 dB. Para a “condição boa” (IS_boa) foi gerado um filtro que considerou os valores de isolamento sonoro recomendados pela norma brasileira NBR 10.152 (2017) [9]. Nesta condição, o L_{Aeq} foi calibrado para 35 dB. Apenas os Índices de Redução Sonora Ponderados (R_w) das janelas foram alterados, visto que as esquadrias eram os materiais de menor desempenho acústico na fachada.

As duas condições de resposta impulsiva e isolamento sonoro foram combinadas em processos de auralização em áudio *ambisonics*, nos quais a fonte sonora utilizada foi uma gravação de ruído de tráfego. Para a auralização da condição RI_boa_IS_boa, por exemplo, foi utilizado o filtro de isolamento sonoro da “condição boa”, que filtrava a gravação do ruído de tráfego considerado como fonte sonora externa, e a resposta impulsiva da “condição boa”, que condicionava o áudio filtrado ao tempo de reverberação existente na sala simulada.

As condições simuladas foram, portanto, uma combinação de condições boas e ruins, além de uma condição em “silêncio”, cuja fonte sonora era ruído rosa não filtrado, a fim de mascarar possíveis ruídos provenientes do laboratório em que o participante se encontrava para realização do teste. As condições testadas foram as apresentadas no quadro abaixo.

Quadro 1: Condições acústicas simuladas e auralizadas

Condição acústica	Resposta impulsiva	Isolamento sonoro	Fonte sonora
RI_ruim_IS_ruim	Ruim	Ruim	Tráfego
RI_boa_IS_ruim	Boa	Ruim	Tráfego
RI_ruim_IS_boa	Ruim	Bom	Tráfego
RI_boa_IS_boa	Boa	Bom	Tráfego
RI_silêncio	Boa	Não filtrado	Ruído rosa

2.2 Teste cognitivo

Para avaliação das condições acústicas simuladas e auralizadas, foi aplicado em 16 participantes um teste cognitivo de repetição seriada no ambiente de realidade virtual modelado. O teste foi realizado no laboratório de realidade virtual do IHTA, no qual o participante permanecia sentado em uma cadeira durante o teste, usando um *Head-mounted Display* (Visor montado na cabeça, em tradução livre – HMD, na sigla em inglês) do tipo VIVE Pro Eye em conjunto com o controle remoto, além de fones de ouvidos previamente calibrados e ligados ao computador através de uma placa de som.



Figura 3: Equipamentos utilizados pelos participantes durante o teste.

Durante o experimento, o participante permanecia sentado em uma cadeira enquanto

via a sala de aula em realidade virtual através do HMD (Figura 4). Com auxílio do controle remoto, o participante controlava o início do teste cognitivo de repetição seriada, projetado no quadro branco da sala virtual. Inicialmente, algumas informações eram dadas e um teste do experimento era realizado para que o participante se familiarizasse com o teste cognitivo antes do estudo efetivo.

Após a etapa de teste, o participante deveria realizar o teste cognitivo para cada uma das cinco condições acústicas. Em cada condição a sala de aula permanecia visualmente igual, porém o áudio reproduzido nos fones de ouvido mudava de acordo com a condição acústica. O áudio ouvido foi gerado de modo *ambisonics*, no qual o participante podia mover a cabeça livremente e localizar o áudio sendo propagado sempre através da parede de fachada. Para cada participante as condições acústicas eram reproduzidas em ordem aleatória a fim de evitar efeitos de fadiga que pudessem alterar os resultados do experimento.

O teste cognitivo de repetição seriada consistia em números de 1 a 9 que apareciam momentaneamente no quadro branco virtual em ordem aleatória, devendo o participante memorizar esses números na ordem disposta. Após uma pausa de 10 segundos, o participante devia apertar botões virtuais contendo números de 1 a 9 na mesma ordem em que apareceram anteriormente na tela.



Figura 4: Participante durante a realização do experimento.

Este teste foi repetido 12 vezes para cada condição acústica, segundo recomendações dadas por [5]. Após a finalização das 12 repetições era permitido ao participante uma pausa mais longa, em que ele podia iniciar o próximo bloco de testes quando desejasse.

Ao final, os resultados dos participantes foram salvos juntamente com as ordens de números dispostos na tela. Estas foram comparadas com os dados fornecidos pelos participantes durante o experimento para cada condição acústica e estabelecida uma média de acertos. Para cada condição, a média de acertos dos participantes foi comparada a fim de identificar o quanto as condições acústicas interferiram nos resultados dos testes cognitivos. Estes são apresentados na sessão a seguir.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados gerados a partir das respostas dos participantes foram individualmente comparados com aqueles gerados aleatoriamente durante o teste cognitivo a fim de avaliar a quantidade de acertos dos participantes. Foi calculada a média de acertos em cada uma das condições acústicas e esta foi comparada entre os participantes. As médias encontradas são mostradas no gráfico da Figura 5.

Em todas as situações as médias da quantidade de acerto foi semelhante. Outro fator em comum foi a alta variação entre a quantidade de acertos, como mostrada nas barras de erros, mostrando que o desempenho entre participantes variou de modo significativo. A condição com menor variação (59%) entre o desempenho dos participantes foi a “IR_ruim_IS_boa” se considerarmos todos os casos. Se o pior desempenho da condição “IR_silêncio” for desconsiderado em virtude de ser um “outlier”, esta foi a condição com menor variação entre desempenhos com 47% de diferença entre o melhor e o pior resultado.

A semelhança entre a média do desempenho dos participantes entre as diferentes condições acústicas demonstra, a priori, que o ruído de tráfego nestas condições pode não interferir na concentração dos estudantes e seu desempenho cognitivo. Uma hipótese para isso é que o ruído



de tráfego, embora intermitente, é contínuo e o participante pode se acostumar com a gravação, repetida diversas vezes, ao realizar o experimento. Para maiores conclusões, uma amostra maior de participantes deve ser analisada.

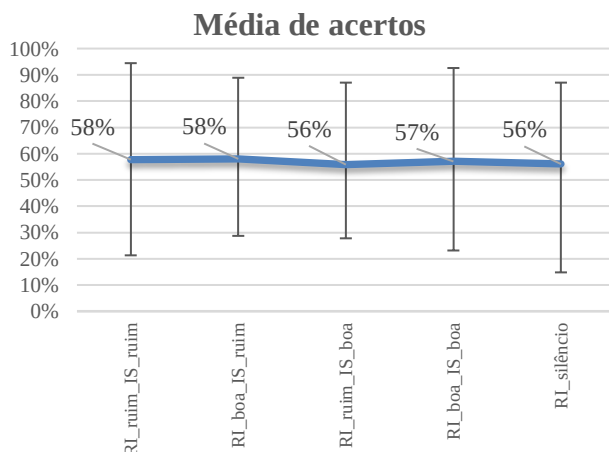


Figura 5: Gráfico de média de acertos em cada condição acústica.

As condições acústicas tiveram seus resultados agrupados, então, usando o gráfico do tipo “*boxplot*” para análise do padrão de desempenho dos participantes, conforme mostrado na Figura 6. A mediana, representada por um X no gráfico, foi semelhante em todos os resultados, com valores próximos aos 60%, indicando que 50% dos participantes acertaram mais ou menos do que este percentual.

O gráfico da Figura 6 mostra primeiro os resultados para as duas condições com isolamento sonoro ruim, seguido pelas duas condições acústicas com tempo de reverberação adequado e, por fim, pela condição em silêncio.

Na condição “RI_ruim_IS_ruim”, considerada a pior condição acústica por apresentar um isolamento sonoro pobre e um tempo de reverberação alto, houve uma maior variação nos desempenhos entre participantes, de 21 a 94% de acerto. Foi a condição com o menor e maior percentual de acerto dentre todas as condições. Entre os participantes, 50% acertaram entre 51 e 76%, sendo que 25% deles acertaram entre 51 e 60%, indicando uma maior concentração de desempenho nesta faixa.

Na condição “RI_boa_IS_ruim” houve uma menor concentração de desempenhos semelhantes, em que 50% dos participantes acertaram entre 40 e 75% da ordem dos dígitos do teste cognitivo. Do total, 25% dos participantes acertaram entre 65 e 75%, o que pode indicar que o tempo de reverberação menor auxiliou no desempenho cognitivo, mesmo com o isolamento sonoro ruim, em comparação com a condição anterior.

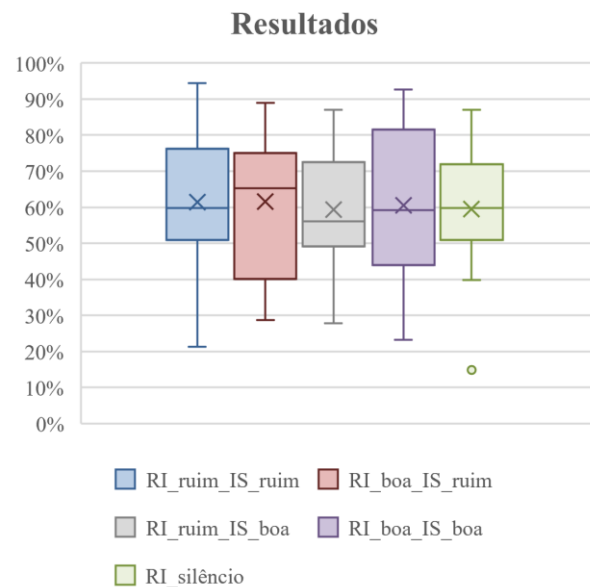


Figura 6: Gráfico dos resultados dos participantes em cada condição acústica.

Na condição que a resposta impulsiva é ruim e o isolamento bom, “RI_ruim_IS_boa”, houve uma concentração maior de desempenhos semelhantes, variando entre 49 e 72% de acertos. Houve uma maior concentração de acertos entre 49 e 56%, sendo este o resultado de 25% dos participantes. Em comparação com a condição “RI_ruim_IS_ruim”, em que a resposta impulsiva também apresentava valores altos de tempo de reverberação, pode-se considerar que os resultados dos 50% dos participantes do segundo e terceiro quartil foram semelhantes.

Na condição acústica “RI_boa_IS_boa”, considerada em teoria a melhor opção, de acordo com os valores dos parâmetros objetivos, os resultados apresentaram uma grande variação entre si. No entanto, o quartil com menor variação entre resultados foi aquele

de melhor desempenho, variando entre 81 e 93% de acertos. Isto pode indicar que, mesmo com grande variabilidade, nesta condição o desempenho dos participantes foi melhor quanto a concentração de resultados.

Na condição “RI_silêncio”, os desempenhos entre participantes são mais parecidos entre si, apresentando a menor variação entre resultados. Esta foi a única condição que apresentou um “outlier”, ou seja, valor considerado como exceção no grupo, representado por um ponto no gráfico da Figura 6. Estima-se que o desempenho mais próximo entre participantes se deu em função da ausência de um ruído que pode ser considerado irritante pelo participante.

Considerando-se que a fonte sonora é externa ao ambiente, pode-se inferir a partir dos resultados que a correlação entre as variáveis das condições acústicas pode precisar de maiores investigações e uma maior amostra de participantes. Outro fator que pode ser mais investigado é a repetição da gravação do ruído de tráfego em todas as condições acústicas, que pode causar familiaridade do participante com o mesmo áudio ao longo do teste, não interferindo significativamente no desempenho cognitivo destes após um tempo.

4. CONCLUSÃO

Este experimento é parte da tese em andamento da autora Luciana da Rocha Alves, sendo o primeiro experimento realizado de uma série de experimentos planejados. A metodologia do experimento resultou em dados significativos para análise prévia, porém análises estatísticas e aplicação do teste com mais participantes devem ser realizadas para maiores conclusões sobre o estudo.

A priori, foi possível perceber que há uma baixa variabilidade dos resultados quando comparados entre as condições acústicas, porém uma alta variabilidade dos resultados dos participantes em cada uma das condições acústicas. Quando analisados a partir da concentração de resultados em uma faixa de porcentagem de acertos, pode-se concluir que as condições que apresentaram resposta impulsiva ruim concentram mais resultados em faixas de porcentagem de acertos mais baixas.

Os resultados de isolamento sonoro ruim ou bom não apresentam semelhanças significativas quando comparados entre condições de isolamento sonoro iguais.

Por fim, cabe ressaltar que este foi um estudo piloto e que a metodologia desenvolvida será replicada em novas situações para análise mais aprofundada.

9. AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao Professor Dr. rer. nat. Michael Vorländer e à doutoranda Anne Heimes da RWTH Aachen University pela colaboração com o estudo durante doutorado-sanduíche da autora Luciana da Rocha Alves. Agradecimentos, também, à Capes pela bolsa de estudos concedida.

REFERÊNCIAS

- [1] D. C. C. K. Kowaltowski, D. C. Moreira, and M. S. Deliberador, “O Programa Arquitetônico No Processo De Projeto: Discutindo a Arquitetura Escolar, Respeitando O Olhar Do Usuário,” in *O programa arquitetônico no processo de projeto: discutindo a arquitetura escolar, respeitando o olhar do usuário*, 1st ed., M. S. Salgado and P. A. Rheingantz, Eds. Rio de Janeiro: Antac, 2012, pp. 160–185.
- [2] N. Prodi and C. Visentin, “Listening efficiency during lessons under various types of noise,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 138, no. 4, pp. 2438–2448, 2015, doi: 10.1121/1.4932053.
- [3] L. C. Brill and L. M. Wang, “Building a Sound Future for Students: Considering the Acoustics in Occupied Active Classrooms Acoustics in occupied active classrooms should be carefully considered because they may relate more to student achievement than unoccupied conditions,” *Acoust. Today*, vol. 14, no. 3, 2018.
- [4] M. Vorländer, *Auralization*, 2nd ed. Cham: Springer, 2020.
- [5] S. J. Schlittmeier, J. Hellbrück, R. Thaden, and M. Vorländer, “The impact of background speech varying in intelligibility: Effects on cognitive performance and perceived disturbance,” *Ergonomics*, vol. 51, no. 5, pp. 719–736, 2008, doi: 10.1080/00140130701745925.
- [6] I. Muhammad, M. Vorländer, and S. J. Schlittmeier, “Audio-video virtual reality environments in building acoustics: An exemplary study reproducing performance results and subjective ratings of a laboratory listening experiment,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 146, no. 3, pp. EL310–EL316, 2019, doi: 10.1121/1.5126598.
- [7] Department for Education, *Building Bulletin 93, “Acoustic design of schools - performance standards.”* United Kingdom, 2015, pp. 1–43.



[8] (British Standards Institution), *EN ISO 12354-3, Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 3*. Europe, 2000.

[9] (ABNT) Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 10.152: Acústica - Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações.*, no. 2 ed. Brasil, 2017, p. 27.