XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Medições acústicas de uma sala de aula modelo para projeção por meio de simulações das demais salas de aula de uma mesma escola

Mediciones acústicas de un aula modelo para proyección mediante simulaciones de otras aulas del mismo colegio

Acoustic measurements of a model classroom for projection through simulations of other classrooms in the same school

Acústica Arquitetônica e Urbana / *Acústica arquitectónica y urbana / Architectural and Urban Acoustics*

Veiga, Wellington Bertagnolli
Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, wellington.veiga@eac.ufsm.br

Palma, Luíza Paim da
Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, luiza.palma@acad.ufsm.br

Tenenbaum, Roberto Aizik
Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, ratenenbaum@gmail.com

Melo, Viviane Suzey Gomes de
Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, viviane.melo@ufsm.br

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo de caso para aprimorar as condições acústicas em salas de aula de escolas públicas. A abordagem consiste na realização de medições e simulações acústicas, visando avaliar as condições desses ambientes. O método adotado inclui um levantamento arquitetônico dos ambientes, seguido pela construção de um modelo 3D que representa as salas. Essa etapa permite o planejamento de aspectos essenciais para a condução das medições acústicas. As medições visam obter parâmetros objetivos das salas, utilizando o levantamento de respostas impulsivas (RIR) em uma sala de aula. Com base nos resultados obtidos, o *software* de simulação acústica possibilita a calibração do modelo 3D. Uma vez calibrado, esse modelo pode ser utilizado para sugerir melhorias no acondicionamento acústico. Assim, disponibiliza-se uma sala de aula modelo, cujos coeficientes de absorção ajustados são empregados nas simulações de outras salas da mesa escola que compartilhem características semelhantes à sala analisada.

Palavras-chaves: Medições acústicas. Simulações acústicas. Condicionamento acústico. Espaços de ensino.

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio de caso para mejorar las condiciones acústicas en las aulas de las escuelas públicas. El enfoque consiste en realizar mediciones y simulaciones acústicas, con el objetivo de evaluar las condiciones de estos. El método adoptado incluye un levantamiento arquitectónico de los ambientes, seguido de la construcción de un modelo 3D que representa las estancias. Este permite planificar aspectos esenciales para la realización de mediciones acústicas. Las mediciones tienen como objetivo obtener parámetros objetivos de las salas, utilizando la evaluación de respuesta impulsiva (RIR) en un aula. A partir de los resultados obtenidos, el software de simulación acústica permite la calibración del modelo 3D. Este modelo puede utilizarse para sugerir mejoras en el acondicionamiento acústico. De esta forma, se dispone de un aula modelo, cuyos coeficientes de absorción ajustados se utilizan en simulaciones para salas que comparten características con la sala analizada.

Palabras clave: Mediciones acústicas. Simulaciones acústicas. Acondicionamiento acústico. Espacios de enseñanza.

Abstract

This paper presents a case study to improve the acoustic conditions in classrooms in public schools. The approach consists of performing acoustic measurements and simulations, aiming to evaluate the conditions of these environments. The adopted method includes an architectural survey of the environment, followed by the construction of a 3D model that represents the rooms. This step allows the planning of essential aspects for conducting the acoustic measurements. The measurements aim to obtain objective parameters of the rooms, using the impulsive response survey (IRR) in a classroom. Based on the results obtained, the acoustic simulation software allows the calibration of the 3D model. Once calibrated, this model can be used to suggest improvements in the acoustic conditioning. Thus, a model classroom is made available, whose adjusted absorption coefficients are used in the simulations of other rooms that share similar characteristics to the room analyzed.

Keywords: Acoustic measurements. Acoustic simulations. Acoustic conditioning. Teaching spaces.

1. Introdução

As condições acústicas adequadas em espaços de ensino são importantes para o desempenho acadêmico e a saúde de alunos e professores (Mealings, 2023). O ruído, frequentemente excessivo, e a inteligibilidade de fala reduzida impactam negativamente em aspectos ligados à concentração, memória, ao processo de ensino aprendizagem e consequentemente a um maior esforço vocal por parte dos docentes (Ronsse, 2011; Keshtkaran e Najafi, 2020).

O estudo de RecaldeJordi, Palau e Márquez (2021) traz uma revisão sistemática de literatura abordando quais parâmetros acústicos estão presentes nas salas de aula e como eles afetam professores e alunos. Tratando-se de escolas públicas brasileiras constata-se que o conforto acústico não é considerado já na concepção arquitetônica do projeto, esse fato colabora para que a problemática continue afetando a qualidade do ensino no país (Pinheiro, Masson e Lopes, 2017).

Para avaliar as condições acústicas de espaços de ensino é necessário considerar alguns parâmetros objetivos como tempo de reverberação (T_{20}, T_{30}), fator de clareza (C_{50}), definição (D_{50}) e, principalmente, o índice de transmissão da fala (STI). Tais parâmetros são obtidos por meio de medições acústicas da resposta impulsiva da sala (RIR). Apesar de não existir uma norma brasileira específica para salas de aula, pode-se adotar como referência a norma americana ANSI/ASA S12.60 (ANSI, R2020) e a NBR IEC 60268-18 (2018) como base para estabelecer critérios e condições adequadas para garantir a qualidade acústica dos espaços de ensino, ajustando o seu uso em relação à sua finalidade.

Esta pesquisa pretende avaliar as condições acústicas de salas de aula de escolas públicas e propor intervenções projetuais com o intuito de assegurar o acesso inclusivo e equitativo dos estudantes a esses recintos, cujo objetivo principal está em avaliar o condicionamento acústico das salas de aula nas escolas públicas por meio de medições e simulações acústicas. A partir dessa análise, serão propostas melhorias para a readequação dos ambientes de ensino. Os objetivos incluem não só a avaliação e melhoria das condições acústicas das salas de aula, mas também a sensibilização dos educadores sobre a importância da acústica no processo de ensino-aprendizagem. Além disso, busca-se promover um compartilhamento de conhecimentos que contribua para a melhoria das condições acústicas desses espaços, impactando positivamente a qualidade do ensino na região.

2. Método

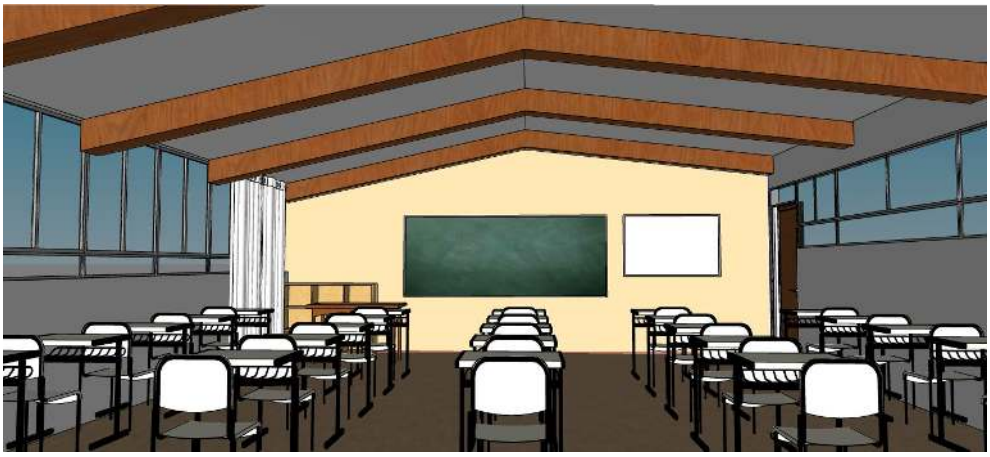
O projeto acústico de salas deve considerar sua finalidade. Em salas de aula, o objetivo principal é garantir boa inteligibilidade da fala, facilitando a comunicação entre professor e estudantes. Para avaliar a qualidade acústica de salas de aula, os principais parâmetros objetivos são: TR (tempo de reverberação), C_{50} (fator de clareza), D_{50} (definição) e STI (índice de inteligibilidade de fala). As medições acústicas foram realizadas *in situ* conforme a norma NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017). Neste artigo, descreve-se o trabalho realizado na Escola Estadual de Educação Básica Augusto Ruschi, situada na cidade de Santa Maria, focando na metodologia aplicada para medições de respostas impulsivas (RIR) e na geração de maquetes virtuais para implementar simulações acústicas em uma sala de aula modelo. A sala escolhida como modelo apresenta características que permitem a replicação do projeto sugerido pela pesquisa em outras salas semelhantes da mesma escola. Embora cada sala e cada escola possam apresentar condições estruturais distintas, esta pesquisa, de forma geral, pretende desenvolver alternativas de projeto que possibilitem às escolas adequar acusticamente seus ambientes de ensino.

2.1 Caracterização do objeto de estudo

A primeira etapa do método adotado consiste em analisar os espaços de ensino da Escola e escolher uma sala modelo. Com a sala modelo definida tem-se a caracterização do objeto de estudo e o levantamento de suas características geométricas. A sala modelo tem 7,10 m de comprimento, 7,10 m de largura, pé direito maior de 3,05 m e pé direito menor de 2,68 m, possuindo uma área de 50,4 m^2 e um volume de 109,2 m^3. Na Figura 1 tem-se a maquete virtual da sala modelo, desenvolvida no *software* SketchUp 2022.

As paredes da sala são compostas de alvenaria pintada, o piso é de madeira e o teto é de MDF com vigas aparentes em madeira, conforme pode ser verificado da Figura 2. Conhecer os materiais da composição da sala é fundamental para ajustar as simulações acústicas com as medições realizadas *in situ.* A sala possui uma capacidade para 25 alunos, fato este que também é importante considerar em um projeto de condicionamento acústico, pois a ocupação do ambiente também tem influência nos parâmetros acústicos simulados e pode ser considerada no projeto.

Figura 1: Maquete virtual da sala modelo.



Fonte: Autores (2023).

Figura 2: Foto da sala modelo.



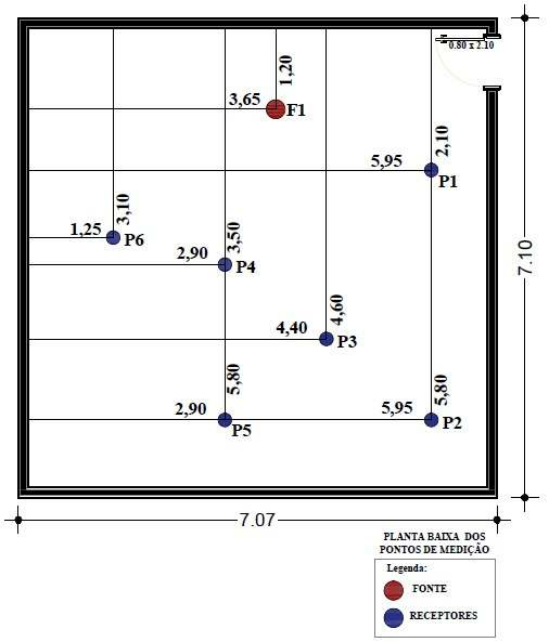
Fonte: Autores (2023).

2.2 Medições acústicas

A Figura 3 apresenta a maquete virtual que evidencia a posição da fonte e de cada receptor utilizado nas medições e simulações.

As medições foram realizadas conforme a norma NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017), pelo método de engenharia. Definiram-se uma posição para a fonte sonora (emissor) e seis para os microfones (receptores). A fonte sonora foi posicionada em frente à lousa, simulando a altura da boca de uma pessoa de pé (1,50 m). Já os microfones (receptores) foram distribuídos pela sala, simulando a altura de uma pessoa sentada (1,20 m).

Figura 3: Posições de fonte e receptores (microfones) na sala modelo.



Fonte: Autores (2023).

No início e ao final de cada medição é feito o ajuste dos microfones. Avaliou-se o ruído residual presente no interior da sala para garantir uma relação sinal-ruído adequada. As medições foram realizadas sem a presença de estudantes. Após as medições, os dados foram pós-processados para extrair a resposta impulsiva da sala vazia (RIR), a partir da qual foram calculados os parâmetros TR, EDT, C_{50}, D_{50} e o índice de transmissão da fala (STI).

Para realizar a medição e obter a resposta impulsiva monoauricular da sala foi utilizada a seguinte instrumentação: termo-higrômetro INTRUTHERM; fonte sonora dodecaédrica omnidirecional Bruel & Kjær 4292; amplificador de potência Bruel & Kjær 2716; chassi CompactDAQ USB National Instruments com 4 slots - cDAQ-9174; módulo de entrada de som e vibração da Série C National Instruments NI-9234; módulo de saída de tensão da Série C National Instruments NI-9263; calibrador de microfones Bruel & Kjær Tipo 4231; microfones

para campo difuso Bruel & Kjær Tipo 4242-A-021 (6 unidades com certificado de calibração válidos); notebook Dell G15, 12ª geração Intel Core i5-12500H 2.5GHz;

A cadeia de medição envolveu a interligação dos microfones ao módulo de entrada da NI por meio de cabos BNC. Esse módulo foi responsável por realizar a conversão do sinal emitido pela fonte sonora e captado pelos microfones, convertendo-o de analógico para digital. A fonte, por sua vez, foi conectada ao módulo de saída da NI, com a assistência de um amplificador de potência. O sinal utilizado na medição foi uma varredura exponencial de senos (*sweep sine*), conforme sugere a norma NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017). A geração do sinal ocorreu no ambiente computacional, por meio do pacote ITA Toolbox no *software* Matlab. Posteriormente, o sinal foi encaminhado ao módulo de saída da NI, que desempenhou a conversão digital para analógico (DAC). Em seguida, o sinal foi transmitido ao amplificador de potência 2716 e direcionado à fonte sonora dodecaédrica. Esta última reproduziu o sinal no interior da sala de aula. Os microfones posicionados dentro da sala, previamente ajustados, captaram o sinal reproduzido no ambiente e o encaminharam ao módulo de entrada da NI. Este módulo, por sua vez, efetuou a conversão do sinal analógico para digital (ADC), resultando na gravação do sinal na forma de um vetor numérico no ambiente do Matlab. O esquema de conexões empregado para as medições está detalhado na Figura 4.

Figura 4: Cadeia de medição.



Fonte: Autores (2023).

2.3 Simulações acústicas

Utilizou-se o *software* Odeon (versão 11.23) para simular virtualmente a sala de aula medida, com parâmetros de entrada incluindo geometria da sala, localização da fonte sonora e receptores, além dos coeficientes de absorção e espalhamento das superfícies. Os coeficientes de absorção foram ajustados para aproximar-se aos valores reais da sala, ou seja, o TR simulado foi comparado com o TR medido, ajustando os coeficientes de absorção. As simulações foram iteradas até que o TR simulado correspondesse aos valores medidos, obtendo assim, a calibração do modelo.

Em seguida, buscam-se materiais acústicos disponíveis no mercado para propor uma solução eficiente e economicamente viável. Em seguida, esses materiais são inseridos na maquete virtual e uma nova simulação é realizada para verificar se o projeto atende aos parâmetros acústicos objetivos apropriados para uma sala com o fim educacional.

3. Resultados e discussões

Nesta seção, são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos com base na metodologia apresentada. A análise da todos os parâmetros acústicos objetivos mencionados são importantes para garantir que as alterações projetuais propostas estejam de acordo com o recomendado.

Na Figura 5 tem-se o TR medido e simulado sem o ajuste dos coeficientes de absorção e, também, a simulação calibrada. Ainda é possível observar o JND, comprovando a assertividade da calibração. Nota-se que o TR adotado como recomendado para salas de aula foi de 0,6 segundos, segundo norma ANSI S12.60 ANSI/ASA (R2020). Com isso constatou-se que a sala não se encontra acusticamente adequada para um ambiente de ensino.

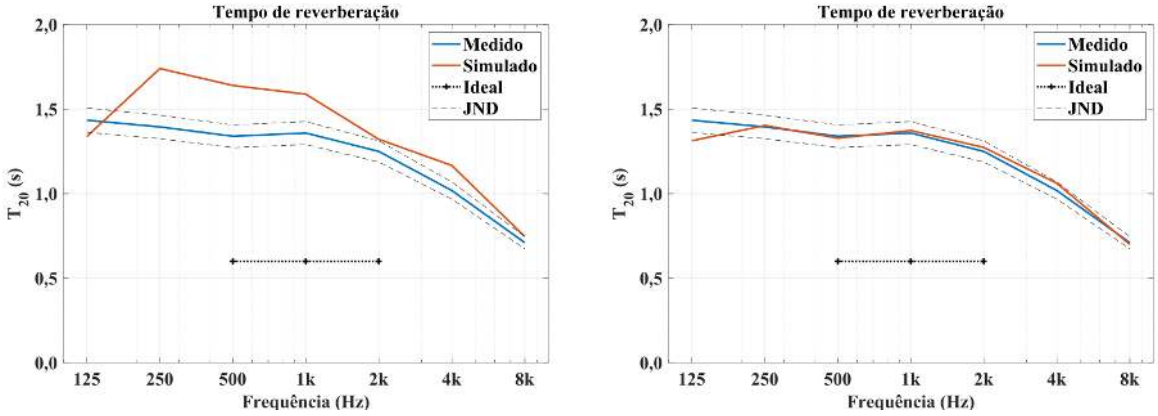
É possível observar que os valores do TR estão longe do ideal para uma sala de aula. Entre 500 Hz e 2 kHz, na região da fala, tem-se em média 1,4 segundos. Na Figura 6 tem-se o gráfico do fator de clareza e da definição com o comparativo entre o medido e o simulado com o ajuste dos coeficientes de absorção por frequência.

Pode-se observar que os valores do fator de clareza até 4 kHz estão abaixo de zero o que indica pouca energia nas primeiras reflexões causando uma baixa inteligibilidade de fala e os valores da definição abaixo de 50% na região da fala.

Figura 5: Tempo de reverberação medido e simulado: (a) Resultados do TR medido e simulado sem ajuste. (b) Resultados do TR medido e simulado com ajuste.

(a) Resultados do TR medido e simulado sem ajuste

(b) Resultados do TR medido e simulado com ajuste

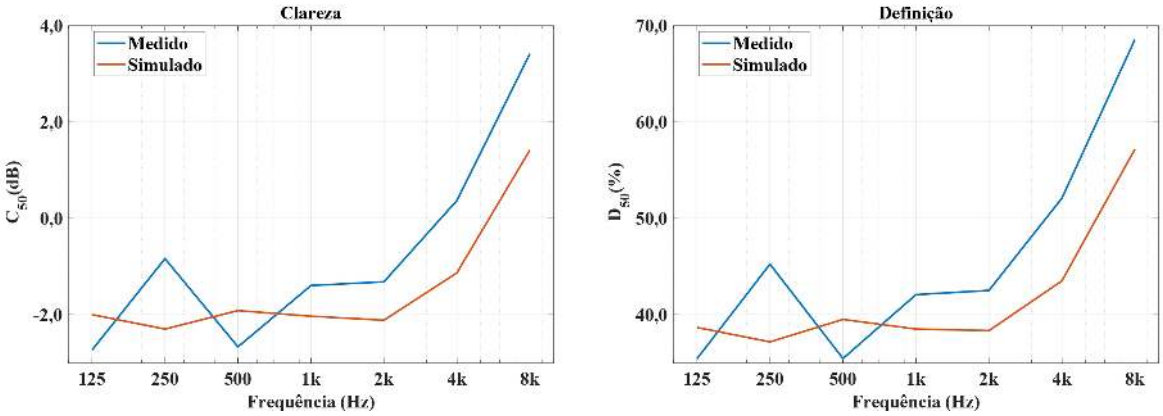


Fonte: Autores (2023).

Figura 6: Fator de clareza e definição medidos e simulados com ajuste dos coeficientes: (a) Resultados do fator de clareza medido e simulado. (b) Resultados da definição medida e simulada.

a) Resultados do fator de clareza medido e simulado

(b) Resultados da definição medida e simulada



Fonte: Autores (2023).

O STI foi calculado pelo método indireto por meio da RIR e a integral de Schroeder. Obteve-se para o STI um valor de 0,55, conforme a norma NBR IEC 60268-16 (ABNT, 2018), pode-se concluir que a sala de aula é categorizada como “aceitável”, conforme visto na Tabela 1. A partir da análise dos resultados obtidos com as medições e simulações foi adotada uma

solução com a finalidade de melhorar o condicionamento acústico da sala por meio da aplicação de materiais absorvedores. Para simular a solução adotada foi necessário alterar a maquete virtual original adicionando a área de aplicação do material.

Tabela 1: Valores de STI correspondentes à qualidade da inteligibilidade da fala.

Categorias de faixas de STI	STI padrão
Ruim	<0,30
Regular	0,30 - 0,45
Aceitável	0,45 - 0,60
Bom	0,60 - 0,75
Excelente	> 0,75

Fonte: NBR IEC 60268-16 (ABNT, 2018).

3.1 Projeto acústico

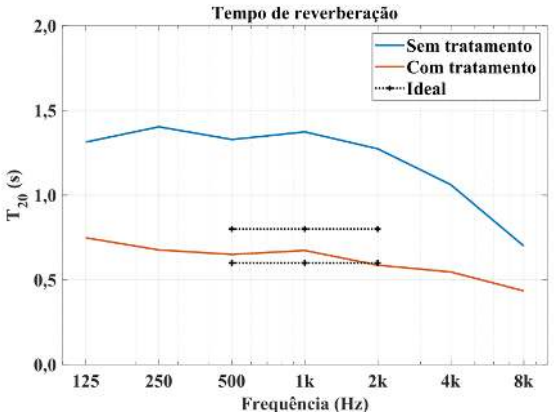
Na Figura 7 pode-se observar que a solução encontrada foi a aplicação de nuvens acústicas, visto que a aplicação de um forro não foi possível devido às condições geométricas da sala. Percebe-se também que a simulação dessa solução apresenta valores de TR satisfatórios, próximos aos 0,6 segundos recomendados, principalmente nas frequências de 500 e 1k Hz.

Figura 7: Tempo de reverberação simulado com a solução adotada: (a) Representação da solução na maquete 3D. (b) Resultados do tempo de reverberação.

(a) Representação da solução na maquete virtual



(b) Resultados do tempo de reverberação



Fonte: Autores (2023).

Na Figura 8 tem-se o resultado das simulações para fator de clareza e definição. Percebe-se que depois de 125 Hz a maior parte da energia sonora está contida nas primeiras reflexões

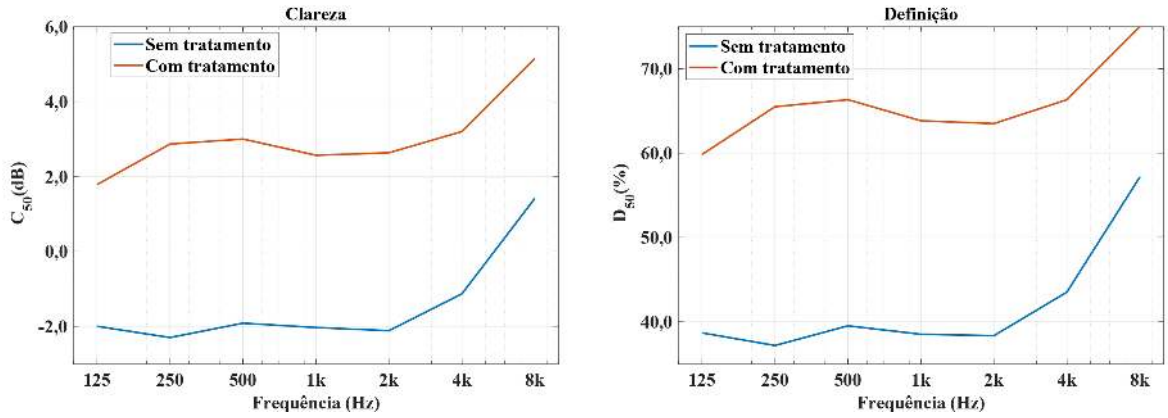
com os resultados de fator de clareza maiores que 0 dB e definição maiores que 60% resultando na melhora na inteligibilidade da fala com a aplicação das nuvens acústicas.

Analisando os resultados dos parâmetros objetivos alcançados com o tratamento proposto observa-se que foi possível obter um STI de 0,71, classificado como “Bom”, porém como se trata de uma sala de aula o ideal seria um STI acima de 0,75, como pode ser visto na Tabela 1.

Figura 8: Fator de clareza e definição simuladas com a solução adotada: (a) Resultados do fator de clareza medido e simulado. (b) Resultados da definição medida e simulada.

b) Resultados do fator de clareza medido e simulado

(b) Resultados da definição medida e simulada



Fonte: Autores (2023).

4. Conclusões

Visto que os parâmetros acústicos obtidos por meio da medição de uma sala, como TR, EDT, C_{50}, D_{50} e STI, apontam para uma condição não favorável à prática de ensino, estabeleceu-se, por meio de criação de maquetes virtuais e simulações, uma estratégia de baixo custo para atingir os índices necessários. Assim, com a solução aplicada na sala modelo da Escola E. E. B. Augusto Rushi obteve-se, com as simulações, resultados satisfatórios, com valores de tempo de reverberação, fator de clareza, definição e STI adequados ao objetivo principal de uma sala de aula.

O método adotado neste projeto permite que as salas de aula que tenham características semelhantes às salas simuladas também possam receber o mesmo tratamento acústico. Assim, para dar continuidade ao projeto, pretende-se aplicar o método adotado em outras

escolas da região a fim de conscientizar seus gestores da influência negativa do ruído e das más condições acústicas no processo de ensino-aprendizagem e na saúde dos docentes.

Referências

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

_____NBR IEC 60268-16: **Equipamentos de sistemas de som – Parte 16: Avaliação objetiva da inteligibilidade da fala pelo índice de transmissão da fala**. Rio de Janeiro, 2018.

AMERICAN NATIONAL STANDARD. ANSI/ASA S12.60-2010/Part 1 (Revision of ANSI/ASA S12.60-2020). **Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools**. New York, R2020.

Keshtkaran, P., Najafi, N. Providing Acoustic Comfort in the Classroom Using Double-Glazed Windows and its Effect on Students Stress. **International Journal of School Health**, v.7, n.3, p.39-44, 2020. https://doi.org/10.30476/intjsh.2020.86643.1088

Mealings, K., Maggs, L. and Buchholz J. M. The Effects of Classroom Acoustic Conditions on Teachers' Health and Well-Being: A Scoping Review**. Journal of Speech, Language, and Hearing Research**, v. 67, n. 1, p.346-367, 2023. https://doi.org/10.1044/2023_JSLHR-23-00256

Pinheiro, E. N. S., Masson, M. L. V., Lopes, M. M. d'S. C. A voz do professor: do projeto arquitetônico à acústica da sala de aula. **Distúrbios da Comunicação**. São Paulo: PUC-SP, v. 29, n. 1, p.10-19, 2017. https://doi.org/10.23925/2176-2724.2017v29i1p10-19

RecaldeJordi, J. Mogas, Palau, R., Márquez, Marian. How classroom acoustics influence students and teachers: A systematic literature review**. Journal of Technology and Science Education**, v. 11, n. 2, p.245-259, 2021. https://doi.org/10.3926/jotse.1098

Ronsse, Lauren M**. Investigations of the relationships between unoccupied classroom acoustical conditions and elementary student achievement.** Tese de doutorado – University of Nebraska-Lincoln. Lincoln, 2011.