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

Avaliação acústica da sala de aula padrão FNDE por meio de simulações e análise de parâmetros acústicos objetivos

Evaluación acústica del aula estándar del FNDE mediante simulaciones y análisis de parámetros acústicos objetivos

Acoustic evaluation of the FNDE standard classroom through simulations and analysis of objective acoustic parameters

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

Palma, Luiza Paim da
Pós-graduanda em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil,
luizapalma97@gmail.com

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

Tenenbaum, Roberto Aizik
Prof.º Dr.º do Curso de Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil,
ratenenbaum@gmail.com

Melo, Viviane Suzey Gomes de
Prof.ª Dr.ª do Curso de Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil,
viviane.melo@ufsm.br

Resumo

Embora o Manual de Orientações Técnicas do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) forneça diretrizes para a construção de edificações escolares com foco no conforto ambiental, é fundamental adotar abordagens específicas para o tratamento acústico das salas de aula. Nesse sentido, o presente artigo tem como objetivo avaliar o condicionamento acústico da sala de aula padrão do Manual Técnico do FNDE por meio de simulações e análise de parâmetros acústicos objetivos, visando subsidiar a melhoria das recomendações do manual para assegurar o conforto acústico em espaços de ensino. A metodologia proposta consiste em uma análise dos parâmetros objetivos de qualidade acústica das salas, visando avaliar o comportamento acústico da sala padrão recomendada no manual do FNDE por meio de simulações acústicas utilizando o *software* de simulação acústica Odeon (v.11). Espera-se, assim, gerar dados que apoiem a atualização do Manual referente ao condicionamento acústico de salas de aula, promovendo ambientes educacionais mais confortáveis e de maior qualidade para seus usuários.

Palavras-chave: Conforto acústico de salas. Simulações acústicas. Condicionamento acústico. Diretrizes projetuais.

Resumen

Si bien el Manual de Directrices Técnicas del Fondo Nacional de Desarrollo de la Educación (FNDE) ofrece directrices para la construcción de edificios escolares con foco en el confort ambiental, es fundamental adoptar enfoques específicos para el tratamiento acústico de las aulas. En este sentido, este artículo tiene como objetivo evaluar el acondicionamiento acústico del aula estándar del Manual Técnico del FNDE a través de simulaciones y análisis de parámetros acústicos objetivos, con el objetivo de subsidiar la mejora de las recomendaciones del manual para garantizar el confort acústico en los espacios de enseñanza. La metodología propuesta consiste en un análisis de los parámetros objetivos de calidad acústica de las salas, con el objetivo de evaluar el comportamiento acústico de la sala estándar recomendada en el manual del FNDE a través de simulaciones acústicas utilizando el software de simulación acústica Odeon (v.11). Se espera, por tanto, generar datos que sustenten la actualización del Manual en materia de acondicionamiento acústico de aulas, promoviendo ambientes educativos más confortables y de mayor calidad para sus usuarios.

Palabras clave: Confort acústico de estancias. Simulaciones acústicas. Acondicionamiento acústico. Pautas de diseño.

Abstract

Although the Technical Guidelines Manual of the National Fund for the Development of Education (FNDE) provides guidelines for the construction of school buildings with a focus on environmental comfort, it is essential to adopt specific approaches for the acoustic treatment of classrooms. In this sense, this article aims to evaluate the acoustic conditioning of the standard classroom of the FNDE Technical Manual through simulations and analysis of objective acoustic parameters, aiming to support the improvement of the manual's recommendations to ensure acoustic comfort in teaching spaces. The proposed methodology consists of an analysis of the objective parameters of acoustic quality of the rooms, aiming to evaluate the acoustic behavior of the standard room recommended in the FNDE manual through acoustic simulations using the Odeon acoustical simulation software (v.11). The expectation is to generate data that support the update of the Manual regarding the acoustic conditioning of classrooms, promoting more comfortable and higher quality educational environments for its users.

Keywords: Acoustic comfort of classrooms. Acoustic simulations. Acoustic conditioning. Design guidelines.

1. Introdução

Existem diversos ambientes onde a fala é o principal estímulo sonoro, como salas de aula, salas de conferência, pequenos auditórios para palestras e cinemas. Nas salas de aula, a fonte sonora predominante é a voz do professor. A fim de obter ambientes confortáveis e que promovam o bem-estar, é fundamental considerar, primeiramente, o propósito do espaço construído, pois os requisitos acústicos variam conforme o uso da instalação e podem ser atendidos pela modificação do volume, da forma e dos materiais. Essas características influenciam a forma como a energia sonora é distribuída no interior do espaço e transmitida aos ouvintes (Diaz et al., 2023; Yang & Jeon, 2020). Nesse contexto, o ambiente construído deve ser projetado para assegurar a saúde auditiva dos ocupantes, otimizar o desempenho de suas atividades e promover a participação confortável no objetivo principal da instalação.

Uma meta-análise conduzida por Thompson et al. (2022) evidenciou que crianças instruídas em ambientes acusticamente controlados apresentam um desempenho superior na compreensão de leitura em comparação com aquelas inseridas em salas de aula com níveis de ruído mais elevados. Diversas fontes de ruído ambiental possuem o potencial de elevar significativamente o nível de ruído residual em salas de aula, incluindo vias de tráfego veicular e ferroviário, rotas aéreas adjacentes à instituição, áreas esportivas ou recreativas pertencentes ao próprio edifício, bem como sistemas de ventilação e condicionamento de ar. A totalidade dessas fontes sonoras intrusas pode comprometer a percepção da fonte sonora primária, tipicamente representada pela voz do docente (Libardi et al., 2006).

Dessa forma, a avaliação da qualidade da fala em salas demanda a consideração de parâmetros acústicos específicos, a exemplo do tempo de reverberação, tempo de decaimento inicial, fator de clareza, definição e índice de transmissão da fala.

O Manual de Orientações Técnicas do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) visa orientar os entes federados, indivíduos e instituições interessadas na elaboração e submissão de projetos de arquitetura e engenharia para a construção de edificações escolares. Os requisitos e critérios para desempenho acústico delineados no manual do FNDE restringem-se ao isolamento acústico das áreas educacionais, abrangendo especificamente as vedações verticais e a cobertura da edificação. Contudo, o documento não aborda a discussão sobre o condicionamento acústico interno das salas de aula, bem como a análise de possíveis configurações e materiais apropriados.

A implementação de novos materiais e a análise de diferentes configurações espaciais possibilitam promover alterações que resultam em múltiplos benefícios acústicos para as salas de aula, atenuando os distúrbios decorrentes de uma acústica inadequada para os usuários. Consequentemente, observa-se o aprimoramento da saúde, do bem-estar e da qualidade do processo educativo, além da viabilização de infraestruturas mais sustentáveis (Keshtkaran &

Najafi, 2020). O principal objetivo deste estudo é avaliar o condicionamento acústico da sala de aula padrão do Manual Técnico do FNDE por meio de simulações e análise de parâmetros acústicos objetivos, visando subsidiar a melhoria das recomendações do manual para assegurar o conforto acústico em espaços de ensino.

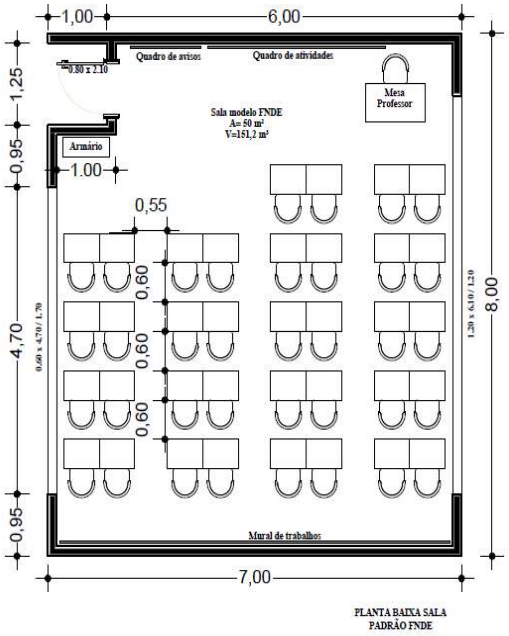
2. Método

O método envolve três etapas. A primeira etapa é a definição e a caracterização detalhada do objeto de estudo. Na segunda etapa, foi conduzida uma simulação acústica, com o intuito de gerar os parâmetros objetivos relevantes para a acústica de salas de aula. Finalmente, a terceira etapa consistiu na análise dos dados obtidos a partir das simulações.

2.1 Caracterização do objeto de estudo

A fase inicial desta investigação consiste na caracterização do objeto de estudo, detalhada na presente seção. Procede-se à definição precisa do objeto e ao levantamento abrangente de suas características físicas e geométricas. Adicionalmente, informa-se que a área recomendada por ocupante é de 1,5 m², pé direito de 2,70 m e o número máximo de discentes por sala de aula estabelecido é de 36, conforme as especificações contidas no Manual Técnico do FNDE (FNDE, 2023). A Figura 1 mostra, em detalhe, a planta baixa da sala de aula padrão, segundo propõe o manual do FNDE.

Figura 1:Planta baixa da sala padrão FNDE.



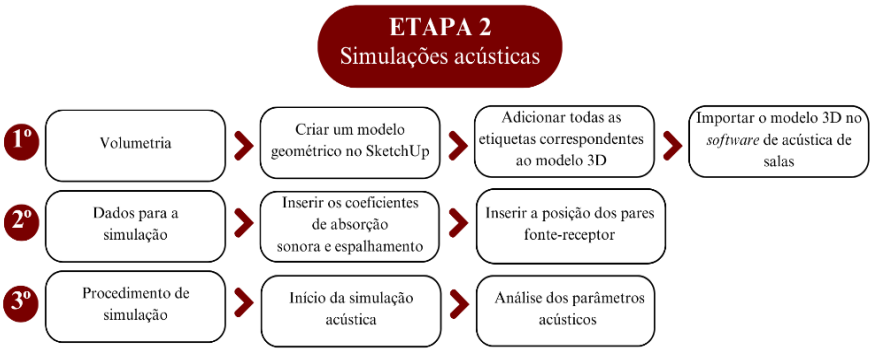
Fonte: adaptado do FNDE (2023).

As informações relativas ao ambiente e ao mobiliário, conforme detalhadas na planta baixa, estão em consonância com as recomendações estabelecidas no manual do FNDE.

2.2 Simulação acústica

Os procedimentos para a realização da simulação acústica e obtenção dos parâmetros objetivos de cada par fonte-receptor da sala de aula, são descritos nesta seção. A Figura 2 apresenta um diagrama da execução dessa etapa da pesquisa.

Figura 2: Diagrama com as etapas de modelagem e simulação acústica realizadas.



Fonte: Autores (2024).

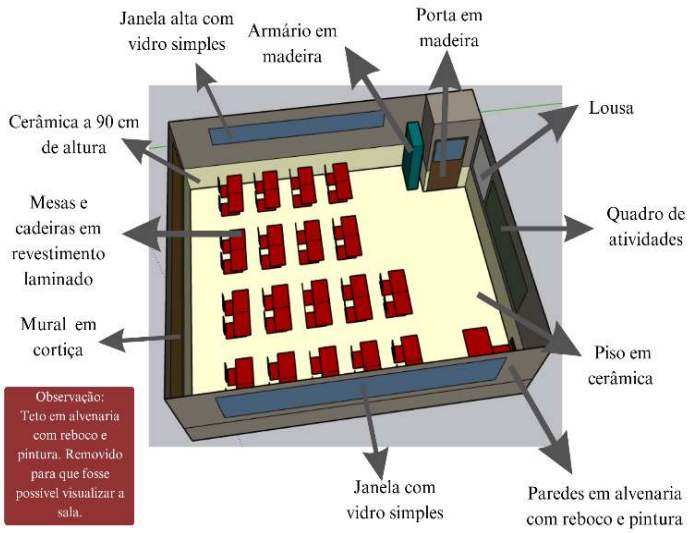
Os dados necessários para realizar a simulação foram inseridos no *software* de acústica de salas Odeon (v.11), cujo acesso é disponibilizado pelo curso de graduação em Engenharia Acústica da UFSM, além do *software* Google SketchUp que foi utilizado para desenvolver a volumetria da sala de aula. A presente etapa tem por objetivo realizar a simulação acústica da sala de aula, com o intuito de extrair e analisar os parâmetros objetivos de acústica de salas, visando fornecer subsídios para a atualização do manual do FNDE.

2.2.1 Dados de entrada para simulação

Para a definição da geometria da sala, utilizaram-se superfícies, o que facilita a modelagem. A cada superfície modelada, atribuiu-se uma identificação específica (etiqueta) e inseriram-se os respectivos coeficientes de absorção e de espalhamento sonoro. A geometria da sala de aula, foi executada inicialmente no *software* SketchUp versão 2023. Foram representados todos os elementos, tanto quanto possível, fidedignos ao real. Ressaltando que as volumetrias cuja finalidade é importar ao *software* de acústica de salas, não necessitam conter todos os detalhes, conforme ressaltado por Ribeiro (2020). Nesse sentido, pés de mesas e cadeiras não são representados, além de maçanetas, luminárias, ventiladores e outros detalhes.
Nesse sentido, o modelo geométrico foi criado, considerando os seguintes elementos: quadro negro, janelas, porta, mesa do professor, armário e mesas e cadeiras para trinta e seis alunos

e um professor(a). A Figura 3 apresenta a volumetria da sala de aula executada no *software* SketchUp, com a identificação de cada material na representação.

Figura 3: Representação do modelo geométrico da sala padrão FNDE no software SketchUp.



Fonte: Autores (2024).

2.2.2 Modelagem e simulação acústica

O passo inicial para a modelagem acústica foi atribuir um material para cada superfície, com seus respectivos coeficientes de absorção (α) e coeficiente de espalhamento (δ) por banda de oitava, através da janela "*Material List*" no *software* Odeon. Os coeficientes de absorção por bandas de oitava de 63 Hz a 8 kHz constam da Tabela 1. O coeficiente de espalhamento adotado para todos os materiais no próprio *software*, δ = 0,01, para todas as frequências. Salienta-se que o coeficiente de espalhamento definido pelo *software* não foi alterado pelo fato de haver dificuldade para encontrar valores para esses coeficientes dos materiais medidos e disponíveis na literatura.

2.2.3 Definição do número de raios da simulação

Conforme o estudo desenvolvido por Mahl (2022), para avaliar o número de raios em salas de aula de volumes próximos ao proposto pelo manual do FNDE, foram realizadas duas simulações: uma com a emissão de 10 mil raios e outra com 100 mil raios. Os resultados obtidos nas simulações indicaram uma diferença mínima entre as simulações realizadas com 10 mil e 100 mil raios. Isso pode ser atribuído ao fato de a sala ser pequena e possuir uma geometria simples, o que reduz a necessidade de um número elevado de raios para uma simulação eficaz. Assim, foi adotado o uso de 10 mil raios, reduzindo, o tempo de processamento para obtenção dos resultados.

Tabela 1: Coeficientes de absorção dos materiais da sala.

		α por frequência (Hz)							
Material	**Área (m²)**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
Paredes em Alvenaria	122,05	0,01	0,06	0,12	0,10	0,08	0,05	0,07	0,01
Cerâmica	84,73	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
Janelas de vidro simples	7,92	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Laminado	20,44	0,01	0,06	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02
Madeira	5,55	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,10	0,10	0,10
Lousa	1,44	0,01	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02
Cortiça	6,60	0,14	0,14	0,25	0,40	0,25	0,34	0,34	0,34

Fonte: Banco de dados do *software* Odeon (v.11).

2.2.4 Dados da simulação: fonte sonora e receptores

A próxima etapa de modelagem acústica foi a inserção da fonte sonora e dos receptores. Os dados inseridos para a fonte sonora localizada na sala de aula modelo para as simulações constam da Tabela 2.

Tabela 2: Dados da fonte sonora inserida na sala de aula.

Sala de aula	**Nome da fonte**	**Posição (m)**		
		X	**Y**	**Z**
Sala padrão FNDE	F1	3,63	6,60	1,60

Fonte: Autores (2024).

A simulação computacional empregou seis receptores. Para a análise dos resultados, calculou-se a média aritmética dos valores obtidos em cada receptor. As especificações dos receptores inseridas no *software* encontram-se detalhadas na Tabela 3.

Tabela 3: Dados dos receptores inseridos na sala de aula.

Sala de aula	**Nome do receptor**	**Posição (m)**		
		X	**Y**	**Z**
Sala padrão FNDE	R1	1,80	3,97	1,20
	R2	3,46	2,90	1,20
	R3	5,20	1,80	1,20
	R4	5,21	4,85	1,20
	R5	5,19	3,37	1,20
	R6	1,80	1,70	1,20

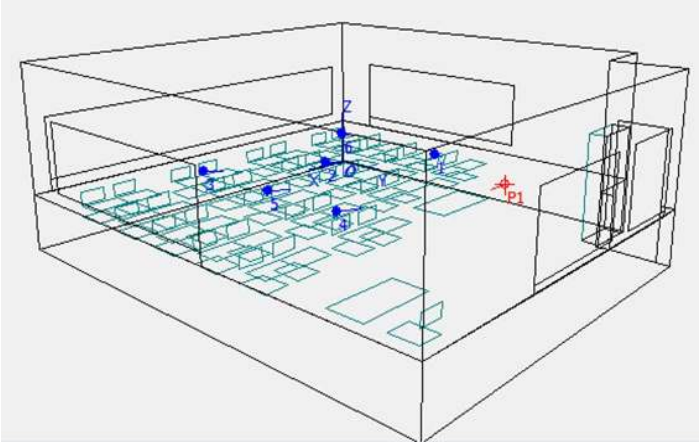
Fonte: Autores (2024).

2.2.5 Simulação da sala padrão FNDE

A simulação acústica feita neste estudo tem como objetivo analisar quatro parâmetros objetivos primordiais da acústica de salas (EDT, T_{20}, C_{50}, D_{50} e STI), com a finalidade de

identificar eventuais deficiências no ambiente. A Figura 4 ilustra a sala de aula inserida no *software* Odeon, onde os pontos em azul indicam os receptores e o ponto vermelho, a fonte sonora.

Figura 4: Sala modelo inserida no software Odeon.

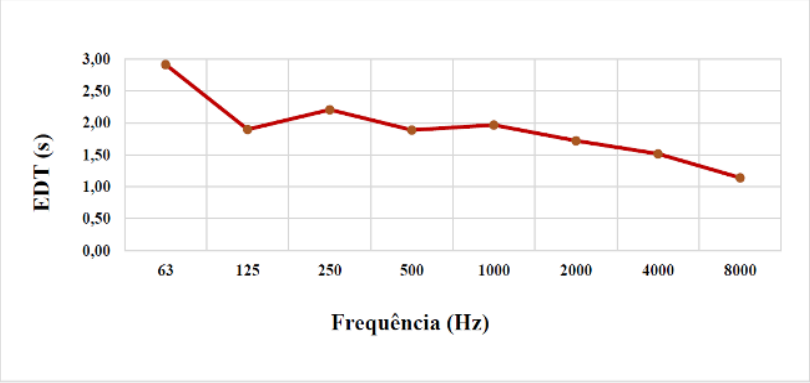


Fonte: Odeon (v.11).

3. Resultados e discussão

A análise dos parâmetros objetivos teve início verificando o tempo de reverberação da sala por meio dos parâmetros EDT e T_{20}. A Figura 5 ilustra o gráfico para o parâmetro EDT, organizados pela média aritmética dos seis pares de fonte-receptor. O EDT é o parâmetro objetivo que melhor se relaciona com a avaliação subjetiva de um ambiente e, em geral, apresenta maior variação ao longo da sala de aula quando comparado ao TR. A partir de 500 Hz, foi possível observar uma redução nos valores. De acordo com a Figura 5, observou-se que os valores obtidos na sala de aula padrão FNDE são excessivamente elevados, na frequência de 1 kHz, o menor valor foi de 1,94 s. Este valor não é considerado adequado para uma sala de aula de volumetria reduzida, como a analisada neste estudo.

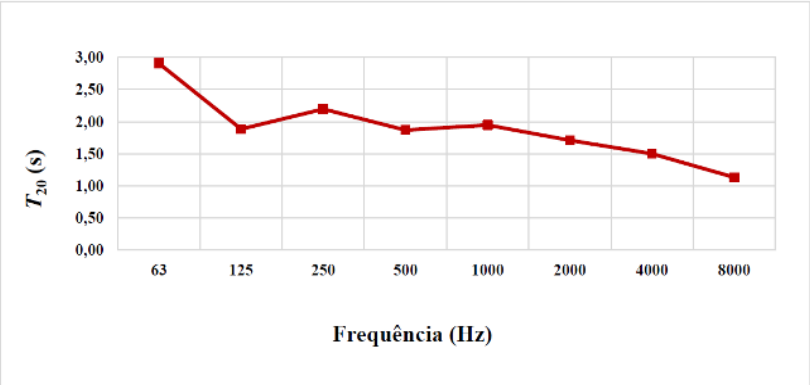
Figura 5: Resultados do Tempo de decaimento inicial (EDT).



Fonte: Autores (2024).

A sala de aula é classificada como pequena, com um volume inferior a 300 m³ (ABNT, 2017). A norma ANSI S12.60 ANSI/ASA (2019) estabelece que, para essas salas, o tempo de reverberação (TR) não deve ultrapassar 0,6 segundos. Segundo Long (2006), o TR pode chegar a um máximo de 0,8 segundos nesses ambientes. No entanto, os resultados obtidos para o T_{20} na sala de aula superam esse limite, o que a torna inadequada para o tipo de espaço em questão. Os dados referentes ao T_{20} podem ser observados na Figura 6.

Figura 6:Resultados do Tempo de reverberação (T_{20}).

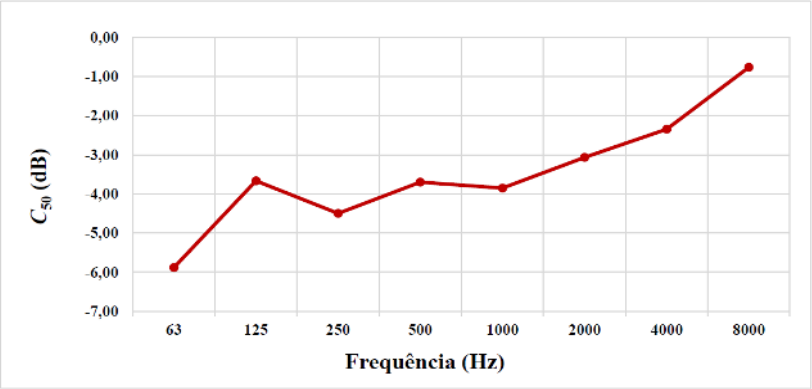


Fonte: Autores (2024).

A média aritmética do tempo de reverberação (T_{20}) entre os receptores, foi calculada em todas as frequências de 63 Hz e 8 kHz, resultando nos seguintes valores para R1 a R6: 2,91 s, 1,89 s, 2,20 s, 1,87 s, 1,95 s, 1,71 s, 1,50 s e 1,13 s. Assim, a média do T_{20} nessa faixa de frequências para a sala de aula foi de 1,89 s. É importante destacar que a sala apresenta diversos materiais com superfícies lisas e reflexivas, em conformidade com as sugestões do Manual do FNDE, o que a torna altamente reverberante. Além disso, a simulação foi conduzida sem a presença de ocupantes (sala vazia), fator que contribui para o aumento do tempo de reverberação.

Os parâmetros objetivos Clareza (C_{50}) e Definição (D_{50}) estão associados à inteligibilidade da fala. Ao iniciar a análise de C_{50}, observou-se que para todas as bandas de frequência, os resultados são negativos, como ilustrado no gráfico da Figura 7. Valores positivos para C_{50} indicam uma maior energia nas primeiras reflexões, resultando em uma inteligibilidade da fala mais alta. Segundo Marshall (1995), a inteligibilidade da fala nesse ambiente, na frequência de 1 kHz, pode ser considerada pobre para todos os receptores.

Figura 7:Resultados do fator de Clareza (C_{50}).



Fonte: Autores (2024).

O parâmetro STI reflete todas as possíveis interferências na clareza do discurso. De acordo com a norma EN 60268-16 (2020), valores de STI entre 0,45 e 0,60 são considerados aceitáveis, entre 0,60 e 0,75 são considerados bons, e acima de 0,75 são considerados excelentes. A média aritmética do índice de transmissão da fala (STI) entre as frequências de 63 Hz e 8 kHz foi calculada para cada receptor, resultando nos seguintes valores de R1 a R6: 0,47, 0,46, 0,46, 0,48, 0,47 e 0,47. Assim, a média do STI em todas as faixas de frequência para a sala de aula foi de 0,46, considerado aceitável.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, procedeu-se à análise acústica da sala de aula padrão especificada no Manual Técnico do Fundo Nacional de Educação (FNDE). A investigação concentrou-se em um modelo de sala de aula tradicional, comumente utilizada no ensino fundamental. O objetivo principal consistiu na realização de simulações acústicas para a obtenção de valores representativos de diversos parâmetros relevantes, incluindo o tempo de reverberação (T_{20}), o tempo de decaimento inicial (EDT), a clareza (C_{50}), e o índice de transmissão da fala (STI).

Constatou-se que os parâmetros acústicos tempo de reverberação (T_{20}) e tempo de decaimento inicial (EDT) excederam significativamente os valores de referência para uma sala com volume de 151,2 m³, atingindo 1,89 s na condição de sala vazia. De modo geral, os resultados dos parâmetros objetivos T_{20}, EDT, clareza (C_{50}) e índice de transmissão da fala (STI) indicam que a sala de aula analisada apresenta inadequação acústica para a finalidade educacional. A inteligibilidade da fala revelou-se insatisfatória, sendo que, para alcançar um nível favorável, seria desejável que a sala apresentasse um tempo de reverberação inferior a 0,8 s, um fator de clareza positivo e um índice de transmissão da fala classificado como excelente.

Uma das recomendações que os autores consideram fundamentais para a melhoria do condicionamento acústico das salas de aula padrão do FNDE diz respeito à superfície revestida de cerâmica até a altura de 90 cm nas paredes da sala. Essa superfície, com cerca de 34% da área superficial total da sala, possui coeficiente de absorção entre 0,01 e 0,02, ou seja, é uma superfície altamente reflexiva, o que se traduz por um importante incremento na reverberação da sala e redução de seu fator de clareza para a fala.

REFERÊNCIAS

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

American national standards institute S12.60. **Critérios de Desempenho acústico, requisitos de design e diretrizes para escolas.** Nova York: American National Standards Institute, 2019.

Diaz, Muriel; Gonzalez-Caceres, Alex; Attia, Shady. **Multicriteria Design: Optimizing Thermal, Acoustic, and Visual Comfort and Indoor Air Quality in Classrooms.** In: Marín-Restrepo, Laura *et al.* (eds) **Removing Barriers to Environmental Comfort in the Global South.** Green Energy and Technology. Springer, Cham, p. 435-449,2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24208-3_30

EN 60268-16: **Equipamentos de sistemas de som - Avaliação objetiva da inteligibilidade da fala pelo índice de transmissão da fala**. 2020.

Keshtkaran, Parinaz; Najafi, Najmeh. **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

Libardi, Aline et al. **O ruído em sala de aula e a percepção dos professores de uma escola de ensino fundamental de Piracicaba.** Distúrbios na comunicação, v.18, n.2, p.167-178, 2006.

Long, M. **Architetural Acoustics**. Oxford, UK: Elsevier, 2006.

Mahl, Ana Luiza. **Avaliação de inteligibilidade da fala em salas de Aula utilizando aurilizações simuladas.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2022. Disponível em: http://repositorio.ufsm.br/handle/1/26364

Manual de Orientações Técnicas. **Elaboração de projetos de edificações escolares. Ensino fundamental**, volume 3, Brasil, 2023.

Ribeiro, Rodrigo Scoczynski. **Caracterização do condicionamento acústico de uma sala de aula com o uso de painéis de madeira.** 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2020. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/5034

Yang, Wonyoung; Jeon, Jin Yong. **Design strategies and elements of building envelope for urban acoustic environment.** Building and Environment, p.182, 2020. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107121