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

Uma proposta de correção de condicionamento acústico de sala de aula da Universidade Federal de Santa Catarina

Uma propuesta de corrección del acondicionamiento acústico de una sala de clase de la Universidad Federal de Santa Catarina.

A Proposal for acoustic conditioning correction of a classroom at the Federal University of Santa Catarina.

Acústica Arquitetônica e Urbana/ *Acústica Arquitectónica y Urbana/ Architectural and Urban Acoustics*

Zandavalli, Carolina
Esp., UFSC, Florianópolis, carolinazandavalli@gmail.com

Westphal, Fernando Simon

Dr., UFSC, Florianópolis, fernando.sw@ufsc.br

Resumo

O condicionamento acústico de salas de aula é um fator muito importante na construção de espaços de ensino. Para tanto, esse trabalho avaliou a qualidade acústica de uma sala de aula padrão universitária propondo correções por meio de simulações computacionais. Foram realizados ensaios *in loco* para medir o tempo de reverberação, seguindo o conjunto de normas técnicas ISO 3382 e recomendações da DIN 10841:2016. Os resultados demonstraram que o condicionamento acústico da sala é insatisfatório, evidenciando dificuldades em atingir tempos de reverberação adequados sem tratamento. A intervenção proposta, que incluiu painéis de madeira perfurados e baffles, atingiu as recomendações normativas com 80% de ocupação, contribuindo para um melhor entendimento do comportamento acústico em ambientes educacionais.

Palavras-chave: Acústica de salas. Sala de aula. Tempo de reverberação. I-SIMPA.

Resumen

El acondicionamiento acústico de las aulas es un factor muy importante en la construcción de espacios educativos. Para ello, este trabajo evaluó la calidad acústica de un aula estándar universitaria proponiendo correcciones a través de simulaciones computacionales. Se realizaron ensayos in situ para medir el tiempo de reverberación, siguiendo el conjunto de normas técnicas ISO 3382 y las recomendaciones de la DIN 10841:2016. Los resultados demostraron que el acondicionamiento acústico del aula es insatisfactorio, evidenciando dificultades para alcanzar tiempos de reverberación adecuados sin tratamiento. La intervención propuesta, que incluyó paneles de madera perforados y bafles, alcanzó las recomendaciones normativas con un 80% de ocupación, contribuyendo a una mejor comprensión del comportamiento acústico en entornos educativos.

Palabras clave: Acústica de salas, sala de clase, tiempo de reverberación, I-SIMPA.

Abstract

The acoustic conditioning of classrooms is a very important factor in the construction of teaching spaces. To this end, this work evaluated the acoustic quality of a standard university classroom, proposing corrections through computational simulations. In-situ tests were conducted to measure the reverberation time, following the ISO 3382 technical standards and the recommendations of DIN 10841:2016. The results showed that the acoustic conditioning of the classroom is unsatisfactory, highlighting difficulties in achieving appropriate reverberation times without treatment. The proposed intervention, which included perforated wood panels and baffles, met the regulatory recommendations with 80% occupancy, contributing to a better understanding of acoustic behavior in educational environments.

Keywords: Room acoustics. Classroom. Reverberation time. I-SIMPA.

Introdução

A falta de qualidade acústica em uma sala de aula gera desafios para muitos alunos e professores, tendo em vista consequências como baixo desempenho escolar, problemas de saúde e bem-estar dada a falta de tratamento necessário na construção desses espaços (Yang; Becerik-Gerber; Mino, 2013).

Com frequência, aulas são dadas em salas adaptadas ou construídas sem requisitos acústicos, sendo limitadas a estruturas convencionais e tradicionais com acabamentos reflexivos (Mueller, 2017).

Diferentemente de países como Portugal (Pinho *et al.*, 2016), Itália (Berardi; Iannace; Trematerra, 2019) e Alemanha (Schulz, 2009), que possuem normativas próprias para ambientes de ensino, no Brasil não existem diretrizes acústicas obrigatórias de como salas de aula devem ser.

A norma ABNT NBR 10152 (ABNT, 2017a) cita valores de referência para níveis de pressão sonora no interior de recintos com atividades de sala de aula, porém, sem regulamentações nacionais com critérios de obrigatoriedade (Zannin; Vieira; Silveira, 2021).

Apesar de muitas decisões de projeto serem consequências econômicas, muitos estudos (Zannin; Fiedler; Bunn, 2013) também demonstraram a questão do desconhecimento sobre boas práticas do condicionamento acústico.

Entender como o som se comporta no ambiente é extremamente importante para que atividades como aulas expositivas possam ser realizadas com qualidade e o conteúdo transmitido pela voz não sofra alterações no momento de recebimento da mensagem (Mealings, 2016).

O desgaste vocal e o excesso de exposição ao ruído não só comprometem o aprendizado, mas também a saúde de alunos e professores, causando desconfortos mentais e físicos como perda auditiva, irritabilidade, dores de cabeça, dificuldade cognitiva. Problemas amplamente abordados em pesquisas científicas nos campos de fonoaudiologia, medicina e educação e que são decorrentes de acústica deficiente (Dias; Santos; Mariano, 2019; Minelli; Puglisi; Astolfi, 2022).

Apesar do esforço de muitos trabalhos na divulgação da gravidade de todos esses impactos, a maioria das salas de aula não atende aos padrões acústicos nacionais e internacionais. Além disso, outro fator importante é que não há consenso sobre os critérios acústicos mais eficientes para ambientes de aprendizagem, incluindo parâmetros mais conhecidos como níveis de ruído residual, tempo de reverberação e taxas de decaimento em dB para T_{20} ou T_{30} (Minelli; Puglisi; Astolfi, 2022).

Diante desse contexto, este trabalho apresenta uma avaliação da qualidade acústica feita em uma sala de aula padrão em uma universidade, com uma proposta de correção utilizando simulação computacional. O objetivo do trabalho é ilustrar a realidade desses espaços e os principais problemas que poderiam ser corrigidos com estratégias de projeto para melhoria acústica.

Metodologia

A análise do comportamento acústico da sala de aula foi feita a partir de um ensaio *in loco*, para a medição do parâmetro acústico tempo de reverberação (Arranz, 2013). Para a avaliação foi utilizado como referência os valores de tempo ótimo de reverberação da norma alemã DIN 10841 (DIN, 2016), que indica valores específicos para espaços com a função de ensino (Nocke, 2018).

Foram feitas simulações computacionais com uma proposta de correção para o ambiente de estudo, visando soluções que pudessem ser executadas respeitando as condições reais da sala de aula.

Características arquitetônicas da sala de aula

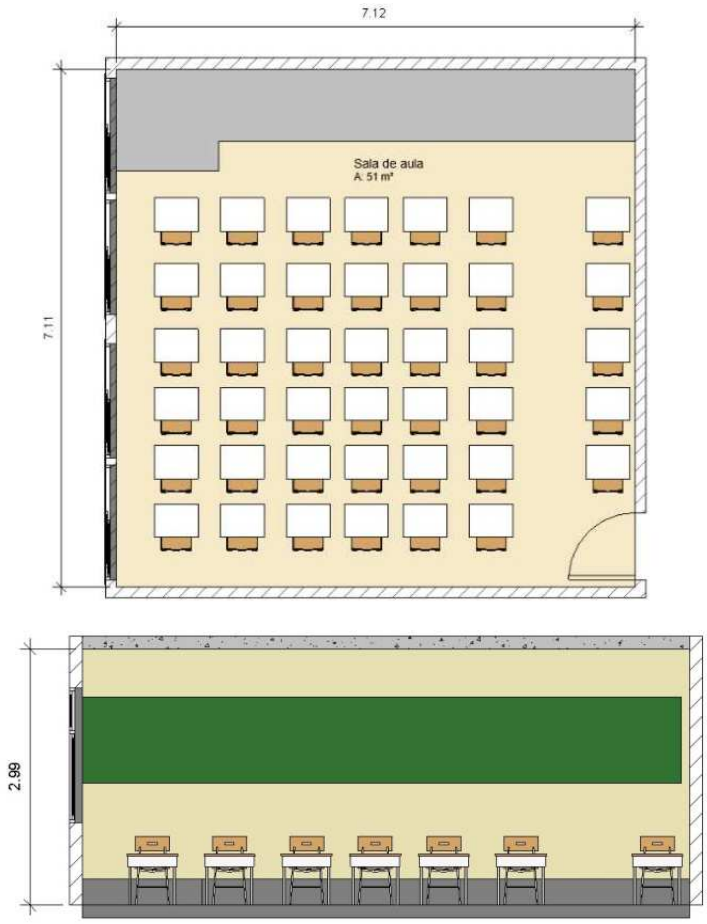
Com base em trabalhos anteriores (Zandavalli; Westphal, 2024), em que foram feitos levantamentos das características das salas de aula padrão da Universidade de Santa Catarina, foi identificado que o tipo de sala mais representativa possui capacidade para 40 alunos.

A sala utilizada como amostra para o estudo tem formato regular, cerca de 50 m² e 151,36m³ de volume. Possui pé-direito de 2,99 metros, paredes em alvenaria, laje rebocada pintada e piso cerâmico. As janelas são de alumínio com cortinas de tecido e o acesso é feito por uma porta de madeira.

O formato da sala impacta diretamente no comportamento sonoro, sendo essa sala de aula particularmente interessante pois seu formato é um quadrado. Essa característica foi analisada e abordada em trabalhos anteriores, visto que a forma quadrada é extremamente desfavorável (Zandavalli; Westphal, 2024).

O interior da sala é composto por carteiras escolares de madeira, mesa e cadeira, uma lousa e acessórios de apoio para equipamentos de multimidia. Há um tablado em concreto em frente a lousa, como mostra a figura 1.

Figura 1: Planta e corte da sala de aula



Fonte: Autores (2024).

Medição *in loco*

A medição *in loco* foi realizada em outubro de 2024 no período de intervalo entre as aulas. O procedimento seguiu as diretrizes do conjunto de normas ABNT ISO 3382 (ABNT, 2017b), adotando o método de Engenharia com 6 combinações de fonte-microfone. Para a medição, o método utilizado foi o ruído interrompido. As figuras 2 e 3 ilustram a sala e a locação dos pontos de fonte (F) e microfone (M), respectivamente.

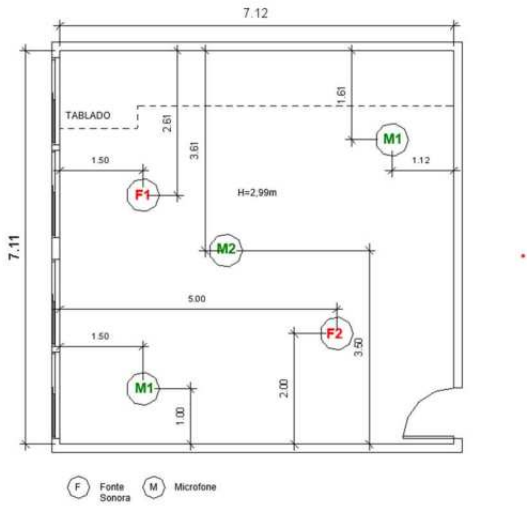
Foram utilizados um sonômetro modelo Investigator 2260, um amplificador de potência e uma fonte sonora dodecaedra, todos da marca Brüel & Kjær. Os resultados foram processados no software *Qualifyer* também da fabricante Brüel & Kjær.

Figura 2: Imagens da sala de aula



Fonte: Autores (2024).

Figura 3. Locação dos pontos de medição



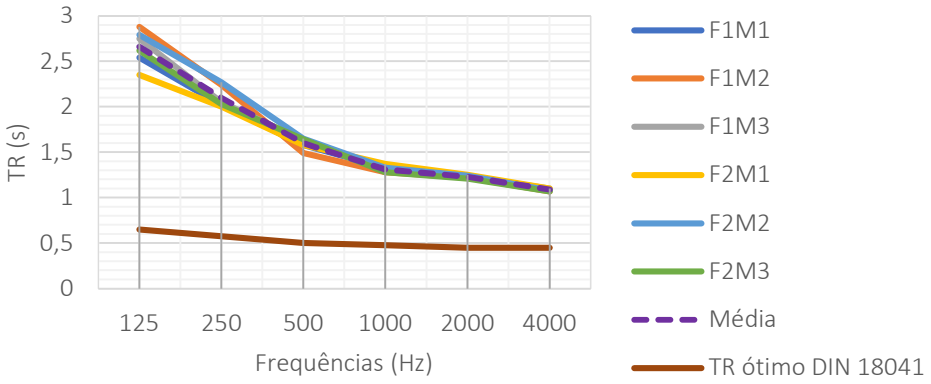
Fonte: Autores (2024).

Resultados

Os resultados apresentados compreendem os valores de tempo de reverberação medidos em cada conjunto de fonte e microfone. Essa análise permite identificar a localização dos pontos mais críticos da sala.

Com base no gráfico 2 a seguir, é possível perceber pouca variação dos resultados em cada combinação de fonte e microfone. Em todos os pontos foi visto o comportamento da diminuição dos valores conforme o aumento da frequência. Isso indica maior necessidade de absorção em baixas frequências.

Gráfico 1: Sala EEL010 - Ruído interrompido



Fonte: Autores (2024).

Utilizando a referência de tempo ótimo de reverberação indicado para espaços de ensino da DIN 10841 (DIN, 2016), linha marrom no gráfico, a conclusão é de que a qualidade acústica da sala é insuficiente.

Correção do problema com simulação computacional

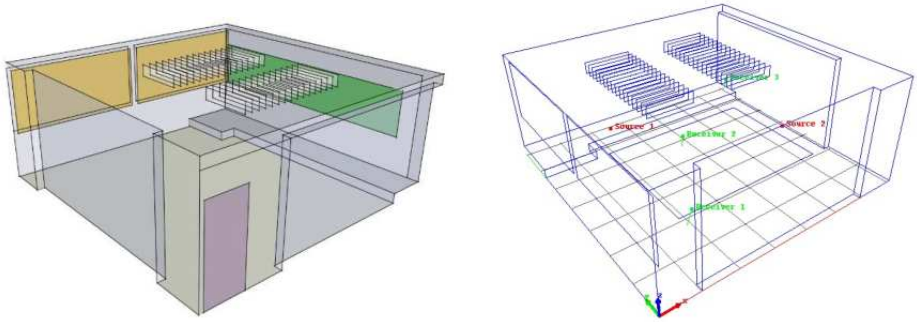
Para corrigir os problemas diagnosticados pelo ensaio in loco, foi feita uma proposta de intervenção utilizando o software de simulação computacional I-SIMPA.

As etapas da simulação são compostas pela modelagem do modelo digital (1), figura 4 (a), essa foi feita utilizando o software de modelagem Sketchup. A modelagem é feita de forma simplificada, representando apenas as superfícies dos materiais, conforme recomendações do software (Picaut; Fortin, 2012).

O modelo digital é exportado para o software I-SIMPA, figura 4 (b) e a partir das superfícies, são atribuídos os materiais com respectivos coeficientes de absorção e espalhamento (2); são locadas as posições de fonte e microfone, em conformidade com o ensaio *in loco* (3). O passo final é a escolha do tipo de cálculo da simulação (4). Para esse estudo foi escolhido o cálculo "SPPS", método que utiliza o traçado de partículas (Gaudeoso; Barbo; Brandão, 2018).

Figura 4: Modelo digital: modelagem e simulação

(a) Sketchup **(b) I-SIMPA**



Fonte: Autores (2025).

A validação do modelo digital foi feita com base no método "*Just Noticeable Difference (JND)*", ou "Diferença Apenas Perceptível" que representa a menor alteração no valor de um parâmetro acústico que pode ser detectada por um ouvinte (Dorrego; Vigeant, 2022). Com base em Vorländer e Summers (2008) são aceitos até 2 JND. Para esse cálculo, foi utilizada a média dos valores obtidos nas frequências 500 Hz e 1000 Hz, frequências mais próximas da fala humana (Ikeda, 2019).

Com o modelo digital validado, foi modelada uma proposta de intervenção a partir da análise dos resultados da medição *in loco*. Foram investigados materiais que pudessem contribuir para a redução do tempo de reverberação da sala, ou seja, com tivessem comportamento de absorção sonora coerente com a curva de resposta da sala identificada no gráfico 1. Nesse caso, materiais que tivessem alta absorção das baixas frequências tais como gesso acartonado e painéis de madeira.

Foi observado que a altura do pé-direito da sala seria insuficiente para a aplicação de forros de gesso modulares, estratégia mais simples que poderia auxiliar no equilíbrio de absorção das baixas e médias frequências. Isso demonstra o quanto pensar no condicionamento acústico é necessário nas etapas iniciais de projeto pois uma correção como essa poderia ser viabilizada. O desempenho dos materiais no teto também seria mais favorável nessa situação, com maior índice de absorção.

No entanto, para a elaboração de uma proposta realista, foram analisadas as superfícies que poderiam receber painéis de madeira perfurados com lã de vidro, aplicando-os 200 mm antes da parede, criando uma câmara de ar. Para esse estudo foram utilizados painéis em mdf nas dimensões 2750 x 160 mm.

Foram feitos testes aplicando cerca de 25m² de painel de madeira perfurado com o objetivo de equilibrar as faixas de baixa e média frequência. Para harmonizar a reverberação em alta frequência, foram testados baffles que pudessem ser pendurados na laje em altura confortável, considerando o pé-direito da sala. Foram adotados baffles lineares, cerca de 16 unidades, com 156 mm de altura e espaçamento entre painéis de 200 mm. Os coeficientes de absorção dos materiais constam na tabela 1.

Outra justificativa para utilização de soluções fixadas nas paredes e teto é a manutenção e durabilidade dos materiais, dando preferência a soluções fixas do que que tratamentos que envolvessem peças coladas.

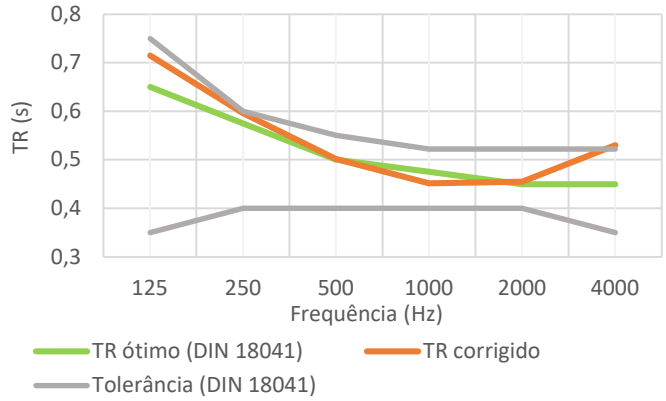
Tabela 1: Coeficientes de absorção dos materiais de tratamento

	Coeficiente de absorção por banda de oitava (Hz)					
Material	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
Forro de gesso	0,50	0,40	0,30	0,45	0,25	0,20
Painel perfurado	1,35	1,25	1,10	1,00	0,75	0,40
Baffle linear 156mm	0,15	0,48	0,76	0,86	1,08	1,03

Fonte: Ecophon (2025), Flexacustic (2025), Sonex (2025), adaptado pelos autores (2025).

Utilizando essas estratégias de correção, considerando a ocupação de 80% da sala, foi possível alcançar os valores de recomendação da DIN 10841 (DIN, 2016). O resultado da simulação (linha laranja) e os valores de referência de TR ótimo (linha verde) estão presentes no gráfico 2, respectivamente.

Gráfico 2: Resultado da simulação computacional



Fonte: Autores (2025).

A norma DIN 10841 (DIN, 2016) possui valores de tolerância (linha cinza) acima e abaixo do valor do tempo ótimo de reverberação adequado para o uso do ambiente e esses variam de acordo com as frequências. Isso é bastante positivo pois amplia as possibilidades de tratamento, tendo em vista que valores de referência fixados muitas vezes são muito baixos e difíceis de alcançar na prática (Nocke, 2018).

Dessa forma, como demonstrado no gráfico, de acordo com a norma alemã, uma sala de aula com volume de 150m³ na frequência de 500 Hz, por exemplo, deveria apresentar valores de tempo de reverberação entre 0,4 e 0,55 segundos.

Considerações finais

O presente trabalho apresentou os resultados da avaliação de condicionamento de uma sala de aula, trazendo uma proposta de correção com base na análise dos resultados medidos e simulação computacional.

Os resultados demonstraram a realidade insatisfatória do condicionamento acústico da sala de aula padrão, mostrando a dificuldade de alcançar bons níveis de tempo de reverberação sem materiais de tratamento adequados.

A correção do ambiente pós construído limita consideravelmente as soluções de tratamento, acarretando resultados com menos chances de atingir a quantidade de absorção necessária e de custo mais elevado.

O trabalho é uma contribuição para o entendimento do comportamento acústico de espaços de ensino com ênfase em suas características construtivas, podendo servir de apoio para a análise de novas salas de aula.

Referências */ Referencias / References*

ARRANZ, Guillermo. **Estúdio y diseño de sistemas para el acondicionamiento acústico.** (Master). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2013. Disponível em:https://oa.upm.es/21536/1/TESIS_MASTER_GUILLERMO_JIMENEZ_ARRANZ.pdf. Acesso em 27 jan. 2025.

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

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

BERARDI, U.; IANNACE, G.; TREMATERRA, A. ACOUSTIC TREATMENTS AIMING TO ACHIEVE THE ITALIAN MINIMUM ENVIRONMENTAL CRITERIA (CAM) STANDARDS IN LARGE REVERBERANT CLASSROOMS. **Canadian Acoustics**, [*s. l.*], v. 47, n. 1, p. 73–80, 2019.

Deutsches Institut für Normung. **DIN 18041**. Acoustics quality in rooms – Specification and instructions for the room acoustics design. Technical Report. Deutsches Institut für Normung, Berlin, 2016.

DIAS, F. A. M.; SANTOS, B. A.; MARIANO, H. C.. Níveis de pressão sonora em salas de aula de uma Universidade e seus efeitos em alunos e professores. **CoDAS**, v. 31, n. 4, p. e20180093, 2019.

DORREGO, F. D. S.; VIGEANT, M. C. A study of the just noticeable difference of early decay time for symphonic halls. **J Acoust Soc Am,** v. 151, p. 80-94, 2022. DOI: 10.1121/10.0009167. PMID: 35105034.

FLEXACUSTIC. **Painéis Flexwood Absorvedores.** Disponível em: https://www.flexacustic.com.br/flexwood/painel/paineis-flexwood-absorvedores/. Acesso em: 19 fev. 2025.

GAUDEOSO, C; BARBO, M; BRANDÃO, E. Tutorial para o uso do software gratuito de simulação em acústica geométrica: I-SIMPA.. In: XXVIII ENCONTRO DA SOBRAC, 2018, Porto Alegre. **Anais eletrônicos...**, Galoá, 2018. Disponível em:

<https://proceedings.science/sobrac/trabalhos/tutorial-para-o-uso-do-software-gratuito-de-simulacao-em-acustica-geometrica-i-s?lang=pt-br> Acesso em: 24 Abr. 2025.

IKEDA, C. Y. K. **Determinação de faixas de operação de parâmetros acústicos para avaliação da qualidade sonora de salas de aula.** 2019. Tese (Doutorado em Tecnologia da Arquitetura) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-15012019-162548/. Acesso em: 10 fev. 2025.

MEALINGS, K. Classroom acoustic conditions: Understanding what is suitable through a review of national and international standards, recommendations, and live classroom measurements. *In:* ACOUSTICS 2016. **Proceedings [...].** Australia, 2016. p. 1–10. Disponível em: https://acoustics.asn.au/conference_proceedings/AASNZ2016/papers/p145.pdf. Acesso em: 20 fev. 2025.

MINELLI, G.; PUGLISI, G. E.; ASTOLFI, A. Acoustical parameters for learning in classroom: A review. **Building and Environment**, [*s. l.*], v. 208, p. 108582, 2022.

MUELLER, Cecília Mattos. **Espaços de ensino-aprendizagem com qualidade ambiental**: o processo metodológico para elaboração de um anteprojeto. 2007. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. doi:10.11606/D.16.2007.tde-19092007-142731. Acesso em: 19 fev. 2025.

NOCKE, C. DIN 18041 – a German view. *In:* EURONOISE 2018 – Conference Proceedings, 2018, Crete. **Proceedings [...].** Crete: Convention Center Creta Maris in Hersonissos, 2018. p. 1033–1038. Disponível em: https://www.euronoise2018.eu/docs/papers/176_Euronoise2018.pdf. Acesso em: 20 fev. 2025.

PICAUT, J; FORTIN, N. I-Simpa, a graphical user interface devoted to host 3D sound propagation numerical codes. **Acoustics 2012**, Apr 2012, Nantes, France. Disponível em: http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00810893. Acesso em 10 abril 2024.

PINHO, P. G. *et al.* Aspects concerning the acoustical performance of school buildings in Portugal. **Applied Acoustics**, [*s. l.*], v. 106, p. 129–134, 2016.

SCHULZ, J. Ausschreibungshinweise. **Sichtbeton Atlas**, [S.L.], p. 92-108, 2009. Vieweg+Teubner. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9330-7_5. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-8348-9330-7_5. Acesso em: 24 abr. 2025.

SONEX. *Baffle Linear*. Disponível em: https://sonex.com.br/produtos/baffle-linear/. Acesso em: 19 fev. 2025.

VORLÄNDER, M.; SUMMERS, J. **Auralization:** fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms, and acoustic virtual reality. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. (RWTHedition). Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-48830-9. Acesso em: 8 fev. 2025.

YANG, Z.; BECERIK-GERBER, B.; MINO, L. A study on student perceptions of higher education classrooms: Impact of classroom attributes on student satisfaction and performance. **Building and Environment**, [*s. l.*], v. 70, p. 171–188, 2013.

ZANDAVALLI, C.; F. S. WESTPHAL. Avaliação do condicionamento acústico de salas de aula da Universidade Federal de Santa Catarina. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2024. p. 1–13. DOI: 10.46421/entac.v20i1.5957. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/5957. Acesso em: 20 fev. 2025.

ZANDAVALLI, C.; F. S. WESTPHAL. Análise de modos normais em salas de aula da Universidade Federal de Santa Catarina. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2024. p. 1–8. DOI: 10.46421/entac.v20i1.6155. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/6155. Acesso em: 20 fev. 2025.

ZANNIN, P. H. T.; FIEDLER, P. E. K.; BUNN, F. Reverberation time in classrooms – Case Study: When an administrative decision changes acoustic quality. **Journal of Scientific and Industrial Research,** v. 72, 2013.

ZANNIN, P. H. T.; VIEIRA, T. J.; SILVEIRA, A. R. R. Evaluation of the Acoustic Comfort in University Classrooms, Based on the Brazilian Technical Standard NBR 10152—Use of Noise Mapping and Acoustic Barriers to Counter Noise on a University Campus. **Current Urban Studies**, [*s. l.*], v. 09, n. 02, p. 238–251, 2021.