

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA
XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Avaliação das condições acústicas em salas de aula de escolas públicas em Santa Maria/RS

Kemerich, B. P.¹; Melo, V. S. G.^{1,2}; Balbé, M. D.¹; Melo, D. S.¹; Vattathara, S. D.¹; Mahl, A. L.²

¹ Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil,

{bianca.kemerich,viviane.melo, marcelo.balbe, dominique.melo, shaliny.vattathara}@eac.ufsm.br

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, RS, Brasil, eng.anamahl@gmail.com

Resumo

Este artigo apresenta um estudo para apoiar a melhoria das condições acústicas em salas de aula e espaços de ensino de duas escolas públicas sediadas no município de Santa Maria, a partir de medições e simulações acústicas para avaliação da inteligibilidade da fala. A temática abrange a qualidade acústica de ambientes de ensino como ferramenta necessária ao aprendizado, contribuindo com tarefas cognitivas dos alunos como a leitura, a concentração e a memorização. 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. Sendo assim, propõe-se a avaliação da inteligibilidade a partir do levantamento de respostas impulsivas em algumas salas de aula. O sinal sonoro adotado é a varredura em frequência. Para emissão do sinal sonoro é utilizada uma fonte omnidirecional e como receptores utilizam-se de microfones, distribuídos na região onde os alunos estão normalmente posicionados. Com os sinais obtidos nas medições, faz-se o processamento de sinais para obtenção de alguns parâmetros acústicos tais como tempo de reverberação, tempo de decaimento inicial, definição, fator de clareza e STI (índice de transmissão da fala). Os resultados das medições refletem a má qualidade acústica nas salas de aula participantes do estudo, apresentando valores para clareza e definição abaixo do recomendável e de tempo de reverberação acima do requerido para salas de aula. Os resultados demonstram que a inteligibilidade da fala do professor fica seriamente comprometida nesses espaços, dificultando o desempenho cognitivo dos alunos e a saúde vocal do professor.

Palavras-chave: Inteligibilidade da fala, conforto acústico, parâmetros acústicos.

PACS: 43.55.Br, 43.55.Gx, 43.55.Ka.

Assessment of acoustic conditions in public school classrooms in Santa Maria/RS

Abstract

This article presents a study to support the improvement of acoustic conditions in classrooms and teaching spaces of two public schools located in the municipality of Santa Maria, from measurements and acoustic simulations to assess speech intelligibility. The theme covers the acoustic quality of teaching environments as a necessary tool for learning, contributing to students' cognitive tasks such as reading, concentration and memorization. In this sense, it is necessary to carry out measurements and acoustic simulations for the adequate adjustment of teaching environments, which can provide acoustic comfort to users. Therefore, it is proposed the evaluation of intelligibility from the assesment of impulse responses in some classrooms. The sound signal adopted is the sweep sine. For the emission of the sound signal, an omnidirectional source is used and microphones are used as receivers, distributed in the region where the students are normally positioned. With the signals obtained in the measurements, the signals are processed to obtain some acoustic parameters such as reverberation time, initial decay time, definition, clarity factor and STI (speech transmission index). The measurement results reflect the poor acoustic quality in the classrooms participating in the study, presenting values for clarity and definition below the recommended and reverberation time above what is required for classrooms. The results show that the teacher's speech intelligibility is seriously compromised in these spaces, hindering the students' cognitive performance and the teacher's vocal health.

Keywords: Speech intelligibility, acoustic comfort, acoustic parameters.



1. INTRODUÇÃO

Em ambientes de ensino e aprendizagem a qualidade acústica é de extrema importância, pois irá refletir no desempenho produtivo de professores e alunos. As condições acústicas de um recinto podem ocasionar grandes efeitos, positivos ou negativos, no desempenho de estudantes e trabalhadores [1].

Um espaço ruidoso gera efeitos negativos em tarefas cognitivas, como a leitura, o foco, a resolução de problemas e a memorização [2]. Isso também afeta a saúde dos professores, pois precisam fazer um enorme esforço vocal para serem compreendidos pelos alunos como demonstra o estudo de Ronsse [3].

Ambientes mais silenciosos, onde a fala é facilmente compreendida, proporcionam um melhor desempenho na aprendizagem e eficiência no trabalho. Autores como Eniza e Garavellia [4] consideram que a acústica da sala de aula seria o principal fator de caráter global responsável pelo chamado analfabetismo funcional, caracterizado pela inabilidade dos alunos em ler e interpretar de forma adequada um texto de seu nível escolar.

No Brasil, as condições acústicas de ambientes educacionais geralmente são negligenciadas na concepção do projeto arquitetônico [5]. Como consequência, a atenção à qualidade sonora do ambiente começa quando este afeta de forma negativa a saúde física e mental de seus ocupantes.

As salas de aula das escolas brasileiras, em particular escolas públicas, não proporcionam condições acústicas ideais para o ensino, ocasionando a dificuldade de aprendizagem dos alunos [6–8]. Boa parte do ruído residual, presente em salas de aula, provém de conversas paralelas entre os alunos, ruídos provenientes de ventiladores ou aparelhos de ar condicionado, em conjunto com a acústica inadequada da sala e ruídos externos, oriundos do pátio e/ou corredores de acesso. Cumpre destacar, ainda, que, no Brasil, em função do clima predominantemente quente, é comum nas construções de ambientes educacionais a colocação de janelas amplas e a adoção de ventilação natural, resultando em uma forte influência do ruído externo em seu interior. 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 palavra falada [7]. Logo, esses ambientes escolares acabam por não proporcionar as condições ideais para o seu objetivo, ou seja, a fala.

Ao avaliar as condições acústicas de salas de aula é preciso analisar os parâmetros objetivos relativos à inteligibilidade e ao *loudness*, como o tempo de reverberação (T_{20} , T_{30} , T_{60}), clareza C_{50} e definição D_{50} para fala e o índice de transmissão da fala (STI - *Speech Transmission Index*) [9].

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 [9], além de critérios de desempenho acústico, requisitos de design e diretrizes para escolas indicados na norma americana ANSI/ASA S12.60-2010 [10]. Ademais, pode-se empregar a norma NBR IEC 60268-16 [11], que indica os valores de STI correspondentes à qualidade da inteligibilidade da fala na sala.

Para a obtenção dos parâmetros supracitados, efetua-se a medição acústica para obtenção da resposta impulsiva monoauricular em determinados pontos da sala (RIR - *Room impulse response*). Também é possível recriar a acústica de uma sala de aula existente virtualmente, utilizando a simulação computacional e calibrando-a com a otimização dos coeficientes de absorção e espalhamento. 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.

Neste estudo, foram aplicadas as duas técnicas para buscar apresentar melhorias na qualidade acústica de duas salas de aula de escolas públicas sediadas na região central do estado do Rio Grande do Sul.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste artigo é apresentar parte dos resultados de um projeto de extensão para apoio na melhoria do ensino, em que a meta principal está na melhoria das condições acústicas das salas de aula de escolas públicas do município de Santa Maria, RS, a partir de apoio técnico do curso de Engenharia Acústica da UFSM.

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.

2.1 Objetivos específicos

Temos dois importantes objetivos específicos a atingir:

- 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, consequentemente, da inteligibilidade da fala em ambientes de ensino, obtidas por meio de medições e simulações acústicas.

3. METODOLOGIA

A presente pesquisa foi realizada em duas escolas públicas de Santa Maria, no Rio Grande do Sul, localizadas em um mesmo bairro, distando 2 km entre si. Para fins de organização dos resultados, as salas de aula foram identificadas como M01 e V02.

A Sala M01 está localizada em uma escola de ensino fundamental e médio e é destinada à alunos das séries iniciais do ensino fundamental, com idade aproximada de sete anos. Essa sala de aula possui largura de 6,03 m, comprimento de 8,34 m e pé direito de 3,80 m, totalizando um volume de 191,10 m³. É possível observar a sala de aula na Figura 1.

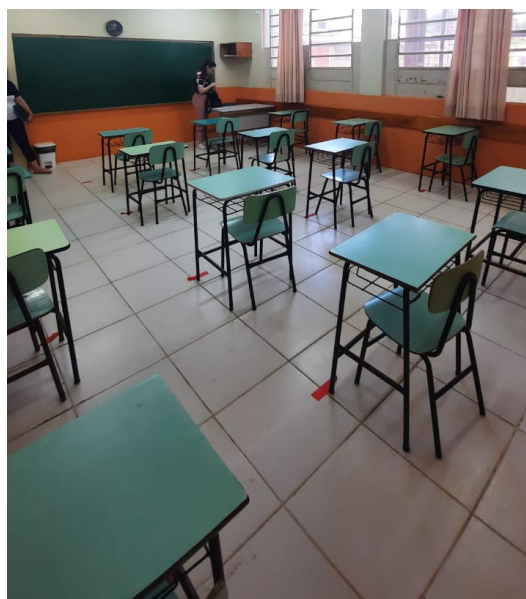


Figura 1: Sala de aula M01.

As paredes da Sala M01 e o teto são de alvenaria pintada e há vigas aparentes; já o piso é em

granilite; as janelas são em madeira maciça com bandeiras em vidro; o mobiliário (mesas e cadeiras dos professores e alunos) de plástico; e o quadro e porta são em madeira maciça.

A Sala V02 (Figura 2) situa-se em uma escola de ensino fundamental de séries iniciais e finais, edificada há 27 anos. Frequentam essa sala de aula alunos entre 12 e 14 anos nos turnos manhã e tarde. Suas dimensões são: 5,02 m de largura, 7,01 m de comprimento, pé direito de 2,96 m, perfazendo um volume de 104,16 m³.



(a) Vista de frente da sala.



(b) Vista do fundo da sala.

Figura 2: Sala de aula V02.



As paredes da Sala V02 são em alvenaria de tijolos com emboço pintado; o teto é uma laje aparente com revestimento em chapisco; o piso é cerâmico; as janelas são basculantes em ferro e vidro; as mesas e cadeiras dos alunos e cadeira do professor são de madeira revestida em fórmica; já a mesa do professor, a porta de entrada e o quadro são de madeira maciça.

Exterior à parede em que se encontram as janelas basculantes da Sala V02, há uma quadra esportiva coberta. Nessa quadra, em alguns dias da semana, os horários de uma turma de educação física coincidem com os da turma que ocupa a sala de aula, ocasionando ruído residual em demasia ao ambiente de ensino.

3.1 Medições acústicas

Nesta Seção estão descritos os procedimentos adotados para a obtenção das RIRs, pelas quais foram obtidos os parâmetros acústicos objetivos de salas.

As medições das RIRs e o cálculo dos parâmetros objetivos ocorreram de acordo com a norma NBR ISO 3382-2 [12], pelo método de engenharia. São utilizadas uma posição de fonte sonora e seis posições de receptores, totalizando seis pares fonte-receptor. Destaca-se, ainda, que, no momento das medições, ambas as salas de aula não estão ocupadas por alunos e professores.

3.1.1 Instrumentação e cadeia de medição

Para a obtenção da RIR, nas duas salas de aula, é usada a seguinte instrumentação com as respectivas especificações:

- Fonte sonora dodecaédrica omnidirecional Bruel & Kjaer 4292;
- Amplificador de potência Bruel & Kjaer 2716;
- 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;
- Calibrador de microfones Bruel & Kjaer Tipo 4231;
- Microfones para campo difuso Bruel & Kjaer Tipo 4242-A-021 (6 unidades);

- Notebook Dell inspiron 15 5000, intel core i7 2.6GHz, 8 GB RAM.

A cadeia de medição com a ilustração da montagem dos equipamentos, pode ser visualizada na Figura 3.



Figura 3: Diagrama do fluxo de sinais para obtenção das respostas impulsivas das salas de aula M01 e V02.

3.1.2 Posições de fonte e receptores

Os microfones (receptores) são posicionados no interior das salas de aula conforme ilustram as plantas baixas na Figura 4 para a Sala M01 e Figura 5 para a Sala V02. Em ambas, são escolhidas uma posição para a fonte e seis posições para os microfones. Os microfones são posicionados na altura de 1,20 m, simulando a altura da pessoa sentada. A fonte sonora é posicionada a 1,50 m do piso ao centro acústico da fonte, simulando a altura da boca de uma pessoa em pé. A Figura 6 ilustra a posição da fonte e dos microfones, vistos do fundo da Sala V02.

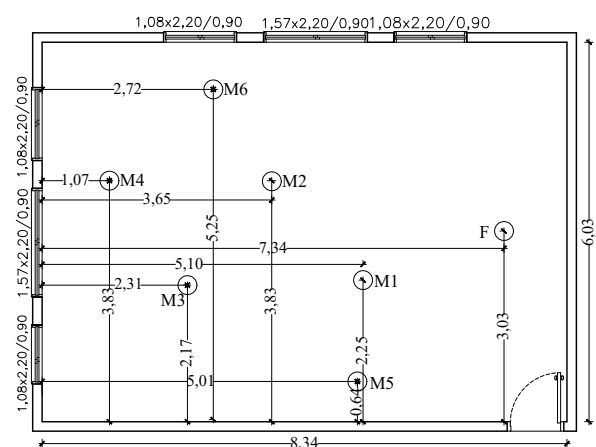


Figura 4: Planta baixa da sala de aula M01 com a localização dos pontos de medição (M) e fonte sonora (F).

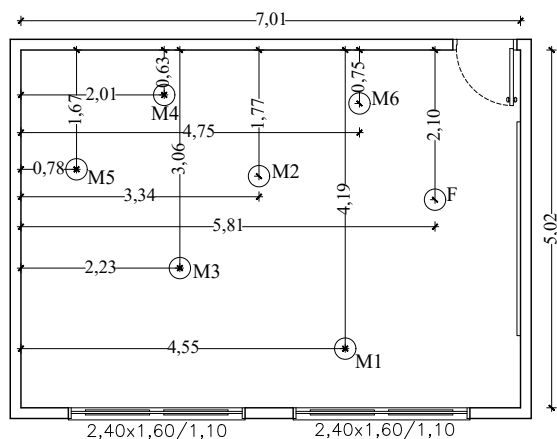


Figura 5: Planta baixa da sala de aula V02 com a localização dos pontos de medição (M) e fonte (F).



Figura 6: Pontos de medição vistos dos fundos da sala de aula V02.

A posição da fonte, em frente a lousa, é definida ao considerarmos ser esta a localização usualmente ocupada pelos professores. Já para os receptores, são escolhidos pontos distribuídos em locais normalmente ocupados pelos discentes. Para determinar a posição desses equipamentos, são respeitadas as distâncias preconizadas na norma NBR ISO 3382-2 [12].

3.1.3 Procedimentos de medição

Antes do início das medições para obtenção das RIRs, realiza-se, nas duas salas de aula, o ajuste de cada microfone. Esse procedimento visa a diminuição de incertezas na medição e a aquisição de resultados com uma boa precisão. Adicionalmente também é efetuada a medição do ruído residual, visando alcançar uma relação sinal ruído adequada, maior que 15 dB, na análise do comportamento acústico da sala. Além disso, são verificadas as condições climáticas de temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica, como pode ser visto na Tabela 1.

O sinal utilizado para a medição é a varredura exponencial de senos (*sweep sine*). Esse sinal é

Tabela 1: Valores das propriedades atmosféricas no momento da medição nas salas M01 e V02.

Sala/Condições	M01	V02
Temperatura (°C)	26.6	26
Umidade Relativa (%)	64	58
Pressão Atmosférica (kPa)	1.018	1.018

projetado para excitar, com aproximadamente a mesma energia, todas as frequências dentro da faixa audível do ser humano, de 20 Hz a 20 kHz, por um tempo suficientemente grande para preencher a sala até seu estado estacionário em cada frequência. Sua geração ocorre a partir de um computador portátil utilizando o pacote *ITA Toolbox*, no *software* Matlab.

Utiliza-se também o *toolbox* de aquisição de dados do Matlab, *Data Acquisition* (DAQ), em todo processo de reprodução e gravação.

Observa-se que, mesmo o sinal sendo projetado de 20 Hz a 20 kHz, sua reprodução fica limitada à função resposta em frequência (FRF) da fonte sonora, assim como o espectro gravado pelos microfones fica limitado pela FRF destes. Isso impõe uma coloração do sistema de reprodução-gravação no sinal de interesse [9].

3.1.4 Extração dos parâmetros objetivos

Com os procedimentos de medições acústicas concluídos, faz-se o pós-processamento dos dados para obtenção das RIRs. A partir destas são extraídos os parâmetros objetivos relacionados à reverberação das salas 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.

3.2 Simulações acústicas

As simulações acústicas são realizadas no *software* Odeon v. 11.23, disponibilizado pelo Curso de Graduação em Engenharia Acústica da UFSM. Tal programa é baseado na teoria 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).

Entre as vantagens da técnica de simulação acústica computacional estão o fato de haver controle total do ruído residual; a fonte sonora ser perfeitamente omnidirecional e impulsiva, isenta de problemas de distorção; e, ainda, a garantia de ter um tempo de início da resposta impulsiva bem definido [13]. Todavia, ainda há incertezas relacionadas aos coeficientes de absorção e espalhamento e sua real aproximação das características dos materiais das salas reais.

As volumetrias importadas ao *software* Odeon são criadas no *software* SketchUp. Salienta-se que as volumetrias inseridas em programas de simulação acústica não necessitam conter espessuras e detalhamentos, tais como pés de mesas e cadeiras, ventiladores, luminárias, dentre outros [14]. Nas Figuras 7 e 8 verificam-se as volumetrias das duas salas de aula já com os receptores e fonte sonora inseridos no *software* Odeon.

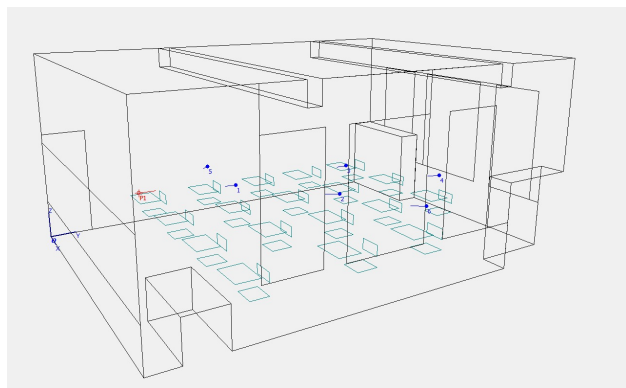


Figura 7: Volumetria da Sala M01, importada no *software* Odeon.

Os α adotados para cada superfície foram consultados no banco de dados dos *software* Odeon e RAIOS 7 (*Room Acoustics Integrated and Optimized Software*) e na literatura [15]. Adotou-se para os δ o valor de 0,05 para todos os materiais e frequências, pois não há informações consistentes acerca desse dado. Quanto às posições de fonte e receptores, foram adotadas as mesmas distâncias das medições, conforme indicado nas Figuras 4 e 6.

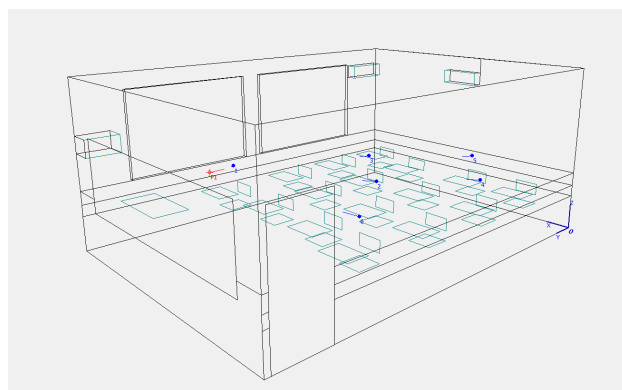


Figura 8: Volumetria da Sala V02, importada no *software* Odeon.

Visando aproximar os coeficientes de absorção dos materiais das superfícies nas salas simuladas, ao final de cada simulação, o TR simulado é comparado ao medido, especificamente do Receptor 1 para a Sala M01 e Receptor 3 para a Sala V02, que são os pontos centrais à fonte de cada sala de aula.

O α é ajustado para que o TR simulado fique dentro dos limites da diferença do limiar observável, do inglês, *Just noticeable difference* (JND), 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% [16]. 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 o simulado também é obtido. Calcula-se a raiz quadrada do somatório das diferenças ao quadrado, entre os valores medido (T_{30m}) e simulado (T_{30s}), em cada banda de oitava dividido pelo número 7, que é o total de frequências em banda de oitava que estão sendo consideradas nesse estudo (125 Hz a 8 kHz), conforme a expressão

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

A confiabilidade na simulação acústica aumenta com a utilização do JND e a verificação do EQM. Empregando-os, além de ajustar o coeficiente de absorção, será viável, no futuro, proceder a reali-

zação de aurilizações com as possíveis soluções de melhorias nas salas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta Seção são apresentados os resultados obtidos de acordo com os procedimentos metodológicos adotados.

É importante ressaltar que, 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 as Salas M01 e V02 foi de, nessa ordem, 1,50 s e 1,24 s e seus volumes 191,1 m³ e 104,16 m³. Portanto, as respectivas f_s para cada uma das salas são 177 Hz, para a Sala M01, e 218 Hz, para a Sala V02.

Considerando que as f_s de ambas as salas de aula estão 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 Ajustes do coeficiente de absorção

Os coeficientes de absorção, após o procedimento de ajuste das simulações acústicas das Salas M01 e V02, encontram-se respectivamente, nos Quadros 1 e 2. Para a Sala M01, o α do piso foi retirado da literatura [15], enquanto os coeficientes dos demais materiais foram extraídos do banco de dados do código computacional RAIOS 7. Ajustaram-se os coeficientes das superfícies parede, teto e piso, nas frequências julgadas necessárias, de acordo com o JND e o EQM do TR para ambas as salas.

4.2 Parâmetros objetivos

Após o processo de calibração do modelo computacional, foram gerados gráficos comparando as médias dos parâmetros objetivos obtidos por meio das medições acústicas com os alcançados na simulação.

Quadro 1: Coeficientes de absorção (α) dos materiais da Sala M01.

Material	α por Frequência (Hz)						
	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k
Parede	0,06	0,12	0,1	0,08	0,045	0,07	0,01
Teto	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,01
Piso	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
Mesas e cadeiras dos alunos	0,06	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2
Armários, mesa do professor, janelas e quadro	0,11	0,12	0,12	0,12	0,1	0,1	0,1

Quadro 2: Coeficientes de absorção (α) dos materiais da Sala V02.

Material	α por Frequência (Hz)						
	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k
Parede	0,01	0,02	0,042	0,03	0,02	0,03	0,01
Teto	0,005	0,02	0,032	0,04	0,04	0,03	0,02
Piso	0	0,04	0,038	0,035	0,06	0,07	0,02
Mobília	0,01	0,24	0,22	0,30	0,40	0,40	0,40
Janelas	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,04
Quadro	0,20	0,22	0,18	0,10	0,10	0,15	0,15
Porta	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10	0,10

4.2.1 Tempo de reverberação

Iniciando pela análise da reverberação nas salas de aula, tem-se o T_{30} médio das Salas M01 e V02 nas Figuras 9 e 10, com os limites do JND para a curva do T_{30} médio medido em cada caso. Os TRs médios totais obtidos para as Salas M01 e V02 foram, respectivamente, 1,50 s e 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 M01 foi de 0,002 e, para a Sala V02, 0,0017.

O TR ideal para salas de aula, ambientes em que a inteligibilidade da fala é primordial, de acordo com a norma ANSI/ASA S12.60-2010 [10], é de 0,6 s nas bandas de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz, para salas de aula com volume menor que 283 m³, que é o caso das duas salas aqui analisadas. Porém, na literatura, encontra-se que o TR pode alcançar, no máximo, 0,8 s [17]. Portanto, o TR das duas salas de aula é inadequado para espaços destinados à



fala, principal recurso do professor para o ensino.

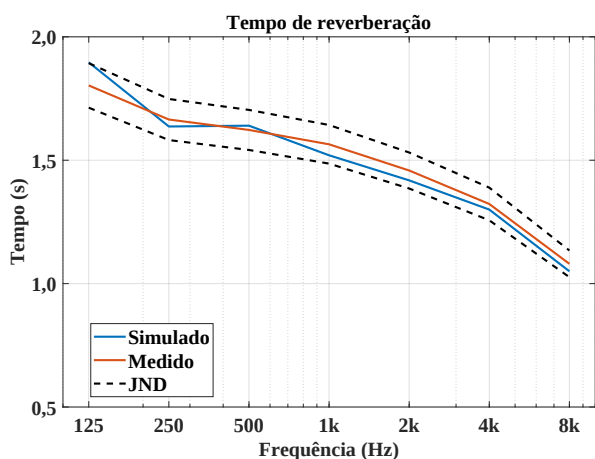


Figura 9: Comparação entre o T_{30} medido e simulado para a Sala M01, com os limites inferior e superior do JND.

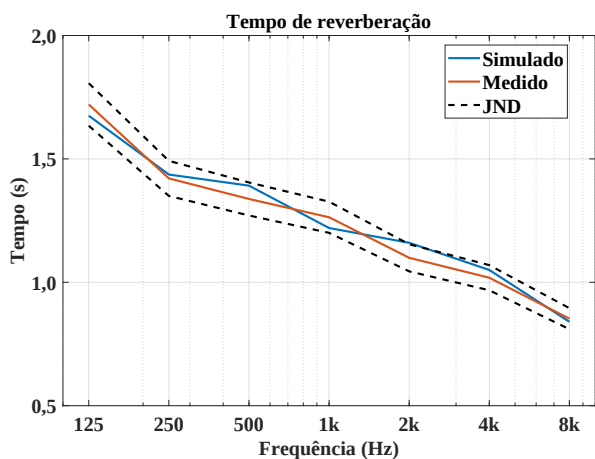


Figura 10: Comparação entre o T_{30} medido e simulado para a Sala V02, com os limites inferior e superior do JND.

Salienta-se, no entanto, que as salas de aula não estavam ocupadas no momento das medições, como supracitado. No estudo de Choi [18], comprovou-se que, na presença de ocupantes, as salas apresentam redução do tempo de reverberação e melhoria no parâmetro objetivo Clareza.

4.2.2 Tempo de decaimento inicial

O tempo de decaimento inicial (EDT) é um parâmetro que se correlaciona melhor com a experiência subjetiva da reverberação [9]. Analisando os EDTs na Figura 11, correspondente à Sala V02, comparando medição e simulação, verificou-se que o *software* Odeon superestima esse parâmetro nas baixas e médias frequências, até 1 kHz, quando as curvas se aproximam. Além disso, a

caracterização dos dados de entrada, como os coeficientes de absorção e espalhamento, foram realmente menos precisos na faixa das baixas frequências.

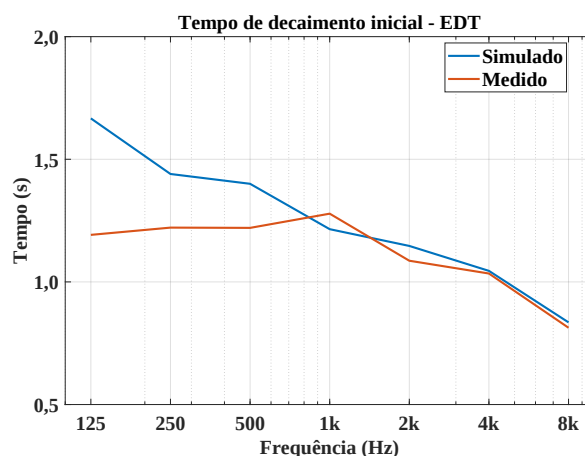


Figura 11: Comparação entre o EDT medido e simulado para a Sala V02.

Na Sala M01 (Figura 12), os EDTs simulado e medido estão relativamente próximos, uma pequena diferença é vista em 125 Hz, 250 Hz e 2 kHz.

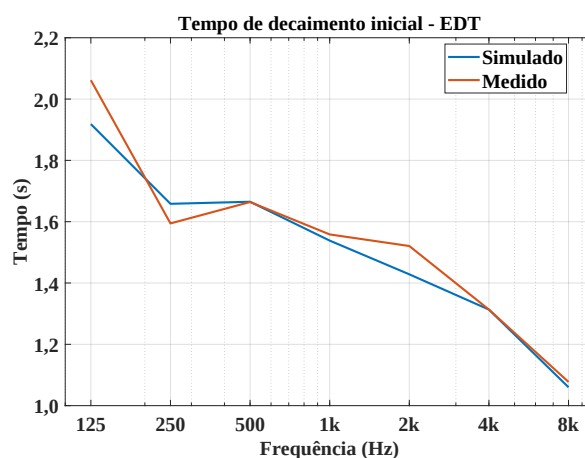


Figura 12: Comparação entre o EDT medido e simulado para a Sala M01.

Nas duas salas, os valores de EDT foram elevados, causando uma sensação bastante reverberante e evidenciando um mau condicionamento acústico.

4.2.3 Clareza, Definição e STI

Inicia-se a análise dos parâmetros objetivos que se relacionam à inteligibilidade da fala, C_{50} , D_{50} e STI.

A clareza mede, em escala decibel, a razão entre a energia contida nas primeiras reflexões e a energia restante da RIR. Já a definição mede,

em escala linear, a razão entre a energia contida nas primeiras reflexões e a energia total da RIR. Os resultados medidos e simulados para clareza e definição encontram-se, respectivamente, nos gráficos das Figuras 13 e 14, para a Sala M01.

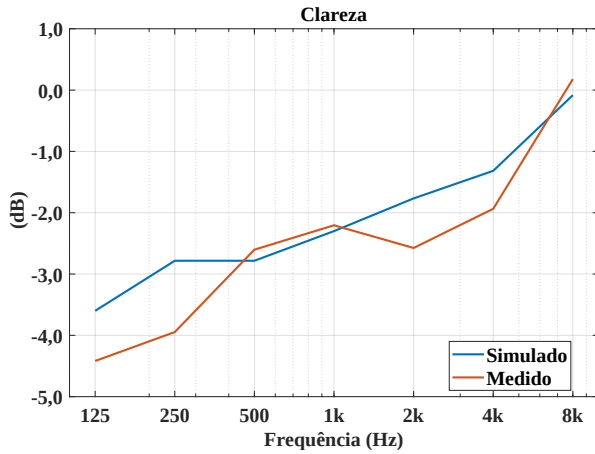


Figura 13: Comparação entre o C_{50} medido e simulado para a Sala M01.

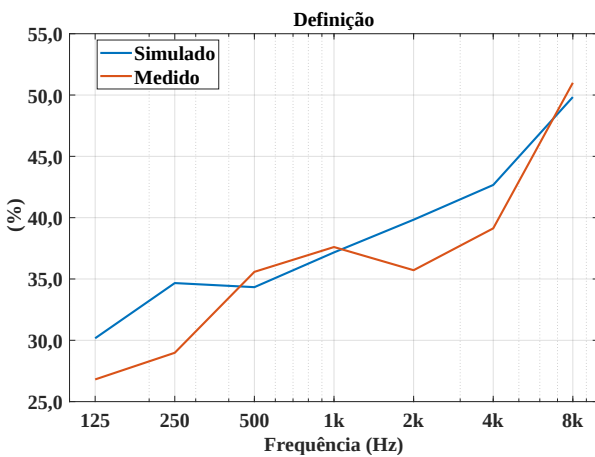


Figura 14: Comparação entre o D_{50} medido e simulado para a Sala M01.

Analisando as curvas dos dois parâmetros, C_{50} e D_{50} , e comparando os valores simulado e medido na Sala M01, tem-se que esses são semelhantes nas frequências de 500 Hz, 1 kHz e próximo de 8 kHz.

As Figuras 15 e 16 ilustram, nessa ordem, clareza e definição para a Sala V02. Nesse caso, as curvas dos dois parâmetros simulados não apresentam diferenças significativas às curvas correspondentes às medições, exceto pelo pico na frequência de 250 Hz.

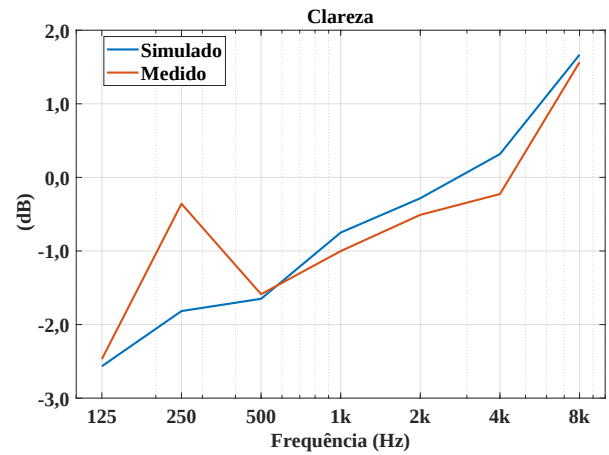


Figura 15: Comparação entre o C_{50} medido e simulado para a Sala V02.

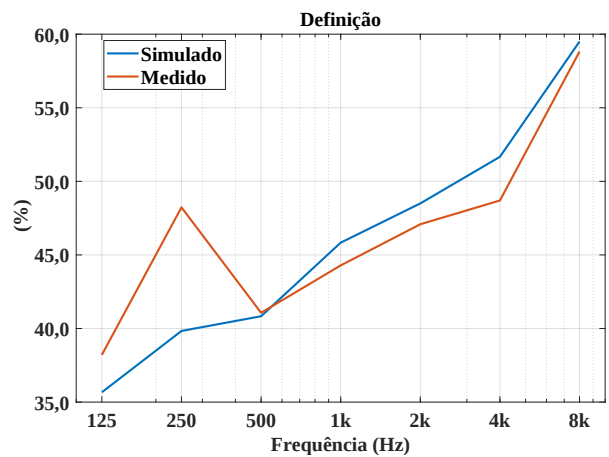


Figura 16: Comparação entre o D_{50} medido e simulado para a Sala V02.

Devido aos valores negativos do C_{50} até, pelo menos, a frequência de 2 kHz para a Sala V02 e totalmente para a Sala M01, podemos afirmar que a clareza da fala nas salas de aula analisadas é insuficiente. Isso é comprovado pelo D_{50} , que é menor que 50% para a maioria das frequências na Sala V02 e totalmente abaixo para a Sala M01. Esses valores indicam que a quantidade de energia na cauda reverberante é maior do que nas primeiras reflexões [9], prejudicando a inteligibilidade da fala.

O STI é calculado com o método indireto descrito na norma NBR IEC 60268-16 [11], 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 M01, foi de 0,50, e para a Sala V02 igual a 0,57. Conforme a norma NBR IEC 60268-16 [11], esses valores caracterizam a inteligibilidade da fala em ambas as salas apenas como “razoável” a “bom” (0,45 – 0,60). 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 consigam compreender melhor a fala do professor.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou a qualidade acústica de duas salas de aula, de escolas públicas, localizadas no município Santa Maria, no Rio Grande do Sul. Através do levantamento da resposta impulsiva monoauricular *in loco*, foi possível obter os parâmetros objetivos T_{30} , EDT, C_{50} , D_{50} e STI. E, por meio de simulação computacional, foram criados os modelos computacionais similares às salas reais.

Os parâmetros objetivos calculados comprovaram a precariedade da qualidade acústica das salas de aula ensaiadas, com a inteligibilidade da fala inadequada, mesmo que os resultados do STI de 0,50 para a Sala M01 e 0,57 para a Sala V02, possam ser classificados como de razoável a bom pela norma pertinente [11]. Com isso, o processo de ensino-aprendizagem e a saúde vocal dos professores são prejudicados.

A simulação computacional em acústica de salas de aula propicia recriar salas com características acústicas semelhantes às reais. Assim, torna-se possível apresentar proposta de melhorias ou até adaptá-las a finalidades distintas [19].

Desse modo, com as simulações acústicas realizadas com o *software* Odeon v. 11.23, os parâmetros supracitados resultantes da simulação aproximaram-se de forma efetiva dos obtidos com as medições acústicas. Ressalta-se que o JND demonstrou ser, mais uma vez, um parâmetro confiável para a calibração de simulações acústicas. Isso pode ser comprovado pelo cálculo do EQM, que resultou 0,002 para o TR da Sala M01 e 0,0017 para o TR da Sala V02.

A partir dos resultados obtidos até o presente tra-

balho, pode-se alcançar o próximo passo da pesquisa, que consiste em estudar soluções, economicamente viáveis, para propiciar a melhoria das condições acústica das salas de aula das duas escolas participantes do projeto de extensão.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFSM pelo apoio ao projeto de extensão através dos Editais FIEEX CT 2020 e 2021 e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelos recursos financeiros aplicados em bolsas.

REFERÊNCIAS

- [1] *Guidelines for community Noise*. Department of the Protection of the Human Environment, Occupational and Environmental Health Organization, Geneva, 1999.
- [2] Evans, Gary W. Chronic noise exposure and reading deficits. the mediating effects of language acquisition. *Sage Publications, Inc.*, 2015. doi: [10.1177/0013916597295003](https://doi.org/10.1177/0013916597295003).
- [3] Ronsse, Lauren M. *Investigations of the relationships between unoccupied classroom acoustical conditions and elementary student achievement*. Tese de doutorado, University of Nebraska, Lincoln, 2011. Disponível em: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1007&context=archengdiss>.
- [4] Eniza, A. e 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.*, 2003.
- [5] 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](https://doi.org/10.23925/2176-2724.2017v29i1p10-19).
- [6] Rocha, R. R. e 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.
- [7] Rabelo, A. T. V.; Santos, J. N.; Oliveira, R. C. e 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](https://doi.org/10.1590/2317-1782/20142014026).
- [8] Melo, V. S. G.; Pinheiro, Y. M. e 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 and XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído*, João Pessoa, 2019.

- [9] Brandão, Eric. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 978-8521210061.
- [10] ANSI/ASA S12.60-2010/part 1. *American national standard acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools, part 1: Permanent schools*. New York, dez. 2008.
- [11] ABNT NBR IEC 60268-16. *Equipamentos de sistemas de som Parte 16: Avaliação objetiva da inteligibilidade da fala pelo índice de transmissão da fala*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, dez. 2018.
- [12] ABNT NBR ISO 3382-2. *Acústica - Medição de parâmetros de acústica de salas - Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, jun. 2017.
- [13] Rindel, J. H.; Christensen, C. L. e Koutsouris, G. Simulations, measurements and auralisations in architectural acoustics. *Acoustics 2013 New Delhi*, págs. 1–16, 2013.
- [14] Vorländer, M. *Auralization*. Germany: Springer Berlin, 2008. doi: [10.1007/978-3-540-48830-9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-48830-9).
- [15] Carvalho, R. P. *Acústica arquitetônica*. Brasília: TheSaurus, 2006. 167 p.
- [16] Bork, Ingolf. 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.
- [17] Long, M. *Architectural Acoustics*. 2ª ed. Massachusetts: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-455551-8.
- [18] Choi, Young-Ji. Effect of occupancy on acoustical conditions in university classrooms. *Applied Acoustics*, 114:36–43, 2016. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/j.apacoust.2016.07.010](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.07.010). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003682X16302043>.
- [19] Lima, P. R. e Vergara, E. F. Simulação acústica de uma sala multiúso para a prática musical: possibilidades de adaptação ao uso. *Ambiente Construído*, 18:161–173, 2017. ISSN 1678-8621. doi: [10.1590/s1678-86212018000300274](https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000300274).