

**Área:** Sustentabilidade | **Tema:** Educação e Sustentabilidade

**MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES ACÚSTICAS DE SALAS DE AULA: ESTUDO DE CASO DE UMA  
ESCOLA PÚBLICA EM SANTA MARIA, RS**

**ACOUSTIC MEASUREMENTS AND SIMULATIONS OF CLASSROOMS: CASE STUDY OF A PUBLIC  
SCHOOL IN SANTA MARIA, RS**

Wellington Bertagnolli Veiga, Viviane Suzey Gomes De Melo, Pedro Paulo Calmon Paes, Raiane Pires Tolio  
e Luiza Paim Da Palma

**RESUMO**

O aumento da população urbana e as mudanças no comportamento das pessoas interferem de maneira significativa na relação com o espaço, assim os padrões de conforto acústico estão diretamente relacionados à qualidade de vida dos indivíduos. As condições ambientais internas podem afetar significativamente a saúde e o conforto dos ocupantes. Essas condições são especialmente importantes em edifícios educacionais, onde alunos, professores e funcionários passam longos períodos do dia e são vulneráveis a esses fatores.

**Palavras-Chave:** Salas de aula, medições e simulações acústicas

**ABSTRACT**

O principal objetivo deste artigo é apresentar um estudo para apoiar a melhoria das condições acústicas em salas de aula e espaços de ensino de uma escola pública sediada no município de Santa Maria, a partir de medições e simulações acústicas. Como objetivos específicos, pode-se elencar: a verificação da inteligibilidade da fala a partir dos parâmetros acústicos de salas, extraídos de medições; e a adequação destes parâmetros, utilizando-se de simulações computacionais, a fim de encontrar soluções projetuais adequadas aos critérios de inteligibilidade de fala.

**Keywords:** Classrooms, acoustic measurements and simulations

# MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES ACÚSTICAS DE SALAS DE AULA: ESTUDO DE CASO DE UMA ESCOLA PÚBLICA EM SANTA MARIA, RS

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da população urbana e as mudanças no comportamento das pessoas interferem de maneira significativa na relação com o espaço, assim os padrões de conforto acústico estão diretamente relacionados à qualidade de vida dos indivíduos. A rápida urbanização e mudanças no estilo de vida moderno trouxeram transformações que afetam a população. Um dos malefícios da urbanização desequilibrada, do aumento desordenado do tráfego, da industrialização, do crescimento rápido das cidades, aliados às necessidades das pessoas, é a produção de sons exacerbados (GHOSH et. al., 2019; GUPTA et. al., 2018). As condições ambientais internas podem afetar significativamente a saúde e o conforto dos ocupantes. Essas condições são especialmente importantes em edifícios educacionais, onde alunos, professores e funcionários passam longos períodos do dia e são vulneráveis a esses fatores.

Na pesquisa de Thompson et. al. (2022) foi apresentado, em uma meta-análise, que no aprendizado de crianças em salas de aula mais silenciosas, elas compreendem a leitura 0,80 pontos a mais do que em salas de aula barulhentas. Quando as crianças entram na escola, a capacidade dos alunos de ouvir e entender informações verbais complexas é fundamental para a aprendizagem. No entanto, essa capacidade é comprometida pela acústica de sala de aula muito variada e desfavorável à fala (VALENTE et. al., 2012).

Existem efeitos significativos provenientes da reverberação, do ambiente de ensino, na percepção da fala e na memória de curto prazo do discurso. Os estudos de Klatte et. al. (2010) verificaram que crianças em salas de aula muito reverberantes têm desempenho inferior em uma tarefa de processamento fonológico, uma vez que relataram maior carga de ruído interno nas salas de aula e julgaram as relações com seus colegas e professores menos positivamente do que as crianças em salas de aula menos reverberantes.

Muitas vezes pequenas mudanças podem trazer muitos benefícios, como a substituição das janelas de vidro simples por vidro duplo, melhorando as condições acústicas da sala de aula, reduzindo assim o estresse dos alunos (KESHTKARAN & NAJAFI, 2020). Outro exemplo está na diminuição de ruído da ventilação mecânica, que é crítico para o desempenho e conforto dos alunos, pela utilização de ventilação natural que têm efeitos positivos e pode ser usada para moldar a paisagem sonora da sala de aula, além de que os sons naturais, podem favorecer a atenção, memória e conforto (PELLEGATTI et. al., 2023).

A ausência de um ambiente que proporcione conforto ambiental aos usuários pode influenciar negativamente na capacidade de aprendizagem dos alunos (RICCIARDI & BURATTI, 2018). Quanto maiores forem os estudos aplicados nessa área, mais rápido as tecnologias poderão ser aplicadas para sanar os principais problemas envolvendo a má acústica presentes em espaços educacionais.

## 2 OBJETIVO

Já é sabido que aspectos acústicos inadequados em ambientes de ensino/aprendizagem são um dos fatores responsáveis por eventuais comprometimentos negativos na saúde do vocal do professor/orador, assim como na qualidade de aquisição de conhecimento por parte dos alunos/ouvintes.

O principal objetivo deste artigo é apresentar um estudo para apoiar a melhoria das condições acústicas em salas de aula e espaços de ensino de uma escola pública sediada no município de Santa Maria, a partir de medições e simulações acústicas.

Como objetivos específicos, pode-se elencar: a verificação da inteligibilidade da fala a partir dos parâmetros acústicos de salas, extraídos de medições; e a adequação destes parâmetros, utilizando-se de simulações computacionais, a fim de encontrar soluções projetuais adequadas aos critérios de inteligibilidade de fala.

### 3 METODOLOGIA

Nesta seção será apresentada a metodologia, desenvolvida por Melo et. al. (2019) para realização de medições das respostas impulsivas (RIRs), geração de desenhos digitais em 3D (maquetes virtuais) e simulações acústicas para as salas de aula do Colégio Estadual Professora Edna May Cardoso.

#### 3.1 A ESCOLA

A escola selecionada como objeto desta pesquisa foi o Colégio Estadual Professora Edna May Cardoso, localizada no bairro Camobi, município de Santa Maria, RS. A escola atende alunos do ensino fundamental ao médio e conta com, além das salas de aula, biblioteca, sala multimídia, quadra de esportes, horta e um pátio dentro do prédio que dá acesso às salas de aula. A Figura 1 ilustra a entrada principal da escola.

Dentre as salas de aula existentes, uma foi selecionada pela equipe deste trabalho para a condução das medições e análises dos parâmetros acústicos. A sala de aula escolhida pode ser vista na Figura 2, esta é utilizada por estudantes do ensino fundamental e médio, sendo uma das salas com desenho padrão da escola. A parede lateral na qual estão localizadas as janelas do tipo basculante é exatamente a que está ao lado da quadra de esportes do colégio. Em alguns dias da semana os horários de uma turma de educação física são os mesmos que os da turma localizada nesta sala de aula, ocasionando bastante ruído residual no ambiente, prejudicando a saúde do professor e o aprendizado dos alunos.

Figura 1 – Entrada principal do Colégio Estadual Professora Edna May Cardoso



Fonte: autores.

Figura 2 - Sala de aula selecionada para realização das medições e análises acústicas

(a) Vista da frente da sala



(b) Vista de trás da sala



Fonte: autores.

### 3.2 MEDIÇÕES ACÚSTICAS

As medições da resposta impulsiva da sala (RIR, do inglês *Room Impulse Response*), destinadas ao cálculo dos parâmetros acústicos objetivos de salas, seguiram as diretrizes contidas na norma NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017), utilizando o método de engenharia. Foram estabelecidas coordenadas para a posição da fonte sonora (emissor) e seis pontos distintos para a colocação dos microfones (receptores), totalizando assim seis pares de fonte-receptor. A representação do *layout* da sala, incluindo suas dimensões e os pontos de medição, está apresentada de maneira detalhada na Figura 3.

Nessa sala de aula, a localização da fonte sonora foi estabelecida próximo à lousa, considerando que este é o local usualmente ocupado pelo(a) professor(a). Já as localizações dos receptores foram definidas em pontos distribuídos no ambiente, em locais que normalmente são ocupados por estudantes, e de modo que mantivessem uma boa distância entre si. A fonte sonora foi posicionada a 1,50 m do piso ao centro acústico da fonte, simulando a altura da boca de uma pessoa adulta em pé. Os microfones foram posicionados na altura de 1,20 m, simulando a altura de uma pessoa sentada. A Figura 4 apresenta a posição da fonte e dos microfones na sala.

É fundamental ressaltar que, antes de iniciar a medição com o sinal de varredura exponencial de senos, procedeu-se ao ajuste individual de cada microfone com o propósito de minimizar as incertezas na medição e alcançar resultados com boa precisão. Adicionalmente, foi conduzida uma medição do ruído residual, utilizando-se de um sonômetro HBK modelo 2270, visando assegurar uma relação sinal ruído adequada, garantindo um valor superior a 15 dB. Importante notar que todas as medições foram efetuadas na ausência de estudantes no interior da sala de aula.

Figura 3 - Planta-baixa com os pontos de medição (fonte e receptores), na sala de aula selecionada

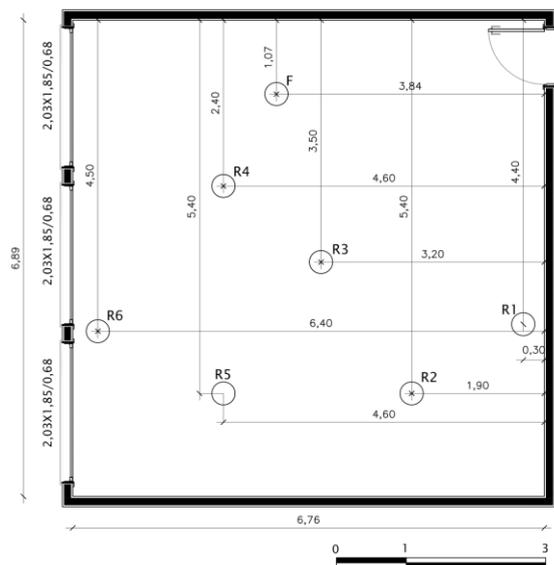


Figura 4 - Posicionamento da fonte sonora e de alguns pontos de receptores na sala de aula



Fonte: autores.

### 3.3 INSTRUMENTAÇÃO

Para a realizar as medições e obter as respostas impulsivas monoauriculares da sala em estudo foi utilizada a seguinte instrumentação:

1. Termo-higrômetro para verificar as condições de umidade e temperatura do ar;
2. Fonte sonora dodecaédrica omnidirecional, Bruel & Kjaer 4292;
3. Amplificador de potência, Bruel & Kjaer 2716;
4. Aquisição de sinais: Chassi CompactDAQ USB National Instruments com 4 slots - cDAQ-9174; módulo de entrada de som e vibração da Série C National Instruments NI-9234; módulo de saída de tensão da Série C National Instruments NI-9263;
5. Calibrador de microfones Bruel & Kjaer Tipo 4231;
6. Microfones para campo difuso Bruel & Kjaer Tipo 4242-A-021 (6 unidades);
7. Tripé para o dodecaedro;
8. Tripé para microfones (6 unidades);
9. Cabos: 6 BNC; 1 speakon; 1 USB tipo A-B;
10. Notebook Dell inspiron 50000, intel core i7 2,6 GHz, 8 GB RAM;
11. Sonômetro HBK, modelo 2270, n° de série 2679331; e
12. Trena, fita crepe, lapiseira e esboços da sala.

### 3.4 DIAGRAMAS E CONEXÕES

O esquema de conexões empregado para as medições está detalhado na Figura 5. O processo de medição envolve a interligação dos microfones ao módulo de entrada da NI por meio de cabos BNC. Esse módulo é responsável por realizar a conversão do sinal sonoro emitido pela fonte sonora dodecaédrica omnidirecional, convertendo-o de analógico para digital. A fonte sonora, por sua vez, é conectada ao módulo de saída da NI por intermédio de um cabo Speakon, com a assistência de um amplificador de potência.

O sinal utilizado para a medição é uma varredura exponencial de senos (*sweep sine*), conforme sugere a norma NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017), projetada para excitar a sala em todas as frequências, dentro da faixa audível de 20 Hz a 20 kHz, por um tempo suficientemente grande até a sala chegar ao seu estado estacionário em cada frequência. A geração deste sinal ocorreu no ambiente computacional por meio do pacote ITA Toolbox no *software* Matlab. Posteriormente, o sinal é encaminhado ao módulo de saída da NI, que desempenhou a conversão digital para analógico (DAC). Em seguida, o sinal é transmitido ao amplificador de potência, modelo 2716, e direcionado à fonte sonora dodecaédrica. Esta última reproduziu o sinal no interior da sala de aula.

Os microfones posicionados dentro da sala captaram o sinal reproduzido no ambiente e o encaminham ao módulo de entrada da NI. Este módulo, por sua vez, efetua a conversão do sinal analógico para digital (ADC), resultando na gravação do sinal na forma de um vetor numérico no ambiente do *software* Matlab. Vale ressaltar que durante todo o processo de reprodução e gravação, utilizou-se o toolbox de aquisição de dados do *software* Matlab (Data Acquisition-DAQ).

É fundamental notar que, embora o sinal tenha sido gerado abrangendo a faixa de 20 Hz a 20 kHz, a sua reprodução está restrita à função resposta em frequência (FRF) da fonte sonora. Da mesma forma, o espectro registrado pelos microfones encontra-se limitado pela sua própria FRF. Isso resulta em uma influência direta da coloração do sistema de reprodução e gravação no sinal de interesse.

Figura 5 - Diagrama do fluxo de sinais para obtenção da resposta impulsiva da sala de aula



Fonte: KEMERICH et. al., 2022.

Após a conclusão das etapas de medições acústicas, o estudo avança para a fase de pós-processamento dos dados coletados. O objetivo principal desse estágio do trabalho é a extração das respostas impulsivas da sala (RIRs). A partir das RIRs são calculados os principais parâmetros objetivos para caracterizar a reverberação da sala de aula. Esses parâmetros incluem o tempo de reverberação ( $T_{30}$ ) e o tempo de decaimento energético inicial (EDT). Além disso, índices associados à inteligibilidade da fala, como clareza ( $C_{50}$ ), definição ( $D_{50}$ ) e o índice de transmissão da fala (STI), também são derivados da RIR. Vale ressaltar que as análises foram conduzidas para uma faixa de frequências que varia de 125 Hz a 8 kHz. Esta faixa foi selecionada por abranger os principais componentes audíveis que são relevantes para este estudo (região que compreende a frequência da voz humana).

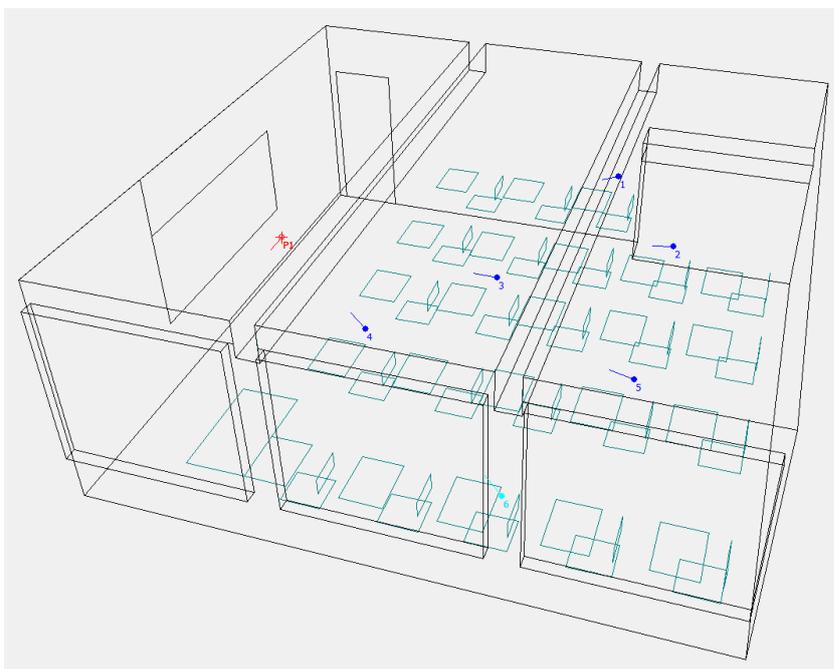
### 3.5 SIMULAÇÕES ACÚSTICAS

O principal objetivo das simulações acústicas é representar virtualmente a sala de aula para analisar seus atributos acústicos, com o intuito de otimizar a concordância acústica entre o ambiente simulado e o ambiente real. Para atingir esse propósito, utilizou-se a versão 11.23 do *software* Odeon, disponibilizado pelo curso de graduação em Engenharia Acústica (EAC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Esse *software* é fundamentado na teoria da acústica geométrica e emprega um algoritmo híbrido que combina técnicas de traçado de raios e fontes virtuais.

Os parâmetros fornecidos como entrada para as simulações no *software* Odeon incluem a geometria da sala, as localizações das fontes sonoras e dos receptores, além dos coeficientes de absorção ( $\alpha$ ) e de espalhamento ( $\delta$ ) associados às superfícies presentes no ambiente.

A modelagem geométrica do ambiente, que serve como base para as simulações no *software* Odeon, é inicialmente desenvolvida utilizando o *software* SketchUp. É relevante notar que a representação geométrica, no contexto deste estudo, não exige detalhamento minucioso de elementos como pernas de mesas e cadeiras, ventiladores ou luminárias. A Figura 6 ilustra a geometria da sala de aula, obtida a partir de medições realizadas no local, e incorpora as coordenadas das fontes e receptores, tal como foram inseridas no ambiente simulado no *software* Odeon.

Figura 6 – Volumetria da sala de aula importada para o *software* Odeon



Fonte: autores.

Os valores dos coeficientes de absorção ( $\alpha$ ), utilizados nas simulações acústicas para cada superfície presente na sala de aula, foram obtidos a partir de algumas referências, incluindo o banco de dados dos *software* Odeon e RAIOS 7 (*Room Acoustics Integrated and Optimized Software*), bem como da literatura, como CARVALHO (2006) e BISTAFA (2011). Quanto aos coeficientes de espalhamento ( $\delta$ ) das superfícies, uma abordagem conservadora foi adotada, estabelecendo um valor uniforme de 0,05 para todos os materiais e faixas de frequência consideradas. Isso se deve à escassez de dados confiáveis e disponíveis relacionados a este parâmetro.

As posições de fonte e receptores foram mantidas em conformidade com as distâncias das medições reais, como indicado na Figura 3. Para a simulação virtual da sala de aula, foi necessária uma adaptação dos coeficientes de absorção das superfícies, utilizando-se como referência bases de dados previamente estabelecidas. O intuito dessa adaptação foi aproximar os coeficientes de absorção dos materiais nas superfícies simuladas aos valores reais presentes na sala de aula. Como procedimento de validação, ao término da simulação, o tempo de reverberação (TR) simulado é comparado com o TR medido, com foco particular no Receptor 3, que é posicionado no ponto central da sala em relação à fonte sonora.

O coeficiente de absorção ( $\alpha$ ) dos materiais é ajustado de forma a manter o TR simulado em conformidade com os limites da diferença do limiar observável (JND), conhecida pelo termo em inglês *Just Noticeable Difference*, em relação ao TR medido. A JND, neste caso, representa a menor variação no valor do TR que um observador humano médio consegue discernir. O valor adotado para JND em relação ao TR é estabelecido em 5% de acordo com BORK (2000) e Brandão (2016). As simulações acústicas são iteradas até que a curva do TR simulado permaneça totalmente dentro dos limites estabelecidos pela JND do TR medido. O uso da JND tem como propósito estabelecer um critério claro para a convergência dos resultados simulados com os valores medidos.

Adicionalmente, é calculado o erro quadrático médio (EQM) entre os valores medidos e os simulados. O EQM é obtido como a raiz quadrada da soma das diferenças ao quadrado entre os valores medidos ( $T_{30 m}$ ) e simulados ( $T_{30 s}$ ) em cada banda de oitava, dividida pelo número 7, que corresponde ao total de frequências em banda de oitava consideradas neste estudo (125 Hz a 8 kHz), conforme expresso na equação:

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{7} \sum_{b=1}^7 (T_{30 m} - T_{30 s})^2}. \quad (1)$$

A utilização da diferença do limiar observável (JND) e a avaliação do erro quadrático médio (EQM) aumentam a confiabilidade das simulações acústicas. Por meio desses parâmetros, além de ajustar o coeficiente de absorção, torna-se possível realizar auralizações futuras com as possíveis soluções de melhorias nas salas.

## 4 RESULTADOS

Nesta seção, encontram-se os resultados decorrentes dos procedimentos metodológicos empregados. A Frequência de Schroeder ( $f_s$ ) é utilizada para a análise de acústica de salas, recomenda-se calculá-la pela expressão

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}}, \quad (2)$$

em que  $T_{60}$  é o tempo de reverberação, nesse caso,  $T_{30}$ , e  $V$  é o volume da sala.

A  $f_s$  refere-se a frequência em que uma sala deixa de exibir um comportamento modal e começa a exibir um comportamento difuso, ou seja é a frequência a partir da qual o som refletido nas superfícies da sala se distribui de forma mais uniforme. O tempo de reverberação médio total para a sala de aula avaliada foi de 1,2 s e seu volume 130,06 m<sup>3</sup>. Portanto, a respectiva  $f_s$  para a sala é 192,1 Hz.

## 4.1 MEDIÇÕES ACÚSTICAS

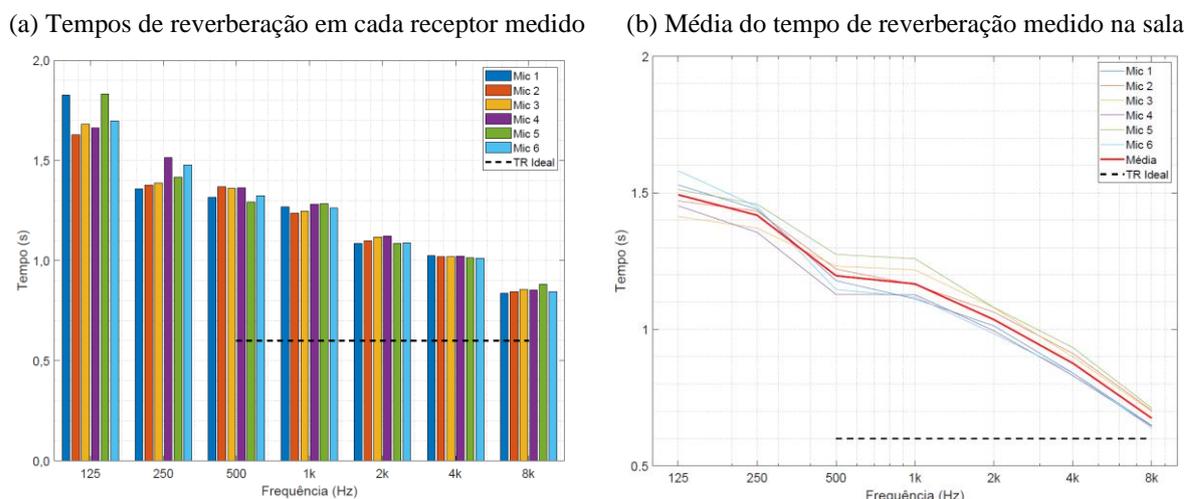
Por meio do pós-processamento utilizando o ITA Toolbox, no *software* Matlab, foram obtidos os seguintes parâmetros objetivos: tempo de reverberação ( $T_{30}$ ), EDT, clareza ( $C_{50}$ ), definição ( $D_{50}$ ) e STI, apresentados nesta subsecção.

### 4.1.1 Tempo de reverberação ( $T_{30}$ )

Pode-se observar na Figura 7(a) um gráfico de histograma representando os valores de tempo de reverberação ( $T_{30}$ ) para todos os pontos medidos, para cada frequência em bandas de 1/1 oitava, e na Figura 7(b) observa-se as curvas dos valores de tempo de reverberação com a média dos pontos medidos.

É estipulado, de acordo com a norma ANSI/ASA S12.60-2010 (ANSI/ASA, 2008), que o tempo de reverberação em salas de aula com volume menor que  $283 \text{ m}^3$  não deve exceder 0,6 segundos nas bandas de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz. Ao analisar a sala em questão constata-se que o TR medido está acima do recomendado pela referida norma. Porém, tem-se na literatura que o TR para salas de aula, no máximo, pode alcançar 0,8 s (LONG, 2014). Com isso, uma vez que os valores atuais não são adequados para ambientes de ensino e aprendizagem, tem-se a necessidade de intervir com um projeto acústico adequado para o recinto em questão.

Figura 7 – Comparação de  $T_{30}$  entre pontos receptores, por frequência, e a média de  $T_{30}$  medidos



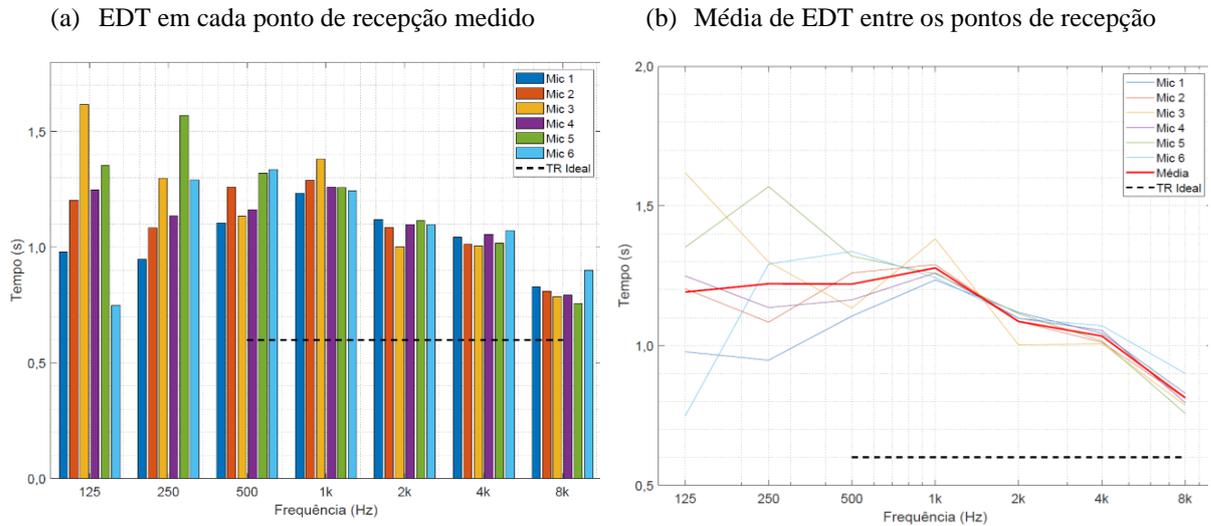
Fonte: autores.

### 4.1.2 Tempo de decaimento inicial (EDT)

O tempo de decaimento inicial (EDT) é importante para medir o tempo de reverberação de forma mais precisa uma vez que considera a distribuição e o nível inicial das primeiras reflexões (decaimento de 0 a  $-10 \text{ dB}$  da resposta impulsiva) e melhor se correlaciona com a experiência subjetiva da reverberação.

Observa-se nas Figuras 8(a) e 8(b) o comportamento do EDT para cada ponto medido e sua média. Nota-se que o EDT é consideravelmente dependente da localização da fonte sonora e do receptor na sala, fazendo com que exista uma variação maior do parâmetro no espaço em relação ao tempo de reverberação. Percebe-se, também, que o EDT na sala mencionada excede os valores adequados.

Figura 8 - Comparação do parâmetro EDT em cada ponto de recepção medido e sua média

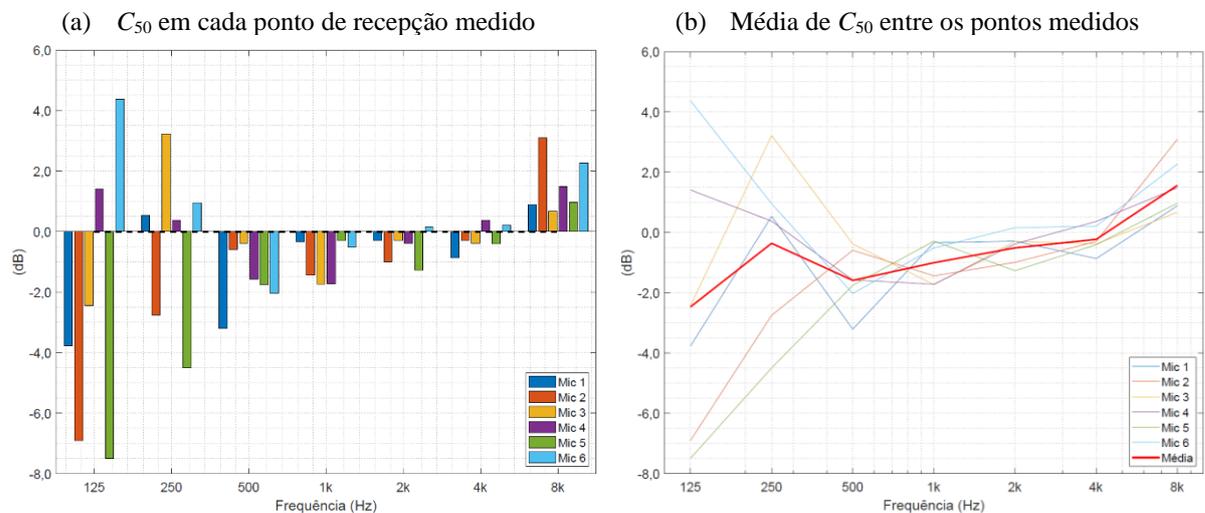


Fonte: autores.

### 4.1.3 Clareza e definição

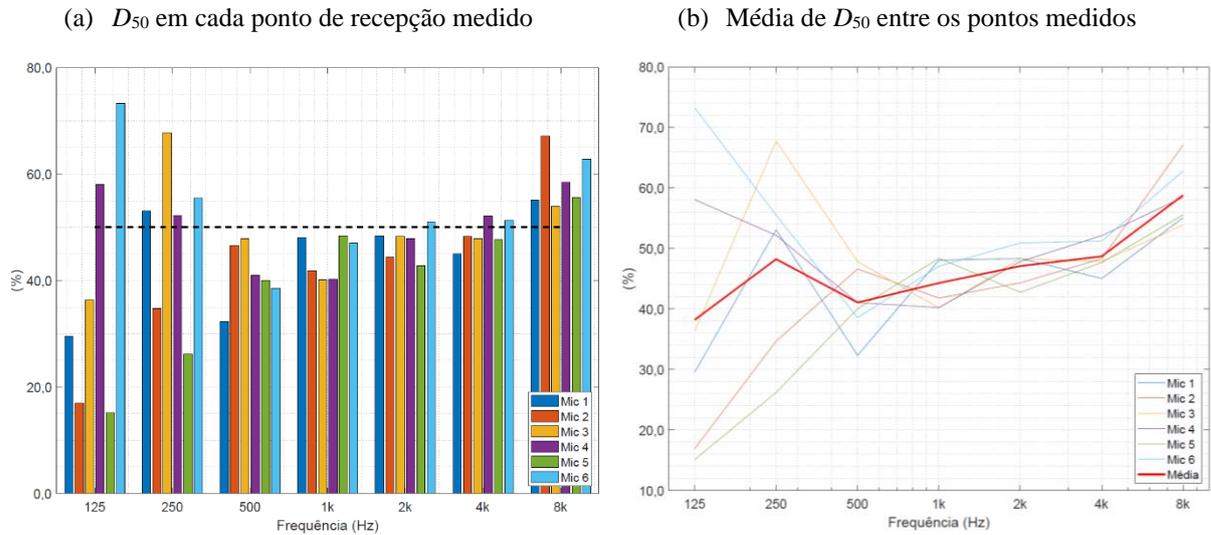
A clareza ( $C_{50}$ ) e a definição ( $D_{50}$ ) são parâmetros essenciais para a avaliação da inteligibilidade de fala. A clareza é um parâmetro que mede a razão entre a energia da resposta impulsiva contida nas primeiras reflexões e o restante da energia, em escala decibel. Por sua vez, a definição, é um parâmetro que mede a energia da resposta impulsiva contida nas primeiras reflexões e a energia total. Em salas de aula, caso deste estudo, é fundamental que esses valores sejam elevados, o que indicaria uma maior concentração da energia nas primeiras reflexões e uma boa inteligibilidade de fala. A partir das medições acústicas realizadas, apresentam-se nas Figuras 9(a) e 9(b) os valores obtidos para  $C_{50}$  e nas Figuras 10(a) e 10(b) os valores obtidos para  $D_{50}$ .

Figura 9 - Comparação da clareza em cada ponto medido e sua média



Fonte: autores.

Figura 10 - Comparação da definição em cada ponto medido e sua média



Fonte: autores.

Conclui-se com os gráficos de histograma das Figuras 9(a) e 10(a) que a maior parte dos valores de clareza e definição indica uma baixa inteligibilidade de fala, visto que esses valores estão abaixo da linha tracejada. A linha tracejada assinala onde existe a mesma quantidade de energia nas primeiras reflexões e na cauda reverberante. Busca-se que os valores de clareza e definição se concentrem mais acima da linha de referência para uma maior inteligibilidade, adequada ao ambiente.

## 4.2 SIMULAÇÕES SEM TRATAMENTO ACÚSTICO

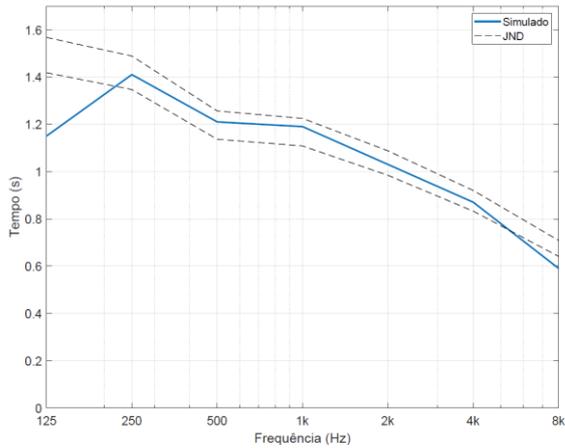
Nesta seção, apresentam-se os gráficos que comparam os parâmetros acústicos objetivos de salas obtidos por meio das medições com os parâmetros obtidos nas simulações, após o processo de calibração do modelo.

### 4.2.1 Tempo de reverberação ( $T_{30}$ )

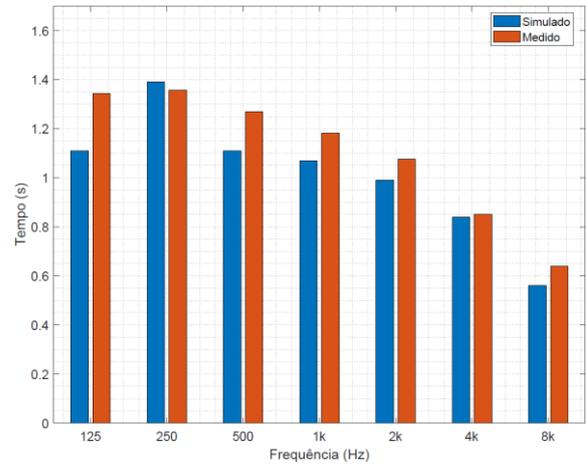
Obteve-se para esta sala o tempo de reverberação ( $T_{30}$ ) médio total de 1,20 s. É possível analisar a média do tempo de reverberação simulado com os limites de JND para a curva do  $T_{30}$  na Figura 11(a). Percebe-se que há proximidade entre os tempos de reverberação medidos e simulados, com o  $T_{30}$  simulado nos limites de JND medido. O EQM do  $T_{30}$  para o ajuste da sala de aula foi de 0,105. Os valores de EDT, clareza ( $C_{50}$ ) e definição ( $D_{50}$ ) encontram-se nas Figuras 11(b), 11(c) e 11(d), comparando os parâmetros medidos e simulados.

Figura 11 - Parâmetros acústicos da sala medidos e simulados para  $T_{30}$ , EDT,  $C_{50}$  e  $D_{50}$

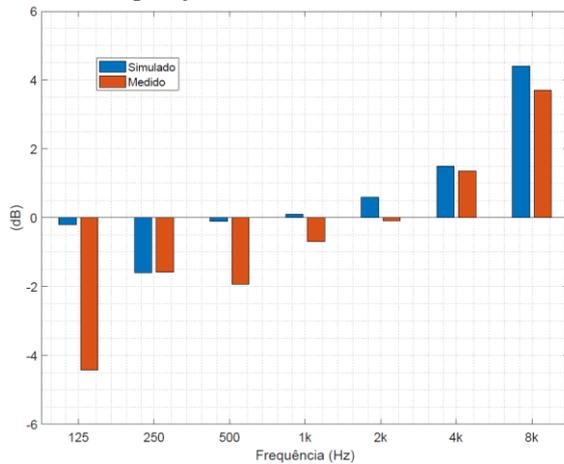
(a) Comparação entre o  $T_{30}$  medido e simulado, com os limites inferior e superior do JND



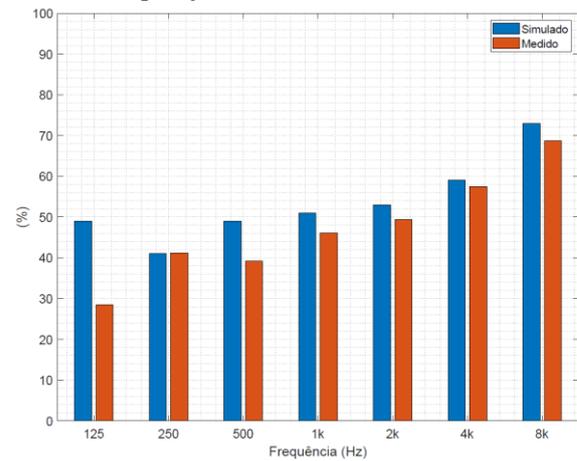
(b) Comparação entre o EDT medido e simulado



(c) Comparação entre o  $C_{50}$  medido e simulado



(d) Comparação entre o  $D_{50}$  medido e simulado



Fonte: autores.

Obteve-se para o STI um valor de 0,60 e conforme a norma NBR IEC 60268-16 (ABNT, 2018), com os valores e a classificação apresentados na Tabela 1, pode-se concluir que a sala de aula é categorizada como “boa”. O STI foi calculado pelo método indireto por meio da resposta impulsiva da sala e a integral de Schroeder, utilizada para derivar a função de transferência de modulação em cada ponto medido.

Tabela 1 - Valores de STI correspondentes à qualidade da inteligibilidade da fala

Categoria de faixas do STI	Ouvintes normais (STI Padrão)
Ruim	< 0,30
Regular	0,30 – 0,45
Aceitável	0,45 – 0,60
Bom	0,60 – 0,75
Excelente	≥ 0,75

Fonte: ABNT, 2018.

Entretanto, níveis de STI melhores são recomendados para ambientes de ensino, garantindo uma melhor compreensão da fala do professor. Para isso, o STI precisa atingir valor superior a 0,75, classificando, assim, a qualidade da sala como “excelente”.

#### 4.3 PROPOSTA DE MELHORIA DAS SALAS DE AULA

Com as medições e as simulações da sala processadas e analisadas adotaram-se estratégias de projeto (pensado no baixo custo) para aplicar um condicionamento acústico adequado ao ambiente de estudo. A aplicação de materiais absorvedores no teto, criando um forro, é uma boa alternativa para reduzir o volume da sala e promover absorção de parte da energia sonora indesejada. Com a adição de forro, distando 0,20 m do teto, subtrai-se da sala um volume de 4,1 m<sup>3</sup>. Logo, o volume da sala passou de 130,06 m<sup>3</sup>, originalmente, para 125,95 m<sup>3</sup>.

No modelo 3D adicionou-se uma nova superfície para associá-la, no *software* de simulação Odeon, às características do material escolhido. Após uma pesquisa detalhada pelos diversos tipos de forros acústicos, disponíveis no mercado, com uma relação custo-benefício que se encaixe com a realidade das escolas públicas, escolheu-se o material cujos coeficientes de absorção, por banda de 1/1 oitava, estão apresentados na Tabela 2.

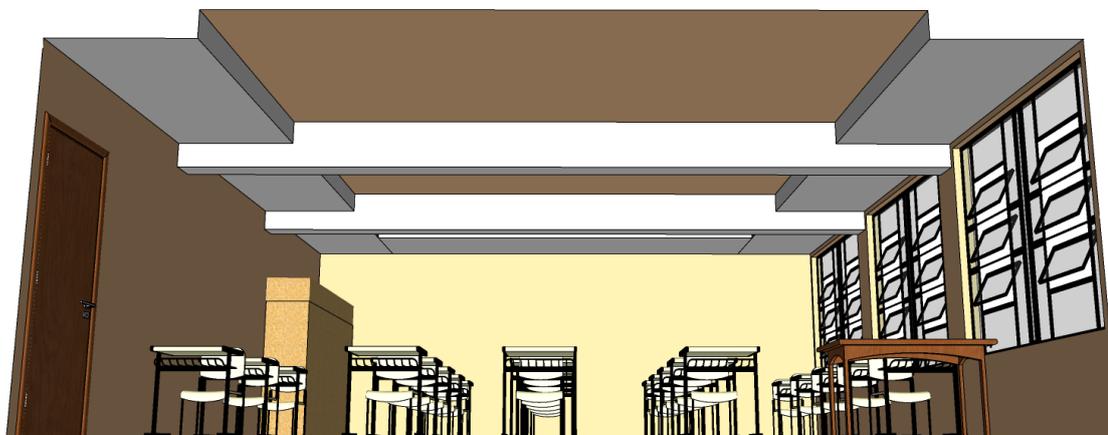
Tabela 2 - Coeficientes de absorção do material escolhido

Materiais	Frequências (Hz)						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Forro 200 mm - Classe C	0,45	0,90	1,00	0,85	0,90	0,95	0,95

Fonte: autores.

Para tornar o projeto economicamente viável, tornou-se crucial estabelecer uma estratégia para definir a distribuição do material selecionado sobre a superfície do teto da sala. Sendo assim, optou-se por distribuir o forro em um arranjo em formato de U, com uma largura de 1 metro, e com sua base orientada para o fundo da sala, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Vista da sala com o destaque para o forro (em cinza) aplicado no modelo 3D



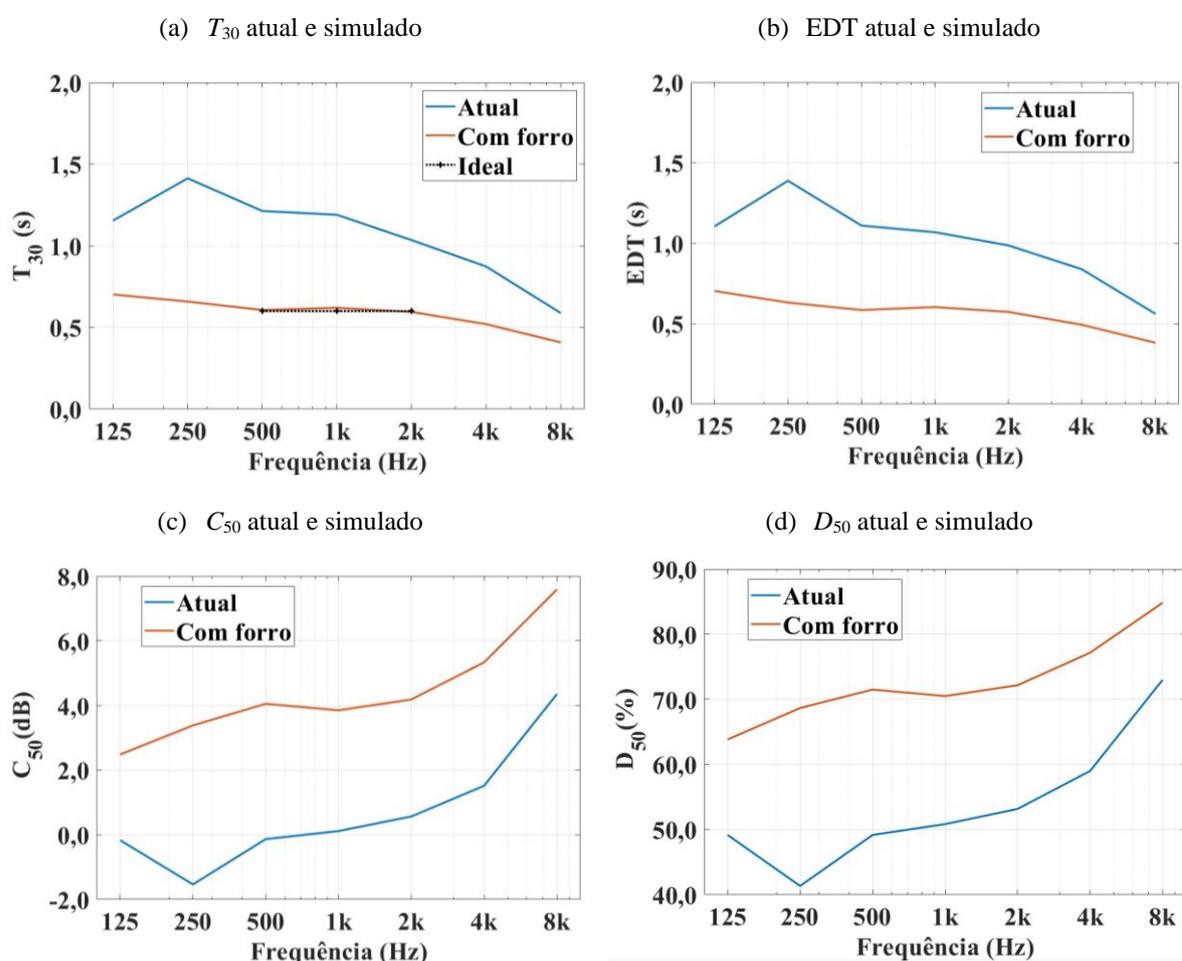
Fonte: autores.

#### 4.4 SIMULAÇÕES COM TRATAMENTO ACÚSTICO

Esta subseção apresenta os resultados dos parâmetros objetivos obtidos por meio de simulações acústicas com a aplicação de forro absorvente no teto. Com o modelo calibrado (obtido a partir do ajuste da simulação com os valores medidos), aplicou-se o forro escolhido no projeto e obteve-se os resultados para  $T_{30}$ , EDT,  $C_{50}$  e  $D_{50}$ .

Como esperado, com a aplicação do material, foi possível alcançar o tempo de reverberação ideal para uma sala de aula, nas bandas de frequência indicadas pela norma ANSI/ASA S12.60-2010 (ANSI/ASA, 2008). Na Figura 12(a) é possível perceber a comparação do  $T_{30}$  atual com o  $T_{30}$  simulado com a aplicação do forro. Também é possível verificar a comparação para EDT,  $C_{50}$  e  $D_{50}$ , nas Figuras 12(b), 12(c) e 12(d).

Figura 12 – Comparação entre os parâmetros  $T_{30}$ , EDT,  $C_{50}$  e  $D_{50}$  da sala atual e com forro



Fonte: autores.

Observa-se, nas Figuras 12(c) e 12(d), que havia concentração da energia contida nas primeiras reflexões antes da aplicação do forro. Já com o forro é possível notar que os resultados de  $C_{50}$  e  $D_{50}$  atingiram, respectivamente, valores maiores que 0 dB e que 50%. Sendo assim é possível obter, com a solução aplicada, uma melhora na inteligibilidade de fala.

Nota-se uma melhora significativa, com a aplicação do forro absorvente, no valor do STI, de 0,60 para 0,71. Conforme a norma NBR IEC 60268-16 (ABNT, 2018) a classificação da sala continua como “boa”, porém com parâmetros objetivos mais equilibrados dentro da sala.

## 5 CONCLUSÕES

Pretende-se, com a metodologia desenvolvida neste projeto, mudar significativamente o cenário das condições acústicas das escolas públicas do município de Santa Maria, contribuindo para a melhoria do processo de ensino-aprendizagem.

Visto que os parâmetros objetivos obtidos por meio da medição da sala, como  $T_{30}$ , EDT,  $C_{50}$ ,  $D_{50}$  e STI, apontam para uma condição não favorável à prática de ensino, estabeleceu-se, por meio de criação de maquetes virtuais e simulações, uma estratégia de menor custo para atingir os índices necessários. Assim, o Forro 200 mm – Classe C foi aplicado em formato de U no teto da sala, via maquete virtual, e obteve-se, nas simulações, resultados satisfatórios, com valores de tempo de reverberação, clareza, definição e STI mais adequados para o objetivo principal de uma sala de aula.

A metodologia desenvolvida neste projeto permite que as demais salas de aula do Colégio Estadual Professora Edna May Cardoso, com características semelhantes à sala simulada, possam receber o mesmo tratamento acústico.

Assim, para dar continuidade ao projeto, pretende-se utilizar a metodologia aplicada em outras escolas da região a fim de conscientizar seus gestores sobre a influência negativa do ruído e as más condições acústicas no processo de ensino-aprendizagem dos alunos e na saúde dos docentes. Por fim, é de grande interesse aproximar a UFSM e a Engenharia Acústica da sociedade, neste caso, da comunidade escolar do município de Santa Maria, e contribuir na sustentabilidade e melhoria ensino.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos gestores do Colégio Estadual Professora Edna May, que nos receberam com interesse nos objetivos da pesquisa, e à UFSM pelo apoio ao projeto de extensão desenvolvido, com recursos financeiros aplicados em bolsas através dos editais FIEEX CT 2022 e 2023.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARD ACOUSTICAL. **ANSI/ASA s12. 60-2010.**

Performance criteria, design requirements, and guidelines for schools, Part 1: Permanent schools. New York, dez. 2008.

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

\_\_\_\_\_. **NBR IEC 60268-16.** Equipamentos de sistemas de som. Parte 16: Avaliação objetiva da inteligibilidade da fala pelo índice de transmissão da fala. ABNT, Rio de Janeiro, dez. 2018.

BISTAFA, S. **Acústica aplicada ao controle de ruído.** São Paulo: Blucher, 2011.

BRANDÃO, E. **Acústica de Salas: Projeto e Modelagem.** São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 978-8521210061.

BORK, I. **A comparison of room simulation software - the 2nd round robin on room acoustical computer simulation.** Acta Acustica united with Acustica, 86:943–956, 11 2000.

CARVALHO, R. P. **Acústica arquitetônica.** Brasília: Thesaurus, 2006. 167 p.

- GHOSH, A.; KUMARI, K.; KUMAR, S.; SAHA, M.; NANDI, S.; SAHA, S. Noiseprobe: Assessing the dynamics of urban noise pollution through participatory sensing. **11th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS)**, 2019. <https://doi.org/10.1109/COMSNETS.2019.8711473>.
- GUPTA, A.; GUPTA, A.; JAIN, K.; GUPTA, S. Noise pollution and impact on children health. **The Indian Journal of Pediatrics**, 85(4), 300-306, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12098-017-2579-7>
- KEMERICH, B. P.; MELO, V. S. G.; BALBÉ, M. D.; MELO, D. S.; VATTATHARA, S. D.; MAHL, A. L. **Avaliação das condições acústicas em salas de aula de escolas públicas em Santa Maria/RS**. 12º Congresso Iberoamericano de acústica, Florianópolis, 2022.
- KESHTKARAN, P. & NAJAFI, N. Providing Acoustic Comfort in the Classroom Using Double-Glazed Windows and its Effect on Students Stress. **International Journal of School Health**, 7(3), 39-44, 2020. <https://doi.org/10.30476/intjsh.2020.86643.1088>
- KLATTE, M.; HELLBRÜCK, J.; SEIDEL, J.; LEISTNER, P. Effects of classroom acoustics on performance and well-being in elementary school children: A field study. **Environment and Behavior**, 42(5), 659-692, 2010. <https://doi.org/10.1177/0013916509336813>
- LONG, M. **Architectural Acoustics**. 2a ed. Massachusetts: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-455551-8.
- MELO, V. S. G.; PINHEIRO, Y. M.; PAES, J. V. G. **Avaliação de inteligibilidade em sala de aula do ensino fundamental para identificação das condições acústicas de escolas públicas em Santa Maria - RS**. Em XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, João Pessoa, 2019.
- PELLEGATTI, M.; TORRESIN, S.; VISENTIN, C.; BABICH, F.; PRODI, N. Indoor soundscape, speech perception, and cognition in classrooms: A systematic review on the effects of ventilation-related sounds on students. **Building and Environment**, 110194, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110194>
- RICCIARDI, P. & BURATTI, C. Environmental quality of university classrooms: Subjective and objective evaluation of the thermal, acoustic, and lighting comfort conditions. **Building and Environment**, 127, 23-36, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.030>
- THOMPSON, R.; SMITH, R. B.; KARIM, Y. B.; SHEN, C.; DRUMMOND, K.; TENG, C.; TOLEDANO, M. B. Noise pollution and human cognition: An updated systematic review and meta-analysis of recent evidence. **Environment international**, 158, 106905, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106905>
- VALENTE, D. L.; PLEVINSKY, H. M.; FRANCO, J. M.; HEINRICHS-GRAHAM, E. C.; LEWIS, D. E. Experimental investigation of the effects of the acoustical conditions in a simulated classroom on speech recognition and learning in children. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 131(1), 232-246, 2012. <https://doi.org/10.1121/1.3662059>