

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

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS DE AULA - ESTUDO DE CASO: DO DIAGNÓSTICO À
ADEQUAÇÃO DO PROJETO**

**ACOUSTIC CHARACTERIZATION OF CLASSROOMS - CASE STUDY: FROM DIAGNOSIS TO
APPROPRIATE DESIGN**

Luiza Paim Da Palma, Viviane Suzey Gomes De Melo, Bianca Pereira Kemerich, Dominique Dos Santos

Melo e Shaliny Denardi Vattathara

RESUMO

A temática abrange a qualidade acústica de ambientes de ensino como ferramenta necessária ao aprendizado, contribuindo com tarefas cognitivas dos alunos. A adoção de práticas projetuais e construtivas que garantam a qualidade acústica para espaços voltados ao processo de ensino-aprendizagem é de suma importância, pois irá refletir no desempenho de alunos e professores. Nesse sentido, torna-se necessária a realização de medições e simulações acústicas para o ajuste adequado dos ambientes de ensino, que possam proporcionar conforto acústico aos usuários.

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

ABSTRACT

A pesquisa tem como aspecto relevante a importância de um projeto de extensão no aprimoramento da eficácia do ensino fundamental, dado que salas de aula acusticamente inadequadas são um dos fatores responsáveis pela eventual ineficiência no processo de ensino-aprendizagem. O principal objetivo do trabalho é apresentar um estudo para apoiar a melhoria das condições acústicas em salas de aula e demais espaços de ensino de uma escola pública sediadas no município de Santa Maria, a partir de medições e simulações acústicas.

Keywords: Classrooms, acoustic measurements, simulations

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS DE AULA – ESTUDO DE CASO: DO DIAGNÓSTICO À ADEQUAÇÃO DO PROJETO

1 INTRODUÇÃO

A adoção de práticas projetuais e construtivas que garantam a qualidade acústica para espaços voltados ao processo de ensino-aprendizagem é de suma importância, pois irá refletir no desempenho de alunos e professores. A exposição da comunidade escolar a ruídos gera efeitos negativos para execução de tarefas cognitivas, como na leitura, na resolução de problemas e na memorização (WHO, 1999).

Ambientes educacionais onde a fala do professor é facilmente compreendida proporcionam um melhor desempenho na aprendizagem dos discentes. Pesquisadores como Eniza e Garavellia (2003) consideram que a acústica da sala de aula pode ser responsável pelo analfabetismo funcional entre jovens, caracterizado pela inabilidade em ler e interpretar um texto adequadamente.

Vários estudos, realizados nos ambientes de ensino no Brasil, apontam que, geralmente, as condições acústicas de ambientes educacionais são negligenciadas na concepção do projeto arquitetônico (PINHEIRO; MASSON; LOPES, 2017). É visto ainda que, as salas de aula, especialmente as de escolas públicas, não proporcionam condições acústicas ideais para a compreensão do ensino, ocasionando dificuldade de aprendizagem (MELO; 2012, ROCHA; SILVA, 2012; RABELO et. al., 2014; MELO; PINHEIRO; PAES, 2019).

Boa parte do ruído residual, presente em salas de aula, provém, além de conversas paralelas entre os alunos, de ruídos provenientes de ventiladores ou aparelhos de ar-condicionado em conjunto com a acústica inadequada dos ambientes, bem como de ruídos externos, oriundos do pátio e/ou corredores de acesso. Diante de todas essas possíveis fontes sonoras, o professor tende a falar mais alto que o normal, a fim de manter a relação sinal-ruído adequada para o entendimento da fala (RABELO et.al., 2014).

Para analisar acusticamente um ambiente é necessário inicialmente conhecer qual a destinação de uso do espaço. Salas de aula têm como principal fonte sonora a voz, sendo assim é essencial para a saúde de seus ocupantes que parâmetros relacionados à inteligibilidade sejam controlados, como o tempo de reverberação (TR), o tempo de decaimento inicial (*Early Decay Time* – EDT), a clareza (C_{50}), a definição (D_{50}) e o STI. Para a obtenção dos parâmetros supracitados, efetuam-se medições acústicas para obtenção da resposta impulsiva monoauricular em determinados pontos da sala (RIR – *room impulse response*). Também é possível recriar virtualmente a acústica de uma sala existente, utilizando simulações computacionais e calibrando o modelo com a otimização dos coeficientes de absorção e espalhamento das superfícies internas. Por meio dessa técnica, podem ser propostas melhorias para a qualidade acústica ou adaptação de ambientes e, quando necessário, avaliar a inteligibilidade da fala subjetivamente.

Com o intuito de analisar os resultados e identificar se a sala de aula está dentro dos padrões ideais de condição acústica para a aprendizagem, utilizam-se os valores ótimos estabelecidos na literatura (BRANDÃO, 2017). Ademais, pode-se empregar a norma NBR IEC 60268-16 (ABNT, 2018), que indica os valores de STI correspondentes à qualidade da inteligibilidade da fala na sala.

2 OBJETO

A pesquisa tem como aspecto relevante a importância de um projeto de extensão no aprimoramento da eficácia do ensino fundamental, dado que salas de aula acusticamente

inadequadas são um dos fatores responsáveis pela eventual ineficiência no processo de aprendizagem.

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 sediadas no município de Santa Maria, a partir de medições e simulações acústicas.

Dentre os objetivos específicos do projeto podemos citar: verificar a inteligibilidade da fala em salas de aula a partir de medições dos parâmetros acústicos de salas; e ter um cardápio de possíveis soluções projetuais para melhoria da qualidade acústica e, conseqüentemente, da inteligibilidade da fala em ambientes de ensino, por meio de simulações acústicas.

3 METODOLOGIA

Nesta seção será apresentada a metodologia para realização das medições da resposta impulsiva (RIR), geração de desenhos tridimensionais (maquetes virtuais) e simulações acústicas para as salas de aula da Escola Municipal de Ensino Fundamental (EMEF) Vicente Farencena. Para o pós-processamento e análise dos dados, um código no *software* MATLAB foi utilizado.

3.1 A ESCOLA

A escola selecionada como objeto de estudo foi a EMEF Vicente Farencena, que pode ser vista em trecho de mapa na Figura 1(a) e sua entrada principal na Figura 1(b), localizada no bairro Camobi, município de Santa Maria, RS. A escola é formada por nove salas de aula, biblioteca, sala multimídia para alunos com necessidades educacionais especiais, sala de informática, sala de professores e sala de orientação educacional (SOE).

Para realização das medições acústicas foi escolhida uma das salas de aula para o desenvolvimento das medições e das análises dos principais parâmetros acústicos. A sala de aula, que pode ser vista na Figura 2, é atualmente utilizada por estudantes dos 6º e 8º anos do ensino fundamental e está localizada ao lado de uma quadra de educação física. A parede lateral na qual estão localizadas as janelas basculantes é exatamente a que está ao lado da quadra. Cumpre registrar que em alguns dias da semana os horários de uma turma de educação física são os mesmos que os da turma localizada nessa sala de aula, ocasionando bastante ruído residual no ambiente, prejudicando a saúde do professor e o aprendizado dos alunos.

Figura 1 – Detalhe em mapa e entrada principal da EMEF Vicente Farencena



Fonte: adaptada pelos autores (TONETTO, 2023).

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

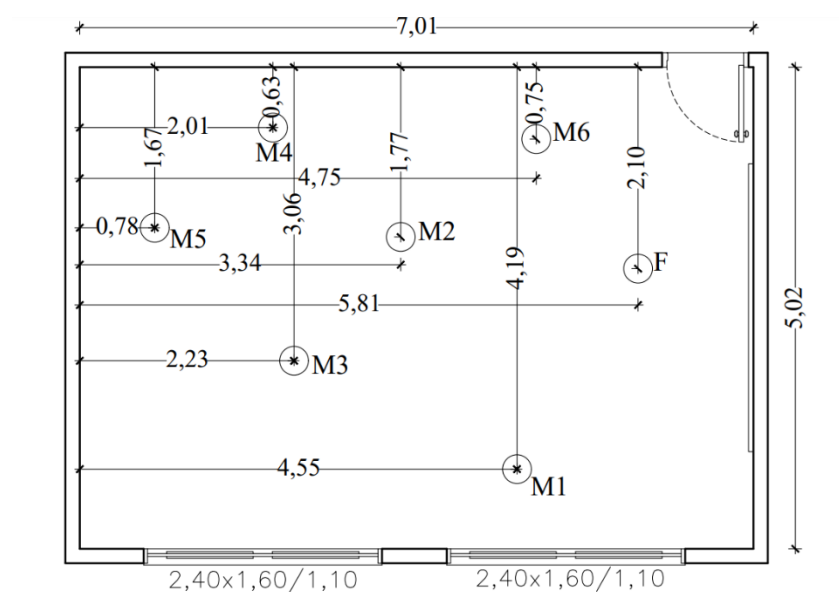


Fonte: autores.

3.2 MEDIÇÕES ACÚSTICAS

As medições da resposta impulsiva (RIR) da sala de aula, para o cálculo dos parâmetros acústicos objetivos de salas, ocorreram segundo a norma NBR ISO 3382-2 (ABNT, 2017), pelo método de engenharia. Foram definidas uma posição para localização da fonte (emissor) e seis posições para os microfones (receptores), totalizando seis pares fonte-receptor. A planta baixa contendo as dimensões da sala e os pontos de medição é apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Planta baixa com os pontos de medição da sala de aula selecionada



Fonte: autores.

Na sala de aula a posição da fonte, na frente da lousa, foi definida considerando que o local é usualmente ocupado pelo(a) professor(a). Já as posições de cada receptor foram definidas em pontos distribuídos no ambiente, em locais que normalmente seriam ocupados por estudantes, de modo que tivesse uma boa distância entre os microfones. Os microfones foram posicionados na altura de 1,20 m, simulando a altura de uma pessoa sentada. 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. A Figura 4 apresenta a posição da fonte e dos microfones na sala.

Figura 4 – Posicionamento da fonte sonora e de alguns pontos de medição na sala de aula



Fonte: autores.

É importante destacar que antes de começar a medição com o sinal de varredura exponencial de senos, realizou-se o ajuste de cada microfone para diminuir as incertezas na medição e obter os resultados com uma boa precisão. Uma medição do ruído residual foi realizada para obter uma relação sinal ruído adequada, maior que 15 dB, na análise do comportamento acústico da sala de aula. As medições foram realizadas sem a presença de estudantes no interior da sala de aula.

3.3 INSTRUMENTAÇÃO

Para a realizar a medição e obter a resposta impulsiva monoauricular da sala foi utilizada a seguinte instrumentação:

1. Termo-higrômetro para verificar as condições de umidade e temperatura do ar antes das medições;
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; e
11. Trena e fita crepe.

3.4 DIAGRAMAS E CONEXÕES

O diagrama com as conexões feitas para as medições é ilustrado na Figura 5. A cadeia de medição consistiu na utilização dos microfones conectados, por meio dos cabos BNC, no módulo de entrada da NI, que faz a conversão analógico para digital do sinal emitido pela fonte sonora dodecaédrica omnidirecional. Sendo a fonte conectada por um cabo speakon no módulo de saída da NI, através 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. Esse sinal foi gerado no computador, utilizando o pacote ITA Toolbox no *software* Matlab, enviado para o módulo de saída da NI, responsável pela conversão digital analógico (DAC), que transmitiu para o amplificador de potência 2716, seguindo para a fonte dodecaédrica, a qual reproduziu o sinal dentro da sala de aula.

Os microfones posicionados dentro da sala captam o sinal ali reproduzido e o enviam para o módulo de entrada da NI, que realiza a conversão analógico para digital (ADC), para gravação do sinal na forma de um vetor numérico dentro do Matlab. Utilizou-se também o toolbox de aquisição de dados do Matlab (Data Acquisition-DAQ) em todo processo de reprodução e gravação.

É importante observar que mesmo o sinal sendo inicialmente gerado, de 20 Hz a 20 kHz, a reprodução do sinal fica limitada a função resposta em frequência (FRF) da fonte sonora, assim como o espectro gravado pelos microfones fica limitado pela FRF destes, impondo assim uma coloração do sistema de reprodução-gravação no sinal de interesse.

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



Fonte: autores.

Com os procedimentos de medições acústicas concluídos, faz-se o pós-processamento dos dados para obtenção da resposta impulsiva (RIR) da sala. A partir desta são extraídos os parâmetros objetivos relacionados à reverberação da sala de aula (T_{30} e EDT) e à inteligibilidade da fala (C_{50} , D_{50} e STI), nas frequências de 125 Hz a 8 kHz, onde se encontram as componentes audíveis principais para este estudo.

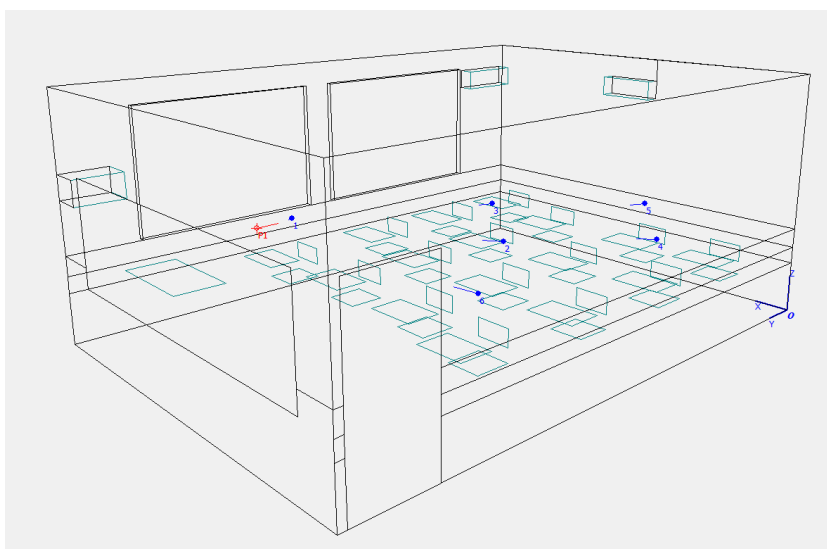
3.5 SIMULAÇÕES ACÚSTICAS

O objetivo das simulações acústicas está em recriar a sala de aula virtualmente para análise dos parâmetros acústicos, com o intuito de atingir a melhor adequação acústica do ambiente virtual com o real. As simulações acústicas foram realizadas no *software* Odeon v. 11.23, disponibilizado pelo curso de graduação em Engenharia Acústica da UFSM. Tal programa é baseado na teoria de acústica geométrica e utiliza um método de cálculo híbrido, ou seja, é composto pelos métodos do traçado de raios e fontes virtuais.

Os dados de entrada para efetuar a simulação computacional no *software* Odeon são: volumetria; posições de fonte e receptores; e coeficientes de absorção (α) e espalhamento (δ).

A volumetria importada para as simulações no *software* Odeon é criada inicialmente no *software* SketchUp. Salienta-se que a volumetria inserida em programas de simulação acústica não necessita conter espessuras e detalhamentos, tais como pés de mesas e cadeiras, ventiladores, luminárias, dentre outros. Na Figura 6 e verifica-se a volumetria da sala de aula medida na escola já com os receptores e fonte sonora inseridos no *software* Odeon.

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



Fonte: autores.

Os valores dos coeficientes de absorção (α) adotados nas simulações, para cada superfície da sala de aula, foram inicialmente importados do banco de dados dos *software* Odeon e RAIOS 7 (*Room Acoustics Integrated and Optimized Software*) e da literatura (CARVALHO, 2006). Adotou-se para os coeficientes de espalhamento (δ) o valor de 0,05 para todos os materiais e frequências, pois não há informações consistentes e disponíveis acerca desse dado. Quanto às posições de fonte e receptores, foram adotadas as mesmas distâncias das medições, conforme indicado na Figura 3. Para recriar a sala de aula virtualmente foi preciso fazer o ajuste dos coeficientes de absorção dos materiais das superfícies, obtidos a partir de banco de dados disponíveis. Visando aproximar os coeficientes de absorção dos materiais das

superfícies na sala simulada, ao final da simulação, o TR simulado é comparado ao medido, especificamente do Receptor 3, que é o ponto central em relação à fonte sonora.

O coeficiente de absorção (α) dos materiais é ajustado para que o TR simulado fique dentro dos limites da diferença do limiar observável (JND), do inglês *just noticeable difference*, do TR medido. Esse parâmetro representa a menor variação no valor do TR que um ser humano médio consegue perceber. O valor do JND para o TR é de 5% (BORK, 2000). Efetuam-se as simulações acústicas até a curva do TR simulado encontrar-se totalmente dentro dos limites do JND do TR medido. Emprega-se o JND de forma a estabelecer um limite para a aproximação dos resultados simulados com o medido.

O erro quadrático médio (EQM) entre os valores medido e simulado também é obtido. Calcula-se a raiz quadrada do somatório das diferenças ao quadrado, entre os valores medido ($T_{30\ m}$) e simulado ($T_{30\ s}$), em cada banda de oitava dividido pelo número 7, que é o total de frequências em banda de oitava que estão sendo consideradas neste estudo (125 Hz a 8 kHz), conforme a expressão

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

A confiabilidade nas simulações acústicas aumenta com a utilização do JND e a verificação do EQM. Empregando-os, além de ajustar o coeficiente de absorção, é possível realizar aurilizações com as possíveis soluções de melhorias nas salas.

Dentre os parâmetros objetivos calculados e processados pelo *software* Odeon, foi possível extrair a resposta impulsiva biauricular (BRIR) da sala em análise para cada par fonte-receptor. Uma BRIR processada pelo Odeon consiste na convolução da resposta impulsiva monoauricular do *software* com informações de uma HRTF (função de transferência relativa à cabeça e torso) generalizada.

As BRIRs, para cada par fonte-receptor, são extraídas do Odeon como arquivos de áudio no formato .wav, em seguida são importadas no *software* de programação Matlab. Uma aurilização simples consiste na convolução entre a BRIR e um sinal anecoico, logo é possível utilizar a função nativa conv para a determinação desse processo na sala de aula em análise (RINDEL; CHRISTENSEN; KOUTSOURIS, 2013, VORLÄNDER, 2008).

4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos de acordo com os procedimentos metodológicos adotados. Para a análise de acústica de salas, recomenda-se calcular a Frequência de Schroeder (f_s) da sala 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 delimita a frequência em que a densidade modal da sala não é tão crítica. O tempo de reverberação médio total para a sala de aula avaliada foi de 1,24 s e seu volume 104,16 m³. Portanto, a respectiva f_s para a sala é 218 Hz.

Considerando que a f_s da sala de aula avaliada está dentro da faixa de frequências audíveis do ser humano é necessário atentar-se que os modos influenciam na perda da inteligibilidade da fala ao longo da sala.

4.1 MEDIÇÕES ACÚSTICAS

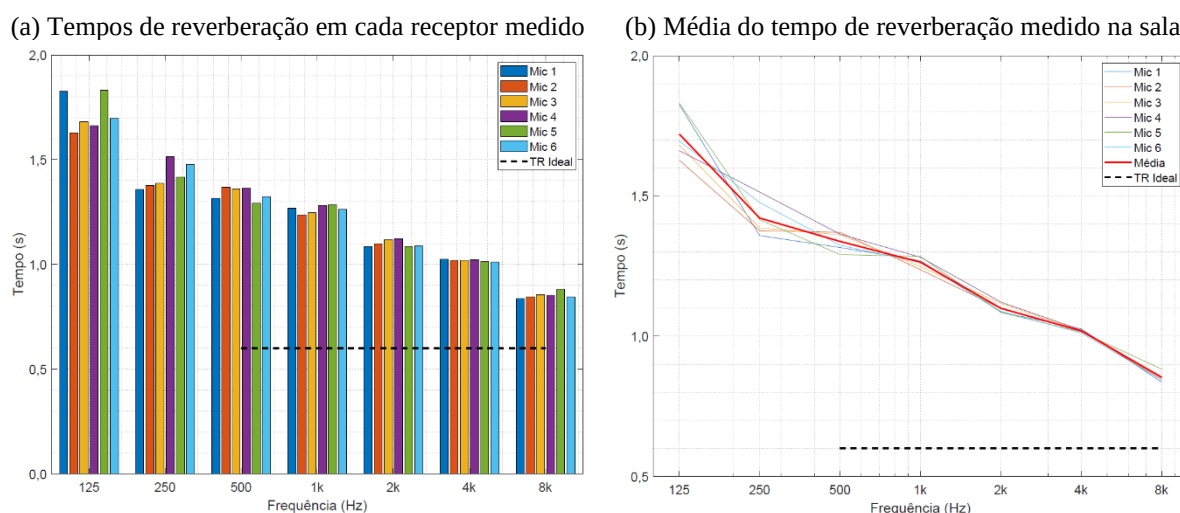
Por meio do pós-processamento utilizando o ITA Toolbox, no *software* Matlab, foram obtidos os seguintes parâmetros objetivos: tempo de reverberação, EDT, clareza (C_{50}), definição (D_{50}) e STI que serão expostos nesta subseção.

4.1.1 Tempo de reverberação

A Figura 7(a) mostra um gráfico de histograma com os valores de tempo de reverberação (T_{30}) para todos os pontos medidos, para cada frequência em bandas de 1/1 oitava, e a Figura 7(b) mostra as curvas dos valores de tempo de reverberação com a média entre os pontos medidos.

De acordo com a norma ANSI/ASA S12.60-2010 (ANSI/ASA, 2008) o tempo de reverberação para salas de aula com volume menor que 283 m^3 não deve ser superior a 0,6 segundos nas bandas de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz. Sendo assim, se faz necessário o controle do TR na sala em análise, uma vez que apresenta um TR medido bem superior a 6 s nessas bandas. Porém, na literatura, encontra-se que o TR pode alcançar, no máximo, 0,8 s (LONG, 2014). Portanto, o TR da sala de aula é inadequado para espaços destinados à fala, principal recurso do professor para o ensino.

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

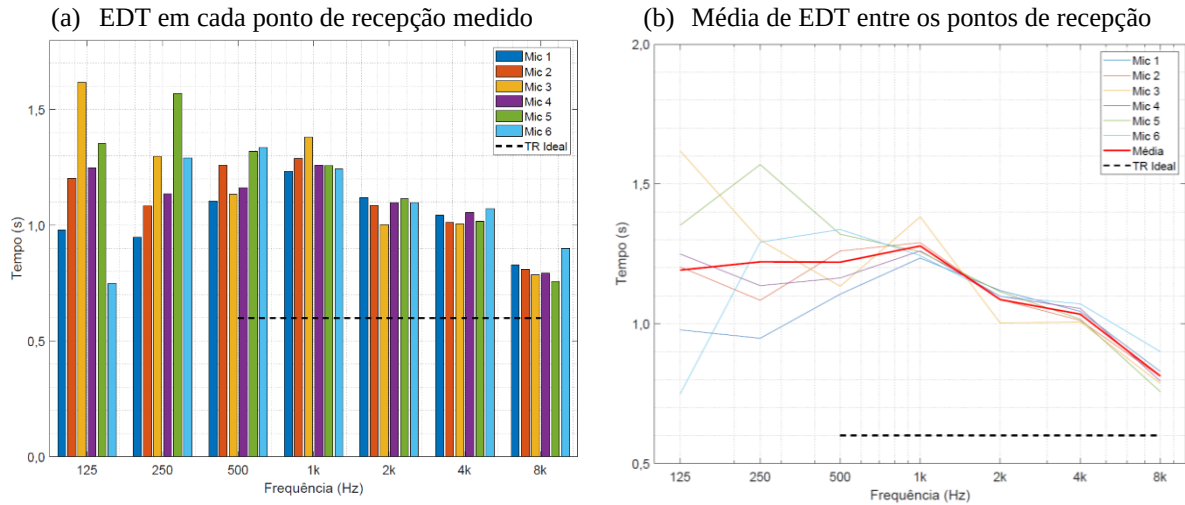


Fonte: autores.

4.1.2 Tempo de decaimento inicial

O tempo de decaimento inicial (EDT) é o parâmetro que mede um tempo de reverberação que melhor se correlaciona com a experiência subjetiva da reverberação, pois leva em consideração os níveis e distribuição temporal das primeiras reflexões (um decaimento de 0 a -10 dB da resposta impulsiva). É um parâmetro consideravelmente dependente da configuração fonte-receptor na sala fazendo com que ele varie mais ao longo da sala comparado ao TR. As Figuras 8(a) e 8(b) mostram o comportamento desse parâmetro para cada ponto medido e sua média. Conforme o esperado há uma variação maior nos valores entre os pontos com relação ao TR, e também possui valores acima do adequado.

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

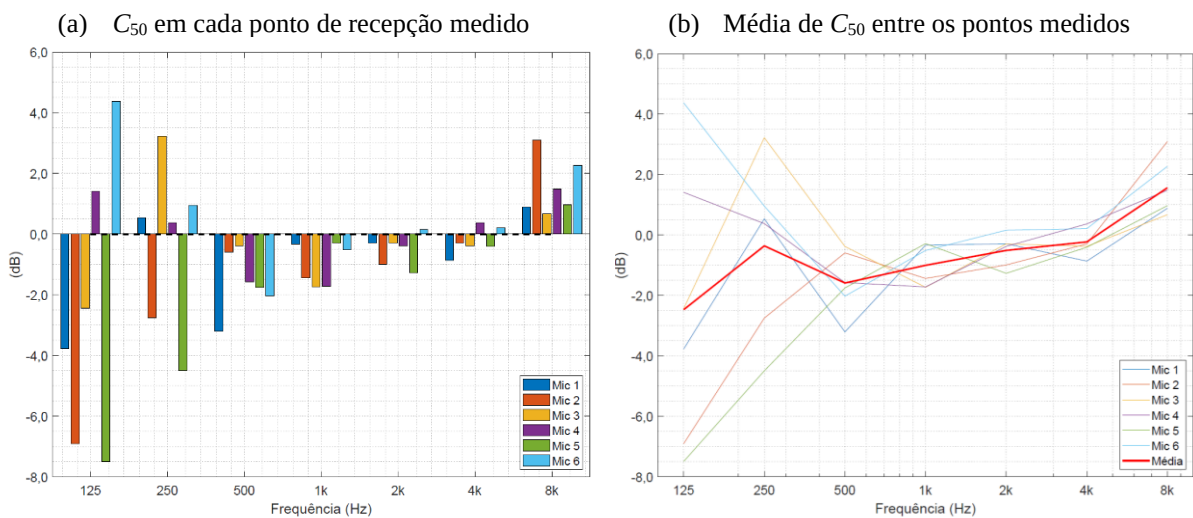


Fonte: autores.

4.1.3 Clareza e definição

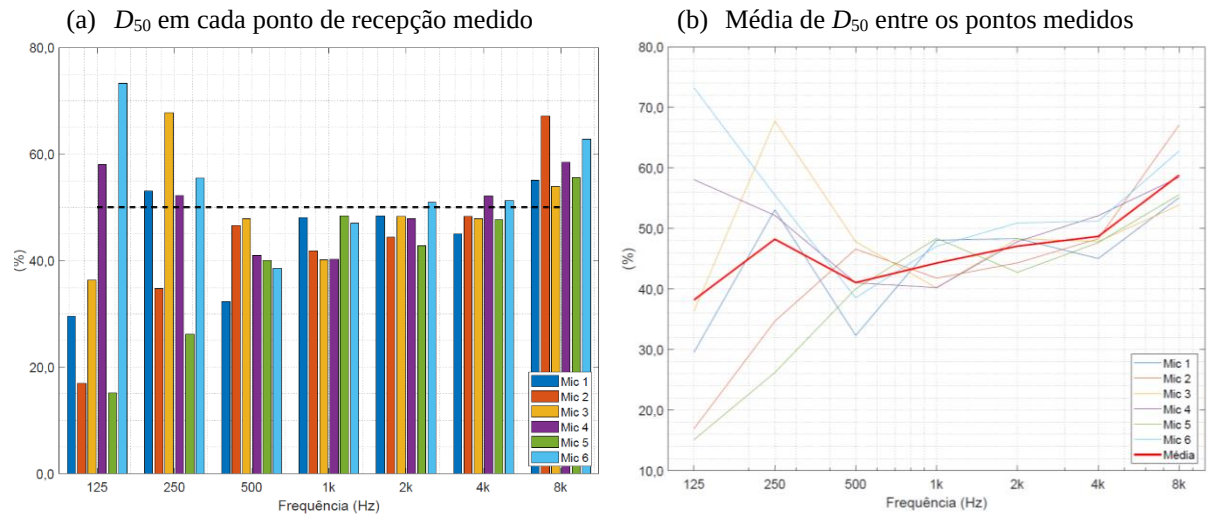
A clareza e a definição são parâmetros que servem para avaliação da inteligibilidade da fala. A clareza mede, em escala decibel a razão entre a energia da resposta impulsiva contida nas primeiras reflexões pela energia restante. Já a definição de forma similar, mede a razão entre a energia da resposta impulsiva contida nas primeiras reflexões e a energia total. Desta forma, os valores mais adequados para esses parâmetros, na avaliação de salas destinadas a fala, como é o caso de estudo, são os que possuem maior energia nas primeiras reflexões, indicando uma boa inteligibilidade da fala. As Figuras 9(a) e 9(b) apresentam os valores obtidos para C_{50} e as Figuras 10(a) e 10(b) os valores obtidos para D_{50} , a partir das medições acústicas realizadas.

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.

A linha tracejada nos gráficos das Figuras 9(a) e 10(a) é demarcada onde há a mesma quantidade de energia nas primeiras reflexões e na cauda reverberante. Os valores acima dessa linha resultam em uma quantidade maior de energia nas primeiras reflexões, o que gera uma maior inteligibilidade da fala. Analisando os gráficos de histograma das figuras a maioria dos valores de clareza e definição estão abaixo da linha tracejada, ou seja, a sala possui uma baixa inteligibilidade da fala.

4.2 SIMULAÇÕES SEM TRATAMENTO ACÚSTICO

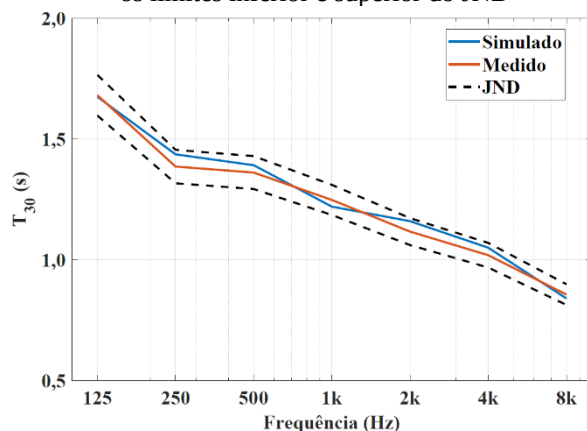
Após o processo de calibração do modelo computacional, são calculados e gerados gráficos comparando as médias dos parâmetros acústicos objetivos de salas, obtidos por meio das medições acústicas com os alcançados nas simulações.

4.2.1 Tempo de reverberação

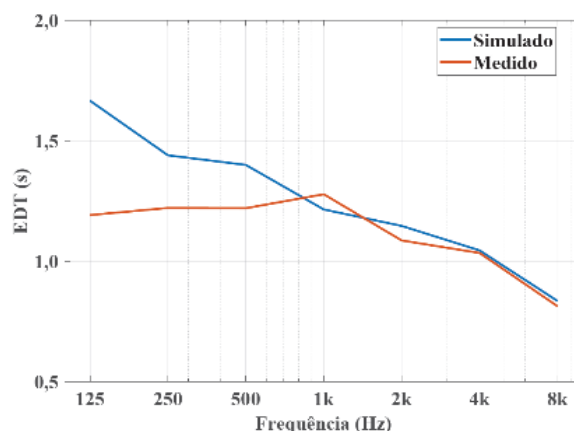
Na Figura 11(a) é possível observar o resultado da média do tempo de reverberação medido e simulado com os limites do JND para a curva do T_{30} . O TR médio total obtido para a sala foi de 1,24 s. Verifica-se que os resultados dos TRs medido e simulado estão próximos, com o T_{30} simulado nos limites do JND medido. O EQM do T_{30} para o ajuste da sala de aula foi de 0,0017. Já as Figuras 11(b), 11(c) e 11(d) mostram os valores de EDT, C_{50} e D_{50} medidos e simulados após o ajuste realizado para T_{30} .

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

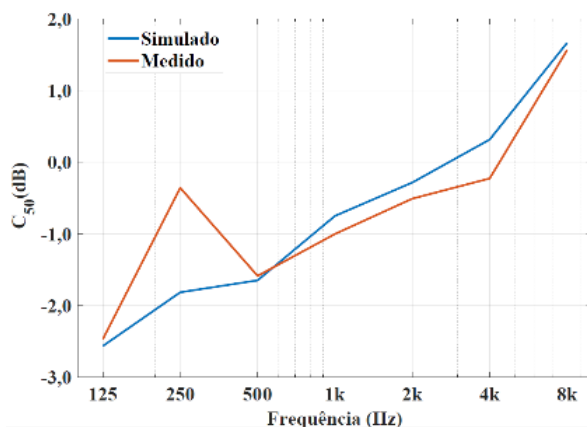
(a) Comparação entre o T_{30} medido e simulado, com os limites inferior e superior do JND



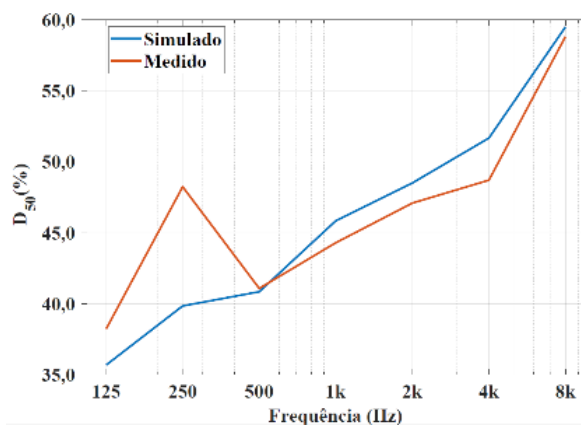
(b) Comparação entre o EDT medido e simulado



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



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



Fonte: autores.

O STI é calculado com o método indireto descrito na norma NBR IEC 60268-16 (ABNT, 2018), através da função `ita_speech_transmission_index` do ITA toolbox no *software* Matlab. Esse método indireto calcula o STI por meio da resposta impulsiva da sala e a integral de energia direta (integral de Schroeder) para derivar a função de transferência de modulação em cada ponto medido. Diante disso, o STI obtido para a sala foi de 0,57. Conforme os valores da norma NBR IEC 60268-16 (ABNT, 2018), apresentados na Tabela 1, esses valores caracterizam a inteligibilidade da fala na sala de aula analisada apenas como “aceitável”.

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.

Porém, como se trata de uma sala de aula, é desejável que o valor do STI esteja acima de 0,75, classificando a sala como “excelente”, para uma ótima inteligibilidade. Valores excelentes de STI fazem com que estudantes com alguma deficiência auditiva consiga compreender melhor a fala do professor.

4.3 PROPOSTA DE MELHORIA DAS SALAS DE AULA

Partindo dos resultados obtidos das simulações adotaram-se alternativas de baixo custo, que promovessem um melhor condicionamento acústico na sala de aula, como mudança de *layout* e aplicação de materiais absortivos acusticamente. Para a aplicação de materiais foi necessário realizar uma alteração no modelo 3D da sala, criando mais uma superfície com a área de ocupação do material.

Inicialmente foi simulada uma configuração da sala apenas com a mudança de *layout* com o que temos no ambiente. Não sendo o suficiente, para uma melhora significativa nas condições acústicas da sala de aula, foi realizada uma pesquisa detalhada por forros acústicos com um bom custo-benefício a fim de distribuí-los no teto. O material escolhido possui os coeficientes de absorção conforme mostra a Tabela 2.

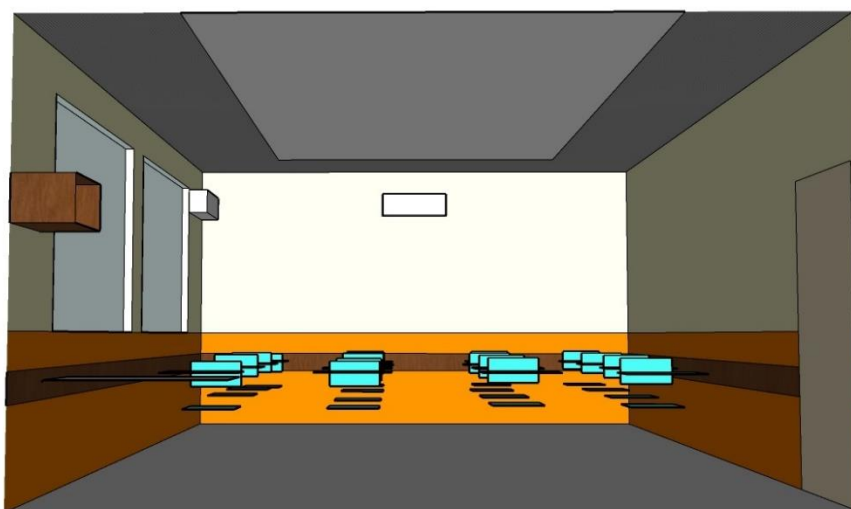
Tabela 2 - Coeficientes de absorção do Forro acústico escolhido

Materiais	Frequências (Hz)						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Forro 50 mm - Classe C	0,10	0,40	0,80	1,00	1,00	0,90	0,90

Fonte: (7).

Por se tratar de um projeto de baixo custo, foi importante definir de forma estratégica como seria distribuído o material escolhido na superfície do teto da sala. Dessa forma, o forro foi distribuído em formato de U com largura de 1 m e com a sua base voltada para o fundo da sala, como pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 - Vista do fundo sala com destaque para a distribuição do forro acústico no teto



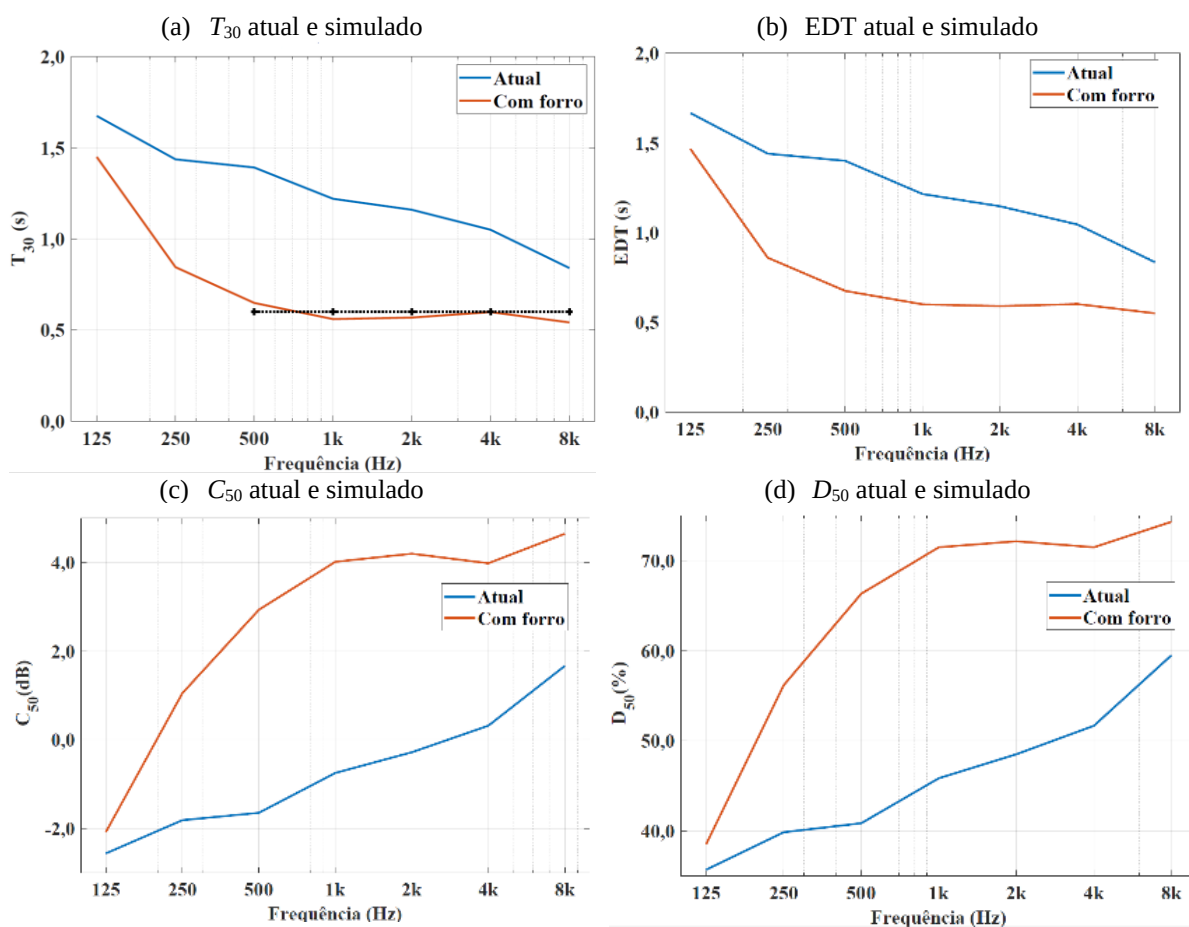
Fonte: autores.

4.4 SIMULAÇÕES COM TRATAMENTO ACÚSTICO

Nesta subseção são expostos os resultados dos parâmetros objetivos obtidos pela simulação acústica com a aplicação de tratamento acústico com um forro absorvente.

A Figura 12(a) mostra o resultado do TR atual e do TR com a aplicação do forro acústico proposto. Analisando o gráfico nota-se que foi possível chegar no TR ideal nas bandas indicadas pela norma ANSI/ASA S12.60-2010 (ANSI/ASA, 2008) com a aplicação do forro. Nas Figuras 12(b), 12(c) e 12(d) visualizamos essa comparação para EDT, C_{50} e D_{50} sem e com a colocação do forro absorvente.

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



Fonte: autores.

Nas Figuras 12(c) e 12(d) verifica-se que depois de 250 Hz a maior parte da energia sonora está contida nas primeiras reflexões com os resultados de clareza maiores que 0 dB e definição maiores que 50% resultando na melhora na inteligibilidade da fala com o forro.

O valor do STI resultou em uma melhora positiva, com a aplicação do forro absorvente, indo de 0,57, da sala atual, para 0,67. Esse resultado reflete conforme a norma NBR IEC 60268-16 (ABNT, 2018) uma boa inteligibilidade da fala.

5 CONCLUSÕES

Apesar da acústica de um ambiente como uma sala de aula ser essencial para alcançar um bom aprendizado, em muitos casos não lhe é dada a devida importância. Os resultados das

medições acústica realizadas na escola refletem a má qualidade acústica em salas de aula. Com os valores de clareza, definição e STI inadequados e salas com bastante reverberação, a inteligibilidade da fala do professor fica seriamente comprometida dificultando a compreensão do que está sendo explicado.

Os ajustes das simulações para geração de maquetes virtuais de salas de aula foram realizados utilizando o JND. Para a sala de aula da EMEF Vicente Farencena fez-se a busca de materiais acústicos de baixo custo para a adequação acústica do ambiente. O Forro 50 mm – Classe C foi aplicado na simulação gerando resultados positivos, alcançando valores de tempo de reverberação, clareza, definição e STI adequados para o objetivo principal de uma sala de aula. Cumpre ainda destacar que as auralizações feitas podem comprovar a melhoria na qualidade acústica do ambiente.

A partir do método desenvolvido pela equipe deste projeto, construído desde 2019 ao longo da execução do projeto de extensão para melhoria do ensino em escolas públicas, em que os parâmetros acústicos medidos são utilizados no ajuste dos coeficientes de absorção das superfícies internas do ambiente para calibração das simulações, é possível adotar os mesmos coeficientes nas simulações das demais salas de aula da escola, já que possuem as mesmas características da sala ensaiada.

Ao fim do projeto, espera-se que a escola consiga aplicar as melhorias sugeridas nas salas de aula e fomentar um ensino de maior qualidade na cidade de Santa Maria.

Outros resultados esperados, em complemento ao objetivo principal deste trabalho são: apresentar a influência do ruído e da acústica interna de salas de aula sobre a inteligibilidade da fala do professor à comunidade escolar; chamar a atenção dos gestores públicos para melhorias na adequação acústica de salas de aula no município de Santa Maria, direcionando recursos para esse fim; e aproximar a área de Acústica da UFSM da comunidade educacional na cidade de Santa Maria.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem 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, 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. Rio de Janeiro, 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, 2018.

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, 2000.

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

ENIZA, A., GARAVELLIA, S. L. **Acústica de salas de aula: estudo de caso em duas escolas da rede privada do distrito federal**. Revista da Sociedade Brasileira de Acústica, Santa Maria, 2003.

LONG, M. **Architectural Acoustics**. 2a ed. Massachusetts: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-455551-8.

MELO, V.S.G. **Avaliação de inteligibilidade em salas de aula do ensino fundamental a partir de respostas impulsivas biauriculares obtidas com cabeça artificial de dimensões infantis**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

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**. XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, João Pessoa, 2019.

PINHEIRO, E. N. S.; MASSON, M. L. V e LOPES, M. M. C. **A voz do professor: do projeto arquitetônico à acústica da sala de aula**. Distúrbios da Comunicação, 29:10–19, 2017. doi: 10.23925/2176-2724.2017v29i1p10-19.

RABELO, A. T. V.; SANTOS, J. N.; OLIVEIRA, R. C., MAGALHÃES, M. C. **Efeito das características acústicas de salas de aula na inteligibilidade da fala dos estudantes**. CoDAS, 26:360–366, 2014. doi: 10.1590/2317-1782/20142014026.

RINDEL, J. H.; CHRISTENSEN, C. L.; KOUTSOURIS, G. **Simulations, measurements and auralisations in architectural acoustics**. Acoustics 2013, New Delhi, págs. 1–16, 2013.

ROCHA, R. R., SILVA, A. R. **Caracterização in loco da qualidade acústica das salas de aula das escolas de ensino fundamental na cidade de Santa Maria, RS - Brasil**. Em VIII Congresso Ibero-Americano de Acústica, Évora, Portugal, 2012.

TONETTO, G. **Caracterização de ruído de tráfego rodoviário em áreas escolares na cidade de Santa Maria – RS**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Santa Maria, 2023.

VORLÄNDER, M. **Auralization**. Springer: Berlin, 2008. doi: 10.1007/978-3-540-48830-9.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Guidelines for community Noise**. Department of the Protection of the Human Environment, Occupational and Environmental Health Organization, Geneva, 1999.