

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

RYAN KEN KANASHIRO TERATO

**AVALIAÇÃO DO CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE UMA SALA DE AULA
COM A IMPLEMENTAÇÃO DE PAINÉIS DE LÃ DE ROCHA: ANÁLISE DO
TEMPO DE REVERBERAÇÃO**

GUARAPUAVA

2025

RYAN KEN KANASHIRO TERATO

**AVALIAÇÃO DO CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE UMA SALA DE AULA
COM A IMPLEMENTAÇÃO DE PAINÉIS DE LÃ DE ROCHA: ANÁLISE DO
TEMPO DE REVERBERAÇÃO**

**Evaluation of the Acoustic Conditioning of a Classroom with the Implementation of
Rock Wool Panels: Reverberation Time Analysis**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção de título
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Scoczynski
Ribeiro.

GUARAPUAVA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

RYAN KEN KANASHIRO TERATO

**AVALIAÇÃO DO CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE UMA SALA DE AULA
COM A IMPLEMENTAÇÃO DE PAINÉIS DE LÃ DE ROCHA: ANÁLISE DO
TEMPO DE REVERBERAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção de título
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 10/abril/2025

Rodrigo Scoczynski Ribeiro
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Aline Ramos Esperidião
Mestre em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Augusto César Fantinelli de Carvalho
Mestre em Engenharia Mecânica e de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2025

Dedico este trabalho principalmente aos meus
pais que me apoiaram durante toda essa
caminhada.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, expresso minha profunda gratidão às pessoas mais próximas e queridas, que me deram suporte ao longo de toda a graduação. Aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado e tornaram essa conquista possível, espero corresponder a todas as expectativas que depositaram em mim.

À minha irmã mais nova, que, mesmo sem perceber, me impulsiona a ser uma pessoa melhor e me motiva a sempre ir além, buscando ser um exemplo.

Aos meus amigos mais próximos que fiz durante o dia a dia corrido da faculdade, que tornavam as idas mais leves e divertidas, Wictor Sar e Alex Machado, sempre terei boas memórias dos tempos que passamos juntos.

Registro minha imensa gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Scoczynski Ribeiro, por toda a orientação, paciência e dedicação durante esta jornada. Professor, sua confiança no potencial dos alunos e seu compromisso com a educação são inspiradores. Acredito que o ensino brasileiro precisa de mais docentes como o senhor, que não apenas transmitem conhecimento, mas também incentivam e apoiam seus alunos ao máximo.

Queria agradecer a Brick Engenharia tenho um grande carinho por todo tempo que eu passei dentro da empresa júnior, fiz grandes amizades lá dentro que espero levar para a vida, aprendi muito sobre as coisas mais diversas e me diverti muito no processo, fico muito feliz de ter vivenciado o MEJ.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por todo o conhecimento adquirido ao longo do curso e pelo suporte oferecido durante o desenvolvimento deste trabalho. A instituição proporcionou um ambiente acadêmico acolhedor, e com recursos e professores dedicados.

Por fim, estendo meus agradecimentos aos meus familiares, que sempre acreditaram no meu potencial e permaneceram ao meu lado durante essa trajetória, oferecendo apoio incondicional e incentivo contínuo.

RESUMO

TERATO, Ryan Ken Kanashiro. AVALIAÇÃO DO CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE UMA SALA DE AULA COM A IMPLEMENTAÇÃO DE PAINÉIS DE LÃ DE ROCHA: ANÁLISE DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2024.

O comportamento acústico de ambientes educacionais é crucial para a qualidade do processo de ensino-aprendizagem, sendo o objeto deste estudo a análise das condições acústicas de uma sala de aula da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Guarapuava. O foco da pesquisa está na avaliação do parâmetro objetivo Tempo de Reverberação (TR) com a incorporação de painéis de lã de rocha, instalados nas paredes da sala. As medições acústicas foram realizadas por meio do método da resposta ao impulso, conforme os procedimentos descritos na NBR ISO 3382-1:2017, foram realizadas três medições diferentes, uma da sala de aula sem tratamento acústico nenhuma, a segunda com os painéis a mostra e a terceira com os painéis com uma camada protetora. O objetivo é verificar se a instalação dos painéis proporciona uma redução significativa no TR, melhorando a inteligibilidade da fala e o conforto acústico. Os painéis de lã de rocha foram escolhidos por suas propriedades de absorção sonora, especialmente em frequências mais altas, adequadas para ambientes educacionais que exigem controle acústico eficaz. A pesquisa evidenciou que, antes da instalação dos painéis, o tempo de reverberação da sala estava fora dos padrões adequados para salas de aula, comprometendo a comunicação entre professores e alunos. Após a instalação dos painéis e a análise dos dados obtidos, constatou-se uma redução no TR, resultando em uma melhoria significativa na qualidade do ambiente acústico. Com ajustes precisos nas características geométricas e materiais da sala, foi possível obter um TR próximo ao ideal para o ambiente educacional, promovendo melhor desempenho acadêmico e conforto auditivo para os ocupantes.

Palavras-chave: acústica de salas; painéis de lã de rocha; medições acústicas; sala de aula.

ABSTRACT

TERATO, Ryan Ken Kanashiro. EVALUATION OF THE ACOUSTIC CONDITIONING OF A CLASSROOM WITH THE IMPLEMENTATION OF ROCK WOOL PANELS: REVERBERATION TIME ANALYSIS. 2024. Undergraduate Thesis (Bachelor's Degree in Civil Engineering) – Federal University of Technology – Paraná. Guarapuava, 2024.

The acoustic behavior of educational environments is crucial to the quality of the teaching-learning process. This study focuses on the analysis of the acoustic conditions of a classroom at the Federal University of Technology – Paraná (UTFPR), Guarapuava campus. The main objective of the research is to evaluate the objective parameter Reverberation Time (RT) through the incorporation of rock wool panels, which were installed on the classroom walls. The acoustic measurements were conducted using the impulse response method, following the procedures described in the ABNT NBR ISO 3382-1:2017 standard. Three different measurements were carried out: the first with the untreated classroom, the second with the panels fully exposed, and the third with the panels covered by a protective layer. The goal is to determine whether the installation of the panels leads to a significant reduction in RT, thereby improving speech intelligibility and overall acoustic comfort. Rock wool panels were chosen for their high sound absorption properties, particularly at higher frequencies, which are suitable for educational environments that demand effective acoustic control. The research showed that, prior to the installation of the panels, the classroom's reverberation time was beyond the acceptable limits for learning spaces, impairing communication between teachers and students. After the installation and data analysis, a noticeable reduction in RT was observed, resulting in a significant improvement in the acoustic quality of the environment. With precise adjustments to the room's geometric and material characteristics, it was possible to achieve a reverberation time closer to the ideal for educational settings, promoting better academic performance and auditory comfort for occupants.

Keywords: room acoustics; rock wool panels; acoustic measurements; classroom.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Interação de ondas sonoras com uma superfície.	19
Figura 2: Reflexão de uma onda plana no ar.....	19
Figura 3: Materiais acústicos aplicados.....	20
Figura 4: Características do material Painel de lã de Rocha.	24
Figura 5 - Metodologia implementada.....	31
Figura 6: Fonte sonora omnidirecional.	32
Figura 7: Condicionador de sinais.	33
Figura 8: Microfone capacitativo ré-polarizado.....	33
Figura 9: Campus UTFPR Guarapuava.	37
Figura 10: Localização do Bloco H no UTFPR Guarapuava.	37
Figura 11: Sala de Aula H209 (lado direito)	38
Figura 12: Sala de Aula H209 (lado esquerdo)	39
Figura 13: Sala de Aula H209 (quadro negro).....	39
Figura 14: Croqui de medições.....	41
Figura 15 - Sala sem tratamentos acústicos (Lado A).....	42
Figura 16 - Sala utilizando os painéis expostos (Lado B).....	43
Figura 17 - Sala utilizando os painéis com a camada véu (Lado C)	43
Figura 18 - Resultados dos Coeficientes de Absorção Sonora in situ.	45
Figura 19 - Aplicação dos testes de correlação no Software R.	46
Figura 20 - Resultados dos tempos de reverberação.	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características da Sala H209	40
Quadro 2 - Parâmetros atmosféricos nos dias de medições.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela comparativa com os tempos de reverberações.....	47
--	-----------

LISTA DE EQUAÇÕES

(1)	18
(2)	25
(3)	26
(4)	35
(5)	35
(6)	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

ISO – International Organization for Standardization

STI – Speech Transmission Index

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

EDT – Early Decay Time

LISTA DE SÍMBOLOS

s – segundos

mm – milímetros

cm – centímetros

m – metros

Hz – hertz (frequência)

dB – decibéis (nível de pressão sonora)

Pa – pascal (unidade de pressão)

MPa – mega pascal

m² – metro quadrado

m³ – metro cúbico

N – Newton

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo principal.....	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Acústica de Salas.....	16
3.2	Som e Ruído	17
3.3	Reflexão Sonora	18
3.4	Isolamento Acústico.....	20
3.5	Inteligibilidade de Fala.....	21
3.6	Absorção Sonora.....	22
3.7	Materiais Naturais	23
3.8	Tempo de Reverberação	25
3.9	Método de Medição	26
3.10	Teste de Correlação	27
3.11	Normativas Aplicadas	28
3.11.1	ABNT NBR ISO 717:2021	28
3.11.2	ABNT NBR ISO 3382:2017	28
3.11.3	ABNT NBR 16313:2025	29
3.11.4	ABNT NBR 12179:1992	29
4	METODOLOGIA.....	30
4.1	Procedimentos Metodológicos	30
4.2	Materiais e Métodos	32
4.2.1	Materiais	32
4.2.2	Métodos	33
4.3	Cálculos do Coeficiente de Absorção Sonora in situ	34

4.3.1	Teste de Correlação	35
4.4	Estudo De Caso: Sala de Aula do Bloco H da UTFPR.....	36
4.4.1	Caracterização da Sala de Aula (BLOCO H – SALA 209).....	38
4.4.2	Caracterização Acústica	40
4.4.3	Tratamento e Análise dos Resultados Obtidos	44
5	RESULTADOS	44
5.1	Coefficiente de Absorção Sonora in situ	45
5.1.1	Teste de Correlação	46
5.2	Resultados do Tempo de Reverberação	46
5.2.1	Análise Comparativa dos Resultados	47
6	CONCLUSÃO.....	49
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICE 1 – Código do cálculo de absorção sonora (Mathlab).....	55
	ANEXO 1 – Certificados de calibração dos materiais de medição utilizados.....	57

1 INTRODUÇÃO

A construção civil desempenha um papel importante no desenvolvimento social e urbano. Dentro desse contexto, a integração de melhorias térmicas e acústicas é essencial para criar ambientes mais confortáveis. Essa preocupação é ainda mais relevante em espaços de aprendizado, como as salas de aula, onde o conforto ambiental contribui diretamente para a qualidade do ensino.

A acústica de salas estuda a forma como o som se propaga em ambientes fechados, como auditórios, salas de aula e de concerto, a fim de controlá-lo para que se adeque acusticamente conforme a necessidade do local. Além disso, o desenvolvimento do condicionamento acústico de um ambiente requer o conhecimento das características das superfícies existentes, bem como o revestimento dos materiais, geometria e localização interna, permitindo a modelagem do som dentro do espaço. Em particular, o uso de materiais como painéis de compostos principalmente lã de rocha, com sua alta capacidade de absorção sonora, é especialmente eficaz em salas de aula, onde a redução de ruídos e a melhoria da inteligibilidade da fala são cruciais para o ambiente de ensino (Brandão, 2016).

A introdução de materiais que proporcionam isolamento térmico e acústico nas salas de aula traz não apenas uma melhoria no conforto ambiental dos alunos e professores, mas também impacta diretamente na concentração e no desempenho acadêmico. Ambientes controlados termicamente reduzem distrações causadas por temperaturas extremas, enquanto o controle acústico promove uma melhor inteligibilidade da fala, essenciais para o processo de ensino-aprendizagem (Oliveira; Santos, 2017).

Considerando a crescente demanda por melhorias nas condições acústicas de ambientes educacionais, este trabalho propõe um estudo voltado à avaliação do desempenho de materiais que possam contribuir para a criação de espaços mais confortáveis e adequados ao aprendizado. Nesse contexto, destaca-se o uso do painel de lã de rocha desenvolvido por uma empresa especializada, cuja aplicação nas paredes de salas de aula visa mitigar os efeitos negativos da reverberação. Embasado em estudos prévios, como os de Brandão (2016), que exploram o condicionamento acústico, este trabalho busca compreender como o painel de lã de rocha pode influenciar o comportamento acústico em um ambiente educacional. Utilizando simulações computacionais e o método da resposta ao impulso para medições acústicas, o estudo segue critérios técnicos de qualidade e normas padronizadas, com o intuito de explorar a viabilidade

desse material na melhoria do conforto acústico e suas possíveis implicações no tempo de reverberação em salas de aula.

Este trabalho investiga o desempenho do material, sendo ele, o painel de lã de rocha, como absorvedores acústicos em escolas para três condições distintas: sala sem tratamento acústico, sala com painéis de lã de rocha expostos e sala com painéis revestidos. verificando se este material específico seria adequado para reduzir os impactos de ruídos externos e internos em salas de aula, onde a qualidade acústica é essencial para o aprendizado.

Com base nos estudos de Brandão (2016) sobre condicionamento acústico e na investigação do desempenho acústico de materiais isolantes, como o painel de lã de rocha, foi conduzido um estudo na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), localizada em Guarapuava-PR. O estudo utilizou o método da resposta impulsiva para medições acústicas, seguindo parâmetros técnicos de qualidade e normas padronizadas, a fim de verificar a adequação do material ao ambiente educacional e seu efeito na redução do tempo de reverberação.

2 OBJETIVOS

Este trabalho será dividido em objetivo geral e objetivos específicos.

2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a eficácia da implementação de painéis de lã de rocha no condicionamento acústico de uma sala de aula, analisando a redução do tempo de reverberação e a melhoria na inteligibilidade da fala, seguindo procedimentos normatizados.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar acusticamente a sala de aula antes do tratamento, realizando medições do tempo de reverberação (TR) conforme a NBR ISO 3382-1:2017;
- Comparar os resultados obtidos antes e depois do tratamento acústico;
- Analisar o impacto do revestimento dos painéis de lã de rocha no desempenho acústico e na segurança do ambiente.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, são abordados, através de uma revisão da literatura, alguns assuntos relevantes no âmbito deste trabalho. Em primeiro lugar, é salientada a importância da acústica de salas, com foco no conceito de tempo de reverberação, especialmente em ambientes como salas de aula e auditórios. Em seguida, são discutidos o isolamento sonoro, o índice de redução sonora e o nível de pressão sonora normalizado, e também materiais isolantes como, por exemplo, a lã de rocha. Posto isto, faz-se uma breve descrição do material principal deste estudo a lã de rocha que pode ser utilizada para fins de absorção sonora e isolamento acústico. Por fim, são abordados alguns métodos de modelagem da acústica de salas e do isolamento sonoro, utilizando simulações computacionais e o método da resposta ao impulso.

3.1 Acústica de Salas

Um bom ambiente acústico é aquele que não provoca alterações no corpo humano que possam impactar negativamente sua saúde. (Reinten *et al.*, 2017). O principal objetivo do condicionamento acústico de salas é criar condições que assegurem a propagação sonora ideal, garantindo que o som se desloque de maneira eficiente da fonte ao receptor (Kuttruff; Mommertz, 2013). Essa característica é fundamental em espaços como salas de aula, escritórios, igrejas, auditórios, salas de concertos e outros ambientes internos, onde a qualidade sonora desempenha um papel crucial no conforto e na funcionalidade do espaço (Savioja; Svensson, 2015).

De acordo com Russo e Ruggiero (2019), a presença de reverberação e ruído em salas de aula pode causar desconforto e resultar em desgaste das cordas vocais dos professores, que acabam fazendo um esforço adicional para serem compreendidos. Além disso, as condições acústicas inadequadas também afetam o desempenho escolar dos alunos, pois o ruído reduz significativamente sua capacidade de concentração.

Um bom ambiente acústico é obtido por meio da utilização de materiais com boas características de isolamento na construção dos edifícios, ainda ele pode ser melhorado por meio de materiais absorventes nas superfícies dos espaços interiores (Januševičius *et al.*, 2016; Meissner, 2017).

O comportamento do som em ambientes fechados depende das características construtivas do espaço, como a forma, o volume, os materiais de revestimento do teto e das paredes, o arranjo e a quantidade de assentos, entre outros fatores. Portanto, para alcançar uma

boa qualidade acústica em um auditório, é essencial ajustar esses elementos construtivos (Bistafa, 2018).

Para que apresentem bom desempenho acústico, os materiais devem ser porosos, como o painel de lã de rocha, que se enquadra na categoria de materiais fibrosos. Esses materiais, quando expostos a ondas sonoras, permitem que as moléculas de ar vibrem em seus poros, convertendo parte da energia sonora em energia térmica. Em frequências mais baixas, essa conversão de energia é menos eficiente, ocorrendo de forma isotérmica, o que resulta em menor absorção de energia. No entanto, para frequências mais altas, o processo se torna adiabático, aumentando significativamente o coeficiente de absorção sonora (α) do material. Assim, o painel de lã de rocha demonstra elevada eficiência na absorção sonora em altas frequências, sendo adequado para uso em ambientes educacionais, como salas de aula, onde a qualidade acústica é essencial (Berardi; Iannace, 2017; Islam; Bhat, 2019).

3.2 Som e Ruído

O som é caracterizado como uma onda mecânica gerada pela vibração de estruturas. Qualquer evento que cause variações de pressão no ar é considerado uma fonte sonora (Remorini, 2018). Quando ocorre uma vibração, as partículas de ar passam por ciclos de compressão e rarefação, o que provoca a movimentação das partículas adjacentes e resulta na propagação da onda sonora pelo meio (Souza *et al.*, 2012).

Dentro desse contexto, o ruído pode ser compreendido como um tipo específico de som. De forma técnica, é definido como uma mistura de sons de diferentes frequências e intensidades que não apresenta uma estrutura harmônica regular e, portanto, é percebido como desagradável ou perturbador ao ouvido humano. Em engenharia acústica, o ruído é geralmente caracterizado como qualquer sinal sonoro que interfere na comunicação, na concentração ou no conforto auditivo (Everest; Pohlmann, 2009).

Embora o ruído tenha, em geral, uma conotação negativa por ser classificado como indesejável, em algumas situações ele pode ter utilidade. Um exemplo prático é o som característico de um pneu furado, que serve como alerta para o motorista sobre um problema no veículo (Bistafa, 2018).

O ruído é um agente físico que, além de prejudicar a comunicação, pode provocar diversos efeitos adversos no organismo humano. Entre os impactos fisiológicos destacam-se a fadiga

auditiva, distúrbios do sono, cefaleia e alterações cardiovasculares. Psicologicamente, a exposição prolongada ao ruído pode gerar ansiedade, irritabilidade, dificuldade de concentração e queda no desempenho cognitivo.

3.3 Reflexão Sonora

A reflexão sonora ocorre quando uma onda sonora incide sobre uma superfície e parte de sua energia é refletida de volta ao ambiente. Esse fenômeno acontece porque, ao encontrar uma barreira sólida, a onda não consegue atravessar completamente o material, fazendo com que parte de sua energia seja devolvida. O comportamento da reflexão depende das propriedades do material e do ângulo de incidência da onda sonora. Ao se propagar, parte da energia da onda sonora é refletida, enquanto outra parte é transmitida pela superfície, e o restante é absorvido. A reflexão sonora é o princípio que permite, por exemplo, a formação de ecos e a acústica de ambientes, a Figura 1 ilustra o fenômeno da reflexão, descrito por (1).

$$E_i = E_r + E_t + E_a \quad (1)$$

Onde,

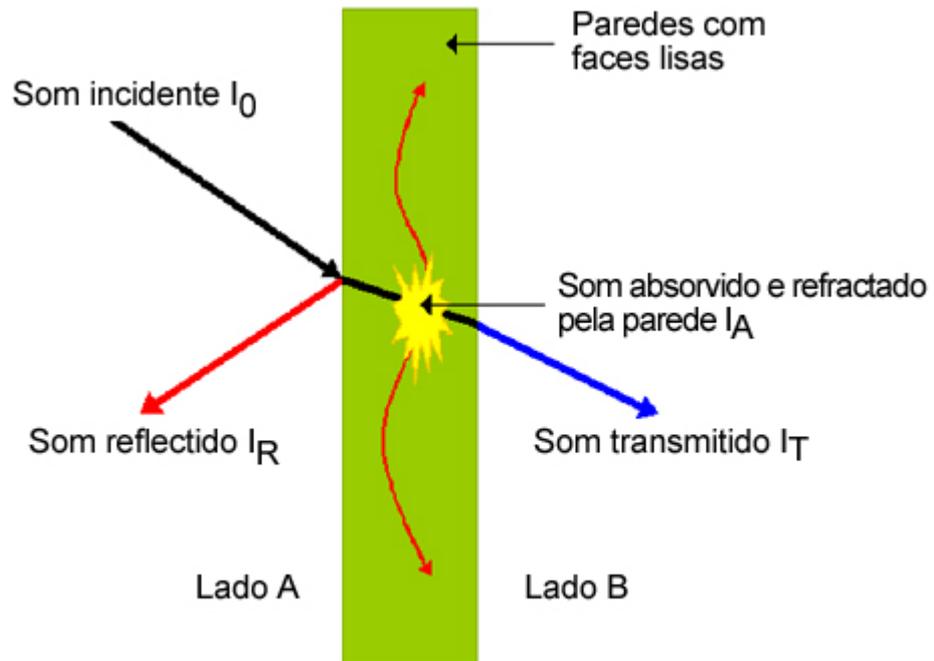
E_i = energia incidente (N m/s);

E_r = energia refletida (N m/s);

E_t = energia transmitida (N m/s);

E_a = energia absorvida (N m/s).

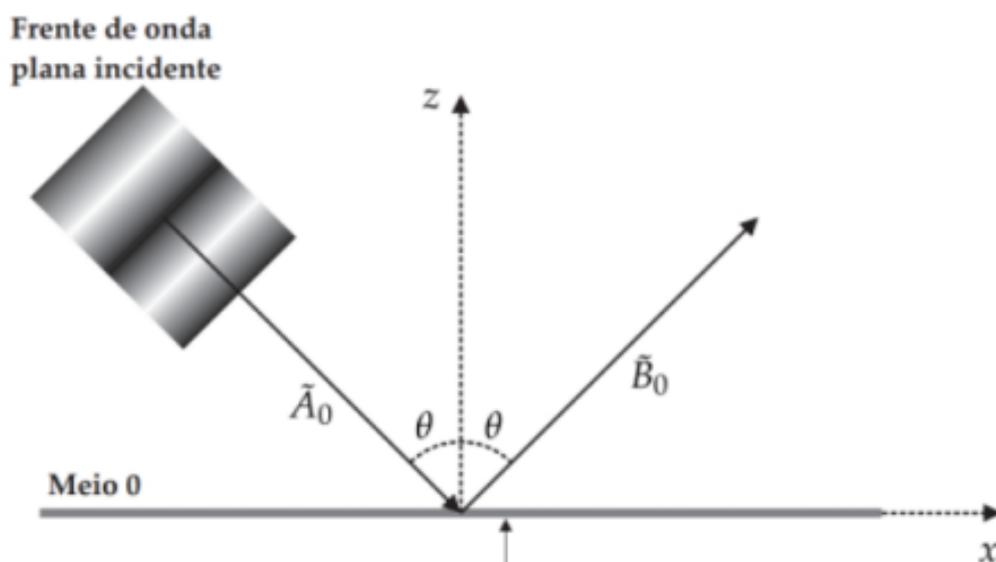
Figura 1: Interação de ondas sonoras com uma superfície.



Fonte: Long (2014).

O ângulo de incidência (θ) é definido como o ângulo entre o raio sonoro que atinge uma superfície e a linha normal a essa superfície. A reflexão especular ocorre quando o raio sonoro refletido forma o mesmo ângulo com a linha normal da superfície, reproduzindo assim o ângulo de incidência (Brandão, 2016). Esse fenômeno está ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Reflexão de uma onda plana no ar.



Fonte: Brandão (2016).

Por outro lado, a reflexão difusa acontece quando a onda sonora se espalha em diversas direções, além da direção especular. Isso está relacionado ao fato de que as superfícies são finitas e apresentam irregularidades em diferentes graus. Compreender os efeitos da difração é essencial para o planejamento acústico, sendo eles: a reflexão difusa em superfícies irregulares (quando o comprimento de onda é igual ou menor que a profundidade das irregularidades), a transmissão ao redor de superfícies finitas (quando o comprimento de onda é muito maior que as dimensões da estrutura), e a reflexão difusa nas bordas de superfícies finitas (Brandão, 2016).

Os materiais fonoabsorventes são, em geral, fibrosos ou porosos, como as lãs minerais e espumas; os materiais refletivos possuem superfícies rígidas, como blocos cerâmicos ou de concreto; enquanto os materiais difusores são irregulares e podem ser projetados para atender às necessidades acústicas específicas de um ambiente (ProAcústica, 2019). A Figura 3 ilustra esses diferentes tipos de materiais.

Figura 3: Materiais acústicos aplicados.



Fonte: ProAcústica (2019).

3.4 Isolamento Acústico

O isolamento acústico é um aspecto fundamental para o controle de ruídos em diferentes ambientes. Ele pode ser definido como a capacidade dos elementos construtivos de minimizar a transmissão sonora de um ambiente para outro, garantindo assim uma redução efetiva de interferências sonoras indesejadas (ProAcústica, 2019).

A escolha do tratamento acústico adequado varia conforme o tipo de ruído presente no ambiente. Para ruídos aéreos, que se propagam através do ar, o controle é feito por meio de sistemas construtivos de isolamento acústico. Já no caso de ruídos de impacto, como o som de

passos ou de objetos caindo, e de vibrações, a solução envolve o isolamento específico de elementos construtivos, cujas propriedades são avaliadas em laboratório (Souza *et al.*, 2012). Cada um desses tipos de ruído exige abordagens distintas para garantir uma eficiência máxima no controle do som transmitido.

Existem parâmetros específicos que são usados para caracterizar o desempenho de um sistema de isolamento acústico entre ambientes. Um deles é o nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado ($L'_{nt,w}$), que mede a eficácia de um piso em isolar ruídos de impacto em diferentes bandas de frequência. Outro parâmetro importante é a diferença padronizada de nível ponderada ($D_{nt,w}$), que avalia a capacidade de isolamento de ruídos aéreos em sistemas de pisos ou paredes divisórias. Além disso, o índice de redução sonora (R_w) é um valor único que define o nível de isolamento a ruídos aéreos proporcionado por um material ou elemento construtivo específico, sendo amplamente utilizado como referência para comparar a eficiência de diferentes materiais (ProAcústica, 2019).

Além desses parâmetros, o desempenho do isolamento acústico também é influenciado por fatores como a densidade dos materiais, a presença de camadas adicionais, como mantas acústicas, e a vedação das juntas e aberturas. Em projetos arquitetônicos, o planejamento acústico adequado envolve tanto a escolha correta dos materiais quanto a implementação de técnicas construtivas que maximizem o isolamento entre ambientes, garantindo um conforto acústico superior.

3.5 Inteligibilidade de Fala

A inteligibilidade da mensagem falada refere-se à proporção de palavras pronunciadas por um orador que são compreendidas pelos ouvintes (Bistafa, 2018). Nesse contexto, a inteligibilidade é influenciada por diversos fatores, como a relação entre o nível de pressão sonora do ruído residual da sala e o nível de pressão sonora da voz ou do sistema eletroacústico utilizado. Além disso, aspectos como a distância entre a fonte sonora e os ouvintes, bem como a quantidade de absorção sonora presente no ambiente, desempenham um papel crucial na clareza com que a mensagem é transmitida (Proacústica, 2019).

Entre os principais fatores que afetam a inteligibilidade, destacam-se a reverberação e a absorção sonora. Em ambientes com alta reverberação, o som da fala pode se misturar com ecos e reflexões, prejudicando a clareza da mensagem. Em contrapartida, a absorção sonora, proporcionada por materiais como carpetes e painéis acústicos, pode reduzir esse efeito, melhorando a inteligibilidade do ambiente (Møller *et al.*, 2015).

Além disso, o ruído de fundo presente no ambiente também interfere na compreensão da fala. Quando o nível de pressão sonora do ruído é alto, ele pode mascarar partes importantes da mensagem falada. Em ambientes com altos níveis de ruído, torna-se mais difícil para os ouvintes entenderem o que está sendo dito, pois o ruído dificulta a audição da fala (Bistafa, 2018).

Outro fator importante é a distância entre o orador e os ouvintes. Em grandes ambientes, como auditórios, a fala pode se atenuar à medida que a distância aumenta, tornando-se mais difícil de ouvir claramente. Para contornar esse problema, o uso de sistemas de amplificação, como microfones e alto-falantes, pode melhorar a transmissão do som e, conseqüentemente, aumentar a inteligibilidade (Haas, 2013).

Vale ressaltar que a inteligibilidade não depende apenas das condições acústicas do ambiente, mas também das características do orador e da capacidade auditiva dos ouvintes. Fatores como a dicção do orador, a clareza de sua fala e a capacidade dos ouvintes de filtrar o ruído de fundo são essenciais para uma boa compreensão da mensagem (Bistafa, 2018).

3.6 Absorção Sonora

O coeficiente de absorção sonora (α) é uma medida adimensional que quantifica a eficiência de um material em absorver ondas sonoras incidentes, variando entre 0 (reflexão total) e 1 (absorção total). Esse coeficiente é fundamental para a caracterização do comportamento acústico de um ambiente, sendo amplamente utilizado na engenharia acústica e na arquitetura para controle da reverberação e inteligibilidade sonora (Kuttruf, 2017).

A absorção sonora ocorre devido à conversão da energia das ondas sonoras em calor, fenômeno que se dá por meio do atrito entre as moléculas do ar ao penetrarem em materiais porosos ou fibrosos (Beranek, 1996). No entanto, a eficiência da absorção não é uniforme para todas as frequências sonoras. Materiais leves e altamente porosos, como espumas acústicas, tendem a absorver melhor frequências altas, enquanto materiais mais densos e espessos, como painéis perfurados ou membranas vibratórias, são mais eficazes na absorção de frequências médias e graves (Everesy; Polhmann, 2014).

A influência da frequência sobre o coeficiente de absorção se deve à interação das ondas sonoras com a estrutura do material. Em altas frequências, cujos comprimentos de onda são menores, a absorção é favorecida por pequenos poros e fibras finas, que aumentam a resistência ao movimento das partículas de ar e promovem a dissipação da energia vibratória. Em contrapartida, para a absorção de sons graves, cujos comprimentos de onda são mais longos, é

necessário que o material possua maior espessura e maior profundidade dos poros, garantindo que a onda penetre suficientemente no material para perder sua energia (Kinsler; Kent, 2000).

Dessa forma, a correta escolha e disposição dos materiais absorventes são essenciais para o desempenho acústico de teatros, auditórios, salas de aula e demais espaços destinados à comunicação sonora.

3.7 Materiais Naturais

O controle do ruído em edifícios é geralmente realizado com o uso de materiais porosos sintéticos, como lã de vidro, poliéster e, principalmente, lã de rocha. A lã de rocha destaca-se como um dos materiais mais eficientes no isolamento acústico, devido à sua estrutura fibrosa e densa, que permite a absorção eficaz de ondas sonoras. Produzida a partir de rochas vulcânicas fundidas, a lã de rocha possui excelentes propriedades termoacústicas, tornando-se uma escolha comum em aplicações de isolamento sonoro em edifícios. No entanto, o processo de produção desses materiais sintéticos é relativamente caro e está associado a impactos negativos no meio ambiente, principalmente devido ao consumo de energia e emissão de poluentes (Berardi; Iannace, 2017).

Com o objetivo de minimizar esses efeitos, pesquisadores têm investigado o uso de materiais naturais como alternativas viáveis para absorção sonora e isolamento acústico. Esses materiais, obtidos a partir de fontes renováveis, apresentam um impacto ambiental reduzido em comparação com a lã de rocha e outros materiais sintéticos (Santoni et al., 2019). Além disso, muitos materiais naturais são subprodutos de outros processos industriais, o que torna seu custo significativamente menor e contribui para uma economia mais sustentável (Berardi; Iannace, 2015). Um aspecto positivo desses materiais é a ausência de substâncias tóxicas, o que os torna seguros para a saúde humana (Santoni *et al.*, 2019).

Embora os materiais naturais possam oferecer um desempenho acústico similar ao da lã de rocha, eles geralmente apresentam algumas limitações, como menor resistência à chama e vulnerabilidade a parasitas. Para superar esses desafios, é comum que sejam submetidos a tratamentos químicos, o que, embora aumente a durabilidade, pode reduzir ligeiramente sua eficácia acústica (Asdrubali *et al.*, 2012).

Nos últimos anos, o uso de fibras naturais, incluindo fibras de origem animal, vegetal e mineral, tem ganhado destaque. No entanto, a lã de rocha continua sendo amplamente utilizada

devido à sua alta performance acústica e térmica, especialmente em ambientes que exigem soluções robustas para controle de ruído e isolamento térmico, como edifícios industriais, comerciais e residenciais (Berardi; Iannace, 2015).

A lã de rocha é um dos materiais mais utilizados para isolamento acústico em ambientes educacionais, como salas de aula, devido à sua excelente capacidade de absorção sonora. Esse material reduz significativamente a transmissão de ruídos externos e o eco interno, melhorando a clareza da fala do professor e o foco dos alunos. Em salas de aula, onde o silêncio e a inteligibilidade são essenciais para o processo de aprendizado, o uso de lã de rocha garante um ambiente acústico controlado, favorecendo a comunicação e a concentração dos estudantes. Paredes recheadas com lãs minerais, como a lã de rocha, oferecem um isolamento acústico eficaz, permitindo, por exemplo, que em uma sala de aula o som do professor seja adequadamente ouvido, proporcionando um ambiente sonoro adequado para o ensino (Catai; Pentead, 2006). A seguir estará representado na Figura 4, as características principais do material que será estudado.

Figura 4: Características do material Painel de lã de Rocha.

Item	Descrição		Normas
Densidades nominais (kg/ m ³)	28, 32, 48, 64, 80, 96, 112, 128 e 144		NBR 11364
Dimensões (mm) Largura x Espessura	Sob consulta*		NBR 11364 e 11356
Condutividade Térmica (K/calm.h. °C)	0,036 (28 kg/m ³) 0,035 (32 kg/m ³) 0,032 (48 kg/m ³) 0,031 (64 kg/m ³) 0,031 (80 kg/m ³) 0,030 (96 kg/m ³) 0,030 (112 kg/m ³) 0,029 (128 kg/m ³) 0,028 (144 kg/m ³)		ASTM C 518
Incombustibilidade	Incombustível		ISO 1182
Teores de Cloreto, Fluoreto, Silicato e Sódio	Determinações	Resultado	ABNT NBR 12581 ASTM C 795
	pH (24 °C)	9,9	
	Cl ⁻ (em ppm)	14	
	F ⁻ (em ppm)	55	
	SiO ³ (em ppm)	579	
	Na ⁺ + SiO ₃ ²⁻ (em ppm)	568	

Fonte: Gesla (2025).

A Figura 4 apresenta as propriedades técnicas do painel de lã de rocha, como densidade nominal (28 a 144 kg/m³), condutividade térmica, incombustibilidade e composição química. As normas associadas (ABNT NBR 11364, ISO 1182, ASTM C 518, entre outras) garantem sua eficiência térmica, resistência ao fogo e estabilidade química. Essas características tornam o material adequado para uso em tratamentos acústicos, contribuindo para o controle da reverberação e melhoria da inteligibilidade da fala em ambientes construídos.

3.8 Tempo de Reverberação

O Tempo de Reverberação pode ser estimado por diferentes métodos, sendo os mais comuns o T60 e o T20. O T60 corresponde ao tempo necessário para que o nível de pressão sonora caia 60 dB após a interrupção da fonte sonora, sendo a forma clássica de definição do parâmetro. Já o T20 é uma estimativa baseada na queda de 20 dB, entre -5 dB e -25 dB, com posterior extrapolação para 60 dB. Esse método é amplamente utilizado em medições práticas, pois é menos suscetível a interferências de ruído de fundo, mantendo boa precisão na estimativa do tempo de reverberação real (ISO 3382-1, 2017).

O tempo de reverberação (T60) é o tempo necessário para que o nível de pressão sonora em um ambiente diminua 60 dB após a interrupção da fonte sonora, sendo um indicador essencial da qualidade acústica de um espaço (ABNT, 2025). Esse conceito foi desenvolvido por Sabine (1900), que, ao estudar a inteligibilidade da fala na Sala de Conferências do Museu de Arte Fogg, observou que o som permanecia no ambiente por mais de 5 segundos, dificultando a compreensão das palavras (Long, 2014; Egan, 1988).

O tempo de reverberação pode ser calculado pela fórmula de Sabine, desde que o coeficiente médio de absorção sonora do ambiente seja inferior a 0,30 (Oliveira Filho, 2014). A equação utilizada é:

$$T_{60} = \frac{0,161 * V}{A} \quad (2)$$

Onde,

T_{60} = Tempo de reverberação (s);

V = Volume da sala (m³);

A = Absorção sonora equivalente (m²).

A absorção sonora equivalente A é definida por:

$$A = \sum_i^n a_i * s_i \quad (3)$$

Onde,

A = Absorção sonora equivalente (m²);

a_i = Coeficiente de absorção sonora do material i (adimensional);

s_i = Superfície real do material i (m²).

A influência do T60 na percepção do som varia conforme o ambiente. Em salas de aula, por exemplo, um tempo de reverberação curto melhora a inteligibilidade da fala, enquanto em igrejas góticas, um T60 elevado amplifica o som de órgãos, criando um efeito desejado para a música (ProAcústica, 2019). Bistafa (2018) destaca que um tempo de reverberação prolongado pode comprometer a clareza do discurso devido ao mascaramento do som direto, mas, por outro lado, contribui para o aumento do nível sonoro ao reforçar as reflexões sonoras.

Além do T60, outro parâmetro relacionado é o Tempo de Decaimento Inicial (do inglês Early Decay Time, EDT), que mede a inclinação da curva de decaimento nos primeiros instantes após a interrupção da fonte sonora, sendo um indicador complementar da acústica do ambiente (Brandão, 2016).

De acordo com ProAcústica (2019), o tempo de reverberação tem grande influência na maneira como percebemos os sons. Em uma sala de aula, para que as palavras ditas sejam ouvidas e compreendidas claramente, necessita-se de um tempo de reverberação curto. Já em uma igreja gótica, o som de um órgão tem um aumento significativo do nível sonoro devido ao elevado tempo de reverberação presente no ambiente. Portanto, é preciso adequar os tempos de reverberação de acordo com os espaços e suas finalidades de uso.

3.9 Método de Medição

O método de resposta impulsiva é amplamente utilizado para medir o comportamento acústico de uma sala, como uma sala de aula, por meio da análise da resposta sonora ao ser excitada por um sinal impulsivo. Esse método possibilita a obtenção das curvas de decaimento do nível de pressão sonora, que indicam como o som se dissipa no ambiente ao longo do tempo.

A medição dos parâmetros acústicos de ambientes, como salas de aula, segue as diretrizes da NBR ISO 3382-1:2017, que especifica os equipamentos e procedimentos necessários. Entre os equipamentos estão uma fonte sonora omnidirecional, capaz de emitir sons igualmente em todas as direções, um gerador de sinais, um amplificador, microfones para captar o som, uma

placa de aquisição de sinais e um computador para o processamento e análise dos dados coletados.

O sinal impulsivo é um tipo de sinal que contém energia em todas as frequências analisadas de forma uniforme. Quando esse sinal é emitido por uma fonte sonora, posicionada em uma parte da sala, ele se propaga pelo ambiente, sendo registrado por um receptor (microfone) em outro ponto da sala. O som captado pelo receptor é composto pelo som direto, proveniente da fonte, e pelas suas múltiplas reflexões nas superfícies da sala, como paredes, teto e mobiliário. Essa combinação de som direto e refletido constitui a resposta ao impulso da sala.

O sinal registrado varia conforme a posição da fonte e do receptor dentro do ambiente, uma vez que diferentes locais da sala têm distintas condições de reflexão sonora. A resposta ao impulso revela informações importantes sobre a reverberação, a dispersão do som e a qualidade acústica do espaço. Esse método é particularmente útil em salas de aula, onde o controle acústico é essencial para garantir a inteligibilidade da fala e o conforto auditivo dos alunos, melhorando assim a eficácia do processo de ensino-aprendizagem (Ribeiro, 2020).

3.10 Teste de Correlação

A análise de correlação é uma ferramenta estatística amplamente utilizada para verificar a relação entre duas variáveis distintas. No contexto da acústica, ela pode ser aplicada para avaliar a correspondência entre diferentes conjuntos de coeficientes de absorção sonora obtidos em condições variadas ou por métodos distintos (Arnela et al., 2025). Entre as abordagens possíveis, destacam-se os testes de correlação não-paramétricos de Spearman e Kendall, que são apropriados quando não se pode assumir a normalidade dos dados.

O teste de Spearman, conhecido como Spearman's rho (ρ), utiliza o método dos mínimos quadrados ordinários para calcular a correlação com base na ordenação dos dados. Já o teste de Kendall, representado por Kendall's tau (τ), fundamenta-se na comparação pareada entre todos os pontos de dados, considerando pares concordantes e discordantes como base para o cálculo (Okoye; Hosseini, 2024). Apesar de ambos medirem relações monotônicas, suas abordagens distintas fornecem complementos valiosos na interpretação da consistência entre variáveis.

Segundo Schober, Boer e Schwarte (2018), valores de coeficiente de correlação superiores a 0,70 indicam forte correlação entre as variáveis analisadas, e valores acima de 0,90 representam uma correlação muito forte. A escolha do teste adequado e a interpretação correta

dos resultados são fundamentais para garantir a confiabilidade das conclusões em estudos comparativos de desempenho acústico.

3.11 Normativas Aplicadas

As principais normas que auxiliam a atingir o objetivo desta pesquisa são as seguintes.

3.11.1 ABNT NBR ISO 717:2021

A ABNT NBR ISO 717:2021 – “Classificação de isolamento acústico em edificações e elementos de edificações” estabelece critérios para avaliar e padronizar o isolamento a ruído aéreo em ambientes construídos (ABNT, 2021). A norma permite classificar o desempenho acústico de elementos como paredes, pisos, portas e janelas, sendo essencial para garantir um ambiente adequado para diferentes usos, incluindo salas de aula.

A aplicação dessa norma em ambientes escolares visa minimizar a interferência de ruídos externos, como tráfego e outras atividades próximas, promovendo melhor inteligibilidade da fala e maior conforto acústico para alunos e professores. As classificações são definidas com base em medições padronizadas, permitindo a adoção de soluções eficazes para controle de ruído.

3.11.2 ABNT NBR ISO 3382:2017

A ABNT NBR ISO 3382:2017 – “Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas” estabelece diretrizes para avaliar a qualidade acústica em diferentes tipos de ambientes (ABNT, 2017). A norma é dividida em três partes:

- Parte 1: Salas de espetáculos;
- Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns;
- Parte 3: Escritórios de planta livre.

A Parte 2 dessa norma é especialmente relevante para salas de aula, pois especifica métodos para a medição do tempo de reverberação, um fator essencial para garantir a clareza da comunicação verbal. O excesso de reverberação pode comprometer a inteligibilidade da fala, dificultando o aprendizado dos alunos. Dessa forma, a norma orienta medições e análises para otimizar o desempenho acústico dos espaços educacionais.

3.11.3 ABNT NBR 16313:2025

A ABNT NBR 16313:2025 – "Acústica - Diretrizes para a avaliação da qualidade acústica de ambientes construídos" estabelece parâmetros para a avaliação e melhoria do conforto acústico em diferentes tipos de edificações, incluindo espaços educacionais (ABNT, 2014). A norma fornece diretrizes para a medição, análise e interpretação de dados acústicos, garantindo que os ambientes construídos atendam aos requisitos mínimos de desempenho acústico para cada tipo de uso.

A NBR 16313:2025 aborda fatores essenciais para a qualidade acústica, como tempo de reverberação, nível de ruído de fundo e índice de transmissão da fala (do inglês Speech Transmission Index, STI). Em salas de aula, a aplicação desta norma auxilia na criação de um ambiente sonoro adequado, reduzindo interferências que podem comprometer a inteligibilidade da fala e, conseqüentemente, o aprendizado dos alunos.

Entre os critérios estabelecidos, a norma recomenda níveis adequados de isolamento acústico contra ruídos externos e internos, além da aplicação de materiais que favoreçam a absorção sonora para o controle da reverberação. Dessa forma, a (ABNT NBR 16313: Acústica - Diretrizes para a avaliação da qualidade acústica de ambientes construídos, 2025) complementa outras normativas, como a (NBR ISO 3382: Acústica – Medição de parâmetro de acústica de salas, 2017), ao fornecer diretrizes mais amplas para a avaliação da qualidade acústica em edificações, reforçando a importância do controle sonoro nos ambientes educacionais para garantir o conforto e a eficiência na comunicação verbal.

3.11.4 ABNT NBR 12179:1992

A ABNT NBR 12179:1992 – "Acústica – Determinação do nível de pressão sonora em ambientes internos devido a fontes externas" define diretrizes para medir e avaliar a interferência de ruídos externos em espaços fechados (ABNT, 1992).

Em salas de aula, essa norma auxilia na identificação e controle de ruídos indesejáveis, como tráfego urbano, obras ou áreas de lazer próximas, que podem afetar a concentração e o rendimento dos alunos. A metodologia estabelece procedimentos para medições padronizadas, permitindo a adoção de soluções para melhorar o conforto acústico e a qualidade do ambiente educacional.

4 METODOLOGIA

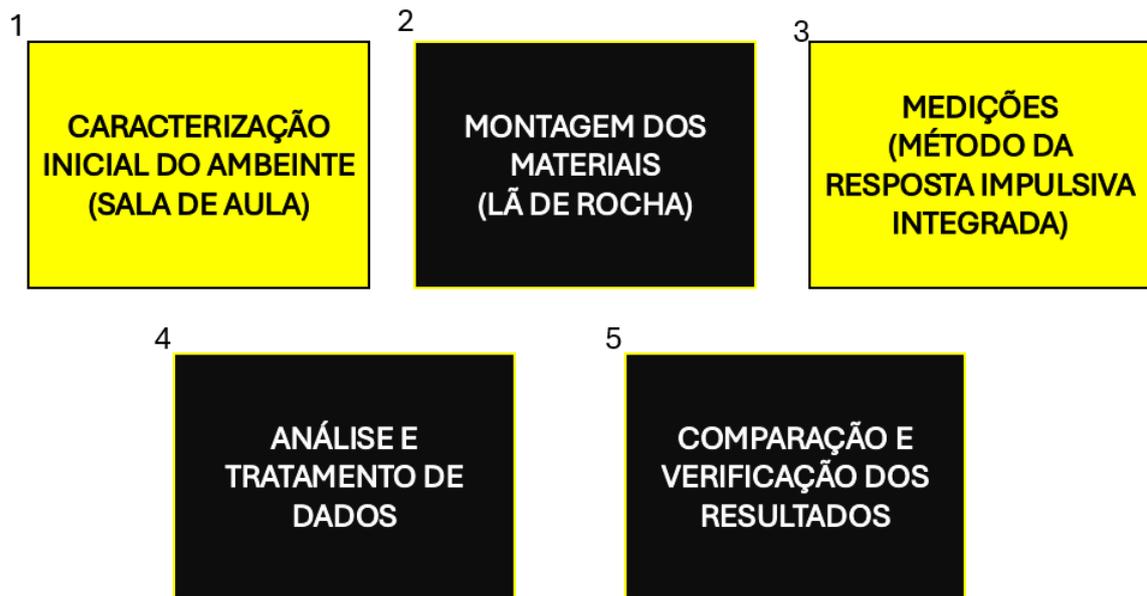
O presente trabalho é classificado como uma pesquisa de natureza aplicada, pois busca solucionar um problema prático relacionado à acústica de ambientes educacionais. Neste caso, o objetivo é avaliar a eficácia de painéis fabricados com lã de rocha incorporados às paredes de uma sala de aula da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Campus Guarapuava, verificando se essa solução seria adequada para melhorar o isolamento e a qualidade acústica do ambiente. A pesquisa visa caracterizar o desempenho acústico da sala com a instalação desses painéis e verificar se a sua incorporação contribuiria para um ambiente sonoro mais adequado para o processo de ensino-aprendizagem, garantindo maior conforto auditivo para alunos e professores (LAKATOS, 2017).

Este capítulo tem o propósito de apresentar os procedimentos necessários para a execução da pesquisa de campo deste estudo. O objetivo é avaliar as condições do ambiente atual da sala de aula na UTFPR - Campus Guarapuava, bem como a viabilidade da introdução de painéis de lã de rocha nas paredes. Além disso, serão analisados os parâmetros acústicos do espaço antes e após a instalação dos painéis, com a intenção de propor uma solução ideal para o ambiente, assegurando melhorias no conforto acústico e na inteligibilidade da fala.

4.1 Procedimentos Metodológicos

Este capítulo apresenta os procedimentos adotados para a condução da pesquisa, detalhando as etapas necessárias para a coleta e análise dos dados. A metodologia foi estruturada com base na caracterização acústica do ambiente, aplicação de materiais absorventes, realização de medições e posterior tratamento dos resultados.

Figura 5 - Metodologia implementada.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 5 apresenta o fluxo metodológico adotado neste trabalho, organizado em cinco etapas principais. Inicialmente, realizou-se a caracterização do ambiente, com levantamento das condições acústicas da sala de aula antes da aplicação de qualquer material, incluindo medições preliminares e descrição física do espaço. Na segunda etapa, procedeu-se com a montagem dos materiais acústicos, especificamente painéis de lã de rocha, instalados conforme o planejamento experimental.

A terceira etapa consistiu na realização das medições acústicas, utilizando o método da resposta impulsiva integrada, conforme preconizado pela norma ABNT NBR ISO 3382-1:2017. Essas medições permitiram avaliar parâmetros como o tempo de reverberação em diferentes configurações do ambiente. Em seguida, foi feita a análise e tratamento dos dados, com organização dos resultados em planilhas e aplicação de métodos estatísticos e comparativos, conforme necessário.

Por fim, a última etapa envolveu a comparação e verificação dos resultados obtidos, permitindo avaliar a eficácia dos materiais instalados na melhoria das condições acústicas da sala de aula. Esse processo possibilitou concluir sobre o impacto das intervenções na inteligibilidade da fala e no desempenho acústico geral do ambiente.

4.2 Materiais e Métodos

4.2.1 Materiais

Para a realização das medições acústicas do tempo de reverberação, foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos fornecidos pelo Laboratório de Instalações Prediais do curso de Engenharia Civil da UTFPR, Campus Guarapuava:

- Microfone capacitivo pré-polarizado tipo 4966 de 1/2" do fabricante Brüel & Kjær, cujo comprovante de calibração se encontra no Anexo 1;
- Condicionador de sinais de um canal modelo 1704-A-001 do fabricante Brüel & Kjær;
- Fonte sonora omnidirecional modelo DDC-100 do fabricante GROM ilustrado na Figura 6;
- Interface de áudio USB modelo USB 96 do fabricante PreSonus;
- Termo-higro-barômetro modelo THB-100 do fabricante Instrutherm;
- Trena a laser;
- Tripé.

Figura 6: Fonte sonora omnidirecional.



Fonte: GROM (2024).

Figura 7: Condicionador de sinais.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 8: Microfone capacitativo ré-polarizado.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.2 Métodos

A análise foi realizada com base em medições obtidas por meio do método da resposta impulsiva integrada, conforme estabelecido pela ABNT NBR ISO 3382-1:2017. Esse método consiste na emissão de um sinal sonoro breve e de ampla faixa de frequência, como um estalo, explosão controlada ou sinal de varredura senoidal (*sweep-sine*), seguido da captação da resposta acústica do ambiente por microfones posicionados estrategicamente.

Em uma sala de aula, a medição é realizada inserindo a fonte sonora em um ponto representativo do espaço, simulando a posição de um professor. Microfones são distribuídos em diferentes locais, representando os pontos de escuta dos alunos. O sinal emitido percorre o ambiente, refletindo nas superfícies e sendo absorvido de acordo com os materiais presentes.

O registro do som captado permite calcular o tempo de reverberação T60 e outros parâmetros acústicos, como o EDT, que influencia diretamente na inteligibilidade da fala. Os

dados coletados são analisados para avaliar se a sala atende aos requisitos acústicos ideais para ensino, possibilitando ajustes como a inclusão de materiais absorventes ou melhorias na disposição dos elementos arquitetônicos para otimizar a propagação sonora.

4.3 Cálculos do Coeficiente de Absorção Sonora *in situ*

O coeficiente de absorção sonora é definido como a fração de energia sonora absorvida por um material em relação à energia incidente. Esse coeficiente varia entre 0 e 1, onde valores próximos de 0 indicam materiais altamente reflexivos e valores próximos de 1 representam materiais altamente absorventes. No entanto, em algumas condições, especialmente quando se trata de materiais com superfícies irregulares, porosas ou geometrias complexas, a medição da energia incidente pode ser subestimada, afetando a precisão dos cálculos. Isso ocorre porque a fórmula de Sabine, amplamente utilizada para estimar o tempo de reverberação e o coeficiente de absorção sonora, apresenta limitações em ambientes onde a absorção sonora é elevada.

Quando os coeficientes de absorção ultrapassam 0,40, por exemplo, o modelo clássico se torna impreciso, pois não considera adequadamente os efeitos de difusão, difração em bordas e absorção excessiva.

No presente estudo, foram analisados diferentes cenários de desempenho acústico do ambiente, conforme ilustrado na Figura 2: (a) sem tratamentos acústicos, (b) com lã de rocha exposta e (c) com painéis de lã de rocha revestidos. A avaliação do tempo de reverberação foi conduzida seguindo as diretrizes da NBR ISO 3382-1:2017, que estabelece procedimentos padronizados para a medição de parâmetros acústicos em salas (ISO, 2017). Estudos anteriores demonstram que o tempo de reverberação é diretamente influenciado pelos materiais presentes no ambiente, impactando a inteligibilidade da fala e o conforto acústico (Kuttruff, 2016; Kang & Schulte-Fortkamp, 2016). As medições ocorreram nos dias 05 e 06 de novembro de 2024, em um ambiente contendo as mobílias previamente descritas e com a presença exclusiva dos colaboradores da pesquisa.

A atenuação acústica foi analisada utilizando a Equação (4), que determina a atenuação total (A_t) do ambiente em função do volume da sala (v), das velocidades de propagação do som (c_1 e c_2), dos tempos de reverberação (T_1 e T_2) e dos coeficientes de atenuação de potência (m_1 e m_2) para os cenários sem e com tratamento acústico. A relação entre a velocidade de propagação do som no ar e a temperatura foi expressa por $c = (331 + 0,6t)$, conforme estabelecido por pesquisas anteriores (Rossing, 2007).

$$A_t = 55,3 * v \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4 * v(m_2 - m_1) \quad (4)$$

Onde,

A_t = Atenuação sonora total (dB);

v = Volume da sala (m³);

c_1, c_2 = Velocidades de propagação do som (m/s);

T_1, T_2 = Tempo de reverberação (s);

m_1, m_2 = Coeficientes de atenuação de potência (dB/m).

Os coeficientes de atenuação de potência foram calculados a partir do coeficiente de atenuação (α), seguindo a metodologia estabelecida pela norma ISO 9613-1 (ISO, 1993). Esse cálculo considera fatores ambientais como temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa, conforme a Equação (5):

$$m = \frac{\alpha}{10 \log(e)} \quad (5)$$

Onde,

m = Coeficiente de atenuação de potência (dB/m);

α = Coeficiente de atenuação.

Por fim, os coeficientes de absorção sonora (α_s) para as frequências de interesse foram determinados conforme a Equação (6), levando em conta a área de material de absorção sonora inserida no ambiente, equivalente a 13,69 m²:

$$\alpha_s = \frac{A_t}{S} \quad (6)$$

Onde,

α_s = Coeficiente de absorção sonora;

A_t = Atenuação sonora (dB/m);

S = Área do material de absorção sonora (m²).

Materiais como a lã de rocha apresentam alta eficiência na absorção de ondas sonoras, especialmente em frequências médias e altas (Cox; D'Antonio, 2016).

4.3.1 Teste de Correlação

Uma das formas de avaliar a correlação entre dois resultados distintos de coeficientes de absorção sonora é por meio da aplicação de teste de correlação (Arnela et al., 2025). Os testes de Spearman e Kendall são opções de estatística não-paramétrica, ou seja, não supõe uma normalidade amostral.

Entre as diferenças dos dois testes, o coeficiente de Spearman é calculado por meio dos “mínimos quadrados ordinários”, enquanto as correlações de Kendall são calculadas por meio da “comparação pareada” de todos os pontos de dados. Assim, as correlações de Kendall’s tau (τ) são baseadas em “pares concordantes e discordantes”, de Spearman’s rho (ρ) são baseadas em “desvios”, respectivamente (Okoye; Hosseini, 2024).

Coefficientes de correlação acima de 0,70 indicam que existe uma forte correlação entre os as variáveis analisadas. Acima de 0,90 indica que a relação é muito forte (Schober; Boer; Schwarte, 2018).

4.4 Estudo De Caso: Sala de Aula do Bloco H da UTFPR

O local de estudo se dá presente na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), do bloco H da sala de aula 209, localizado no campus da cidade de Guarapuava no Paraná, na Avenida Guarapuava. A sala de aula é utilizada para principalmente o curso de graduação de engenharia civil oferecido pela universidade, sendo um espaço destinado principalmente às atividades acadêmicas, como aulas expositivas, seminários e apresentações de projetos. Como parte de um ambiente educacional, a sala deve oferecer condições adequadas para a comunicação eficiente entre professores e alunos, sendo o conforto acústico um fator essencial para este processo.

O campus se localiza no bairro Cidade dos Lagos e abrange uma área significativa, em constante crescimento. Com diversos blocos acadêmicos, laboratórios e áreas dedicadas à pesquisa e inovação tecnológica, em um total de 10 blocos e a portaria, o campus abriga aproximadamente 2.500 alunos de graduação e conta com um corpo docente de cerca de 200 professores. A infraestrutura do campus inclui áreas para atividades culturais e científicas, além de espaços destinados ao desenvolvimento de projetos de extensão e inovação tecnológica, reforçando o papel da universidade na promoção do desenvolvimento econômico e social da região de Guarapuava e arredores.

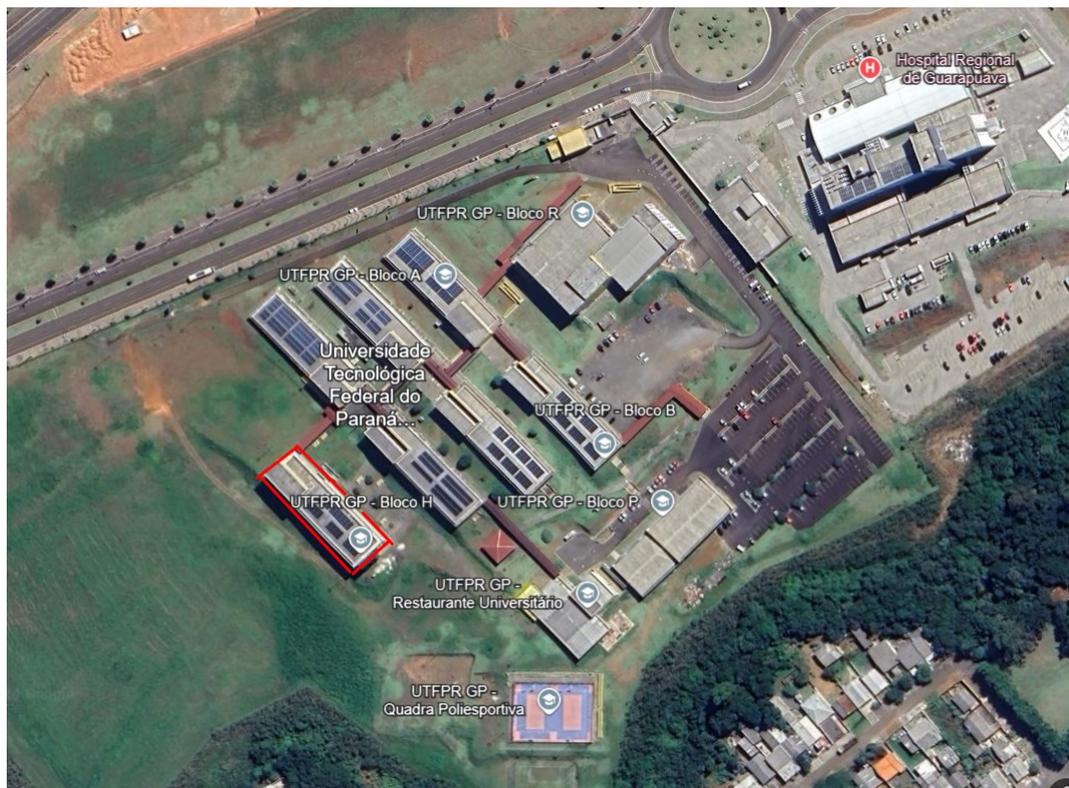
Nas Figuras 9 e 10 é possível visualizar a suas construções e localização, respectivamente.

Figura 9: Campus UTFPR Guarapuava.



Fonte: Amor Real Notícias.

Figura 10: Localização do Bloco H no UTFPR Guarapuava.



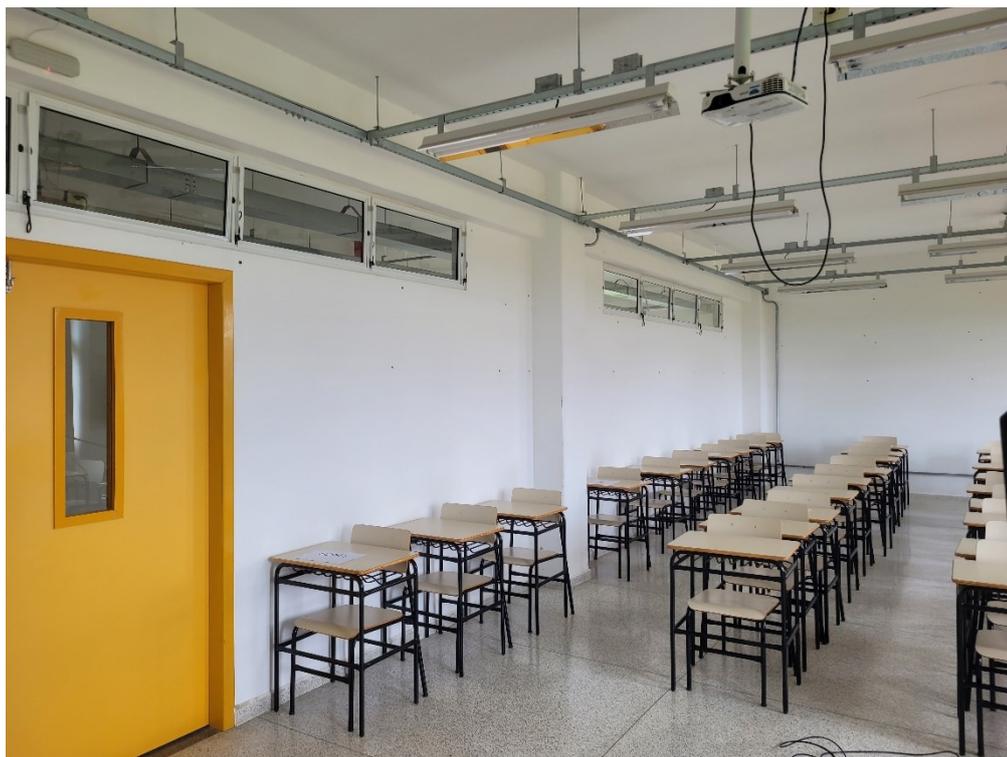
Fonte: Google Earth (2025)

4.4.1 Caracterização da Sala de Aula (BLOCO H – SALA 209)

A sala de aula H209, localizada no Campus Guarapuava, foi selecionada para a realização das medições. O ambiente possui dimensões de 12,8 m de comprimento, 6,4 m de largura e 3,27 m de altura, resultando em um volume total de 267,9 m³. O teto é revestido de gesso, e a sala conta com janelas laterais que ocupam grande parte da parede direita, medindo 2,30 m de altura, cobertas por cortinas de pano que estavam propositalmente posicionadas em 3/4 de abertura conforme apresentado no Quadro 1.

A disposição interna inclui cinco fileiras de carteiras, somando um total de 47 unidades, além de uma mesa e uma cadeira para o professor. O ambiente também é equipado com um projetor, uma lousa para projeção e um quadro-negro que ocupa grande parte de uma das paredes. A entrada é composta por uma porta de duas folhas em MDF, enquanto a parede lateral esquerda possui pequenas janelas.

Figura 11: Sala de Aula H209 (lado direito)



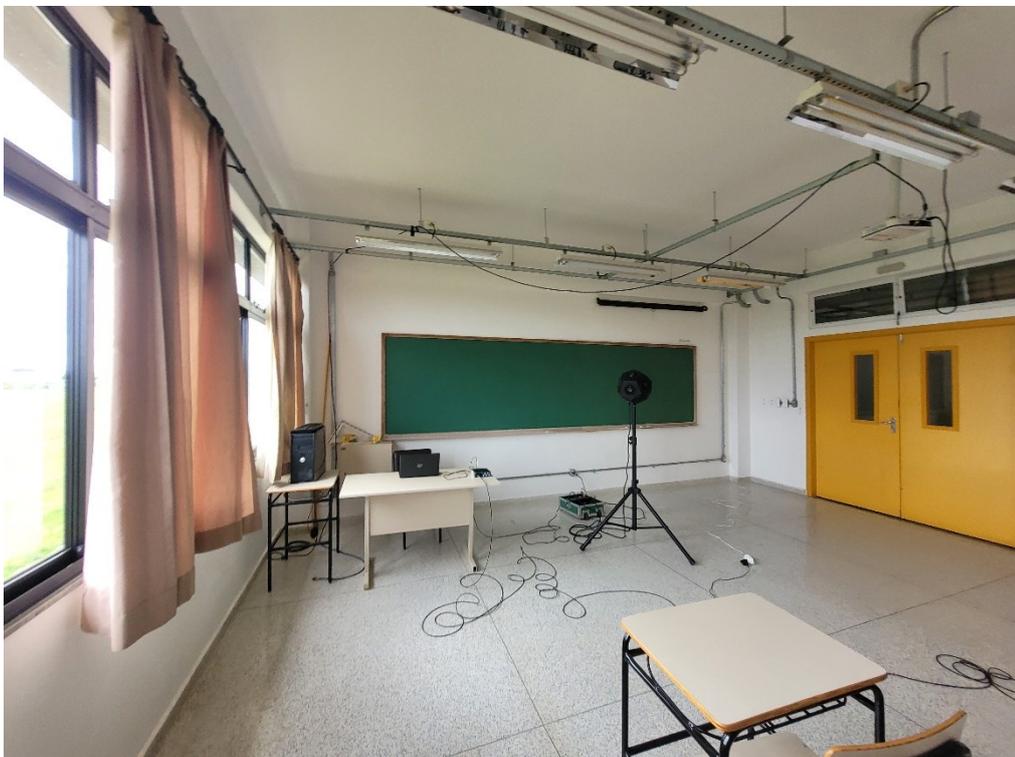
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 12: Sala de Aula H209 (lado esquerdo)



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 13: Sala de Aula H209 (quadro negro)



Fonte: Autoria própria (2025).

Quadro 1: Características da Sala H209

CARACTERISTICA	VALOR
Comprimento	11,80 m
Largura	6,40 m
Altura	3,27 m
Área	81,92 m ²
Perímetro	38,40 m
Volume	267,90 m ³
Nº de Carteiras	47

Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Caracterização Acústica

Esta seção tem como finalidade avaliar a caracterizar acústica da sala H209. A análise foi realizada com base em medições obtidas por meio do método da resposta impulsiva integrada, conforme estabelecido pela ABNT NBR ISO 3382-1:2017.

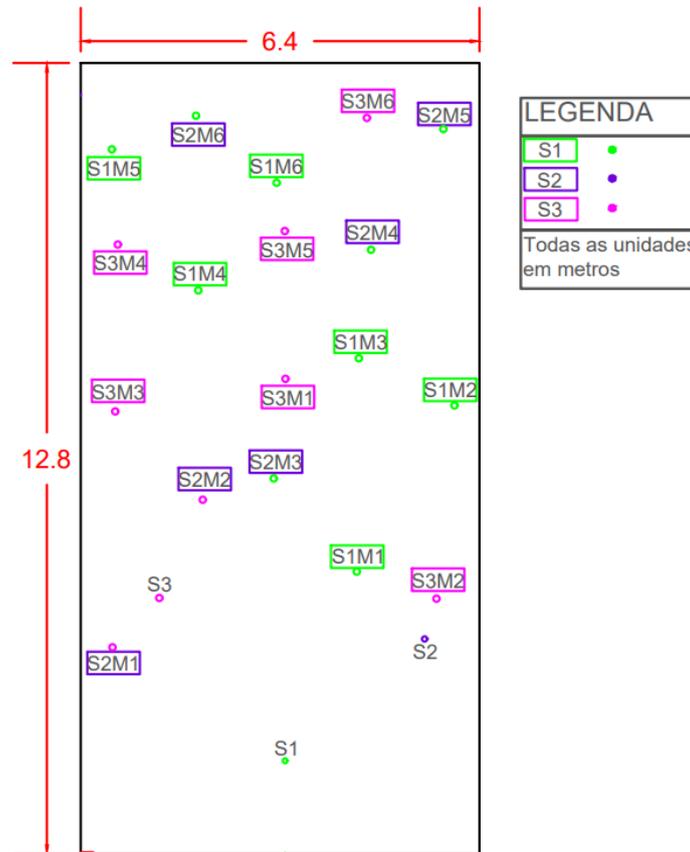
Em conformidade com a norma, foram utilizadas três posições de fontes sonoras e seis posições de microfones para cada fonte sonora, totalizando 18 combinações fonte-receptor. Essas disposições estão representadas em um croqui (Figura 13), onde as fontes sonoras são identificadas pela letra "S" e os microfones pela letra "M". Cada combinação é designada, por exemplo, como S1M1, indicando a fonte sonora na posição 1 e o microfone na posição 1 correspondente.

Foram definidos os seguintes parâmetros para as medições:

- Número de amostras para a Transformada Rápida de Fourier (em inglês Fast Fourier Transform, FFT): 18;
- Taxa de amostragem de 44100 Hz;
- Utilização do método de varredura senoidal como tipo de ruído junto a uma técnica de deconvolução;
- A duração do sweep foi calculada como $\frac{2^{18}}{44100} = 5,94 \text{ s}$;
- Foram adicionados 04 segundos de silêncio após a emissão do ruído para gravar a reverbereção das altas frequências;
- Área de lã de rocha para as medições: 13,69m².

Dessa forma, atendendo aos requisitos normativos.

Figura 14: Croqui de medições.



Fonte: Autoria própria (2025).

De acordo com a NBR ISO 3382-1:2017, as medições do tempo de reverberação podem ser realizadas em diferentes estados de ocupação do ambiente, sendo essencial a descrição precisa das condições em que foram conduzidas, devido ao impacto significativo desses fatores na interpretação dos resultados obtidos. No presente estudo, as medições foram realizadas nos em dois dias distintos, em um ambiente contendo as mobílias previamente descritas e com a presença exclusiva dos colaboradores da pesquisa, não havendo registro de precipitações atmosféricas durante o período de coleta de dados.

Adicionalmente, os parâmetros ambientais, incluindo temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do ar, foram mensurados por meio de um termo-higro-barômetro, cujos resultados estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Parâmetros atmosféricos nos dias de medições

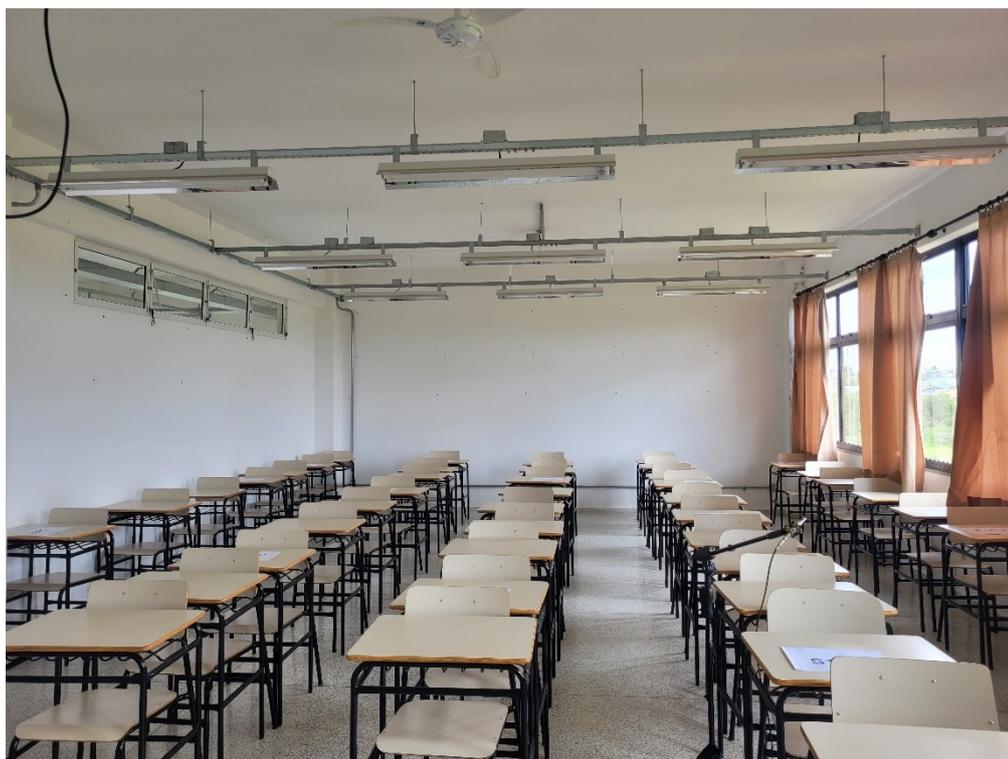
Parâmetros atmosféricos

Data	05/11/2024	06/11/2024
Temperatura (°C)	25,0	24,5
Pressão atmosférica (hPa)	900,02	899,41
Umidade relativa (%)	67,0	72,3

Fonte: Autoria própria.

Foram considerados três cenários distintos para três condições distintas: sala sem tratamento acústico, sala com painéis de lã de rocha expostos e sala com painéis revestidos. No primeiro cenário, a sala de aula foi avaliada sem a presença de qualquer sistema de absorção sonora sendo realizada no dia 05. No segundo, foram instalados painéis acústicos nas paredes laterais e de fundo, com a camada de lã de rocha exposta no dia 06. Já no terceiro cenário, os painéis foram dispostos na mesma configuração, porém com a camada de um véu por cima da lã de rocha. As diferentes disposições de absorção sonora estão ilustradas nas Figuras 15, 16 e 17.

Figura 15 - Sala sem tratamentos acústicos (Lado A)



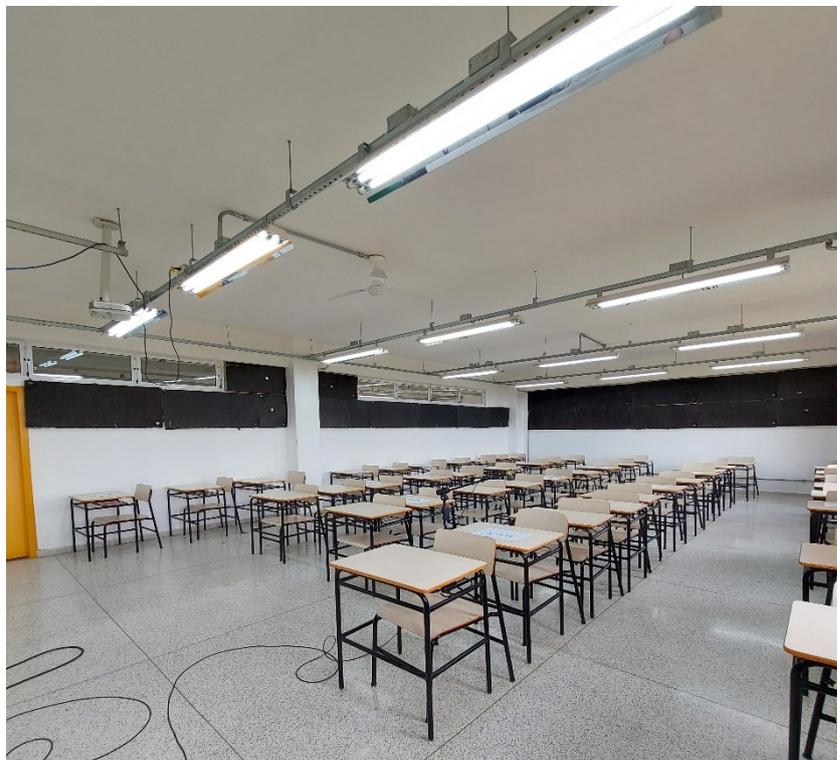
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 16 - Sala utilizando os painéis expostos (Lado B).



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 17 - Sala utilizando os painéis com a camada véu (Lado C)



Fonte: Autoria própria (2025).

4.4.3 Tratamento e Análise dos Resultados Obtidos

Por meio da ferramenta ITA Toolbox, foi realizado o processamento das respostas ao impulso para a obtenção do Tempo de Reverberação (T20), no intervalo de frequência de 20 Hz a 20 kHz, utilizando algoritmos de Transformada Rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transform). Em seguida, os resultados foram exportados em um arquivo no formato “.txt” e posteriormente importados para o software Excel, onde foram tratados e analisados.

Embora a faixa de audição humana compreenda frequências entre 20 Hz e 20 kHz, a análise completa dessa faixa não é essencial para a avaliação do condicionamento acústico de um ambiente. Isso se deve ao fato de que a voz humana falada apresenta uma faixa predominante entre 120 Hz e 220 Hz, enquanto uma orquestra pode atingir frequências entre 3.000 Hz e 4.000 Hz (Vieira, 2004).

Dessa forma, foram considerados apenas os resultados referentes às bandas de oitava entre 125 Hz e 4.000 Hz, faixa que melhor representa a percepção sonora em auditórios e ambientes de grande porte.

5 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados das medições acústicas realizadas na sala de aula H209 da UTFPR, campus Guarapuava, utilizando o método da resposta ao impulso conforme a norma NBR ISO 3382-1:2017. Os dados obtidos foram analisados para três condições distintas: sala sem tratamento acústico, sala com painéis de lã de rocha expostos e sala com painéis revestidos.

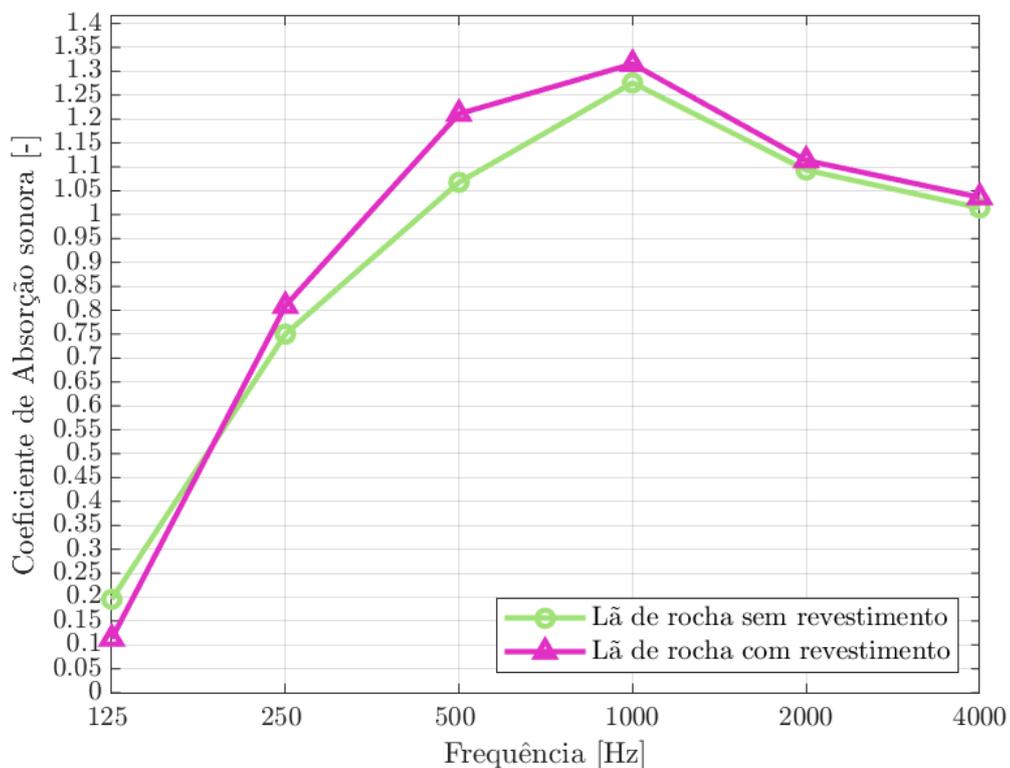
Os valores de Tempo de Reverberação (TR) foram obtidos por meio da média das medições realizadas em diferentes posições dentro da sala, abrangendo as bandas de oitava entre 125 Hz e 4000 Hz. Esses dados experimentais foram comparados com os resultados das simulações computacionais, com o objetivo de validar o modelo acústico adotado e assegurar a precisão da análise. Além disso, o TR medido na condição final foi confrontado com os valores de referência encontrados na literatura para ambientes educacionais, que variam de 0,4 a 0,6 segundos. É importante destacar que esses valores ideais consideram a presença de ocupantes no ambiente, o que torna possível avaliar de forma mais realista a efetividade do tratamento acústico implementado.

Também foi realizado o cálculo do Coeficiente de Absorção Sonora no local o qual é essencial para que seja possível avaliar as diferentes faixas de frequência que o material e o espaço conseguem absorver e foi realizado um teste de correlação para avaliar os dados obtidos.

5.1 Coeficiente de Absorção Sonora *in situ*

Com o objetivo de obter uma avaliação mais precisa do desempenho acústico dos materiais aplicados no ambiente, foram realizados ensaios *in situ* para a determinação dos coeficientes de absorção sonora. Diferentemente dos métodos teóricos, que podem apresentar limitações em ambientes com alta absorção ou geometrias complexas, as medições *in situ* possibilitam resultados mais representativos das condições reais de uso. Essa abordagem permite observar o comportamento dos materiais em diferentes faixas de frequência, considerando a interação com o espaço e a distribuição do som no ambiente. Os resultados obtidos, apresentados na Figura 18, permitem comparar o desempenho das diferentes configurações adotadas e analisar sua efetividade na melhoria das condições acústicas da sala.

Figura 18 - Resultados dos Coeficientes de Absorção Sonora *in situ*.



Fonte: Autoria própria.

O presente trabalho analisou dois sistemas de absorção sonora em uma sala de aula, comparando a lã de rocha com e sem revestimento. As diferenças observadas ficaram abaixo da Diferença Mínima Perceptível (JND) de 5%. Isso confirma que o revestimento não compromete a capacidade de absorção sonora da lã de rocha.

Além disso, os coeficientes de absorção estimados, conforme normativas para testes em câmara reverberante, apresentaram valores superiores a 0,80 para frequências acima de 250 Hz, destacando o alto desempenho acústico do material. Estudos como os de (Cox; D'Antonio 2016) reforçam que materiais porosos como a lã de rocha mantêm sua eficiência sonora mesmo quando revestidos, desde que o material de cobertura permita a passagem do som para o núcleo absorvente. Os resultados indicam que a lã de rocha é uma solução eficaz para o tratamento acústico de ambientes educacionais.

5.1.1 Teste de Correlação

A aplicação dos testes de correlação de Spearman e Kendall levou a coeficientes de 0,94 e 0,87, conforme a Figura 19, resultante da aplicação dos métodos no software R.

Figura 19 - Aplicação dos testes de correlação no Software R.

```
> sem_revestimento=c(0.1953115638,0.7500922497,1.067654892,1.275804026,1.093359388,1.014082855)
> com_revestimento=c(0.1130207844,0.8091022699,1.210971422,1.315319458,1.113530732,1.036236998)
>
>
> cor(sem_revestimento, com_revestimento, method = "spearman")
[1] 0.9428571
> cor(sem_revestimento, com_revestimento, method = "kendall")
[1] 0.8666667
```

Fonte: Autoria própria.

Esses resultados, demonstram uma correlação muito forte entre os conjuntos de dados. Isso sugere que os métodos utilizados fornecem resultados consistentes, reforçando a confiabilidade das medições realizadas. Pequenas diferenças entre os coeficientes podem indicar variações na sensibilidade dos métodos em determinadas condições.

5.2 Resultados do Tempo de Reverberação

Os resultados das médias aritméticas entre as medições de posicionamento de fonte F1, F2 e F3 obtidos a partir do método da resposta impulsiva para o parâmetro Tempo de Reverberação (T20) para cada terças-de-oitava de 125 a 4000 Hz estão apresentados nas tabelas a seguir.

Devido à importância do controle acústico em salas de aula para garantir a inteligibilidade da fala e o conforto auditivo, diversos estudos analisam os parâmetros ideais para esse tipo de ambiente. No entanto, há uma defasagem na literatura quanto à normatização específica para salas de aula no Brasil, uma vez que a NBR 12179:1992 trata do tratamento acústico de recintos fechados de forma genérica, sem especificações detalhadas para ambientes educacionais.

Além disso, embora o tempo de reverberação (TR) seja um dos principais parâmetros para avaliar a qualidade acústica, a maioria dos estudos foca na análise de bandas de frequência limitadas, como 500 Hz e a média entre 500 e 1000 Hz, consideradas representativas da inteligibilidade da fala. No entanto, pesquisas apontam que a compreensão da comunicação verbal também é influenciada por frequências mais amplas, de 125 a 4000 Hz, abrangendo tanto sons graves quanto agudos.

Dessa forma, esta pesquisa analisou o TR da sala de aula para a faixa de 125 a 4000 Hz, conforme os critérios estabelecidos pela NBR ISO 3382-1:2017, comparando os valores obtidos com referências da literatura. Para salas de aula, diversos estudos sugerem um TR ideal entre 0,4 e 0,8 segundos, garantindo que a voz do professor seja ouvida claramente sem excessiva reverberação. Assim, adotou-se como referencial o valor máximo de 0,6 segundos para a frequência de 1000 Hz, conforme indicado em normas internacionais e estudos acadêmicos, considerando que a sala é destinada à comunicação oral e ao aprendizado, onde a clareza da fala é essencial.

5.2.1 Análise Comparativa dos Resultados

Na Tabela 1 estão apresentados os valores comparativos de tempo de reverberação entre os três lados medidos. Para melhor visualização, os resultados foram compilados na Figura 20.

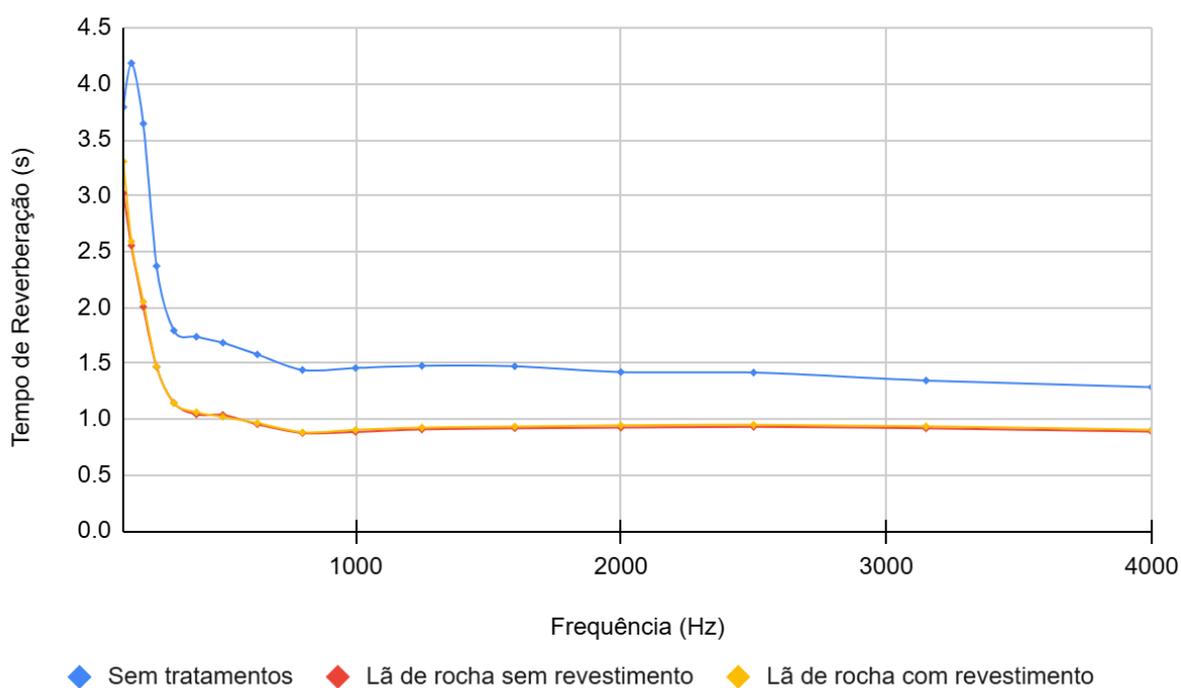
Tabela 1 - Tabela comparativa com os tempos de reverberações.

Frequência (Hz)	T_{60} Sem Tratamentos (dB)	T_{60} Lã de rocha sem Revestimento (dB)	T_{60} Lã de rocha com Revestimento (dB)
125	3,79	3,02	3,31
155	4,19	2,55	2,59
200	3,64	2,01	2,05
250	2,37	1,47	1,47
315	1,79	1,15	1,14

400	1,74	1,04	1,06
500	1,68	1,04	1,02
630	1,58	0,95	0,97
800	1,44	0,88	0,88
1000	1,46	0,89	0,90
1250	1,48	0,91	0,93
1600	1,47	0,92	0,94
2000	1,42	0,92	0,94
2500	1,42	0,93	0,95
3150	1,35	0,92	0,94
4000	1,29	0,89	0,91

Fonte: Autoria própria.

Figura 20 - Resultados dos tempos de reverberação.



Fonte: Autoria própria.

Nota-se que ambas as soluções tanto com a lã de rocha exposta quanto com a face revestida resultaram em uma melhora significativa no tempo de reverberação da sala de aula. Para a banda de frequência de 1000 Hz, por exemplo, o tempo de reverberação (T60) na condição sem tratamento, que era de aproximadamente 1,5 segundos, foi reduzido em cerca de 0,60 segundos após a aplicação dos tratamentos. Apesar da melhoria, o tempo obtido ainda

ultrapassa o valor referencial máximo adotado de 0,6 segundos. Os valores medidos para as configurações F1, F2 e F3, obtidos por meio do método da resposta ao impulso, para o parâmetro Tempo de Reverberação (T20) nas bandas de oitava de 125 a 4000 Hz, estão apresentados nas Tabelas 1. O valor estipulado de 0,6 segundos, conforme previsto em norma, já considera a presença de pessoas no ambiente, o que reforça que os resultados obtidos se mantêm dentro de um nível aceitável. Além disso, observa-se que o uso de um revestimento sobre a lã de rocha não compromete significativamente o desempenho acústico do material. Entretanto, a adoção do revestimento é vantajosa tanto do ponto de vista estético quanto funcional, pois impede a dispersão de partículas da lã de rocha no ambiente, o que pode causar irritações na pele, nos olhos e nas vias respiratórias. Assim, a solução com revestimento se mostra mais segura e adequada para salas de aula, conciliando desempenho acústico e conforto ambiental.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar o condicionamento acústico de uma sala de aula por meio da implementação de painéis de lã de rocha, analisando seu impacto no tempo de reverberação (TR). Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação dos painéis proporcionou uma redução significativa no TR, melhorando a qualidade acústica do ambiente.

Os ensaios seguiram os procedimentos estabelecidos pela NBR ISO 3382-1:2017, garantindo rigor técnico na coleta e análise dos dados. Antes da implementação do tratamento acústico, o TR da sala estava acima dos valores recomendados para ambientes educacionais, o que comprometia a compreensão da fala do professor e, conseqüentemente, o aprendizado dos alunos. Após a instalação dos painéis, observou-se uma queda no TR, especialmente nas faixas de frequência mais críticas para a comunicação verbal (500 Hz e 1000 Hz).

Outro aspecto relevante identificado foi que o revestimento dos painéis de lã de rocha não comprometeu sua eficiência acústica, uma vez que as diferenças no TR entre os painéis revestidos e não revestidos foram mínimas e dentro da margem de erro perceptível ($JND < 5\%$). Além disso, o revestimento apresentou vantagens práticas, como maior durabilidade do material e redução da dispersão de partículas no ar, tornando-o uma opção mais segura para ambientes de ensino.

A pesquisa reforça a importância do controle acústico em salas de aula, destacando que a utilização de materiais adequados pode minimizar efeitos negativos da reverberação e do ruído, favorecendo um ambiente propício para o ensino-aprendizagem. Assim, recomenda-se a

aplicação de painéis absorventes em ambientes acadêmicos e a revisão das normativas nacionais, como a NBR 12179:1992, para contemplar parâmetros mais atualizados e específicos para espaços educacionais.

Dessa forma, conclui-se que a lã de rocha, quando corretamente aplicada e dimensionada, é uma solução eficaz para o tratamento acústico de salas de aula, garantindo um ambiente sonoro adequado e promovendo melhorias na comunicação e no desempenho acadêmico dos alunos.

Apesar dos resultados satisfatórios quanto à redução do tempo de reverberação (TR), esta pesquisa apresentou algumas limitações que devem ser consideradas. A principal delas refere-se à impossibilidade de realizar as medições com a sala ocupada por um número representativo de pessoas, fator que influencia diretamente na absorção sonora e, conseqüentemente, nos valores de TR. Além disso, a análise se concentrou exclusivamente nesse parâmetro, sem aprofundamento nos demais indicadores acústicos recomendados por norma, como os índices de clareza e definição. Por fim, o estudo foi restrito à avaliação de um único tipo de material absorvente (lã de rocha), sem explorar outras soluções que poderiam apresentar desempenhos distintos.

Com base nessas limitações, propõem-se três possíveis direcionamentos para estudos futuros. Primeiramente, recomenda-se a repetição das medições com a sala ocupada, considerando diferentes níveis de lotação, a fim de obter dados mais realistas e alinhados com a condição de uso efetiva do espaço. Em segundo lugar, sugere-se a aplicação de outros materiais absorventes, como espuma de melamina, painéis de fibra de madeira ou placas de gesso perfuradas com manta acústica, possibilitando comparações de desempenho e custo-benefício. Por fim, uma análise complementar incluindo os índices de clareza da fala (C50 e C80) e definição (D50), conforme especificado na ABNT NBR ISO 3382-1:2017, traria uma visão mais abrangente sobre a qualidade acústica do ambiente, especialmente no que diz respeito à inteligibilidade da fala.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.** NBR ISO 3382:2017. Acústica - Medição de parâmetros de acústica de salas. Rio de Janeiro, 2017.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.** NBR ISO 3382:2024. Acústica - Medição de parâmetros de acústica de salas.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.** NBR ISO 12179:1992. Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ARNELA, Marc; BURBANO-ESCOLÀ, Ricardo; SCOCZYNSKI RIBEIRO, Rodrigo; GUASCH, Oriol.** Reverberation time and random-incidence sound absorption measured in the audible and ultrasonic ranges with an omnidirectional parametric loudspeaker. *Applied Acoustics*, v. 229, p. 110414, fev. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.110414>.
- BERANEK, Leo L.** *Concert halls and opera houses: music, acoustics, and architecture*. 2. ed. New York: Springer Science & Business Media, 1996.
- BERARDI, Umberto; IANNACE, Gino.** Acoustic behavior of natural fibers for noise reduction. *Building and Environment*, v. 94, p. 840-852, 2017.
- BISTAFA, Sylvio Luiz.** *Acústica aplicada à engenharia*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2018.
- BRANDÃO, Luciana M.** *Conforto acústico em ambientes escolares: desafios e soluções*. Rio de Janeiro: LCTE, 2016.
- CATAI, Rodrigo E.; PENTEADO, Edson M.** *Controle de ruído industrial*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- COX, Trevor; D'ANTONIO, Peter.** *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. 3. ed. New York: CRC Press, 2016.
- EGAN, M. David.** *Architectural acoustics*. New York: McGraw-Hill, 1988.

EVEREST, F. Alton; POHLMANN, Ken C. *Master handbook of acoustics*. 6. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

GESLA. *Catálogo técnico de produtos em lâ de rocha*. São Paulo: Gesla, 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3382-1: Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces. *Tech. rep.*, International Organization for Standardization, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 354: Acoustics—Measurement of sound absorption in a reverberation room. *Tech. rep.*, International Organization for Standardization, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9613-1: Acoustics—Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. *Tech. rep.*, International Organization for Standardization, 1993.

ISLAM, Md. Zahirul; BHAT, Geeta S. Acoustic performance of porous sound-absorbing materials made from natural fibers. *Applied Acoustics*, v. 146, p. 160-172, 2019.

ITA-Toolbox. *Open Source Toolbox for Acoustic Measurement and Signal Processing*. Institute of Technical Acoustics, RWTH Aachen University, 2024. Disponível em: <https://www.akustik.rwth-aachen.de/cms/ITA/Software/ITA-Toolbox>. Acesso em 2025.

JANUŠEVIČIUS, Tomas; JUCYS, Artūras; JUREVIČIUS, Mindaugas. Acoustic simulation in educational spaces. *Applied Acoustics*, v. 122, p. 104-112, 2016.

KANG, Jian; SCHULTE-FORTKAMP, Brigitte. *Soundscape and the built environment*. Boca Raton: CRC Press, 2016.

KINSER, Donald J.; KENT, George L. *Fundamentals of acoustics*. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

KUTTRUFF, Heinrich. *Room acoustics*. 6. ed. New York: CRC Press, 2017.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. *Metodologia científica*. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

LONG, Marshall. *Architectural acoustics*. 2. ed. San Diego: Elsevier, 2014.

MEISSNER, Michal. Acoustic simulation in educational spaces. *Applied Acoustics*, v. 122, p. 104-112, 2017.

MORAES, Juliana C. *Isolamento acústico em escolas: estudo de caso com painel de lã de rocha*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

M. Berzborn, R. Bomhardt, J. Klein, J.-G. Richter, M. Vorländer. The ITAToolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing. *43th Annual German Congress on Acoustics*, Kiel (Germany), 6-9 Mar 2017.

OKOYE, Kingsley; HOSSEINI, Samira. Correlation Tests in R: Pearson Cor, Kendall's Tau, and Spearman's Rho. In: *R Programming: Statistical Data Analysis in Research*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. p. 247–277. DOI: 10.1007/978-981-97-3385-9_12.

OLIVEIRA, Francisco A.; SANTOS, Mariana C. Efeitos da acústica em ambientes educacionais: um estudo sobre ruído e conforto acústico. *Revista de Engenharia Acústica*, v. 12, n. 2, p. 45-60, 2017.

OLIVEIRA FILHO, João S. *Parâmetros acústicos em salas de aula: um estudo experimental*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

PROACÚSTICA – Associação Brasileira para a Qualidade Acústica. *Guia técnico de acústica aplicada a edificações*. São Paulo, 2019.

RIBEIRO, A. C. *Avaliação acústica de ambientes escolares*. Belo Horizonte: UFMG, 2020.

ROSSING, Thomas D. *Springer handbook of acoustics*. New York: Springer Science & Business Media, 2007.

RUSSO, Danilo; RUGGIERO, Giacomo. *Acústica em ambientes educativos: desafios e soluções práticas.* São Paulo: Blucher, 2019.

SANTONI, Andrea; ASDRUBALI, Francesco; D'ALBERTI, Federica. Sustainable acoustic materials: A review of natural fibers for noise control applications. *Applied Acoustics*, v. 145, p. 330-345, 2019.

SAVIOJA, Lauri; SVENSSON, Ulf Peter. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 138, n. 2, p. 708-730, 2015.

SOUZA, Diego A.; OLIVEIRA, Mariana F.; GOMES, Carlos L. Acústica de ambientes educacionais: revisão de normas e propostas de melhoria. *Revista de Engenharia Acústica*, v. 23, p. 15-22, 2012.

VIEIRA, Marcelo A. Frequências sonoras e sua importância na acústica de ambientes. *Revista Acústica & Engenharia*, v. 7, p. 22-33, 2004.

APÊNDICE 1 – Código do cálculo de absorção sonora (Mathlab).

```

Temp=24.5;
hum=72.3;
pa = 89.941;

T = Temp+273.15;
pr = 101.325;
T0=293.15;
C=-6.8346*((273.16/T)^1.261)+4.6151;
psatpr=10^C;
h=hum*(psatpr)/(pa/pr);
fr0=(pa/pr)*(24+4.04*10^4*h*((0.02+h)/(0.391+h)));
frn=(pa/pr)*((T/T0)^(-1/2))*(9+280*h*exp(-4.17*((T/T0)^(-1/3))-1));
%freq=[20,25,31.5,40,50,62.5,80,100,125,155,200,250,315,400,500,630,800,1000,1250,1600
,2000,2500,3150,4000,5000,6350,8000,10000,12500,16000,20000];
freq=[125,250,500,1000,2000,4000];

for i = 1:6
alpha(i)=1000*(8.686*freq(i)^2*(((1.84*10^-11*((pa/pr)^(-1))*((T/T0)^(1/2))))+((T/T0)^(-
5/2))*0.01275*exp(-2239.1/T)*(fr0+(freq(i)^2/fr0))^-1)+0.1068*(exp(-
3352/T))*(frn+(freq(i)^2/frn))^-1));
end

```

ANEXO 1 – Certificados de calibração dos materiais de medição utilizados.

INTERMETRO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO (Calibration Certificate)



Nº 4838/24R

Laboratório de Calibração acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o Nº 0450
(Calibration Laboratory accredited by CGCRE in accordance with ABNT NBR ISO/IEC 17025, under No. 0450)

OS 73332

Cliente: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
(Client)
Endereço: AV LAURA PACHECO BASTOS,800 - GUARAPUAVA/PR
(Address):

Data da Calibração: 25/06/2024
(Calibration date)

Solicitante: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
(Requester):
Endereço: AV LAURA PACHECO BASTOS,800 - GUARAPUAVA/PR
(Address):

Data de Emissão: 26/06/2024
(Issue date)

Equipamento Calibrado (Calibrated Equipment)

Item Calibrado: MICROFONE
(Calibrated Item)

Acessórios Conjugados: Não possui.
(Conjugated Accessories)

Nº de Série: 3265444
(Serial Nº)

Marca: BRUEL & KJAER
(Brand)

Polarização (V): 0
Polarization (V)

Nº de Identificação: NÃO CONSTA
(ID Nº)

Modelo: 4966
(Model)

Tipo: FF
(Type)

Nº de Patrimônio: NÃO CONSTA (N/A)
(Patrimony Nº)

Condições Ambientais Aplicáveis à Calibração (Environmental Conditions)

Local da Calibração: Laboratório de Calibração (Calibration Laboratory)
(Calibration Location)

Pressão barométrica: 930,5 mbar
(Barometric pressure)

Temperatura durante a calibração: 22,7 °C
(Temperature during calibration)

%ur durante a calibração: 70 %
(Relative Humidity)

Metodologia de Calibração (Calibration Methodology)

Os resultados a seguir apresentados referem-se à média de 3 medições. A calibração foi realizada conforme Norma IEC 61094-6:2004, procedimento interno PCA-015.

(The results presented below refer to the average of 3 measurements. Calibration was performed according to Standard IEC 61094-6:2004, internal procedure PCA-015.)

Padrões Utilizados (Standards Used)

Código Padrão de Trabalho:
(Code) (Working Standard)

060 Pré-amplificador padrão B&K 2669

123 Multímetro Digital

303-5 Termohigrometro Canal 5

168 Amplificador de Medição

173 Gerador de Sinais Arbitrários + Atenuador de passo

197 Atuador eletrostático 1/2"

177 Barômetro digital

280 Microfone B&K 4192

Certificado de Calibração
(Certificate Nº)

RBC2-12183-699 - TOTAL SAFETY - RBC

E1877-2023 - LABELO - RBC

3205-24R - INTERMETRO - RBC

RBC2-12184-484 - TOTAL SAFETY - RBC

DIMCI 0290-2024 - INMETRO-RBC

DIMCI 0644-2024 - INMETRO RBC

CAL-226620-23 - ABSI - RBC

RBC2-12239-441 - TOTAL SAFETY - RBC

Validade do Padrão
(Expiration Date)

mai/25

nov/25

abr/25

mai/25

mar/26

jun/26

jul/25

jul/25



INTERMETRO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO (Calibration Certificate)

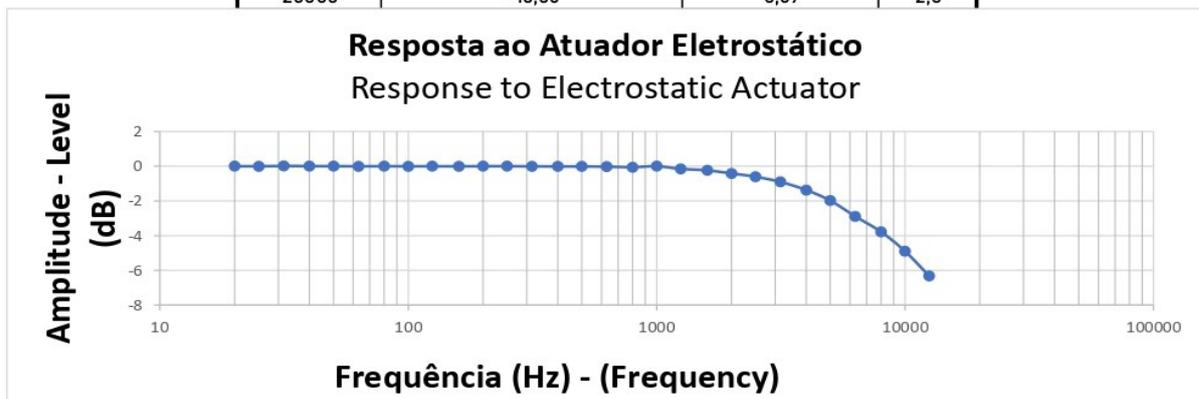
Nº 4838/24R



Laboratório de Calibração acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o N° 0450
(Calibration Laboratory accredited by CGCRE in accordance with ABNT NBR ISO/IEC 17025, under No. 0450)

Resultados Obtidos (Obtained Results)

Frequência (Frequency) (Hz)	Resposta em frequência (dB) (normalizado em 250 Hz) (Frequency response (dB) (normalized to 250 Hz))	U (dB)	k
20	0,00	0,49	2,0
25	0,00	0,49	2,0
31,5	0,01	0,49	2,0
40	0,01	0,49	2,0
50	0,00	0,49	2,0
63	0,00	0,49	2,0
80	0,00	0,49	2,0
100	0,00	0,49	2,0
125	0,00	0,49	2,0
160	-0,01	0,49	2,0
200	0,00	0,49	2,0
250	0,00	0,49	2,0
315	0,00	0,49	2,0
400	-0,01	0,49	2,0
500	-0,01	0,49	2,0
630	-0,03	0,49	2,0
800	-0,05	0,49	2,0
1000	#DIV/0!	0,50	2,0
1250	-0,15	0,50	2,0
1600	-0,24	0,50	2,0
2000	-0,41	0,50	2,0
2500	-0,61	0,50	2,0
3150	-0,90	0,50	2,0
4000	-1,37	0,50	2,0
5000	-1,98	0,50	2,0
6300	-2,89	0,50	2,0
8000	-3,78	0,51	2,0
10000	-4,90	0,54	2,0
12500	-6,32	0,56	2,0
16000	-7,61	0,61	2,0
20000	-10,06	0,69	2,0



INTERMETRO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO (Calibration Certificate)

Nº 4838/24R



Laboratório de Calibração acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o Nº 0450
(Calibration Laboratory accredited by CGCRE in accordance with ABNT NBR ISO/IEC 17025, under No. 0450)

Sensibilidade	dB re.1V/Pa (250 Hz)	-25,82
Sensibilidade	mV/Pa (250 Hz)	51,18

Notas (Notes)

1. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k determinado nas tabelas, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação NIT-DICLA-021.

(1. The reported expanded measurement uncertainty is stated as the standard measurement uncertainty multiplied by the coverage factor k determined in the tables, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%. Standard measurement uncertainty was determined in accordance with publication NIT-DICLA-021.)

2. Os resultados acima apresentados referem-se exclusivamente ao item calibrado e às condições supra mencionadas. O presente certificado somente pode ser reproduzido na sua forma e conteúdo integrais e sem alterações. Não pode ser utilizado para fins promocionais.

(2. The results presented above refer exclusively to the calibrated item and the conditions mentioned above. This certificate may only be reproduced in its entire form and content without alterations. It cannot be used for promotional purposes.)

3. Os resultados apresentados no gráfico acima correspondem a resposta em frequência determinada pelo atuador eletrostático. Correções para campo livre ou para campo difuso podem ser fornecidas pelo fabricante.

(3. The results presented in the graph above correspond to the frequency response determined by the electrostatic actuator. Free-field or diffuse-field corrections can be provided by the manufacturer.)

Lucas Silva
Téc. Executante
(Tec. Performer)

*Este certificado foi assinado eletronicamente pelo Signatário Autorizado.
(This certificate has been electronically signed by the Authorized Signatory.)*