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 do condicionamento acústico de um cinema com absorvedores ressonantes: Estudo de Caso

Evaluación del acondicionamiento acústico de un cine con absorbentes resonantes: Estudio de Caso

Evaluation of the acoustic performance of a cinema with resonant absorbers: Case Study

Acústica arquitetônica e de edifícios

Scoczynski Ribeiro, Rodrigo
Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, rodrigosribeiro@utfpr.edu.br
Gidrão, Gustavo
Doutorado em Engenharia de Estruturas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Brasil, gidrao@utfpr.edu.br
Silvestro, Laura
Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Brasil, laurasilvestro@utfpr.edu.br
Catai, Rodrigo
Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, catai@utfpr.edu.br
Silva, Dyorgge Alves
Mestrado em Engenharia de Estruturas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, Brasil, dyorggeasilva@utfpr.edu.br
Rúbia Mara Bosse
Doutorado em Engenharia de Estruturas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Brasil, rubiambosse@utfpr.edu.br
Lima, Antônio Ricardo Caldas de Lima
Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, Brasil, antonio.lima@outlook.com

Resumo

Este estudo analisa o condicionamento acústico de um cinema com absorvedores ressonantes (placas perfuradas de MDF) através de simulações (software Raven) e medições (norma ABNT NBR ISO 3382-1). A pesquisa revela que o desvio das especificações das cavidades de ar e da posição da lã mineral durante a instalação gerou diferenças entre resultados simulados e medidos. Um cinema foi avaliado (com volume de 221,1 m³ e localizado em Guarapuava-PR), o tempo de reverberação a 250 e 500 Hz atendeu à norma ABNT NBR 12179, mas divergiu em altas frequências. Conclui-se que a eficácia do projeto acústico depende do rigor na execução das cavidades e materiais, conforme ensaios prévios, alinhando prática e premissas teóricas.

Palavras-chave: Condicionamento acústico. Absorvedores ressonantes. Acústica geométrica. Placas perfuradas.

Resumen

Este estudio analiza el acondicionamiento acústico de un cine con absorbentes resonantes (placas perforadas de MDF) mediante simulaciones (software Raven) y mediciones (norma ABNT NBR ISO 3382-1). La investigación revela que el desvío de las especificaciones de las cavidades de aire y de la posición de la lana mineral durante la instalación generó diferencias entre los resultados simulados y los medidos. Se evaluó un cine (con un volumen de 221,1 m³ y ubicado en Guarapuava-PR), donde el tiempo de reverberación a 250 y 500 Hz cumplió con la norma ABNT NBR 12179, pero presentó divergencias en las altas frecuencias. Se concluye que la efectividad del proyecto acústico depende del rigor en la ejecución de las cavidades y los materiales, según los ensayos previos, alineando la práctica con las premisas teóricas.

Palabras clave: *Acondicionamiento acústico. Absorbentes resonantes. Acústica geométrica. Placas perforadas.*

Abstract

This study examines the acoustic conditioning of a cinema with resonant absorbers (MDF perforated plates) through simulations (Raven software) and measurements (ABNT NBR ISO 3382-1 standard). The research reveals that deviations from the air cavity specifications and mineral wool placement during installation led to discrepancies between simulated and measured results. A cinema was evaluated (with a volume of 221.1 m³ and located in Guarapuava-PR, Brazil), where the reverberation time at 250 and 500 Hz complied with the ABNT NBR 12179 standard but diverged at higher frequencies. It is concluded that the effectiveness of the acoustic design depends on rigorous execution of cavity dimensions and material placement, in line with prior test specifications, thereby aligning practical implementation with theoretical assumptions.

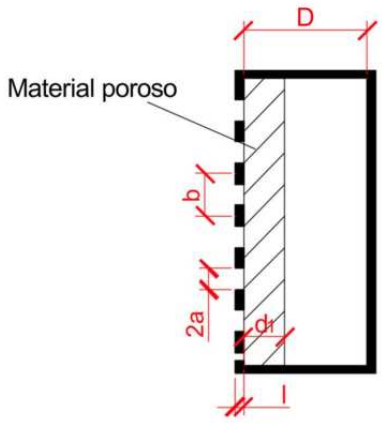
Keywords: *Acoustical treatment. Resonant absorbers. Geometric acoustics. Perforated plates.*

Introdução

Os materiais que absorvem som têm se revelado extremamente eficazes no gerenciamento de ruídos. A proporção entre o som que chega às pessoas distantes, seja por caminho direto ou refletido, depende da eficiência com que as paredes do local refletem ou absorvem o som (Crocker; Arenas 2021). O uso criterioso de materiais absorventes de som é uma das ferramentas mais essenciais no projeto acústico. Geralmente, esses materiais são aplicados com os seguintes propósitos: ajustar o Tempo de Reverberação (TR) de um ambiente, como um auditório ou sala de concertos, para adequá-lo à sua função específica; minimizar reflexões sonoras indesejadas provenientes de superfícies distantes, que podem ser percebidas como ecos; e diminuir a densidade de energia acústica e, com isso, reduzir os níveis de pressão sonora em locais barulhentos, como fábricas, escritórios amplos e outros espaços similares (Kuttruff; Vorländer, 2024).

Os absorvedores de som podem ser divididos em materiais porosos e fibrosos, que são eficientes em altas frequências; os dispositivos baseados em placas perfuradas, eficientes em médias frequências; e absorvedores de membrana, eficientes em baixas frequências (Brandão, 2018). A Figura 1 apresenta uma seção esquemática de um absorvedor de placa perfurada.

Figura 1: Esquema do absorvedor de placa perfurada



Fonte: Adaptado de Brandão (2018).

O absorvedor tipo placa perfurada é um dispositivo acústico que combina uma placa rígida com furos e uma cavidade de ar atrás, podendo incluir material absorvente. Ele funciona por ressonância: as ondas sonoras passam pelos furos e são dissipadas na cavidade, onde a energia é absorvida por reflexões e atrito. A frequência de absorção depende do tamanho dos furos, da espessura da placa e da profundidade da cavidade. Seu desempenho é limitado a uma faixa estreita de baixas frequências (Cox; D'Antonio, 2016). A impedância de superfície (Z_s) deste tipo de absorvedor pode ser calculada por meio da Equação 01, onde as variáveis a, b, d_1, D e l podem ser verificadas na Figura 1. A variável l' é dada como $l' = l + 1{,}7a$ (Brandão, 2018).

$$Z_s = j\omega \frac{\rho_0 \pi a^2 l'}{b^2} + \frac{-jZ_{sar}Z_p \cot(k_p d_1) + (Z_p)^2}{Z_{sar} - jZ_p \cot(k_p d_1)} \quad (01)$$

Onde ρ_0 é a densidade característica do ar (kg/m³), ω é a frequência angular (rad/s) e k_p é o número de onda da camada de material poroso acima da camada de ar (rad/m). A impedância no topo da camada de ar (Z_{sar}) é dada como $Z_{sar} = -j\rho_0 c_0 \cot[k_0(D - d_1)]$, com o número de onda k_0 (rad/m) e velocidade do som no ar c_0 (m/s). A impedância da placa perfurada (Z_p) é dada como $Z_p = j\omega m"$, onde $m" = \rho_0 \pi a^2 l'/b^2$, sendo a densidade superficial do gás contido na perfuração. Por fim o coeficiente de absorção sonora - $\alpha(\theta)$ - em função do ângulo de incidência, pode ser calculado por meio da Equação 02.

$$\alpha(\theta) = 1 - \left| \frac{\frac{Z_s}{\rho_0 c_0}\cos(\theta) - 1}{\frac{Z_s}{\rho_0 c_0}\cos(\theta) + 1} \right|^2 \quad (02)$$

A medição em laboratório de coeficientes de absorção sonora é prescrita pela norma ISO 354 (2003), onde uma amostra de 10,0 a 12,0 m² é colocada em uma câmara reverberante com volume próximo à 200,0 m³. Esta amostra é montada sobre um *plenum*, com espessuras definidas pela própria norma ISO 354 (2003), e a variação desta espessura leva a diferentes valores de absorção sonora em baixas frequências, pelas ressonâncias que mudam de posição ao se variar a profundidade da camada de ar.

No Brasil, a norma NBR 12172 (1992) define o condicionamento acústico como o "processo pelo qual se procura garantir em um recinto o tempo ótimo de reverberação e, se for o caso, também a boa distribuição do som". A norma apresenta, em seu Anexo I, referências para

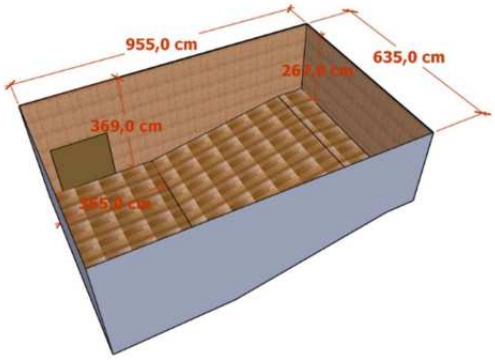
tempos de reverberação em 500 Hz para diferentes tipos de ambientes, baseadas na publicação de Beranek (1986), incluindo salas de conferência e cinemas.

Este trabalho tem por objetivo avaliar o condicionamento acústico de um teatro construído com painéis de placas perfuradas como absorvedores sonoros por meio de simulações e medições de parâmetros acústicos objetivos. A discussão científica está sobre a construção de cavidades de ar diferentes das informadas nos relatórios de ensaios de coeficientes de absorção sonora feitos com determinados *plenum* e com a existência de material poroso atrás da placa.

Materiais e Métodos

Um cinema, localizado na cidade de Guarapuava-PR, com volume igual à 221,1 m³ foi analisado quanto ao seu desempenho acústico. As dimensões são apresentadas pela Figura 2.

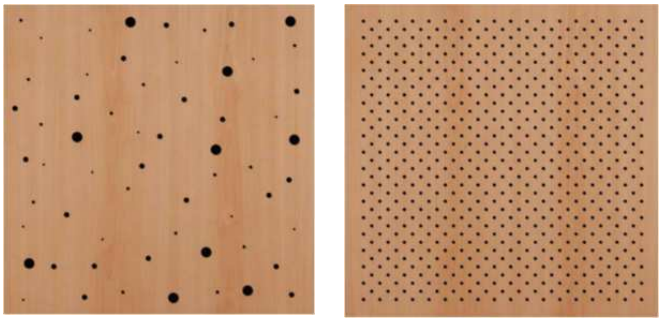
Figura 2: Dimensões do cinema.



Fonte: Autor (2025, p. 05).

As vedações laterais do cinema são compostas por placas perfuradas feitas de MDF (*Medium Density Fiberboard*) com massa superficial de 8,00 kg/m² e espessura de 15,0 mm, sendo comercializada em placas de 60,0 cm x 60,0 cm. Os furos são variáveis e sem simetria em sua distribuição. O forro também é composto por placas perfuradas, com dimensões de 2,44 m x 1,28 m e espessura de 16,0 mm. A densidade superficial do forro é de 11,5 kg/m², e diferentemente das placas de revestimento de paredes, o forro possui perfurações simetricamente distribuídas. A Figura 3 ilustra ambos os materiais de acabamento.

Figura 3: Placas perfuradas para (a) paredes e (b) forro.



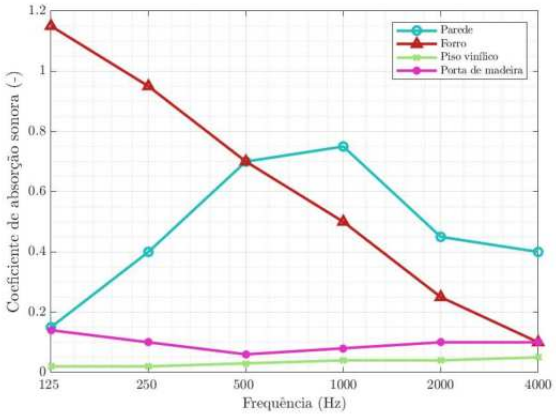
(a) (b)

Fonte: Tecnoplak (2025)

Os fabricantes apresentam dados de coeficientes de absorção sonora considerando espessuras de cavidades de ar (*plenum*) de 50,0 mm para revestimento de parede e de 200,0 mm para o revestimento de forro, conforme orientações da norma IS0 354. No revestimento de forro o fabricante também informa que a cavidade de ar deve possuir uma lã mineral.

Os outros materiais envolvidos no ambiente são o piso vinílico e a porta de madeira, cujos coeficientes de absorção sonora foram retirados do trabalho de Cox e D'Antonio (2016). A Figura 4 apresenta os coeficientes de absorção sonora dos materiais utilizados para a simulação acústica.

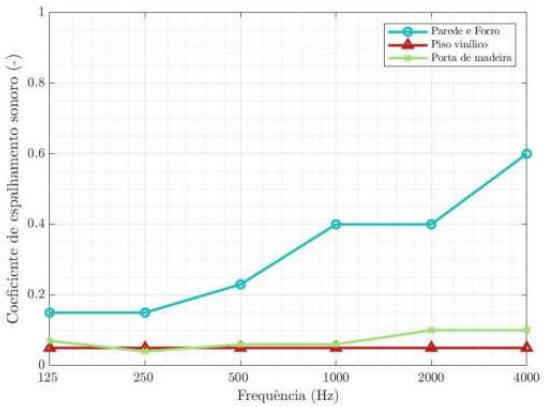
Figura 4: Coeficiente de absorção sonora adotados.



Fonte: Autor (2025, p. 06).

Os coeficientes de espalhamento sonoro adotados, baseados na pesquisa de Zeng, Christensen e Rindel (2006), podem ser verificados na Figura 5.

Figura 5: Coeficientes de espalhamento sonoro adotados.



Fonte: Autor (2025, p. 07).

Ocorre que a aplicação dos revestimentos não respeitou as espessuras de cavidades de ar utilizadas para a realização dos ensaios de absorção sonora pelo fabricante, e desprezou também a lã mineral atrás da placa. As espessuras reais para as cavidades de ar são de 10,0 cm para os revestimentos de parede e 60,0 cm para o forro.

As simulações acústicas foram realizadas no *software* Raven, desenvolvido pelo *Institute for Hearing Technology and Acoustics* da Universidade de Aachen na Alemanha e cuja licença é educacional. A validação do software foi realizada pelos trabalhos de Brinkmann *et al.* (2019) e de Brandão *et al.* (2022). Para a simulação foi utilizado o método de traçado de raios e foram adotados os valores das Figuras 3 e 4 como premissas de projeto.

Os parâmetros adotados para a simulação constam na Tabela 1, onde as variáveis atmosféricas foram as mesmas que as mensurados no dia das medições de parâmetros acústicos objetivos. A avaliação destes parâmetros foi feita por um termo-higro-barômetro de modelo THB-100 do fabricante Instrutherm, com calibração válida à Rede Brasileira de Calibração (RBC). A determinação do número de partículas se deu conforme orientações de Vorländer (2020) para que o erro no fator de força do som (G) fosse inferior à 1,00 dB, que é a Diferença Mínima Perceptível (JND) para este parâmetro.

Tabela 1: Dados de entrada para as simulações acústicas.

Parâmetro	Valor
Temperatura (º C)	23,0
Pressão atmosférica (Pa)	89900
Umidade (%)	58,0
Duração da janela de avaliação (s)	3,00
Resolução temporal (ms)	10,0
Número de partículas	35000
Diâmetro da esfera de detecção (m)	0.1061

Fonte: Autor (2025, p. 07).

As medições de respostas ao impulso (RI) foram realizadas conforme as diretrizes da norma ABNT NBR ISSO 3382-1 (2017). Foi adotado o método da resposta impulsiva integrada por meio do *software* MatLab e da ferramenta ITA ToolBox (Berzborn *et al.*, 2017). Foi adotado um ruído do tipo *sweep* exponencial com duração de 5,42 s junto à técnica de deconvolução linear (Avelar *et al.*, 2016). Após a execução do ruído foram adicionados 4,00 s de silêncio para o armazenamento da resposta ao impulso. Foram adotados 06 pontos de medição para 03 posições de fontes sonoras (F1, F2 e F3), totalizando 18 pontos de medição. A Figura 6 ilustra a distribuição dos pontos de medições e a aquisição das RI propriamente ditas.

Figura 6: (a) Croqui dos pontos de medição e (b) aquisição de uma resposta ao impulso.



(a) (b)

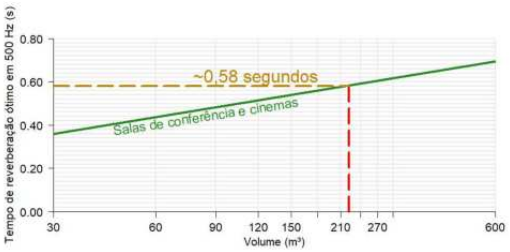
Fonte: Autor (2025, p. 08).

Os equipamentos utilizados forma uma foto sonora omnidirecional modelo DDC-100 do fabricante GROM; um condicionador de sinais modelo 1704-A-002 do fabricante Brüel&Kjær; um microfone de campo live de 1/2” modelo 4189 com pré-amplificador modelo 2671, ambos

do fabricante Brüel&Kjær e uma interface USB de aquisição de áudio modelo AudioBOX USB 96 do fabricante PreSonus. O tempo de reverberação médio considerou os 18 pontos de medição e foi obtido por extrapolação a partir da avaliação do tempo de decaimento de 30 dB (T_{30}).

O tempo de reverberação ótimo, recomendado pela norma ABNT NBR 12179 (1992) pode ser verificado na Figura 7, sendo igual à 0,58 segundos em 500 Hz.

Figura 7: Tempo de reverberação ótimo conforme a normativa brasileira.



Fonte: Autor (2025, p. 08).

A obtenção de valores ótimos em outros frequências pode ser obtida conforme Bistafa (2018), onde a distribuição em outras frequências é em função do valor ótimo em 500 Hz, conforme indicado pela Tabela 2.

Tabela 2: Tempo de reverberação ótimo em bandas de oitava.

Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Porcentagem do TR em 500 Hz	150%	110%	100%	97%	95%	94%

Fonte: Adaptado de Bistafa (2018).

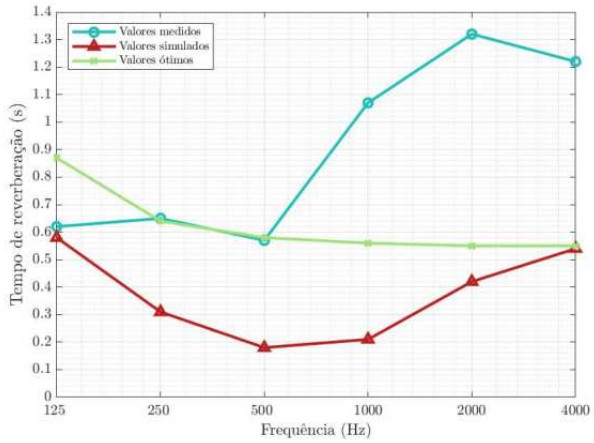
Resultados e Discussões

Os valores simulados e medidos do tempo de reverberação podem ser verificados na Figura 8. Os valores medidos em 250 e 500 Hz convergiram com os valores ótimos propostos pela norma ABNT NBR 12179 (1992), porém para as frequências superiores os valores se mostraram divergentes.

Valores simulados e medidos apenas se aproximaram na frequência de 125 Hz, apresentando grandes diferenças para as outras frequências. O valor único do TR pode ser obtido pela média aritmética entre os valores de 500 e 1000 Hz conforme a norma ABNT NBR ISO 3382-1 (2017), o que resulta em 0,82 s para os valores medidos e 0,20 s para os valores simulados. Esta diferença é superior à 5,00 % entre eles, o que significa que existe uma Diferença Mínima

Perceptível e que o modelo simulado não condiz com os dados reais. Logo, a execução dos sistemas de revestimento de piso e parede, considerando absorvedores ressonantes, deve respeitar as espessuras de cavidades utilizadas nos testes acústicos de absorção sonora e a existência de lã mineral ou não. Caso contrário não haverá proximidade entre os valores medidos e simulados, levando à inutilidade do projeto de condicionamento acústico. A falta de colocação de lã mineral atrás da placa perfurada pode levar a uma baixa absorção em médias frequências, fazendo com o que o dispositivo apenas consiga obter bons resultados em baixas frequências, o que pode ser verificado pelas aplicações das Equações 01 e 02 (Brandão, 2018).

Figura 7: Valores medidos e simulados de TR



Fonte: Autor (2025, p. 10).

Conclusões

Este trabalho teve como objetivo avaliar o condicionamento acústico de um cinema construído com materiais absorvedores ressonantes. O valor medido em 500 Hz foi de 0.58 segundos, alcançando o valor recomendado pela norma ABNT NBR 12179 (1992) para esta frequência. Os valores simulados divergiram dos valores medidos pelo fato da cavidade de ar atrás dos painéis perfurados serem diferentes das cavidades utilizadas nos testes de absorção acústica em câmara reverberante e, principalmente, por não ter sido incluída a lã mineral na execução, o que não proporcionou uma absorção sonora em médias e altas frequências. Conclui-se que um eficiente projeto de condicionamento acústico somente existirá se forem respeitadas as espessuras de *plenum* detalhadas nos relatórios de ensaios de coeficientes de absorção sonora.

Referências

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3382-1. Acústica — Medição de parâmetros de acústica de salas. Parte 1: Salas de espetáculos**. Rio de Janeiro, RJ: [*s. n.*], 2017.

AVELAR, Márcio; PRESTES, Pedro; SARDÁ, Alexandre; BONIFÁCIO, Paulo. Measuring sound insulation from partitions through a deconvolution technique. *In*: 22ND INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS ICA 2016, 2016. **22nd International Congress on Acoustics ICA 2016 : Proceedings** [...]. Buenos Aires, Argentina: [*s. n.*], 2016. p. 350. Disponível em: http://ica2016.org.ar/website/proceedings/.

BERANEK, Leo. **Acoustics**. Chicago, EUA: American Inst. of Physics, 1986.

BERZBORN, Marco; BOMHARDT, Ramona; KLEIN, Johannes; RICHTER, Jan-Gerrit; VORLÃ¤NDER, Michael. The ITA-Toolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing. 6 mar. 2017. [*S. l.*]: 43th Annual German Congress on Acoustics, Kiel (Germany), 6 Mar 2017 - 9 Mar 2017, 6 mar. 2017. Disponível em: http://publications.rwth-aachen.de/record/687308.

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. São Paulo, Brazil: Blucher, 2018.

BRANDÃO, Eric. **Acústica de Salas: projeto e modelagem [livro eletrônico]**. 1. ed. São Paulo, SP: Blucher, 2018.

BRANDÃO, Eric; SANTOS, Edna S. O.; MELO, Viviane S. G.; TENENBAUM, Roberto A.; MAREZE, Paulo H. On the performance investigation of distinct algorithms for room acoustics simulation. **Applied Acoustics**, [*s. l.*], v. 187, p. 108484, 2022. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108484.

BRINKMANN, Fabian; ASPÖCK, Lukas; ACKERMANN, David; LEPA, Steffen; VORLÄNDER, Michael; WEINZIERL, Stefan. A round robin on room acoustical simulation and auralization. **The Journal of the Acoustical Society of America**, [*s. l.*], v. 145, n. 4, p. 2746–2760, 30 abr. 2019. https://doi.org/10.1121/1.5096178.

COX, Trevor; D'ANTONIO, Peter. **Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application**. 3. ed. Boca Raton, EUA: CRC Press, 2016.

CROCKER, Malcolm J.; ARENAS, Jorge P. **Engineering Acoustics: Noise and Vibration Control**. Reino Unido: John Wiley & Sons Ltd, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 354 - Acoustics - Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room**. [*S. l.*: *s. n.*], 2003.

KUTTRUFF, Heinrich; VORLÄNDER, Michael. **Room Acoustics**. 7. ed. Boca Raton, EUA: CRC Press, 2024.

TECNOPLAK. **Forros acústicos Tecnoplak Acustic 32 e Acustic 33**. [*S. l.*: *s. n.*], 2025. Disponível em: https://www.tecnoplak.com.br/produtos/forros-acusticos/2. Acesso em: 9 maio 2025.

VORLÄNDER, M. **Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality**. Aachen, Germany: Springer International Publishing, 2020(RWTHedition).

ZENG, Xiangyang; CHRISTENSEN, Claus Lynge; RINDEL, Jens Holger. Practical methods to define scattering coefficients in a room acoustics computer model. **Applied Acoustics**, [*s. l.*], v. 67, n. 8, p. 771–786, 1 ago. 2006. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.12.001.