XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

AVALIAÇÃO DE INTELIGIBILIDADE EM SALA DE AULA DO ENSINO FUNDAMENTAL PARA IDENTIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES ACÚSTICAS DE ESCOLAS PÚBLICAS EM SANTA MARIA – RS

Viviane S.G. Melo (1); Yuri M. Pinheiro (2); João V.G. Paes (3)
(1) DSc, Professora do curso de Engenharia Acústica e do PPGEC, viviane.melo@eac.ufsm.br
Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Departamento de Estruturas e Construção Civil, Av. Roraima, 1000, Camobi, Santa Maria, RS, 97105-900, Tel.: (55) 3220 6112.
(2) Bolsista FIEX 2018, Aluno do curso de Engenharia Acústica, yuri.pinheiro@eac.ufsm.br
(3) Bolsista FIEX 2018, Aluno do curso de Engenharia Acústica, joao.paes@eac.ufsm.br

RESUMO
Este artigo reporta um estudo, utilizando testes de articulação, para a avaliação de inteligibilidade da fala em salas de aula a fim de avaliar as condições acústicas em salas de aula de escolas públicas sediadas no município de Santa Maria. O tema desenvolvido envolve a qualidade acústica de salas de aula e o desenvolvimento de novas metodologias em ensaios de acústica para o ajuste adequado dos ambientes de ensino. Propõe-se a avaliação da inteligibilidade a partir do levantamento das respostas impulsivas biauriculares nas salas. O sinal sonoro adotado é a varredura em frequência. Para a emissão do sinal sonoro, é utilizada uma fonte onidirecional e, como receptor, uma cabeça artificial, responsável pela gravação dos sinais biauriculares. A partir dos sinais obtidos nas medições, são calculados os parâmetros acústicos das salas de aula e realizado um procedimento de processamento de sinais para a geração de aurilizações. Essas aurilizações são, em seguida, testadas em crianças por meio de fones de ouvido. De acordo com os resultados, a maioria das salas possui um tempo de reverberação próximo do adequado para a fala, mas apresenta isolamento insuficiente para o conjunto paredes e esquadrias, possibilitando a interferência do ruído de fundo vindo do ambiente externo.
Palavras-chave: inteligibilidade, acústica de salas, qualidade acústica, aurilização.

ABSTRACT
This article reports a study, using articulation tests, to evaluate the word intelligibility in classrooms in order to evaluate the acoustic conditions in classrooms of public schools located in the city of Santa Maria. The theme involves the acoustic quality of classrooms and the development of new methodologies in acoustic tests for the adequate adjustment of teaching environments. It is proposed the evaluation of intelligibility from the measurement of impulse binaural responses in the rooms. The adopted sound signal is the sweep sine. For the emission of the sound signal an omnidirectional source is used and as receiver an artificial head is responsible for the recording of binaural signals. From the signals obtained in the measurements, the acoustic parameters of the classrooms are calculated and a procedure of signal processing for the generation of auralizations is carried out. These auralizations are then tested on children by means of headphones. According to the results, most rooms have a reverberation time close to that suitable for speech, but it presents insufficient insulation for the due to walls, doors and windows, allowing the interference of the background noise.
Keywords: intelligibility, room acoustics, acoustic quality, auralization.

1. INTRODUÇÃO

A saúde é um componente fundamental da qualidade de vida do ser humano, que se reflete na sua capacidade produtiva e de aprendizado. Um ambiente ruidoso dá lugar à fadiga, perda de concentração, nervosismo, reações de estresse, ansiedade, falta de memória, baixa produtividade, cansaço, irritação, problemas com as relações humanas, dificuldade de aprendizagem etc. (COSTA e QUERIDO, 2009).

As salas de aula das escolas brasileiras — em particular as das escolas públicas —, sabidamente não proporcionam as condições ideais para o ensino, no que toca às suas condições acústicas. O principal fator de qualidade acústica em uma sala de aula é a inteligibilidade da fala que, grosso modo, traduz a maior ou menor facilidade com que os estudantes podem ouvir e entender o que diz o professor em aula.

A capacidade de ouvir é um componente fundamental da qualidade de vida do ser humano, que se reflete na sua capacidade produtiva e de aprendizado. É bem conhecido o fato de que a inteligibilidade da fala em salas de aula, principalmente naquelas utilizadas para o ensino fundamental, é fator preponderante na qualidade e eficácia do aprendizado. Alguns autores consideram que a acústica da sala de aula seria o principal fator de caráter global responsável pelo assim chamado analfabetismo funcional, que se caracteriza pela inabilidade do aluno em ler e interpretar adequadamente um texto de seu nível escolar (ENIZA e GARAVELLIA, 2003).

Diversos autores têm se debruçado sobre essa questão (BRADLEY, 1986, 1996, 1999). Contudo, os estudos realizados sobre o tema nos países do primeiro mundo concentram-se mais nos aspectos da acústica interna da sala, uma vez que em países de clima temperado ou frio, a influência do ruído externo sobre a acústica da sala é pequena, dadas as condições climáticas adversas desses países. No Brasil, a tradição arquitetônica é de construções de janelas amplas e adoção de ventilação natural, o que propicia a forte influência do ruído externo em seu interior (MÜLLER, 2004).

A inteligibilidade da fala que, como mencionado, é o fator fundamental para o entendimento do que o professor diz em sala de aula e, em consequência, para o aprendizado, requer, para sua avaliação, de um demorado e oneroso ensaio, com a participação dos alunos, denominado teste de articulação, criado por French e Steinberg (1947). Um teste de articulação, de forma bastante resumida, consiste em se apresentar um ditado, podendo ser formado por palavras monossilábicas, que deverá ser anotado pelos presentes. A correção desse ditado, após um adequado tratamento estatístico, fornecerá um valor médio percentual de acertos que constituirá a inteligibilidade da fala na sala em estudo (um número entre 0 e 100%).

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é apresentar os resultados de uma pesquisa de extensão tendo como meta principal a melhoria das condições acústicas das salas de aula de escolas públicas do município de Santa Maria a partir de apoio técnico da área de acústica e vibrações da UFSM. Esta pesquisa tem, como aspecto relevante, a importância de um projeto de extensão no aprimoramento da eficácia do ensino fundamental, uma vez que salas de aula acusticamente inadequadas são um dos maiores responsáveis pela eventual ineficácia na aprendizagem.

3. MÉTODO

Foram medidas as respostas impulsivas mono e biauriculares para quatro posições de microfone e cabeça artificial em cada uma de três salas de aula do ensino fundamental. Em seguida, foi avaliada a inteligibilidade da fala em uma dessas salas, por meio de testes de articulação, onde participaram seus alunos. O método adotado para o levantamento da inteligibilidade da fala foi a aplicação de testes de articulação a partir de três listas anecoicas contendo 20 monossílabos cada uma. Finalmente, foi feita a aurilização de cada uma das listas, a partir da convolução dos sinais anecoicos com a resposta impulsiva biauricular levantada na sala. As aurilizações foram, então, aplicadas, por meio de fones de ouvido, a alunos da mesma turma, obtendo-se, assim, testes de articulação virtual.

3.1. Avaliação da inteligibilidade

Quando se faz a análise acústica de um ambiente é necessário que a destinação da sala seja conhecida. Salas de aula têm como principal fonte sonora a voz, dessa maneira é necessário que parâmetros relacionados a inteligibilidade da fala, bem como tempo de reverberação, definição, fator de clareza, fator de ganho e STI.

O projeto acústico de salas depende diretamente de sua utilização. Em salas para música, uma das necessidades básicas é que a sala promova boa espacialidade (TENENBAUM et. al., 2007; BERANECK, 1996), enquanto em plantas industriais a questão que se impõe é o nível sonoro a que o trabalhador estará exposto (HARRIS, 1998). No que se refere a salas de aula, o propósito essencial é a boa inteligibilidade da fala, de modo que a comunicação entre professor e estudantes se faça sem esforço, facilitando ao máximo a compreensão e, consequentemente, o aprendizado.

Na caracterização da qualidade acústica de salas, os principais parâmetros objetivos a serem considerados são: T_{30} (tempo de reverberação), EDT (tempo de decaimento inicial), C_{50} (fator de clareza, para a palavra), Ts (tempo central), D_{50} (definição), BR (razão de baixos) e a família de IACC (correlação cruzada interauricular), tal como definidas na norma ISO 3382:2008.

Os ensaios para o levantamento das respostas impulsivas para distintos pares fonte/receptor, utilizaram sinais de varredura em frequência (*sweep sine*) (MÜLLER and MASSARANI, 2001), excitando e adquirindo os sinais de resposta via um programa de processamento digital de sinais implantado em microcomputador.

A Figura 1 ilustra um esquema de testes de articulação (MELO, 2012). No intervalo dos testes de articulação, conduzidos a partir de ditado com listas de palavras monossilábicas, a fonte sonora, à direita, emite o sinal sonoro, contendo a varredura em frequência e a cabeça artificial registra a gravação da resposta impulsiva da sala, enviando os sinais ao computador.

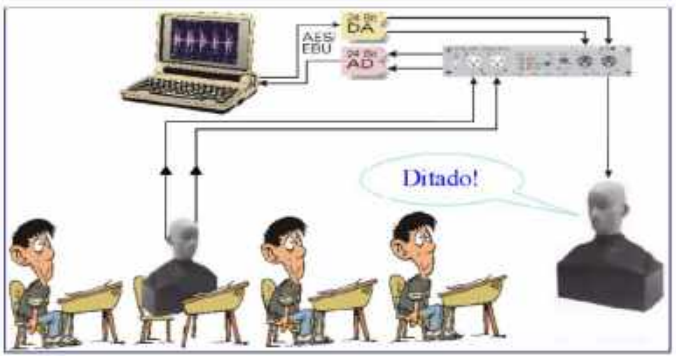


Figura 1 – Ilustração dos testes de articulação conduzidos em sala de aula com emissão e gravação simultâneas (MÜLLER, 2004).

Para o levantamento da inteligibilidade da fala em salas de aula foram executados testes de articulação, segundo as etapas a seguir.

- Preparação de um conjunto de listas de palavras monossilábicas, a partir de um banco de dados contendo gravações de 226 monossílabos registradas em câmara anecoica.
- Condução de testes de articulação em salas de aula do ensino fundamental e médio, onde listas anecoicas são apresentadas aos alunos de cada turma, todas emitidas pela fonte sonora.
- Emissão de varreduras em frequência, com a presença dos alunos, para o levantamento das respostas impulsivas para algumas posições na sala de aula. São emitidas cinco varreduras, de modo a se extrair uma resposta impulsiva média, para cada posição em cada sala ensaiada.
- É registrado o nível de ruído de fundo presente em cada uma das salas ensaiadas, bem como a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar.
- A partir dos resultados obtidos para a inteligibilidade da fala nas salas de aula avaliadas, foi produzido um relatório sobre as condições acústicas encontradas nas escolas participantes do Projeto. Alguns principais parâmetros de qualidade acústica de salas, especialmente T_{30}, D_{50}, C_{50}, IACC e STI foram calculados.

3.1.1. Metodologia de medição da resposta impulsiva mono e biauricular

Para cada sala de aula avaliada, realizou-se a medição da resposta impulsiva com auxílio do software *MatLab*. Gerou-se um *sweep* de seis segundos de duração e gravaram-se os sinais de resposta com os microfones dispostos em quatro pontos de cada sala de aula. A posição da fonte sonora foi centralizada junto ao quadro negro, enquanto os microfones e a cabeça artificial foram posicionados no lugar de algumas cadeiras ocupadas normalmente pelos alunos. A Figura 2 apresenta a configuração do posicionamento do conjunto fonte sonora, microfones e cabeça artificial utilizada em uma das salas de aula ensaiada.



Figura 2 – Configuração com o posicionamento da fonte sonora, cabeça artificial – indicada pelo retângulo vermelho – e microfones distribuídos na sala de aula – indicados pelos círculos vermelhos. (Os autores, 2018).

Ao todo, foram avaliadas neste estudo três salas de aula (Salas 1, 2, e 8). As Salas 1 e 2, são adjacentes, separadas por uma parede lateral removível, feita de madeira e com vários problemas de transmissão sonora. A Sala 8 foi escolhida por ser a mais próxima da rua, estando mais suscetível ao ruído de tráfego. Na Figura 3 é possível observar a parede de madeira que divide as duas salas (seta vermelha). A Figura 4 ilustra a configuração e layout da Sala 8.

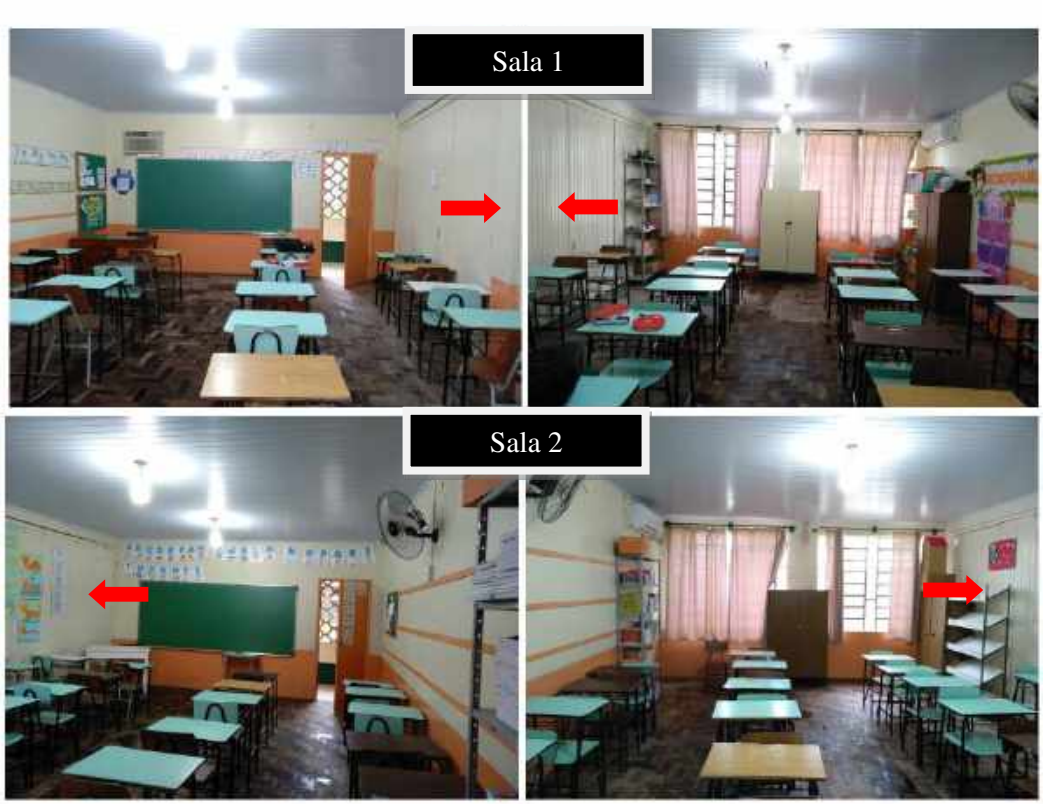


Figura 3 – Salas de aula 1 e 2 com indicação da parede lateral por meio de setas vermelhas. (Os autores, 2018).



Figura 4 – Sala 8 da Escola Municipal Padre Nóbrega. (Os autores, 2018).

3.1.2. Diagramas e conexões

O sinal utilizado para a medição é uma varredura exponencial de senos, conforme sugere a norma ISO 3382 - 2, projetada para excitar todas as frequências dentro da faixa audível (20 Hz a 20 kHz) por um tempo suficientemente grande para excitar a sala até seu estado estacionário em cada frequência. Esse sinal foi gerado no computador utilizando o pacote ITA Toolbox, no MatLab. O sinal, então, é enviado para a interface de áudio, responsável pela conversão digital/analógico (DAC) que, por sua vez, o transmite para o amplificador de potência 2716. Finalmente, completando a cadeia de excitação da sala, o sinal amplificado é enviado para a fonte dodecaédrica. Os microfones posicionados no interior da sala captam o sinal e o enviam à interface de áudio, que realiza a conversão analógico/digital (ADC), para gravação do sinal captado, na forma de um vetor temporal, no MatLab.

A cadeia de medição adotada neste estudo consistiu, de um modo geral, no uso dos microfones conectados à *medusa*, e esta, por sua vez, conectada à interface de áudio, conforme mostra a Figura 5.

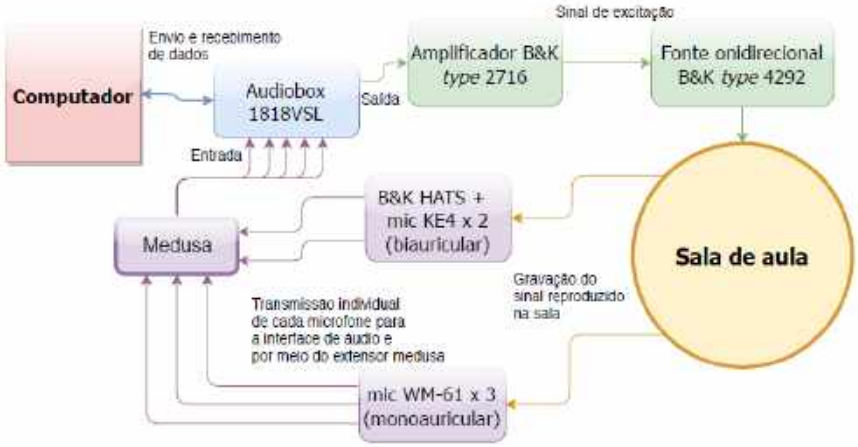


Figura 5 – Diagrama de blocos do fluxo de sinais para obtenção das respostas impulsivas das salas de aula. (Os autores, 2018).

É importante observar que, mesmo o sinal sendo projetado de 20 Hz a 20 kHz, a reprodução do mesmo fica limitada devido à função resposta em frequência (FRF) da fonte sonora, assim como o espectro gravado pelos microfones fica limitado pela FRF destes, impondo desse modo uma coloração imposta pelo sistema de reprodução-gravação no sinal de interesse. Foram utilizados dois conjuntos de microfones para captação do sinal na sala. Um par de microfones KE4 da Sennheiser e um trio de microfones WM-61 da Panasonic. O trio WM-61 foi utilizado como microfone onidirecional, monoauricular, para obtenção da resposta impulsiva da sala; já o par KE4 foi utilizado para obtenção da resposta impulsiva biauricular da sala. Os microfones KE4 foram posicionados na entrada do conduto auditivo da cabeça artificial, para possibilitar a aquisição de sinais biauriculares com a interface de áudio, levando à medição da resposta impulsiva biauricular da sala.

3.1.3. Realização das medições

Mediu-se uma posição de fonte por sala para quatro posições de receptores (três microfones e uma cabeça). As Figuras 6 e 7 mostram as plantas baixas das salas avaliadas, assim como o posicionamento da fonte sonora e dos receptores.

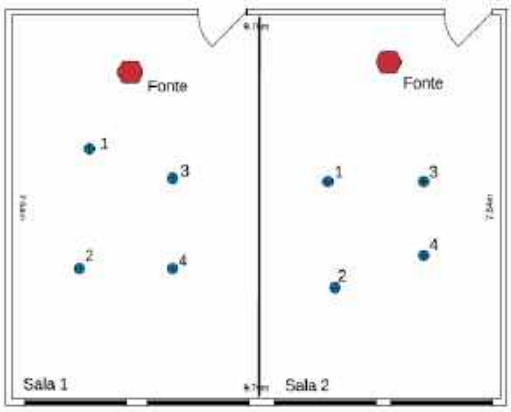


Figura 6 – Planta baixa, com indicação do posicionamento da fonte e receptores, das Salas 1 e 2, separadas por uma parede lateral removível. (Os autores, 2018).



Figura 7 – Planta baixa, com indicação do posicionamento da fonte e receptores, da Sala 8. (Os autores, 2018).

Escolheu-se utilizar a fonte sonora centralizada à frente do quadro negro, já que esta é a região normalmente ocupado pelo(a) professor(a). A fim de melhor caracterizar as salas, escolheu-se quatro posições de microfones de maneira que estes estivessem o mais distante possível cada um dos outros, levando em consideração a limitação de comprimento dos cabos utilizados nas ligações.

Em um primeiro momento, uma cabeça artificial foi colocada na Posição 1 e os demais microfones nas Posições 2, 3 e 4. Realizaram-se três medições seguidas, objetivando a obtenção de uma média, para, então, haver a troca de posição. A cabeça artificial ocupa a Posição 2, e o microfone que então ocupava esta posição foi colocado na Posição 1, realizando-se novamente três medições. Dessa forma, muda-se a cabeça artificial de posição até que se faça a medida em todos os quatro pontos. Ao todo, a medição de cada sala de aula durou, em média, 40 minutos e a medição completa demandou 3 horas e meia para sua realização.

4. RESULTADOS

4.1. Tempo de reverberação

A Figura 8 mostra a comparação entre os valores dos tempos de reverberação (TRs) encontrados para as três salas medidas. Nota-se que o TR da Sala 8 difere notavelmente dos demais. Já os TRs das Salas 1 e 2 se aproximam, na maioria das bandas de frequência. Isso deve-se ao fato do layout da Sala 8 ser bem diferente daquele das Salas 1 e 2. De acordo com a norma ANSI/ASA S12.60-2010 o tempo de reverberação em sala de aula com volume menor que 283 m^3 (10.000 ft^3) não deve ser superior a 0,6 s nas bandas de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz. Se faz necessário, portanto, o controle do TR em todas as salas examinadas, já que o valor encontrado é superior ao recomendado. As Figuras 9, 10 e 11 mostram os TRs obtidos em cada uma das quatro posições das Salas 1, 2 e 8, respectivamente.

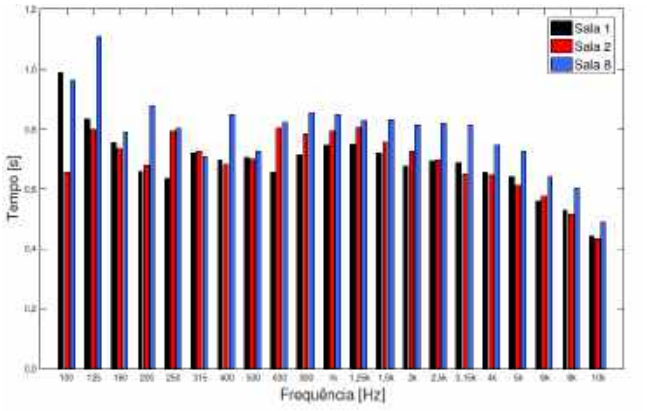


Figura 8 – Comparação dos tempos de reverberação (T_{30}) médios entre as salas avaliadas. (Os autores, 2018).

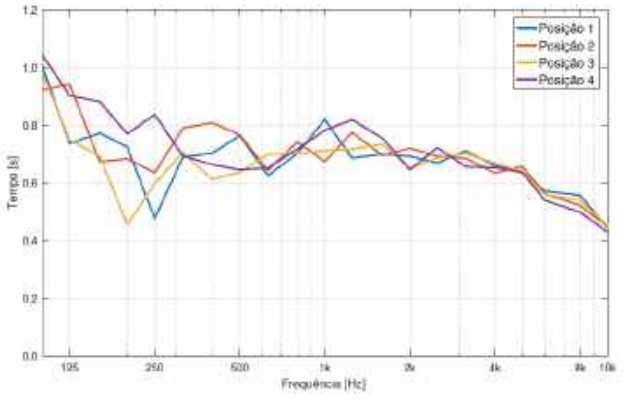


Figura 9 – Comparação do tempo de reverberação (T_{30}) nas quatro posições de medição da Sala 1. (Os autores, 2018).

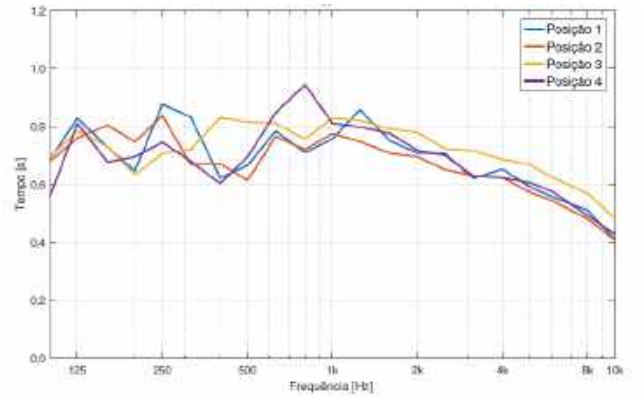


Figura 10 – Comparação do tempo de reverberação (T_{30}) nas quatro posições de medição da Sala 2. (Os autores, 2018).

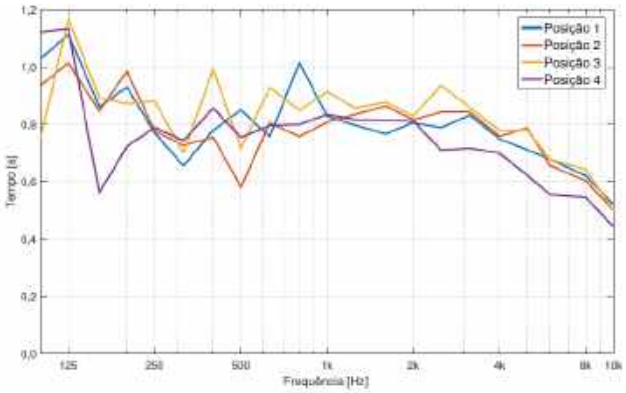


Figura 11 – Comparação do tempo de reverberação (T_{30}) nas quatro posições de medição da Sala 8. (Os autores, 2018).

4.2. Ganho

Ganho é um parâmetro que mede a influência da sala no *loudness,* ou seja, a sua amplificação. Em outras palavras, está associado ao suporte que a sala oferece ao orador. A presença de um campo reverberante ajuda o orador, no caso da escola, o(a) professor(a), a falar por mais tempo sem se fatigar. Porém, deve-se levar em conta que aumentar o ganho aumentando o campo reverberante leva a um decréscimo da inteligibilidade, portanto é necessário que haja um bom compromisso entre esses fatores (BRANDÃO, 2018).

A Figura 12 mostra a comparação entre os ganhos calculados para cada sala de aula medida.

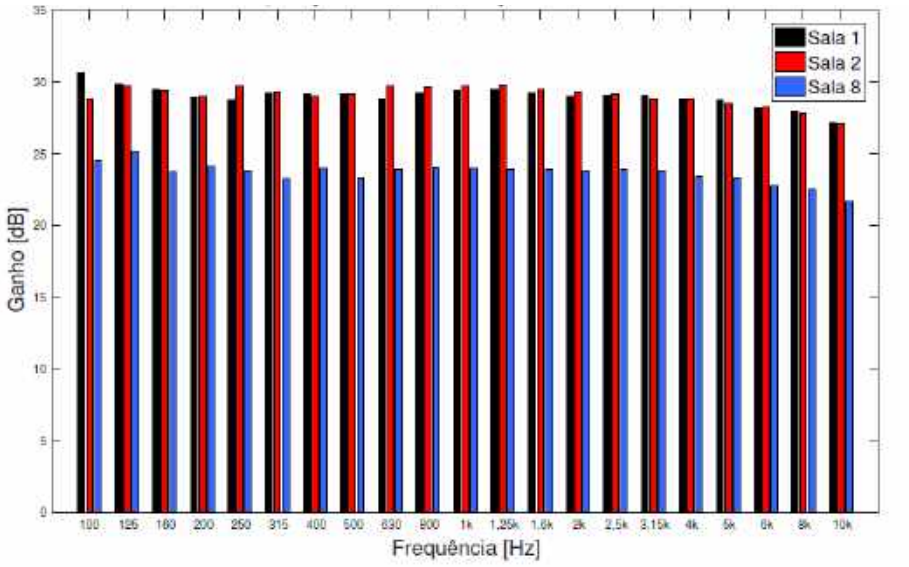


Figura 12 – Comparação do ganho entre salas de aula avaliadas no estudo. (Os autores, 2018).

Nota-se que o ganho da Sala 8 é relativamente menor (aproximadamente 5 dB) ao encontrado nas Salas 1 e 2, mesmo aquela tendo maior tempo de reverberação médio. Isso se deve ao fato de a sala possuir maior volume em relação às outras duas. Já que todas elas possuem absorção parecida (materiais e mobiliário similares compõem todas as salas), as paredes mais distantes do orador na Sala 8 influenciam na queda do ganho.

4.3. Construção dos ditados de monossílabos

O segundo passo do experimento realizado foi a aplicação de três ditados, contendo 20 monossílabos cada, a fim de avaliar a inteligibilidade da fala. A construção dos ditados foi feita a partir da escolha de 60 monossílabos anecoicos, distribuídos em três listas diferentes de forma que existissem sons contendo a maior variedade de sílabas e vogais possível. As listas são apresentadas na Tabela 1. Cada lista tem, em média, 2 minutos de duração com 5 segundos de intervalo entre um monossílabo e outro, além de um som de alerta no início e outro ao final do ditado.

Tabela 1 – Listas de monossílabos anecoicos, escolhidos para utilização nos testes de articulação. (Os autores, 2018).

	Lista 1	Lista 2	Lista 3
1	Diz	Clã	Céu
2	Fé	Cós	Jó
3	Au	Dó	Mal
4	Ei	Mel	Pé
5	Léo	Nu	Tem
6	Lha	Quem	Vai
7	Dom	Rei	Teu
8	Bis	Tom	Pra
9	Mão	Chão	Rim
10	Nha	Ca	Vê
11	Oi	Sem	Sol
12	Flu	Tal	Fim
13	Foi	Véu	Caos
14	Grau	Fá	Em
15	Pão	Pós	No
16	Boi	Se	Pré
17	Bras	Bla	Mim
18	Ai	Cão	Na
19	Fla	Aos	Cruz
20	Gol	Má	Gril

4.4. Metodologia de aplicação dos ditados

Adotando a mesma fonte onidirecional utilizada na medição da resposta impulsiva, aplicou-se o sinal do ditado com a fonte sonora posicionada em frente à turma da Sala 2. Foram distribuídas aos alunos folhas com instruções e canetas, além de ser feito um breve treinamento com uma lista teste contendo três monossílabos. Também foram dadas algumas explicações pertinentes sobre acústica, tais como, ruído de fundo, problemas relacionados ao ruído e inteligibilidade.

Durante a aplicação dos ditados, foi posicionado um microfone para gravação do ruído de fundo. No intervalo dos testes de articulação foi efetuado o levantamento da resposta impulsiva biauricular, na presença dos alunos.

Os alunos participantes dos testes de articulação tinham entre 11 e 13 anos de idade. A dificuldade por parte do corpo docente da escola em liberar os alunos impossibilitou a aplicação dos testes de articulação nas três salas de aula consideradas.

4.5. Resultados de inteligibilidade

Esta seção irá mostrar os resultados dos ditados, assim como a média de acertos por aluno e a média de acertos por palavra. As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam os resultados dos testes de articulação realizados na Sala 2.

Tabela 2 – Resultados da Lista 1 para a turma da Sala 2. (Os autores, 2018).

Turma 1 Lista 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Média
Diz	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0,80
Fé	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0,20
Au	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,00
Ei	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,00
Léo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,00
Lha	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0,33
Dom	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,93
Bis	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,00
Mão	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,93
Nha	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0,87
Oi	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,00
Flu	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0,67
Foi	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0,33
Grau	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,93
Pão	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,87
Boi	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,00
Bras	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0,87
Ai	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,00
Fla	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0,33
Gol	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0,33
Acertos	15	10	16	18	17	17	15	16	15	18	18	16	17	15	14	15	
Média	0,75	0,5	0,8	0,9	0,85	0,85	0,75	0,8	0,75	0,9	0,9	0,8	0,85	0,75	0,7	0,75	

Tabela 3 – Resultados da Lista 2 para a turma da Sala 2. (Os autores, 2018).

Turma 1 Lista 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Méd
Clã	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0,81
Cós	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0,81
Dó	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Mel	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Nu	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Quem	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Rei	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0,75
Tom	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,88
Chão	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0,88
Ca	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0,75
Sem	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0,88
Tal	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0,75
Véu	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,88
Fá	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06
Pós	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0,81
Se	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0,81
Bla	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0,63
Cão	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0,81
Aos	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0,81
Má	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Acertos	18	0	14	16	18	18	19	19	17	16	19	17	18	11	18	18	
Média	0,9	0	0,7	0,8	0,9	0,9	0,95	0,95	0,85	0,8	0,95	0,85	0,9	0,55	0,9	0,9	

Como se observa nos resultados das três listas aplicadas à turma da Sala 2, as médias de acertos para palavras começadas em F, tais como *Fé, Foi, Fá e Fim* foi muito baixa. A partir de uma breve análise do espectro destas palavras, em comparação com o espectro de palavras com alta taxa de acerto, foi constatada a proeminência de componentes de 1 kHz a 2 kHz, mostrando que falta absorção acústica nessas bandas de frequência na Sala 2, primordiais para o bom entendimento da voz, e consequentemente, o bom desempenho em sala de aula.

Tabela 4 – Resultados da Lista 3 para a turma da sala 2. (Os autores, 2018).

Turma 1 Lista 3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Médi
Céu	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Jô	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0,88
Mal	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0,88
Pé	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Tem	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Vai	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Teu	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Pra	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,88
Rim	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0,56
Vô	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Sol	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Fim	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0,50
Caos	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Em	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0,88
No	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Pré	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Mim	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Na	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,88
Cruz	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,94
Gril	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0,88
Acertos	19	0	19	20	19	17	19	19	19	20	18	19	18	20	17	18	19	
Média	0,95	0	0,95	1	0,95	0,85	0,95	0,95	1	0,9	0,95	0,9	1	0,85	0,9	0,95	

4.6. Aurilização

Aurilização, segundo Vorländer (2008), é o processo de criar sons audíveis através de dados simulados, medidos ou sintetizados. Dessa forma, foi feita a aurilização da Sala 2, por meio da convolução da resposta impulsiva biauricular, gravada no dia da aplicação dos ditados, com as mesmas listas utilizadas nos ditados, além da adição do ruído de fundo gravado também durante a aplicação dos testes. Assim, os mesmos ditados foram novamente aplicados aos alunos, através de fones de ouvido, a fim de comparar os seus resultados. Foi utilizado o fone de ouvido Bose QC25 com controle ativo de ruído, com intuito de diminuir o ruído de fundo, presente no local durante a realização do teste virtual, e melhorar a relação sinal-ruído do teste.

Nessa etapa, apenas 10 alunos compareceram aos testes, já que foram realizados em dezembro e muitos deles já se encontravam em férias. Porém como mostram as Tabelas 5, 6 e 7, os resultados dos testes virtuais se mostraram piores, com índices de acerto inferiores. Dois fatores podem justificar esse resultado.

Tabela 5 – Resultados da Lista 1 aurilizada para a turma da Sala 2. (Os autores, 2018).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Diz	X	X	X	1	1	X	1	0	1	1	1	0	1	X	1	X	0,8
Fé	X	X	X	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	X	0	X	0,0
Au	X	X	X	1	1	X	1	1	1	1	1	1	1	X	1	X	1,0
Ei	X	X	X	1	1	X	1	0	1	1	1	1	1	X	1	X	0,9
Léo	X	X	X	1	1	X	1	1	1	1	1	1	1	X	1	X	1,0
Lha	X	X	X	1	0	X	0	0	0	0	1	0	1	X	0	X	0,3
Dom	X	X	X	1	1	X	1	1	1	1	1	1	1	X	1	X	1,0
Bis	X	X	X	1	1	X	1	1	1	1	1	0	1	X	1	X	0,9
Mão	X	X	X	1	1	X	1	1	1	1	1	1	1	X	1	X	1,0
Nha	X	X	X	1	1	X	0	1	1	1	1	1	1	X	1	X	0,9
Oi	X	X	X	1	1	X	1	1	0	1	1	1	1	X	1	X	0,9
Flu	X	X	X	1	1	X	0	0	0	0	0	0	0	X	1	X	0,3
Foi	X	X	X	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	X	0	X	0,0
Grau	X	X	X	1	1	X	1	1	1	1	1	1	1	X	1	X	1,0
Pão	X	X	X	1	1	X	0	1	1	1	1	1	1	X	1	X	0,9
Boi	X	X	X	1	1	X	1	1	1	1	1	1	1	X	0	X	0,9
Braço	X	X	X	1	1	X	1	1	1	1	1	1	1	X	1	X	1,0
Ai	X	X	X	1	1	X	1	0	1	1	1	1	0	X	1	X	0,8
Fla	X	X	X	0	0	X	0	0	1	0	0	0	0	X	0	X	0,1
Gol	X	X	X	0	1	X	0	0	0	0	0	0	0	X	0	X	0,1
Acertos	0	0	0	16	16	0	12	11	14	14	15	12	14	0	14	0	
Média	X	X	X	0,8	0,8	X	0,6	0,55	0,7	0,7	0,75	0,6	0,7	X	0,7	X	

Tabela 6 – Resultados da Lista 2 aurilizada para a turma da Sala 2. (Os autores, 2018).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Clá	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Cós	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Dó	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Mel	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Nu	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	0	X	0	X	0,8
Quem	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Rei	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	0	1	X	1	X	0,9
Tum	X	X	X	0	1	X	0	1	1	X	1	1	1	X	1	X	0,8
Chão	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Ca	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Sem	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Tal	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Vêu	X	X	X	1	0	X	1	1	1	X	0	1	1	X	1	X	0,8
Fá	X	X	X	0	1	X	0	0	0	X	0	1	1	X	0	X	0,3
Pós	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Se	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Bla	X	X	X	0	1	X	1	0	1	X	1	0	0	X	0	X	0,4
Cão	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Aos	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Mã	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Acertos	0	0	0	17	19	0	18	18	18	19	0	18	18	18	0	17	0	
Média	X	X	X	0,85	0,95	X	0,9	0,9	0,9	0,95	X	0,9	0,9	0,9	X	0,85	X	

Tabela 7 – Resultados da Lista 3 aurilizada para a turma da Sala 2. (Os autores, 2018).

Turma 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Jo	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Mal	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Pé	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Tem	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Vai	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Teu	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Pra	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Rim	X	X	X	1	0	X	0	0	1	X	0	0	1	X	0	X	0,3
Vô	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Sol	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Fim	X	X	X	1	0	X	0	0	0	X	0	0	1	X	1	X	0,3
Caos	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Em	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
No	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Pré	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Mim	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Na	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Cruz	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	1	1	X	1	X	1,0
Gril	X	X	X	1	1	X	1	1	1	X	1	0	1	X	1	X	0,9
Acertos	0	0	0	20	18	0	18	18	19	0	18	17	20	0	19	0	
Média	X	X	X	1	0,9	X	0,9	0,9	0,95	X	0,9	0,85	1	X	0,95	X	

O primeiro fator deve-se ao fato de uma escolha não muito feliz quanto à localização da cabeça artificial na Sala 2, onde ela foi posicionada próximo à parede removível, região onde os resultados dos testes de articulação foram piores devido à interferência dessa parede. O segundo fator deve-se ao fato de que a cabeça artificial utilizada possuía dimensões antropométricas de adulto, ao passo que os alunos, como já

mencionado, eram crianças de 11 a 13 anos, portanto, com funções de transferência associadas à cabeça bem distintas (FELS, 2008).

5. CONCLUSÕES

Apesar de a acústica de um ambiente como uma sala de aula ser tão importante quanto a cadeira na qual a criança está sentada, não lhe é dada a devida importância em nosso país. Os resultados dos testes refletem exatamente isto. Com a exclusão da criança de número 2, que comprovadamente sofre de dislexia, todos os outros alunos se mostraram aptos à realização do teste, porém como é visto, a taxa de acertos em determinadas palavras é baixíssima, enquanto em outras muito alta.

Dessa forma, comprova-se a necessidade de condicionamento acústico adequado para que a aprendizagem não seja prejudicada, melhorando dessa maneira a qualidade de ensino e criando um ambiente mais saudável.

Um estudo cientificamente fundamentado para a avaliação das condições acústicas das salas de aula das escolas públicas de ensino fundamental do município de Santa Maria e, em particular, a avaliação da inteligibilidade da fala nas salas de aula, constitui uma contribuição importante que o Departamento de Estruturas e Construção Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria pode oferecer para a melhoria do ensino nas escolas públicas da região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

R. Costa E J.G. Querido. **A qualidade acústica ambiental nas salas de aula das escolas públicas, sua influência no processo ensino-aprendizado e na qualidade de vida do professor**. Acústica e Vibrações, 40: 10–20, 2009.

A. Eniza e S.L. Garavellia. **Acústica de salas de aula: estudo de caso em duas escolas da rede privada do DF**. Revista da Sociedade Brasileira de Acústica, 31:2-12, 2003.

J.S. Bradley. **Predictors of speech intelligibility in rooms**. J. Acoust. Soc. Am., 80:837-845, 1986.

J.S. Bradley. **Optimizing the decay range in room acoustics measurements using maximum-length sequences techniques**. J. AES, 44:266–273, 1996.

J.S. Bradley, R.D. Reich and S.G. Norcross. **On the combined effects of signal-to-noise ratio in room acoustics on speech intelligibility**. J. Acoust. Soc. Am., 106:1820–1828, 1999.

S. Müller. **Metrologia aplicada a qualidade acústica de salas de aula — Testes de inteligibilidade e medições bi-auriculares em escolas públicas**. Relatório técnico INMETRO, 2004.

N.R. French and J.C. Steinberg. **Factors governing the intelligibility of speech sounds**. J. Acoust. Soc. Am., 19:90-119, 1947.

Springer-Verlag, New York, 1998.

R.A. Tenenbaum, T.S. Camilo, J.C.B. Torres. **Hybrid method for numerical simulation of room acoustics with auralization: Part 1 – Theoretical and numerical aspects**. J. Bras. Soc. Mech. Sci. and Eng., 29(2):211-221, 2007.

L. Beranek. **Concert and Opera Houses: How They Sound**. Acoustical Society of America, Woodbury, 1996.

C.M. Harris. **Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control**. 3rd Ed. Acoustical Society of America, Woodbury, 1998.

S. Müller and P. Massarani**. Transfer-function measurement with sweeps**. J. Audio Eng. Soc., 49(6):443-471, 2001.

V.S.G. Melo. **Avaliação de inteligibilidade de salas de aula de ensino fundamental a partir de respostas impulsivas biauriculares obtidas com cabeça artificial de dimensões infantis**. Tese de D.Sc. PEM/COPPE/UFRJ, 2012.

EN ISO. **3382-2: 2008**. Acoustics. Measurements of room acoustics parameters. Part, 2:3382–2.

ANSI Standard ANSI. **Asa s12. 60-2010/part 1** american national standard acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools, part 1: Permanent schools. USA: Acoustical Society of America, 2010.

Eric Brandão. **Acústica de salas: projeto e modelagem**. Editora Blucher, 2018.

Michael Vorländer. **Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality**. Springer Science & Business Media, 2007.

FELS, J. **From children to adults: How binaural cues and ear canal impedances grow**. Ph.D. Thesis, Institut für Technische Akustik, Aachen University, Aachen, Germany, 2008.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFSM pelos recursos financeiros aplicados no financiamento do projeto de extensão através do Edital FIEX CT 2018.