



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

**QUALIDADE ACÚSTICA DA SALA DE AULA:
UMA AVALIAÇÃO PELOS ALUNOS**

Marcio Ferreira Lacerda

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Carlos Eduardo Aguiar

Rio de Janeiro
Janeiro de 2018

QUALIDADE ACÚSTICA DA SALA DE AULA:
UMA AVALIAÇÃO PELOS ALUNOS

Marcio Ferreira Lacerda

Orientador: Carlos Eduardo Aguiar

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Dr. Carlos Eduardo Aguiar (Presidente)

Dra. Irina Nasteva

Dr. Hugo Milward Riani de Luna

Rio de Janeiro
Janeiro de 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

L131q Lacerda, Marcio Ferreira
Qualidade Acústica da Sala de Aula: Uma Avaliação pelos Alunos / Marcio Ferreira Lacerda - Rio de Janeiro: UFRJ / IF, 2018. viii, 93 f.: il.;30cm.
Orientador: Carlos Eduardo Aguiar
Dissertação (mestrado) – UFRJ / Instituto de Física / Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2018.
Referências Bibliográficas: f. 92-93.
1. Ensino de Física. 2. Reverberação. 3. Ruído. 4. Qualidade acústica. I. Aguiar, Carlos Eduardo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. III. Qualidade Acústica da Sala de Aula: Uma Avaliação pelos Alunos

Dedico esta dissertação à minha família, em especial
à minha esposa Marcella.

Agradecimentos

À Marcella, pela compreensão, pelo incentivo e pelo seu amor ilimitado.

À Melissa e ao Marcos, por serem as minhas fontes de inspiração e superação.

À minha mãe (*in memoriam*) Maria Alice Ferreira Lacerda, que mesmo diante de todas as adversidades, sempre me amparou com muito carinho e dedicação.

Ao meu ex-professor e orientador desta dissertação, Carlos Eduardo Magalhães de Aguiar, por ser um professor e ser humano exemplar, pela sua dedicação e disponibilidade, por saber direcionar este trabalho com muito comprometimento e acreditar em mim em todos os momentos.

Aos docentes do MPEF pelo aprendizado: Alexandre Carlos Tort, Deise Miranda Vianna, Felipe Siqueira de Souza da Rosa, Hélio Salim de Amorim, Ildeu de Castro Moreira, Lúcia Helena Coutinho, Marta Feijó Barroso, Marcus Venicius Cougo Pinto e Vitorvani Soares.

À Sra. Dilma Santos, secretária do MPEF, por sua ajuda e orientação nas atividades administrativas.

Aos colegas de turma e aos amigos, pela convivência e colaboração.

Aos alunos que participaram da proposta deste trabalho, pelo envolvimento com as aulas.

RESUMO

QUALIDADE ACÚSTICA DA SALA DE AULA: UMA AVALIAÇÃO PELOS ALUNOS

Marcio Ferreira Lacerda

Orientador: Carlos Eduardo Aguiar

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

A qualidade acústica de uma sala de aula pode influenciar consideravelmente o rendimento acadêmico dos estudantes que a utilizam. Nesta dissertação discutimos as variáveis acústicas mais relevantes para a avaliação dessa qualidade – o nível de ruído e o tempo de reverberação – e seu efeito sobre quanto os alunos percebem daquilo que é dito pelo professor. Propomos uma abordagem simples, acessível a alunos ensino médio, dos conceitos físicos envolvidos no estudo da acústica de um ambiente. Também propomos uma atividade prática a esses alunos: a avaliação da qualidade acústica de sua sala de aula. A aplicação dessas propostas a duas turmas do ensino médio é relatada e seus resultados são discutidos.

Palavras-chave: Ensino de Física; Reverberação; Ruído; Acústica da Sala de Aula.

Rio de Janeiro
Janeiro de 2018

ABSTRACT

CLASSROOM ACOUSTICS: AN ASSESSMENT BY THE STUDENTS

Marcio Ferreira Lacerda

Supervisor: Carlos Eduardo Aguiar

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

The acoustics of a classroom can influence considerably the academic attainment of the students that have classes in there. In this dissertation we discuss the variables that are most important in assessing the acoustical quality of a classroom – noise level and reverberation time – and how they affect the students' perception of what is said by the teacher. We propose a simple approach, accessible to high school students, to the basic physics concepts involved in studying the acoustics of an environment. We also propose a practical activity to these students: the assessment of the acoustical quality of their classroom. The implementation of these proposals in two high school classes is described and the results are discussed.

Keywords: Physics Education; Reverberation; Noise; Classroom Acoustics.

Rio de Janeiro
Janeiro, 2018

Sumário

Capítulo 1 Introdução	1
Capítulo 2 Acústica na sala de aula	4
2.1. Ruído na sala de aula	4
2.2. Reverberação na sala de aula	8
2.3. Ruído e reverberação na sala de aula.....	10
2.4. A distância do aluno ao professor	12
2.5. Qualidade acústica: uma proposta para o ensino médio.....	13
Capítulo 3 Ruído e Reverberação na Sala de Aula.....	15
3.1. Propagação do som.....	15
3.2. Frequência e intensidade do som.....	15
3.3. Níveis de ruídos aceitáveis	17
3.4. Reflexão e eco	18
3.5. Reverberação: múltiplos ecos.....	19
3.6. Tempo de reverberação	20
3.7. Tempo de reverberação e qualidade acústica	23
3.8. Ruído e qualidade acústica da sala de aula.....	23
3.9. A matemática da reverberação	24
Sobre a utilização do modelo matemático no ensino médio	28
Capítulo 4 Atividades Práticas no Ensino Médio.....	29
4.1. Questionário Prévio	29
4.2. Respostas ao questionário.....	30
Propagação do som: questões 1 a 3	30
Eco: questões 4 e 5	34
Reverberação: questões 6 a 8.....	36
Ruído de fundo: questões 9, 10 e 11.....	38
Som alto: questões 12 e 13	40
4.3. Os encontros com os alunos	41
Primeiro encontro	41
Segundo encontro	44
4.4. Resultados das atividades práticas.....	46
Capítulo 5 Conclusão	51
Apêndice A. Qualidade Acústica da Sala de Aula	54
1. Propagação do som.....	56
2. Frequência e intensidade do som.....	56
3. Níveis de ruídos aceitáveis	57
4. Reflexão e Eco.....	59
5. Reverberação: múltiplos ecos.....	60
6. Tempo de reverberação	61
7. Tempo de reverberação e qualidade acústica	64
8. Ruído e qualidade acústica da sala de aula.....	65
Apêndice B. A Matemática da Reverberação.....	66
Apêndice C. Questionário Pré-Aula	73
Apêndice D. Guias das Atividades Práticas	77
Apêndice E. Roteiros das Aulas	82
Aula 1: Reverberação e acústica em sala de aula	83
Aula 2: Medida do Tempo de Reverberação	88
Referências Bibliográficas.....	92

Capítulo 1

Introdução

É comum associar a aprendizagem dos alunos às metodologias utilizadas pelos docentes e a fatores sociais, culturais e econômicos. No entanto, existem aspectos intrínsecos à sala de aula – arquitetura, acústica, iluminação, etc. – que também podem influenciar significativamente o ensino e a aprendizagem.

A reverberação e o ruído, quando em excesso, representam um problema do local de estudo que pode comprometer consideravelmente a inteligibilidade da fala do docente, prejudicar a concentração dos alunos e, conseqüentemente, afetar negativamente a prática pedagógica. A reverberação é a persistência acústica de um som em um ambiente. Em salas de aula comuns nos Estados Unidos a reverberação e o ruído fazem com que alunos com audição normal compreendam apenas 75% de uma lista de palavras (em inglês) e não reconheçam as outras 25% [AAS 2000]; é como se ao ler um livro escolar um aluno compreendesse apenas três de cada quatro palavras. A qualidade acústica da sala de aula não compromete da mesma forma a aprendizagem de todos os alunos – estudantes com problemas auditivos, mesmo leves, terão certamente mais dificuldades [Crandell 2000]. Para crianças nos anos escolares iniciais os obstáculos são ainda mais acentuados, pois elas estão formando seu vocabulário e têm dificuldades para compreender as frases a partir de seu contexto. Os professores também são beneficiados por um ambiente com boa qualidade acústica, pois além de serem compreendidos com maior facilidade, correm menos risco de sofrer problemas fonoaudiológicos devido ao uso excessivo de altos níveis de voz.

É importante, portanto, avaliar a qualidade acústica de uma sala de aula. Particularmente interessante é a possibilidade dos próprios alunos realizarem essa avaliação, ainda que de maneira informal, não-profissional. Além de estimular os alunos a se preocuparem com as condições dos ambientes que frequentam no seu dia a dia, a avaliação da qualidade acústica da sala de aula permite ao professor de Física apresentar conceitos importantes como propagação e reflexão do som, intensidade sonora e sua medida em decibéis, reverberação e ruído. As medidas envolvidas nessa avaliação introduzem os alunos ao uso de sensores (o decibelímetro) e à aquisição e análise de dados em computadores.

Até onde sabemos, nos periódicos dedicados ao Ensino de Ciências quase não existem trabalhos que tratem da acústica da sala de aula. Os livros de Física do ensino médio geralmente falam sobre a reverberação, embora de forma muito sucinta e sem mencionar seus efeitos sobre a compreensão daquilo que se pretende ouvir. O ruído e suas consequências não são mencionados nos textos que consultamos.

O objetivo desta dissertação é propor uma abordagem acessível a alunos do ensino médio sobre os parâmetros que definem a qualidade acústica de uma sala de aula – essencialmente o nível de ruído e o tempo de reverberação. A qualidade acústica é normalmente considerada como uma função dessas variáveis, determinada empiricamente pelo grau de compreensão da fala [Bradley 1986]. Parte essencial de nossa proposta é que as medidas do nível de ruído e tempo de reverberação, e a consequente avaliação da qualidade acústica, sejam realizadas pelos alunos.

A proposta foi aplicada em sala de aula com alunos de duas turmas do ensino médio. A introdução aos conceitos relevantes para a compreensão e realização do trabalho foi feita pelo professor, adotando, em parte, métodos do “Ensino sob Medida” (*Just in Time Teaching*).

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira. Iniciamos o Capítulo 2 com a discussão dos principais parâmetros (reverberação e ruído) que influenciam a qualidade acústica da sala de aula. No mesmo capítulo abordamos como essa qualidade afeta os estudantes e pode prejudicar a aprendizagem escolar. Mostramos também os valores dos parâmetros acústicos sugeridos pelas normas técnicas de alguns países e resultados típicos encontrados em escolas no Brasil e fora dele. No Capítulo 3 apresentamos nossa proposta de abordagem da acústica da sala de aula, na forma de material didático a ser utilizado por professores e alunos do ensino médio. No mesmo capítulo também descrevemos um modelo matemático simples da reverberação, que pode ser utilizado de acordo com o interesse dos professores e alunos. Mostramos no Capítulo 4 como transcorreu uma aplicação desta proposta no ensino médio, que incluiu a avaliação pelos alunos da qualidade acústica de sua sala de aula. Por fim, apresentamos nossas conclusões no Capítulo 5, assim como possíveis extensões deste trabalho.

O material instrucional produzido na dissertação encontra-se destacado em apêndices para facilitar o seu uso por professores e estudantes. O material de leitura que foi preparado para os estudantes está apresentado no Apêndice A. No Apêndice B está o material sobre a matemática da reverberação, que pode, como já mencionamos, ser utilizado de forma opcional por professores e alunos. No Apêndice C está o

questionário pré-aula distribuído aos alunos e utilizado num contexto inspirado pelo “ensino sob medida”. Os guias das atividades práticas estão no Apêndice D. Finalmente, o Apêndice E apresenta os slides exibidos aos alunos durante as aulas.

Capítulo 2

Acústica na sala de aula

Diversos fenômenos acústicos podem prejudicar a percepção de sons pelos estudantes em uma sala de aula. Alguns dos mais importantes são o tempo de reverberação, a relação entre o nível da voz do professor e o ruído de fundo, e a distância entre o professor e o aluno. Essas variáveis não afetam todos os alunos da mesma forma; aqueles que apresentam deficiência auditiva serão mais prejudicados do que aqueles com audição normal, quem está mais longe do docente ouvirá com mais dificuldade o que é dito, crianças pequenas terão mais empecilhos que os adolescentes.

2.1. Ruído na sala de aula

Em uma sala de aula, a fala do professor é habitualmente transmitida para os alunos com interferência de ruídos de fundo, produzidos na própria sala, no ambiente escolar ou externamente à escola. O ruído pode ser considerado como qualquer som audível indesejável, que atrapalha o que um aluno deveria ouvir na aula. O ruído de fundo na sala de aula afeta a capacidade de o aluno compreender o que é dito pelo professor. O ruído em excesso prejudica principalmente a compreensão de consoantes, o que reduz significativamente a habilidade do ouvinte entender o discurso, já que essa habilidade depende essencialmente do reconhecimento das consoantes [Crandell 2000].

O ruído produzido na sala de aula vem normalmente de ventiladores, aparelhos de ar condicionado e dos próprios alunos. O ambiente escolar contribui com ruídos gerados nas salas contíguas, pátio de recreio, ginásio, corredores, etc. O ambiente externo à escola também é uma fonte comum de ruído, vindo, por exemplo, da construção civil, trânsito de veículos, aviões, etc. Em geral é difícil determinar o valor do ruído de fundo em uma sala de aula, pois o mesmo oscila no decorrer do tempo e isso dificulta a sua determinação. A intensidade do ruído em um ambiente pode ser obtida com um medidor de nível de pressão sonora (NPS) e normalmente é dado em uma escala de decibéis (dB). Também é usada a escala dBA, ponderada para reproduzir a sensibilidade média do ouvido humano a diferentes frequências em situações de baixa intensidade do som. Existem também escalas dBB e dBC, apropriadas para sons de alta e altíssima intensidade (a última geralmente é utilizada para fiscalização do ruído). A

Tabela 2.1 mostra o resultado de estudos do nível de ruído de fundo em salas de aula ocupadas e desocupadas [Crandell 2000].

Estudo	Níveis de ruído da sala de aula	
	Níveis com a sala desocupada	Níveis com a sala ocupada
Sanders (1965)	42 dBB a 58 dBB	52 dBB a 69 dBB
Nober & Nober (1975)	---	65 dBA
Bess, Sinclair & Riggs (1984)	41 dBA	56 dBA
Finitzo-Hieber (1988)	---	48 dBA a 68 dBA
Crandell & Smaldino (1995)	51 dBA	---

Tabela 2.1: Nível de ruído da sala de aula obtido em diferentes estudos. Adaptado de [Crandell 2000].

Em um estudo realizado em cinco escolas brasileiras localizadas na região Sul, foram medidos os níveis de ruído de fundo (o nível equivalente Leq^1) em duas situações: janelas e portas abertas (acústica desfavorável) e fechadas (melhores condições acústicas) [Losso 2004]. Os resultados estão mostrados na Figura 2.1, onde as barras escuras e claras representam, respectivamente, as medidas com portas e janelas abertas e fechadas. A linha horizontal indica o nível de ruído considerado ‘ideal’ pelos autores.

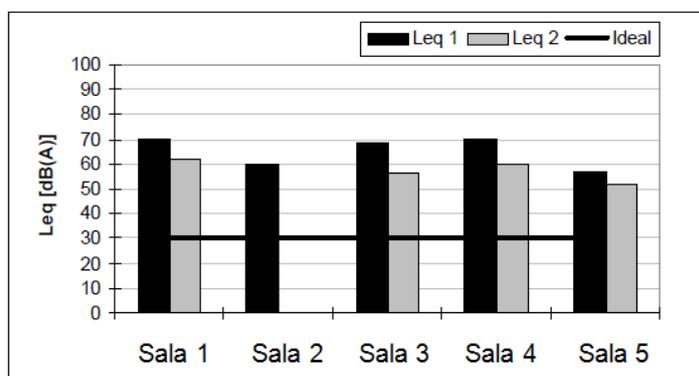


Figura 2.1: Níveis de ruído médio, Leq (dB(A), 3 min.) em cinco salas de aula. As barras escuras e claras correspondem a salas com portas e janelas abertas e fechadas, respectivamente. O nível de ruído ‘ideal’ é indicado pela linha horizontal. Adaptado de [Losso 2004].

Os níveis aceitáveis de ruído em salas de aula são estabelecidos por normas técnicas, que variam de país para país. Exemplos de níveis toleráveis estão apresentados na Tabela 2.2. Vemos que todas as salas de aula da Tabela 2.1 e da Figura 2.1 apresentam níveis de ruído incompatíveis com as normas da maioria dos países. Mesmo

¹ Nível de som médio durante o tempo de medida.

de acordo com a norma brasileira, que é um pouco mais tolerante, boa parte dessas salas pode ser considerada acusticamente inapropriada.

País	Níveis aceitáveis de ruído em sala de aula
Brasil (NBR 10152)	40-50 dBA
Estados Unidos (ANSI S12.60-2002)	35 dBA (desocupada)
Inglaterra (BB93)	35 dBA (desocupada)
Bélgica (1977/1987)	30-45 dBA
França (1995)	38 dBA
Alemanha (1989)	30 dBA
Itália (1985)	36 dBA
Portugal	35 dBA
Suécia (1995)	30 dBA
Turquia (1986)	45 dBA

Tabela 2.2: Níveis aceitáveis de ruído em sala de aula, segundo normas de alguns países. Adaptado de [ANSI 2002, Shield 2012, Losso 2004].

A percepção precisa da fala não depende apenas do nível ou tipo de ruído de fundo, mas sim na relação sinal-ruído (S/R). No caso, por sinal entendemos o nível sonoro da voz do professor. Por exemplo, se que o nível típico da voz do professor for 70 dB e o ruído da sala for 60 dB, a relação sinal-ruído será $S/R = +10$ dB. Quanto maior for o valor da relação S/R, maior será a capacidade de compreensão da fala. A relação S/R em salas de aula foi objeto de muitos estudos e alguns resultados podem ser vistos na Tabela 2.3. Note que é possível encontrar situações com S/R negativo, ou seja, com ruído mais intenso que o sinal.

Estudo	Relação Sinal/Ruído
Sanders (1965)	+ 1 a + 5
Paul (1967)	+ 3
Blair (1977)	- 7 a 0
Markides (1986)	+ 3
Finitzo-Hieber (1988)	+1 a + 4

Tabela 2.3: A relação S/R em diferentes salas de aula. Adaptado de [Crandell 2000].

A Figura 2.2 mostra a taxa de reconhecimento de sentenças para crianças com audição normal (barras sombreadas) e crianças com pequena perda auditiva (barras claras) em diversas condições de sinal-ruído. Os dados mostram que os dois grupos apresentam praticamente as mesmas taxas de percepção da fala em ambientes quietos ou

com alta relação sinal-ruído. No entanto, à medida que a relação sinal-ruído diminuiu a diferença entre os dois grupos aumenta significativamente; para $S/R = -6$ dB as crianças com problema auditivo, ainda que pequeno, reconhecem cerca de metade das sentenças entendidas pelas crianças com audição normal.

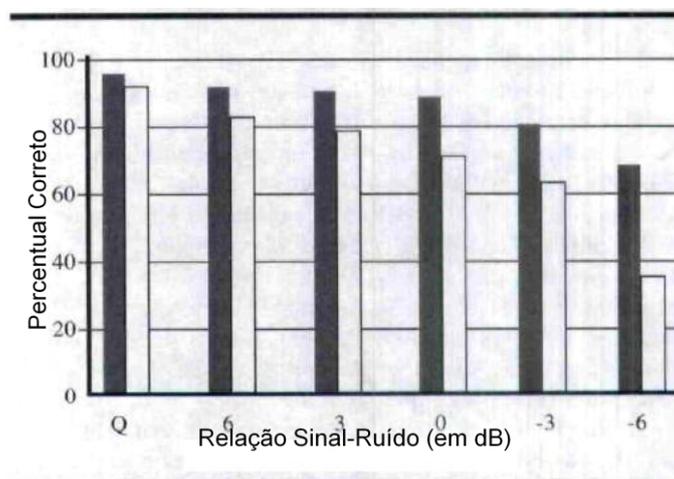


Figura 2.2: Taxa de reconhecimento de sentenças (percentual correto) em função da relação sinal-ruído. Os resultados para crianças com audição normal são mostrados pelas barras sombreadas e os de crianças com pequena perda auditiva pelas barras claras. Adaptado de [Crandell 2000].

O ruído na sala de aula, além de prejudicar o reconhecimento da fala, pode comprometer a atenção, a concentração e o comportamento do aluno. A prática da leitura, em especial das crianças nos anos iniciais de escolarização, também é afetada pelo ruído [Crandell 2000].

O ruído de fundo prejudica também o professor, gerando fadiga, tensão e desconforto. Professores apresentam ocorrência maior de problemas vocais em relação à população geral. É possível que tais problemas sejam provocados pelo aumento da intensidade da voz na tentativa de superar o ruído na sala de aula [Crandell 2000].

O nível de ruído em sala de aula e a intensidade de voz do docente foram medidos em um estudo realizado em instituições da rede municipal de ensino de uma cidade do interior de São Paulo, em turmas do primeiro ano do ensino fundamental [Guidini 2012]. As medições do nível de ruído ocorreram em salas sem e com alunos, no último caso em atividade didática que não fosse uma aula expositiva. A intensidade vocal das professoras (todos docentes eram do gênero feminino) foi medida durante um minuto de aula expositiva. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 2.4.

Salas	Ruídos sem crianças	Ruídos com crianças	Intensidade da voz das professoras
1	44,79	45,06	52,54
2	44,8	56,05	60,00
3	44,61	55,88	62,64
4	45,83	60,77	62,07
5	51,52	63,17	68,43
6	41,6	52,03	59,76
7	56,44	56,55	60,00
8	40,66	64,16	64,73
9	45,22	63,73	64,25
10	45,31	65,02	62,53
Média	46,08	58,24	61,70

Tabela 2.4: Valores médios, em dBA, do ruído na sala de aula e da intensidade da voz da professora. Adaptado de [Guidini 2012].

É importante reiterar que, em conformidade com a norma brasileira (NBR 10152, ver Tabela 2.2), o nível máximo de ruído permitido em salas de aula é no de 40 a 50 dBA. De acordo com os resultados mostrados na Tabela 2.4, apenas uma sala com alunos está dentro desse padrão. A média do ruído nas salas com alunos foi 58 dBA, acima do limite recomendado. Outra observação é que em todas as salas de aula o nível de ruído aumentou com a presença dos alunos, porém não da mesma forma, pois enquanto que na sala 1 o aumento foi de apenas 0,27 dBA, na sala 8 chegou impressionantes 23,5 dBA. Já a intensidade da voz das professoras foi de 52 a 68 dBA, com uma média de 62 dBA, apenas 3-4 dBA acima da média do ruído.

2.2. Reverberação na sala de aula

A reverberação, como o ruído, é um efeito acústico que pode prejudicar a percepção da fala na sala de aula. A reverberação consiste basicamente na persistência acústica ou prolongamento do som devido a sucessivas reflexões que ocorrem no ambiente. Em um ambiente reverberante o som permanece “mais vivo”, ou melhor, pode ser ouvido durante um intervalo de tempo maior. Um parâmetro acústico importante para caracterizar a reverberação em um ambiente é o *tempo de reverberação* TR. Para um som abrupto (de curta duração), TR é definido como o tempo que nível sonoro leva para diminuir 60 dB, contado desde sua emissão. Devido a essa escolha o tempo de reverberação também é representado como TR₆₀. Como o decibel é uma escala logarítmica, quando o nível de intensidade sonora diminui de 60 dB a intensidade do som emitido foi reduzida um milhão de vezes em relação ao seu valor inicial.

É possível estimar o TR_{60} de uma sala por meio de uma fórmula empírica desenvolvida por Wallace Sabine, um professor de física de Harvard [AAS 2000]:

$$TR_{60} = \frac{0,161 V}{\sum S\alpha} .$$

Na fórmula de Sabine, TR_{60} é dado em segundos, V é o volume da sala em metros cúbicos e o somatório \sum é realizado sobre todas as superfícies do ambiente. Cada uma dessas superfícies tem área S , dada em m^2 , e coeficiente de absorção α , característico do material que reveste a superfície. A fórmula de Sabine mostra que quanto maior for o volume de um ambiente maior será o tempo de reverberação, e que quanto mais superfícies absorverem o som, menor será esse tempo.

A reverberação excessiva em uma sala de aula prejudica a compreensão da fala, pois o som que chega diretamente ao ouvinte é mascarado pela superposição com os sons emitidos anteriormente, que permanecem no ambiente devido a múltiplas reflexões nas paredes e outras superfícies da sala. Assim como no caso do ruído, a reverberação prejudica mais a compreensão de consoantes que a de vogais [Crandell 2000]. Tempos de reverberação encontrados em salas de aula comuns estão mostrados na Tabela 2.5.

Estudo	Tempo de reverberação em segundos
Kodaras (1960)	0,40 a 1,10
Nabelek & pickett	0,50 a 1,00
McCroskey & Devens (1975)	0,60 a 1,00
Brandley (1986)	0,39 a 1,20
Crandell & Smaldino (1994)	0,35 a 1,20

Tabela 2.5: Tempo de reverberação em salas de aula comuns. Adaptado de [Crandell 2000].

Tempos de reverberação recomendados para diferentes ambientes escolares estão mostrados na Figura 2.3 [AAS 2000]. No caso de salas de aula, o intervalo de valores aceitáveis de TR_{60} vai de 0,4 a 0,6 segundos. Vemos da Tabela 2.5 que uma parcela apreciável de salas de aula encontra-se fora dessa faixa.

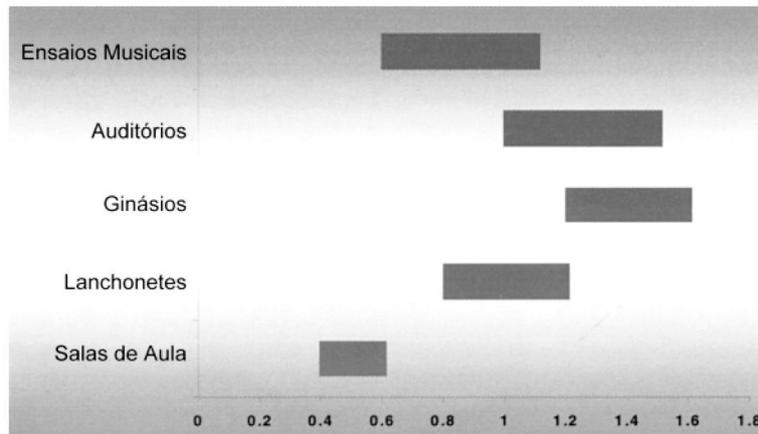


Figura 2.3: Tempos de reverberação TR_{60} apropriados a diferentes instalações escolares [AAS 2000].

Tempos de reverberação em salas de aula da Região Sul do Brasil são apresentados na Figura 2.4 [Losso 2004]. Pode-se notar que todos os tempos medidos estão acima do valor ‘ideal’ citado pelos autores, cerca de 0,5 s. Esse valor corresponde ao centro da faixa indicada na Figura 2.3. Nenhuma das salas estava sequer dentro dessa faixa.

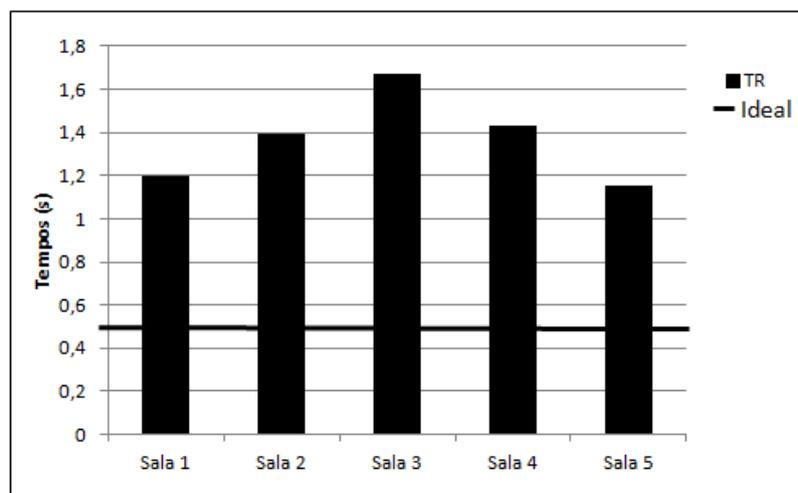


Figura 2.4: Tempo de reverberação de cinco salas de aulas de escolas diferentes. O valor ‘ideal’ para uma sala de aula é mostrado pela linha horizontal. Adaptado de [Losso 2004].

2.3. Ruído e reverberação na sala de aula

Já discutimos como cada uma das variáveis acústicas, reverberação e ruído, afetam isoladamente a compreensão da fala na sala de aula. É importante também analisar o efeito combinado desses dois fatores. A percepção da fala é afetada pela ação conjunta do ruído e da reverberação em maior grau do que quando esses efeitos agem de forma independente. Por exemplo, considere as seguintes situações. Um aluno está

ouvindo o professor em uma sala de aula silenciosa e sem reverberação, e alguém liga o ar condicionado gerando um ruído que reduz a percepção do aluno em 10%. Já em outra sala, sem ruído, a presença de superfícies refletoras causa reverberação e reduz em 10% a compreensão das palavras do professor. Em uma terceira sala, onde ambos os problemas (ruído e reverberação) estão presentes nos níveis das salas anteriores, a percepção do que é dito pelo professor terá uma redução de 40% a 50% [Crandell 2000]. Esse efeito não-aditivo pode ser visto na Tabela 2.6 [Crandell 2000, Finitzo-Hieber 1978], onde são mostradas as taxas de reconhecimento (em porcentagem) de palavras *monossilábicas* em ambientes com diferentes níveis de sinal-ruído e tempos de reverberação.

Condição do teste	Grupos	
	Audição normal	Com problemas auditivos
TR = 0,0 segundos		
S/R	%	%
Quieto	94,5	83,0
+ 12 dB	89,2	70,0
+ 6 dB	79,7	59,5
0 dB	60,2	39,0
TR = 0,4 segundos		
S/R	%	%
Quieto	92,5	74,0
+ 12 dB	82,8	60,2
+ 6 dB	71,3	52,2
0 dB	47,7	27,8
TR = 1,2 segundos		
S/R	%	%
Quieto	76,5	45,0
+ 12 dB	68,8	41,2
+ 6 dB	54,2	27,0
0 dB	29,7	11,2

Tabela 2.6: Taxa de reconhecimento de palavras monossilábicas em crianças com audição normal e com perda auditiva, para ambientes com diferentes níveis de sinal-ruído e tempo de reverberação. Adaptado de [Crandell 2000, Finitzo-Hieber 1978].

Em uma sala de aula comum, com TR = 1,2 s e S/R = +6 dB [Crandell 2000], a Tabela 2.6 mostra que as crianças reconhecem apenas 54% dos sons monossilábicos, e isso se tiverem audição normal. Esse desempenho acústico é muito pior para crianças com deficiência auditiva, para as quais a taxa de reconhecimento cai a 27%. Em uma

sala boa acusticamente, com $TR = 0,4$ s e $S/R = +12$ dB [Crandell 2000], alunos com audição normal reconhecem 83% dos sons. Mesmo numa sala como essa, estudantes com problemas auditivos apresentam uma taxa de compreensão de monossílabos de apenas 60%.

O nível de inteligibilidade da fala (medido pela percentagem de palavras corretamente reconhecidas) em salas de aula como função do tempo de reverberação TR e da relação sinal-ruído S/R está mostrado na Figura 2.5 [Bradley 1986]. Vemos que o aumento de S/R melhora a taxa de compreensão, como seria de se esperar, e que o aumento de TR diminui essa taxa. É interessante notar que a compreensão de 100% das palavras só é possível para TR menor que aproximadamente 0,7 s [Bradley 1986].

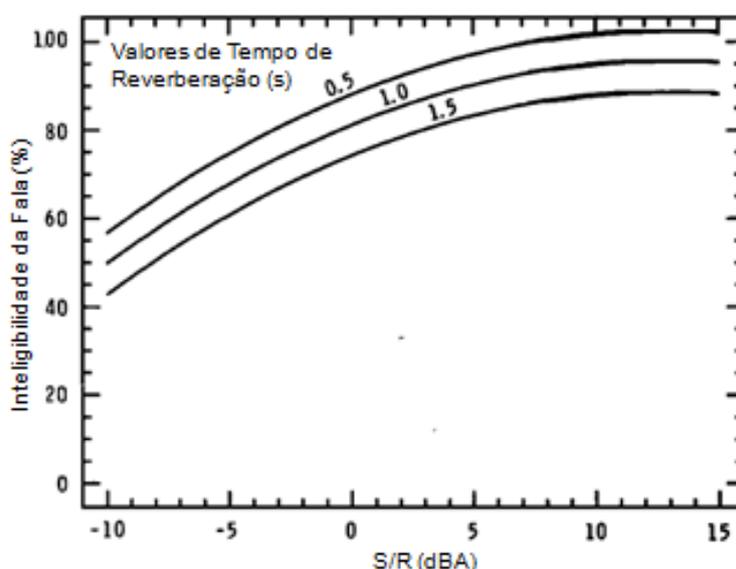


Figura 2.5: Valores estimados da inteligibilidade da fala (percentagem de reconhecimento de palavras) em função do tempo de reverberação e da relação sinal-ruído S/R . Adaptado de [Bradley 1986].

A diferença entre os resultados da Tabela 2.6 e da Figura 2.5 possivelmente deve-se ao fato da primeira referir-se ao reconhecimento de palavras monossilábicas [Finitzo-Hieber 1978] e a segunda ao reconhecimento de palavras polissilábicas. Como em geral é mais fácil identificar palavras de muitas sílabas que as de apenas uma, isso poderia explicar porque em condições equivalentes a taxa de acertos indicada na Figura 2.5 é maior que a da Tabela 2.6.

2.4. A distância do aluno ao professor

Em uma sala de aula, a distância do docente ao aluno também influencia o entendimento da fala. A Figura 2.6 mostra como a distância ao professor afeta a taxa de

reconhecimento de monossílabos por crianças com audição normal, em uma sala com $S/R = 6$ dB e $TR = 0,6$ s. Vemos que o entendimento da fala diminui significativamente com a distância.

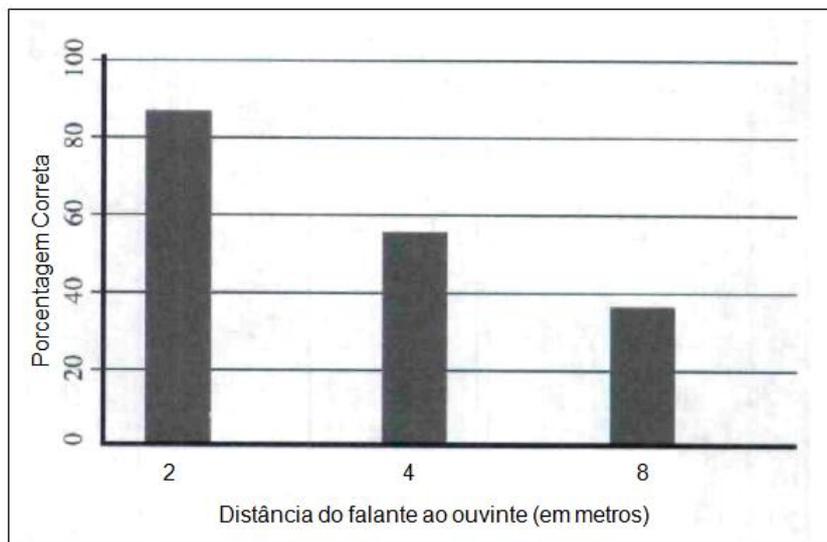


Figura 2.6: Taxa de reconhecimento de monossílabos (percentual correto) em função da distância do falante ao ouvinte realizado com crianças com audição normal. Adaptado de [Crandell 2000].

A uma distância relativamente pequena, o som direto emitido pelo professor chegará ao aluno com mais intensidade que som proveniente da reverberação. A propagação do som direto segue a lei do inverso do quadrado da distância, ou seja, se a distância do aluno até o professor dobra, a intensidade do som direto é reduzida quatro vezes. Isso corresponde a uma atenuação da ordem de 6 dB. Por causa dessa atenuação, a uma determinada distância crítica a intensidade do som direto torna-se semelhante à do som reverberante. Para distâncias maiores o som reverberante passa a dominar. Portanto, a curtas distâncias os efeitos da reverberação sobre a compreensão de palavras são menos acentuados que a longas distâncias. A distância crítica encontrada em uma sala de aula comum está geralmente em torno de três a quatro metros do professor [Crandell 2000].

2.5. Qualidade acústica: uma proposta para o ensino médio

Os resultados apresentados nesta seção mostram que a qualidade acústica de uma sala de aula pode afetar a aprendizagem dos estudantes e a saúde vocal dos professores. Também é interessante notar que os conceitos associados à qualidade acústica de um ambiente podem ser apresentados com relativa simplicidade. Esses dois

aspectos fazem da qualidade acústica um tema que poderia ser tratado com proveito em cursos introdutórios de física. A seguir, no Capítulo 3, descreveremos uma abordagem da qualidade acústica a ser aplicada no ensino médio, introduzindo de forma simplificada os conceitos e variáveis acústicas relevantes para o problema. Parte desse material é baseada no presente capítulo e por isso evitaremos a repetição de algumas figuras. O Apêndice A contém uma versão autocontida do Capítulo 3, que pode ser lida por alunos e professores sem necessidade de consultar o restante desta dissertação.

Capítulo 3

Ruído e Reverberação na Sala de Aula

3.1. Propagação do som

Ondas sonoras são ondas mecânicas, ou seja, necessitam de um meio material (ar, água, etc) para se propagar. Essas ondas comprimem e distendem o meio, produzindo zonas alternadas de alta e baixa pressão.

O som se propaga com uma velocidade finita, aproximadamente 340 m/s no ar. Por exemplo, se um raio cai em longe de uma pessoa, o som do trovão só será ouvido por essa pessoa após um determinado intervalo de tempo. Ela verá primeiramente a luz emitida pelo raio e somente depois ouvirá o barulho do trovão. A distância ao local onde caiu o raio pode ser estimada multiplicando a velocidade do som pelo tempo transcorrido entre a chegada da luz e a do som. Por exemplo, se você ouve o som com um segundo de ‘atraso’, o raio caiu a aproximadamente 340 m; se o atraso fosse de 5 segundos a distância seria de 1.700 m.

3.2. Frequência e intensidade do som

A frequência com que as zonas de compressão e distensão se alternam em uma onda sonora é uma grandeza característica dessas ondas. O que chamamos de som audível são ondas em uma determinada faixa de frequência, que tipicamente vai de 20 Hz até 20.000 Hz (1 Hz = 1 hertz = 1 oscilação por segundo). Esses limites não são fixos, variando de pessoa para pessoa. A figura a seguir mostra o espectro sonoro da audição humana e de alguns animais.

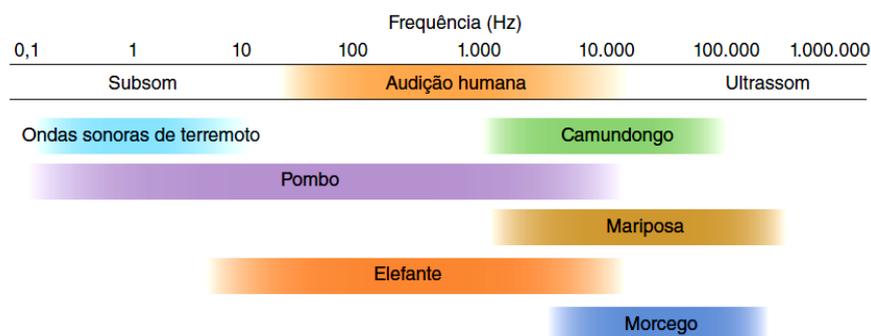


Figura 3.1: O espectro sonoro ouvido por alguns animais.¹

¹ Blaidi, Glorinha, Hugo, Spinelli, *Física – Módulo 16 – Ondas*, Sistema Uno

A intensidade do som, ou melhor, o nível sonoro, é medido em unidades de *bel*, abreviada como B (o nome foi dado em homenagem a Alexander Graham Bell, um dos inventores do telefone). Como um bel representa uma diferença muito grande de nível sonora usa-se mais o seu submúltiplo decibel (assim como muitas vezes usamos centímetro ou milímetro para medir comprimentos pequenos, deixando o metro de lado). O decibel representa 1/10 do bel (deci = décima parte) e é abreviado como dB.

É importante notar que, estritamente falando, intensidade sonora e nível sonoro são grandezas distintas. A intensidade é definida como a potência sonora que atinge uma unidade de área, e tem unidade de W/m^2 . O nível sonoro (ou nível de pressão sonora) é o logaritmo dessa intensidade e é dado em decibéis. Por uma questão didática não consideramos apropriado introduzir esse tipo de distinção e usamos intensidade sonora, nível sonoro e nível de intensidade sonora como sinônimos, representando todos em decibéis.

Já vimos que a audição humana é limitada, em termos de frequência, entre 20 Hz e 20.000 Hz. Em relação ao nível sonoro, o limite inferior da nossa audição é 0 dB, aproximadamente. O limite superior é determinado, grosso modo, pela sensação de dor que pode ser provocada pelo som. O gráfico a seguir mostra em que valores de frequência (eixo horizontal) e nível de intensidade sonora (eixo vertical) o ouvido humano é capaz de ouvir o som.

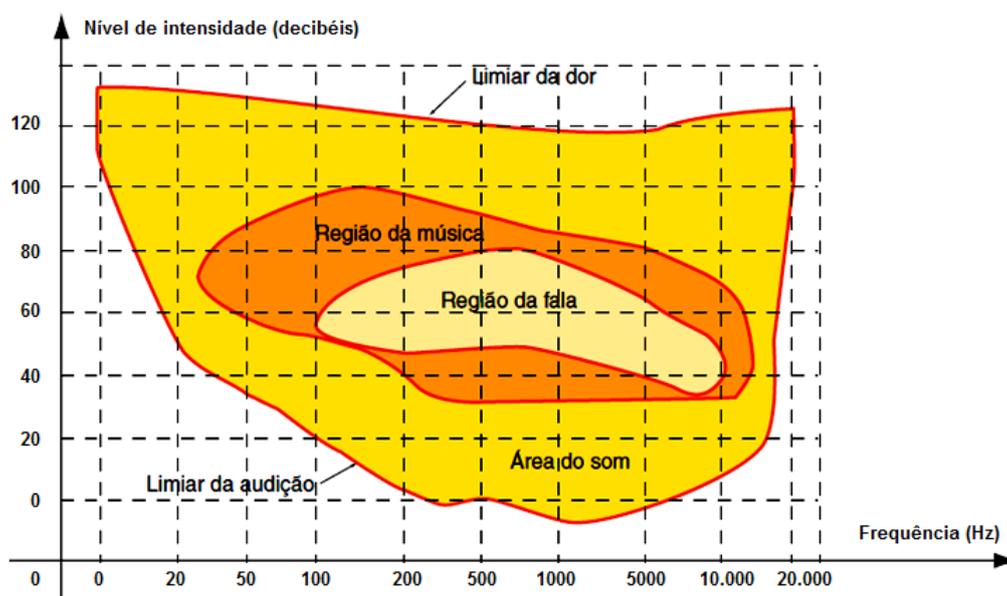


Figura 3.2: Região de intensidade sonora e frequência que o ouvido humano é capaz de ouvir.¹

¹ Blaidi, Glorinha, Hugo, Spinelli, *Física – Módulo 16 – Ondas*, Sistema Uno

3.3. Níveis de ruídos aceitáveis

Qualquer pessoa que seja exposta excessivamente a sons de alta intensidade pode sofrer danos auditivos irreversíveis. Os níveis aceitáveis de ruído são estabelecidos por normas técnicas e alguns exemplos para ambientes internos estão apresentados na Tabela 3.1. Níveis aceitáveis em diferentes tipos de áreas externas estão mostrados na Tabela 3.2.

Ambiente	dB
Hospitais (apartamentos, enfermarias)	40-50
Escolas (salas de aula)	40-50
Residências (dormitórios)	35-45
Residências (sala de estar)	40-50
Sala de concertos e teatros	30-40
Sala de conferência, cinemas de múltiplo uso	35-45
Restaurante, bares e confeitaria	40-50
Escritórios (salas de reuniões)	30-40
Igrejas e templos (cultos meditativos)	40-50
Pavilhão para atividades esportivas	45-60

Tabela 3.1: Níveis aceitáveis de ruído, em decibéis, para alguns tipos de ambientes internos (adaptado da norma NBR 10152).

Tipo de área	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Áreas estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Áreas mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Tabela 3.2: Níveis aceitáveis de ruído, em decibéis, para áreas externas (adaptado da norma NBR 101521).

Para proteger trabalhadores que estão submetidos a ruídos excessivos, a Legislação de Segurança, Higiene e Medicina do Trabalho estabelece limites de tolerância para ruídos contínuos e intermitentes, mostrados na Tabela 3.3:

Nível de ruído (dB)	Máxima exposição diária permitida
80	16 horas
85	8 horas
90	4 horas
95	2 horas
100	1 hora
105	30 minutos
110	15 minutos
115	7 minutos

Tabela 3.3: Máxima exposição diária permitida para ruídos (adaptado da norma NR-15 do Ministério do Trabalho).

É possível medir o nível de ruído de um ambiente através de um aparelho chamado *decibelímetro*. Existem aplicativos que permitem usar um telefone celular como decibelímetro (não tão preciso quanto um aparelho profissional). Estudos sobre a precisão de diferentes combinações de celulares e aplicativos na medição de nível de ruído estão nas referências [Kardous 2014, Kardous 2016]. Há diversos aplicativos que podem ser utilizados nos sistemas Android e iOS e muitos são gratuitos. A Figura 3.3 mostra um desses aplicativos durante a medida do nível de intensidade sonora em um ambiente.

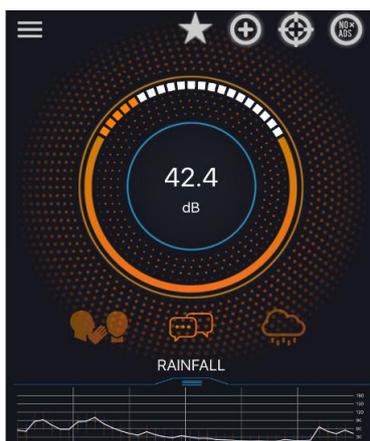


Figura 3.3: Aplicativo em um celular medindo o nível de intensidade sonora em decibéis.

3.4. Reflexão e eco

A reflexão do som ocorre quando uma onda sonora encontra um obstáculo e retorna para o meio no qual estava se propagando. O eco é um fenômeno associado à reflexão do som. Por exemplo, quando uma pessoa grita em um ambiente amplo, como uma caverna, ou em uma região de montanhas, após alguns instantes pode ouvir novamente a própria voz. É o som emitido que, refletido, volta à sua origem.

A ecolocalização, ou biossonar, é um sentido encontrado em alguns animais (morcegos e golfinhos, por exemplo) que lhes permite determinar a posição de objetos por meio de emissão de ondas sonoras, no ar ou na água. Pelo tempo gasto para que essas ondas sejam refletidas no alvo e voltem como eco, o animal descobre a localização de corpos e obstáculos à sua volta.

Além dos animais, alguns seres humanos também utilizam a ecolocalização. Por exemplo, o norte-americano Ben Underwood, que foi diagnosticado com câncer na retina e por isso teve seus olhos removidos aos três anos, era capaz de detectar objetos com batidas de palmas, cliques e estalos com a boca. Com esses sons ele era capaz de

localizar o que estava ou seu redor, o que lhe permitia dispensar o auxílio de bengalas, cães guia, etc.

O princípio do eco também é utilizado na construção de instrumentos para avaliar distâncias, dimensões e formas, como o sonar e os aparelhos de ultrassonografia. O sonar é empregado, por exemplo, para estudar o perfil do fundo do mar e na pesca, para localizar cardumes.

3.5. Reverberação: múltiplos ecos

O som produzido em um ambiente fechado (uma sala de aula, por exemplo) se propaga em várias direções e pode passar por múltiplas reflexões antes de chegar a um ouvinte. Essas múltiplas reflexões chegam ao ouvinte em instantes diferentes, muito próximos um do outro, gerando uma persistência do som mesmo após cessar sua emissão pela fonte sonora. Esse efeito é conhecido como *reverberação*.

A Figura 3.4 ilustra como múltiplas reflexões de um mesmo som podem chegar a um ouvinte, sobrepondo-se e gerando a reverberação.

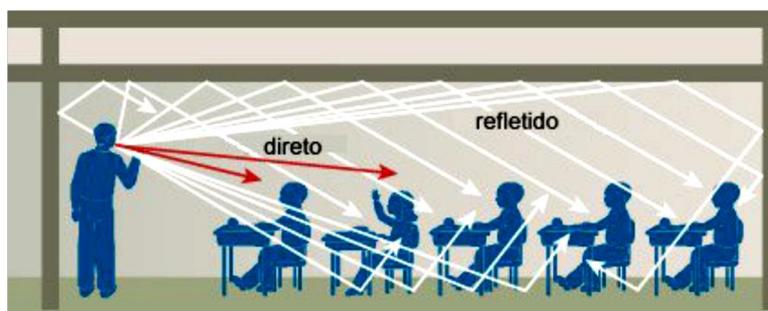


Figura 3.4: Ilustração do fenômeno da reverberação.

Como a cada reflexão o som perde uma fração da sua energia inicial, a reverberação tende a desaparecer com o tempo. Esse efeito está representado esquematicamente no gráfico da Figura 3.5.

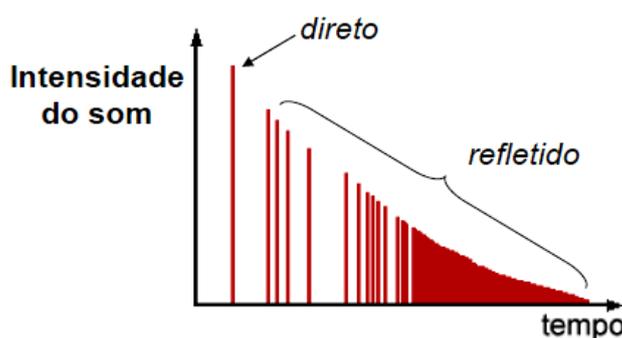


Figura 3.5: Reverberação de um pulso sonoro quase instantâneo.

Eco e reverberação não são sinônimos embora ambos sejam causados pela reflexão do som. O eco é o som que chega ao ouvinte após, essencialmente, uma única reflexão por um obstáculo distante, percebida após um intervalo de tempo suficiente para ser distinguida do som original. Na reverberação, como já foi dito, o som chega ao ouvinte após várias reflexões no próprio local, criando um prolongamento auditivo. Se alguém está em um lugar muito reverberante, está pessoa ouve o som de sua voz sobreposto ao que acabou de dizer nos instantes anteriores.

3.6. Tempo de reverberação

Um ambiente muito reverberante pode trazer problemas no que diz respeito à inteligibilidade das palavras emitidas. Quando pronunciamos um vocábulo com várias sílabas, os sons sobrepõem-se, ou seja, ao emitir uma sílaba o som da sílaba anterior ainda pode ser ouvido, prejudicando a compreensão do que foi dito. Por outro lado alguma reverberação pode ser útil acusticamente, pois as reflexões produzem um reforço ao som percebido diretamente, permitindo que pessoas distantes da fonte sonora possam ouvi-la mais facilmente.

O tempo de reverberação de um recinto é um dos principais parâmetros para caracterizar sua qualidade acústica. Em um ambiente que possui tempo de reverberação muito longo, vimos que o som enviado por uma fonte permanece perceptível por mais tempo. Numa sala de aula, por exemplo, isso pode prejudicar a comunicação verbal entre professor e alunos. Por outro lado, se o tempo de reverberação for muito curto torna-se mais difícil a um aluno distante do professor escutar o que este diz.

É importante que se tenha cuidado antes de julgar se a reverberação é prejudicial, visto que isso depende da finalidade para a qual o ambiente foi projetado. Também é necessário ter um padrão quantitativo do grau de reverberação. Uma medida muito usada para isso é o tempo de reverberação TR_{60} (ou simplesmente TR), definido como o tempo necessário para que a intensidade do som decaia 60 decibéis a partir do momento no qual a fonte cessa de emití-lo.

Para medir o tempo de reverberação de um ambiente, uma possibilidade é produzir um som abrupto (como uma bexiga de festa sendo estourada) e gravá-lo com um celular, por exemplo. Muitos aplicativos de gravação mostram a forma da onda registrada (a pressão sonora em função do tempo), o que permite estimar visualmente a reverberação do ambiente. A Figura 3.6 mostra a gravação do estouro de uma bexiga,

feita com um desses aplicativos. Vemos que o som do estouro leva alguns décimos de segundo para se tornar imperceptível.

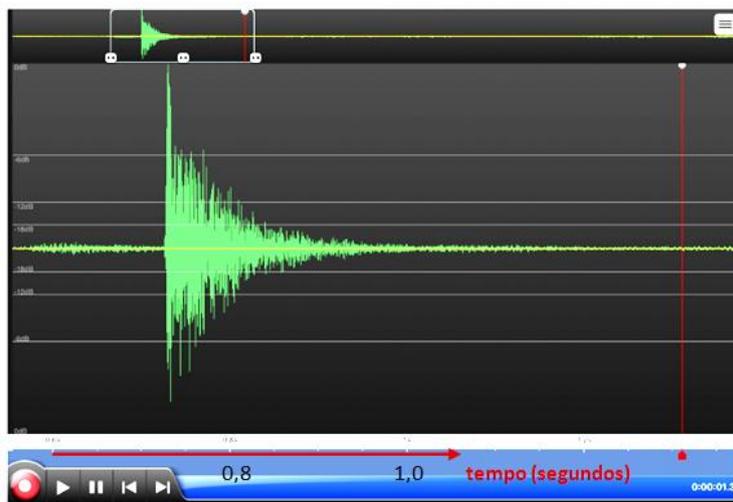


Figura 3.6: Reverberação do som produzido pelo estouro de uma bexiga de festa.

A Figura 3.6 mostra a forma da onda sonora (a variação da pressão no ar) produzida pelo estouro da bexiga. Para obter o tempo de reverberação TR_{60} precisamos de um gráfico que mostre o nível de intensidade sonora, medido em decibéis, em função do tempo. Um gráfico desse tipo está mostrado na Figura 3.7, também para o estouro de uma bexiga. Vemos que, medida em decibéis, a intensidade sonora decai proporcionalmente ao tempo transcorrido.

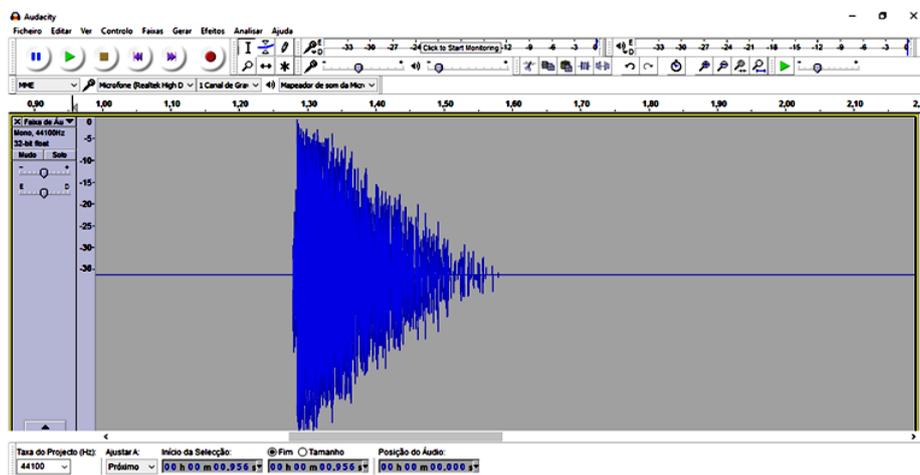


Figura 3.7. O nível sonoro, medido em decibéis, após o estouro de uma bexiga.

A Figura 3.8 mostra esquematicamente como a reverberação de um som abrupto, medida em decibéis, diminui linearmente com o tempo. Ou seja, seu gráfico é uma reta inclinada para baixo. O tempo de reverberação TR_{60} pode ser obtido diretamente desse gráfico, como também está mostrado na Figura 3.8.

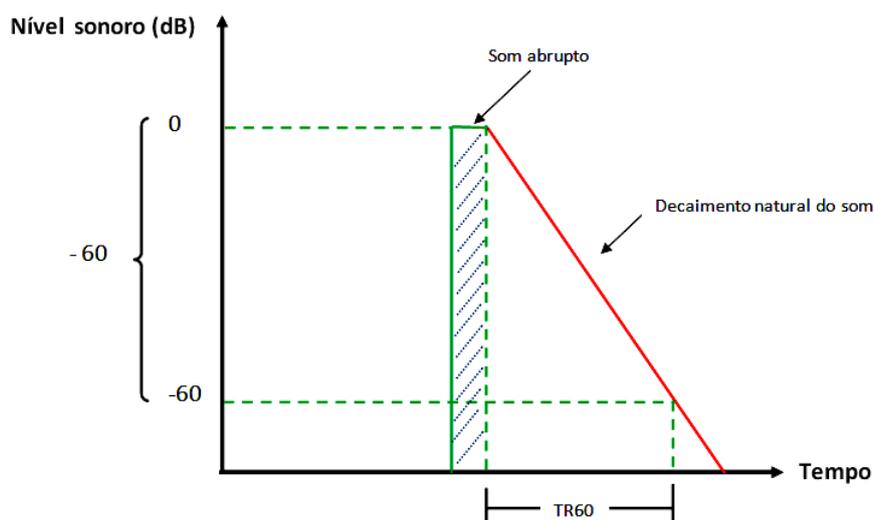


Figura 3.8: Tempo de reverberação (TR_{60}) de um som abrupto.

Vamos utilizar essas observações para obter o tempo de reverberação do som do estouro da bexiga mostrado na Figura 3.7. O nível sonoro registrado na figura cai de 0 dB a aproximadamente -30 dB, de modo que não podemos obter diretamente o tempo de reverberação TR_{60} como está indicado na Figura 3.8. Só podemos medir diretamente o tempo necessário para cair 30 dB, que chamaremos de TR_{30} . Entretanto, como a queda do nível sonoro é proporcional ao tempo, o tempo TR_{60} é o dobro de TR_{30} , ou seja, medindo TR_{30} e multiplicando o resultado por 2 obtemos o tempo de reverberação TR_{60} .

Essa medida está ilustrada na Figura 3.9. Podemos utilizar um programa que permita fazer desenhos (Word, PowerPoint ou um editor de figuras) para inserir uma reta diagonal que acompanha o decaimento do nível sonoro, uma reta horizontal no nível de -30 dB e duas retas verticais. a primeira correspondente ao instante em que a diagonal passa por 0 dB e a segunda ao instante em que a diagonal passa por -30 dB. O tempo TR_{30} corresponde ao intervalo entre as retas verticais. Da escala de tempo mostrada na parte superior da Figura 3.9, vemos que esse intervalo vai de 1,0 s a 1,2 s, ou seja, $TR_{30} = 0,2$ s. Com isso, obtemos que o tempo de reverberação é $TR_{60} = 2 \times TR_{30} = 2 \times 0,2 = 0,4$ s.

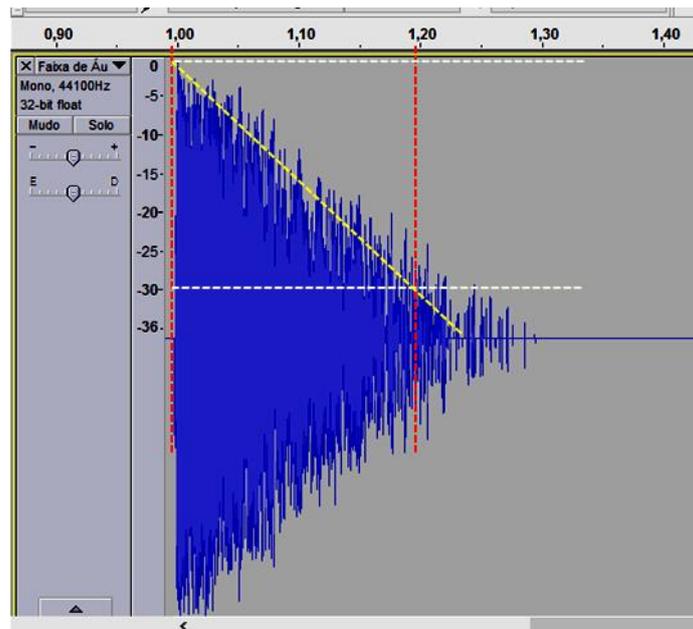


Figura 3.9: Medida do tempo de reverberação.

3.7. Tempo de reverberação e qualidade acústica

O tempo de reverberação adequado a cada ambiente é determinado por estudos em acústica arquitetônica; a Figura 2.3 do Capítulo 2 mostra as faixas aceitáveis de TR_{60} para ambientes encontrados em escolas. Dessa figura vemos que o tempo de reverberação em uma sala de aula deve estar entre 0,4 e 0,6 s, aproximadamente. Se o tempo de reverberação ficar muito distante dessa faixa, a compreensão do que é dito pelo professor pode ficar comprometida.

3.8. Ruído e qualidade acústica da sala de aula

O tempo de reverberação não é o único elemento relevante para a qualidade acústica de uma sala de aula. Outro fator, tão ou mais importante, é o nível de ruído na sala. De acordo com as normas brasileiras, o nível de ruído aceitável em uma sala de aula está, no máximo, entre 40 e 50 dB (veja a Tabela 3.1). Para que o professor seja compreendido pelos alunos, sua voz deve estar acima do ruído na sala de aula. Em turmas de crianças pequenas a voz do professor deve estar no mínimo 15 dB acima do nível de ruído [Losso 2004]. Para alunos mais velhos essa diferença diminui, chegando a cerca de 5 dB no caso de turmas de adultos [Crandell 2000]. Os alunos ouvem a voz do professor a cerca de 60 dB, em média, o que significa que ruídos ambientais muito acima do limite 40-50 dB tornam difícil entender o que está sendo dito na sala de aula.

A diferença em decibéis entre a voz do professor e o ruído da sala é chamada de *relação sinal-ruído* (S/R). Quanto maior for o valor da relação S/R, maior será a capacidade de compreensão da fala. Na Figura 2.5 (capítulo 2) foi mostrado como a taxa de compreensão de palavras depende da relação sinal-ruído e do tempo de reverberação da sala de aula. Vemos nessa figura que quanto menor for a relação sinal-ruído e maior for o tempo de reverberação, pior será a qualidade acústica da sala de aula.

3.9. A matemática da reverberação

Vamos supor que uma pessoa se encontra no centro de um ambiente (sala, quarto, etc.) de comprimento L e emite um som. Este som vai em direção a uma das paredes, onde é refletido e parcialmente absorvido, como mostra a Figura 3.10.

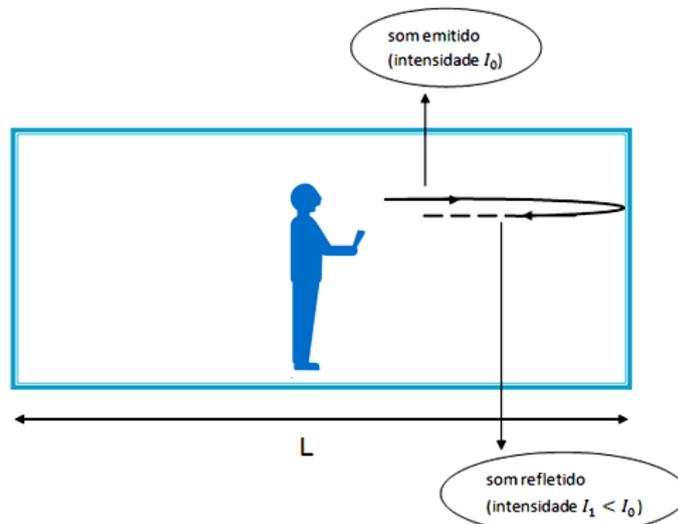


Figura 3.10: Primeira reflexão do som emitido.

Para simplificar nosso estudo, vamos desconsiderar as reflexões que ocorrem no chão, no teto e nas paredes laterais. O som emitido, com intensidade inicial igual a I_0 , vai ser ouvido pela pessoa após a primeira reflexão. Entretanto, sua intensidade agora será I_1 , menor que I_0 , pois parte da energia sonora que incidiu sobre a parede foi absorvida por ela durante a reflexão.

Essa primeira reflexão é seguida por outra, na parede oposta, e daí em diante o som é sucessivamente refletido pelas paredes conforme ilustrado na Figura 3.11.

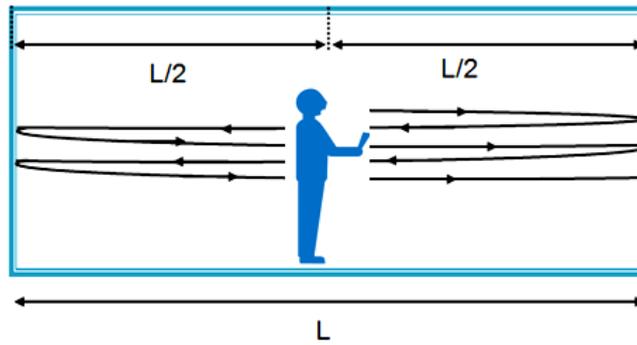


Figura 3.11. Reflexões sucessivas do som emitido.

A cada reflexão mostrada na Figura 3.11 o som é um pouco atenuado. Inicialmente, temos que a intensidade é I_0 . Após a primeira reflexão, já vimos que a intensidade diminui devido à absorção. Podemos caracterizar essa absorção pelo “fator de atenuação” α , um número (maior que 1) que define como a intensidade diminui a cada reflexão. Com isso a intensidade após a primeira reflexão é

$$I_1 = \frac{I_0}{\alpha}.$$

Após a segunda reflexão, a mesma atenuação ocorrerá e a intensidade será

$$I_2 = \frac{I_1}{\alpha},$$

e substituindo

$$I_1 = I_0/\alpha$$

teremos

$$I_2 = \frac{I_0}{\alpha^2}.$$

Após a terceira reflexão,

$$I_3 = \frac{I_2}{\alpha},$$

e substituindo $I_2 = I_0/\alpha^2$ teremos

$$I_3 = \frac{I_0}{\alpha^3}.$$

Continuando esse raciocínio, após n reflexões a intensidade será

$$I_n = \frac{I_0}{\alpha^n}$$

ou,

$$I_n = I_0 \alpha^{-n}. \quad (1)$$

É possível relacionar a distância percorrida pelo som com o número n de reflexões da seguinte forma:

$$d = nL .$$

O tempo que o som leva para percorrer a distância d é

$$t = \frac{d}{c} = \frac{nL}{c}$$

onde c é a velocidade do som. O número de reflexões n pode ser escrito, então, como

$$n = \frac{c}{L} t . \quad (2)$$

Com isso, podemos obter a intensidade do som em função do tempo, $I(t)$, substituindo a equação (2) na fórmula (1) para I_n , obtendo

$$I(t) = I_0 \alpha^{-\frac{c}{L} t} . \quad (3)$$

Vamos definir o Nível de Pressão Sonora (NPS), medido em decibéis (dB), como

$$NPS (dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) .$$

Substituindo a equação (3) na fórmula acima encontramos

$$NPS (dB) = 10 \log_{10} \left(I_0 \cdot \alpha^{-\frac{c}{L} t} / I_{ref} \right)$$

ou seja,

$$NPS (dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{I_0}{I_{ref}} \right) + 10 \log_{10} \alpha^{-\frac{c}{L} t} .$$

Usando as propriedades do logaritmo, temos

$$NPS (dB) = - \left(\frac{c}{L} 10 \log_{10} \alpha \right) t + N_0$$

onde N_0 é independente do tempo:

$$N_0 = 10 \log_{10} \left(\frac{I_0}{I_{ref}} \right) .$$

Definindo uma constante b como

$$b = \frac{c}{L} 10 \log_{10} \alpha \quad (4)$$

teremos

$$NPS (dB) = -bt + N_0 . \quad (5)$$

Note que a fórmula (5) é a equação de uma reta, cujo gráfico já vimos na Figura 3.8 (onde tomamos $N_0 = 0$). Podemos ver que a queda do nível sonoro é proporcional ao tempo transcorrido desde a emissão do som.

O tempo de reverberação TR_{60} é definido como o intervalo de tempo necessário para que a intensidade sonora caia 60 dB, ou seja, de N_0 para $N_0 - 60dB$, como mostrado na Figura 3. Usando a equação (4) obtemos

$$N_0 - 60dB = -b TR_{60} + N_0$$

e, portanto,

$$TR_{60} = \frac{60}{b} .$$

Substituindo na fórmula anterior a equação (4) obtemos

$$TR_{60} = \frac{60}{\frac{c}{L} 10 \log_{10} \alpha}$$

e, com isso,

$$TR_{60} = \frac{6L}{c \log_{10} \alpha}$$

No nosso modelo simplificado, o som é refletido apenas pelas paredes que se encontram à frente e atrás do ouvinte representado nas Figuras 3.10 e 3.11. Se a área total das paredes refletoras for S , a área de cada parede será $S/2$. Multiplicando por $S/2$ o numerador e o denominador da fórmula acima obtemos

$$TR_{60} = \frac{6L \frac{S}{2}}{c \frac{S}{2} \log_{10} \alpha} .$$

Mas o produto da área $S/2$ pelo comprimento L , será igual ao volume V do ambiente.

Portanto

$$TR_{60} = \frac{12 V}{c S \log_{10} \alpha}$$

Trocando a base do logaritmo na equação anterior, $\log_{10} \alpha = \log_{10} e \ln \alpha$, teremos

$$TR_{60} = \frac{12V}{c S \log_{10} e \ln \alpha}$$

e como $\log_{10} e = 0,43$ chegamos a

$$TR_{60} = \frac{12 V}{c S 0,43 \ln \alpha}$$

Vamos considerar que a velocidade do som seja $c \approx 344 \text{ m/s}$, e vamos definir o coeficiente de absorção da superfície como $a = \ln \alpha$. Com isso obtemos

$$TR_{60} = \frac{0,08 V}{aS}$$

onde o tempo é medido em segundos e os comprimentos em metros. Esta é uma aproximação para a *fórmula de Sabine*, um resultado empírico obtido no século XIX por Wallace Sabine:

$$TR_{60} = \frac{0,161 V}{aS} .$$

O resultado do modelo difere da fórmula de Sabine por um fator 2 no numerador. A discrepância deve-se às simplificações introduzidas no modelo, como a suposição que o som é refletido apenas por duas das paredes. Apesar de sua simplicidade, deve ser ressaltado que o modelo prevê corretamente as principais características da reverberação: o TR é proporcional ao volume do ambiente e inversamente proporcional à área das superfícies refletoras.

Sobre a utilização do modelo matemático no ensino médio

A descrição matemática da reverberação desenvolvida acima pode ser omitida a critério do professor, dependendo de fatores como tempo e familiaridade dos alunos com o formalismo matemático. Essa omissão não impede que os conceitos físicos introduzidos no material anterior sejam compreendidos pelos estudantes. Mas entendemos que o desenvolvimento deste modelo com alunos do ensino médio pode ajudá-los a compreender mais profundamente esses conceitos e, ainda mais, mostrar como ferramentas matemáticas – logaritmo e progressão geométrica, por exemplo – podem ser úteis em aplicações práticas. É interessante ressaltar ainda que este conteúdo poderia ser trabalhado de forma conjunta entre os professores de física e matemática, ajudando os alunos a entenderem melhor a relação entre essas duas disciplinas e a realização de atividades práticas como a que será apresentada no capítulo 4.

Capítulo 4

Atividades Práticas no Ensino Médio

Baseados no material apresentado no Capítulo 3, nós realizamos atividades práticas sobre a qualidade acústica das salas de aula e outros ambientes com alunos do primeiro e segundo anos do ensino médio (primeira e segunda séries) de uma escola privada do município do Rio de Janeiro. Os alunos foram estimulados a realizar medidas do nível de ruído e do tempo de reverberação em suas salas de aulas e em outros locais na escola e fora dela. As medidas feitas em sala de aula resultaram em uma avaliação informal (não profissional) da qualidade acústica dessas salas, feita em termos da taxa de compreensão da fala do professor.

Todos os alunos que participaram das aulas foram informados que se tratava de um projeto de mestrado do professor. As atividades foram realizadas em dois encontros, cada um com a duração de dois tempos de aula (1h40min), no terceiro bimestre letivo de 2017.

4.1. Questionário Prévio

As atividades práticas foram intercaladas por discussões entre o professor e os alunos sobre a propagação e percepção do som, os conceitos de ruído e reverberação e seus efeitos sobre a qualidade acústica de diversos ambientes, em particular a sala de aula. Com o intuito de tornar as discussões e atividades mais atraentes e estimular a curiosidade dos alunos sobre o tema da qualidade acústica, utilizamos algumas ideias do Just-in-Time Teaching (Ensino sob Medida) envolvendo a aplicação de questões prévias e utilização das respostas na preparação e realização da aula. De acordo com Araújo e Mazur [Araújo 2013],

“O ponto principal no Ensino sob Medida é a possibilidade do professor planejar suas aulas a partir dos conhecimentos e dificuldades dos seus alunos, manifestadas através das respostas que eles fornecem em atividades de leitura prévias aos encontros presenciais.”

Adaptando os procedimentos do Ensino sob Medida a nossos propósitos, um questionário sobre propagação do som e acústica foi elaborado e enviado aos estudantes duas semanas antes do primeiro encontro. As perguntas foram preparadas de tal forma que o aluno desse as respostas sem a “pressão” de acertar ou errar como em uma lista de exercícios. Dos 20 alunos que participaram das atividades, 14 enviaram suas respostas,

sendo 8 da primeira série e 6 da segunda série. Com as respostas em mãos, a exposição do professor e as discussões em sala de aula foram orientadas de acordo com as ideias e dificuldades apresentadas pelos alunos nos questionários. O questionário completo está no Apêndice C. A seguir mostraremos as questões e analisaremos algumas respostas.

4.2. Respostas ao questionário

Propagação do som: questões 1 a 3

As três primeiras questões do questionário foram elaboradas visando fomentar uma reflexão do estudante sobre a propagação do som, em particular se essa propagação é ou não instantânea. As questões 1 e 2 foram retiradas da dissertação de Sergio Tobias da Silva [Silva 2011]. A primeira questão está mostrada na Figura 4.1. Na opção A (a correta) o som se move de forma progressiva até atingir o ouvinte. Em B, o som chega até o ouvinte no mesmo instante em que a buzina é acionada e sua intensidade aumenta gradativamente.

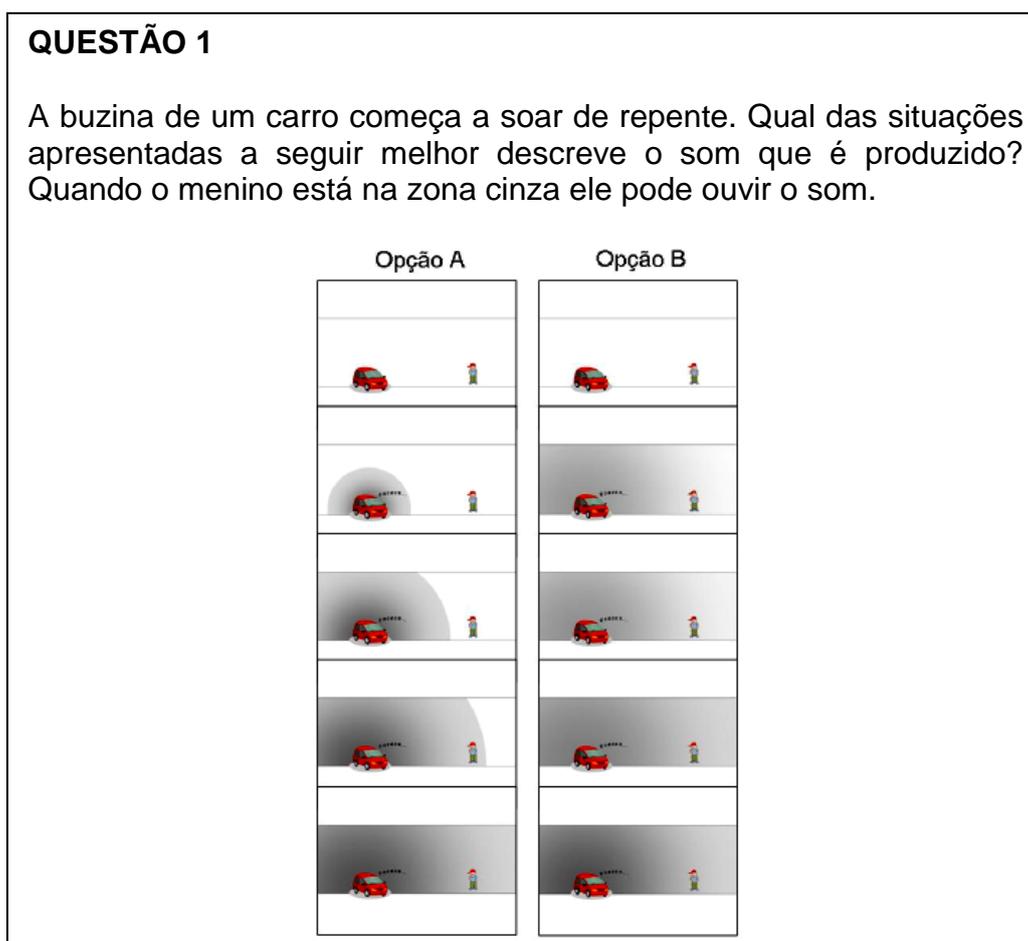


Figura 4.1: Questão inicial sobre a propagação do som. Em A o som se move de forma progressiva até atingir o ouvinte. Em B o som chega até o ouvinte no mesmo instante em que a buzina é acionada e sua intensidade aumenta gradativamente.

As respostas dos alunos a esta questão estão representadas na tabela e gráficos mostrados a seguir. A Tabela 4.1 que mostra a taxa de respostas em cada item dos alunos da primeira e segunda séries.

Questão 1		
	1ª Série	2ª Série
A	13 %	83 %
B	87 %	17 %

Tabela 4.1: Distribuição das respostas (em porcentagem) por item e série.

De acordo com a Tabela 4.1, o índice de acerto dos alunos da segunda série é muito superior ao dos alunos da primeira série. Esses números mostram que a grande maioria dos estudantes dos anos iniciais acredita que o som emitido é percebido por um ouvinte de forma instantânea; já para grande parte da segunda série o som se propaga de forma gradativa. Os resultados da Tabela 4.1 estão apresentados graficamente nas Figuras 4.2 e 4.3.

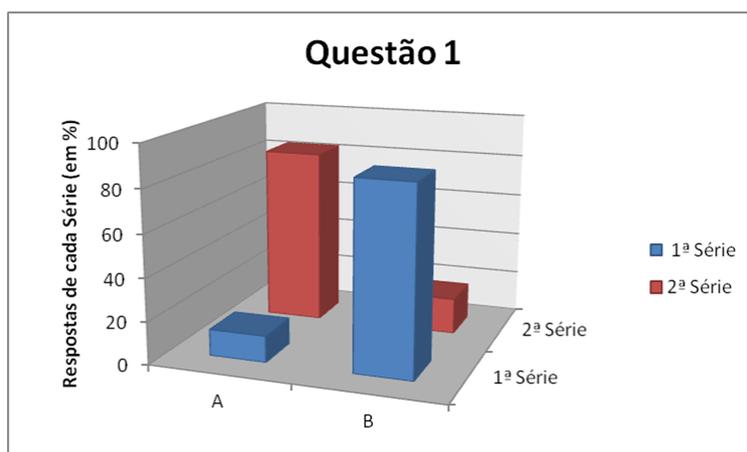


Figura 4.2: Distribuição das respostas (em porcentagem) por item e série.

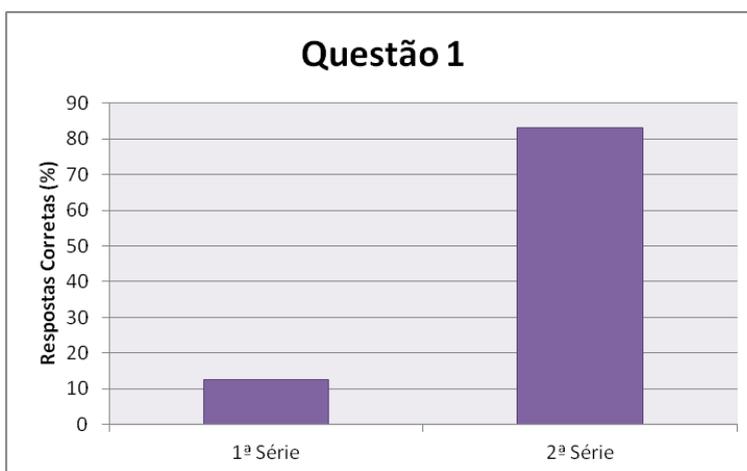


Figura 4.3: Taxa de acerto na 1ª questão, por série.

A segunda questão, mostrada na Figura 4.4, pode ser considerada como continuação da primeira, pois as opções ilustram diferentes noções sobre o desaparecimento do som quando a buzina para de soar. Na opção A o som retorna ao carro depois que a buzina cessa. Em B (a resposta correta) o som se afasta do carro e passa pelo ouvinte com velocidade finita. Em C o som desaparece simultaneamente em todos os pontos do espaço.

QUESTÃO 2

A buzina de um carro para de soar de repente. Qual das situações apresentadas a seguir melhor descreve o desaparecimento do som? Quando o menino está na zona cinza ele pode ouvir o som.

Opção A	Opção B	Opção C

Figura 4.4: A segunda questão apresentada aos alunos. Na opção A o som retorna ao carro depois que a buzina cessa. Em B o som se afasta do carro e passa pelo ouvinte com velocidade finita. Em C o som desaparece simultaneamente em todos os pontos do espaço.

A Tabela 4.2 mostra a distribuição de respostas à questão 2 por item e pela série dos alunos. Nesta questão os alunos da primeira série atingiram uma taxa de acerto

muito maior do que na primeira questão chegando a 87 %, superando inclusive os alunos da segunda série que chegaram a 67 %. Aparentemente, os alunos da primeira série concebem de formas distintas o surgimento e o desaparecimento de um som. Os alunos da segunda série, apesar de nunca terem estudado formalmente física ondulatória (assim como os alunos da primeira série), apresentaram noções mais apropriadas e coerentes sobre a propagação do som. Um fato curioso é que nesta questão nenhum aluno marcou a opção C, na qual o som desaparece simultaneamente em todos os pontos do espaço, justamente o processo oposto ao mostrado na opção B da questão 1.

Questão 2		
	1ª Série	2ª Série
A	13 %	33 %
B	87 %	67 %
C	0 %	0 %

Tabela 4.2: Distribuição das respostas (em porcentagem) por item e pela série dos alunos.

As Figuras 4.5 e 4.6 mostram graficamente os resultados da Tabela 4.2.

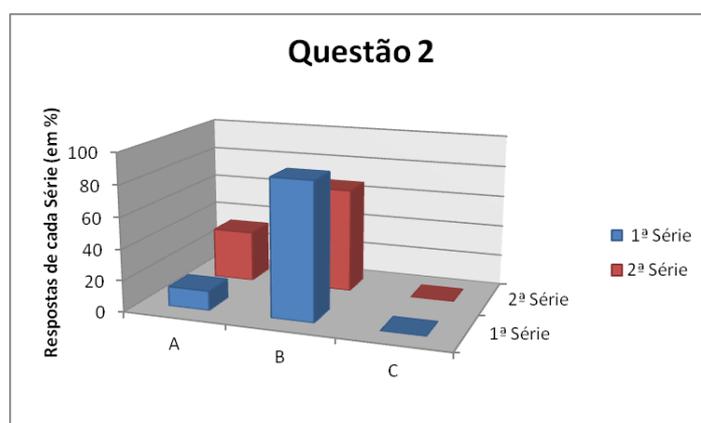


Figura 4.5: Distribuição de respostas na 2ª questão.

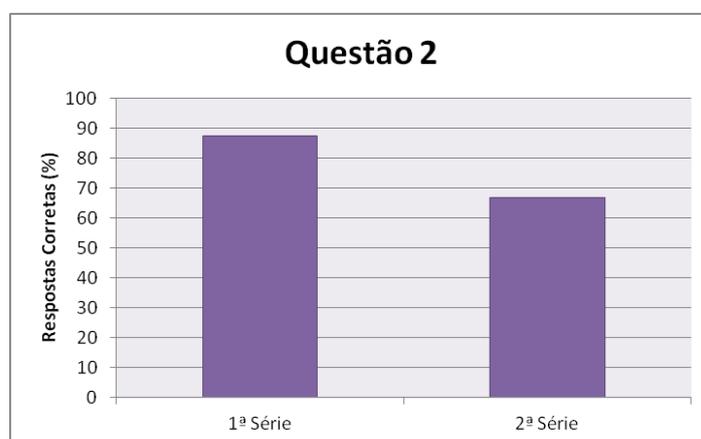


Figura 4.6: Percentagem de acerto na 2ª questão, por série.

A questão 3, mostrada na Figura 4.7, é discursiva e estimula o aluno refletir sobre se a propagação do som é instantânea ou não.

QUESTÃO 3

Por que você vê o relâmpago e só depois ouve o som emitido?

Figura 4.7: A terceira questão sobre propagação do som.

Respostas típicas estão apresentadas abaixo. Uma aluna da primeira série escreveu que:

“Pois a velocidade da luz é mais rápida que a sonora.”

A resposta de um aluno da segunda série foi:

“Porque a velocidade da luz é muito superior à velocidade do som. Temos que a velocidade da luz é de aproximadamente 300.000 km/s e a velocidade do som aproximadamente 340 m/s (1224 km/h).”

De maneira geral as respostas exibidas pelos alunos mostraram um entendimento de que a velocidade da luz é muito superior à velocidade do som e isso faz com que o som seja percebido depois da luz ter sido vista. Para os alunos da primeira série, a incompatibilidade desse resultado com o das questões anteriores é evidente. Mesmo alunos da segunda série que tiveram dificuldades nas primeiras questões deram respostas cabíveis à questão 3. Sendo essa questão uma pergunta comum, talvez os alunos já conhecessem a resposta ou a tenham procurado em livros ou internet.

Eco: questões 4 e 5

As questões 4 e 5 envolvem as noções dos alunos sobre reflexão do som e eco, fenômenos importantes para a compreensão da reverberação. O enunciado da questão 4 está na Figura 4.8.

QUESTÃO 4

Você já ouviu um eco? Descreva em que circunstâncias isso aconteceu. Como você explicaria esse eco?

Figura 4.8: Questão sobre eco.

A resposta de um aluno da primeira série foi:

“Sim, quando estava em um lugar vazio, no vácuo.”

Um aluno da segunda série escreveu:

“Sim, no estacionamento do *shopping*, quando estava quase vazio. Por que não tinham muitas coisas para o som bater e refletir, ele apenas se espalhou.”

Pelas respostas, boa parte dos alunos mostrou familiaridade com o fenômeno do eco e foi capaz de relacioná-lo à reflexão do som.

A quinta questão, mostrada na Figura 4.9, busca estimular os alunos a avaliar suas noções sobre propagação e reflexão do som, descrevendo como alguns animais utilizam o eco na localização de obstáculos e presas.

QUESTÃO 5
Explique como alguns mamíferos como os morcegos, os golfinhos e as baleias utilizam o eco de sons que eles emitem para substituir a visão em condições onde esta é insuficiente, de noite no caso dos morcegos ou em águas escuras ou turvas para os golfinhos. Faça um desenho para complementar sua explicação.

Figura 4.9: Questão sobre eco e localização.

A resposta um aluno da primeira série foi:

“Eles usam a ecolocalização. Esses animais emitem uma onda sonora, quando essa onda bate em algo ela volta e o animal sente.”

Essa resposta veio acompanhada pelo desenho mostrado na Figura 4.10.

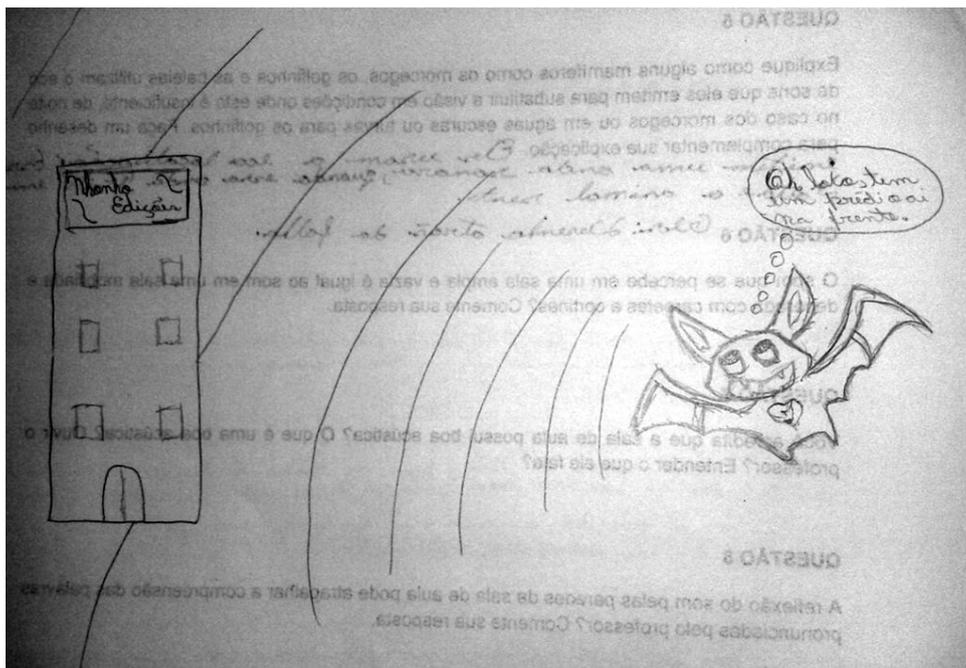


Figura 4.10: Desenho de um aluno da 1ª série.

Uma aluna, também da primeira série, respondeu que:

“Eles emitem sons que ecoam até determinada distância para desviarem de objetos e lugares.”

O desenho que acompanhou essa resposta está na Figura 4.11.

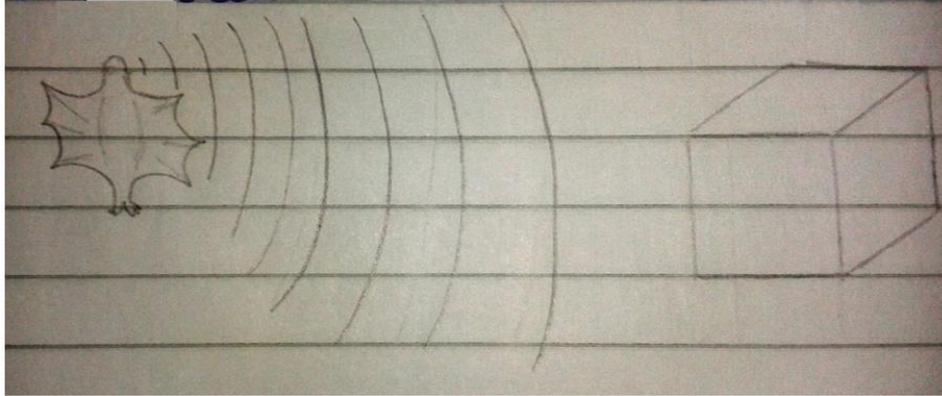


Figura 4.11: Desenho de uma aluna da 1ª série.

Um aluno da segunda série escreveu que:

“Eles utilizam o som refletido, logo sabem onde estão os obstáculos.”

A imagem que veio com a resposta está na Figura 4.12 e foi retirada da internet, como fizeram quase todos os alunos da segunda série.

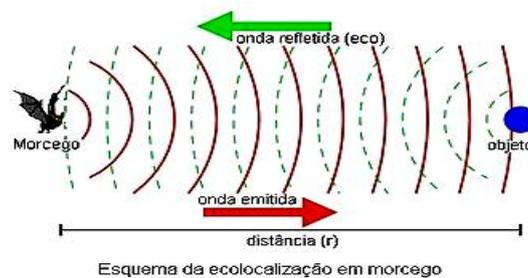


Figura 4.12: Imagem retirada da internet por um aluno da 2ª série.

Os alunos de ambas as séries relacionaram emissão e a reflexão do som em um objeto como sendo o eco, isto pode ser observado tanto nas respostas como nos desenhos.

Reverberação: questões 6 a 8

As questões seguintes, 6, 7 e 8, conduzem o aluno a refletir sobre como a acústica de um ambiente depende dos elementos no seu interior, sobre o que significa uma ‘boa acústica’ e sobre o efeito do eco e reverberação na qualidade acústica. A questão 6 está mostrada na Figura 4.13.

QUESTÃO 6

O som que se percebe em uma sala ampla e vazia é igual ao som em uma sala mobiliada e decorada com carpetes e cortinas? Comente sua resposta.

Figura 4.13: Questão sobre a acústica em diferentes ambientes.

Resposta de uma aluna da primeira série:

“Não, pois em uma sala com móveis não há a ampliação do som, já na sala sem móveis há.”

A resposta de um aluno da segunda série foi:

“Não, porque o som em uma sala mobiliada tem mais elementos que absorvem o som.”

Em geral o padrão de resposta dos alunos mostra que eles percebem a diferença do som que se propaga na sala em situações diferentes, com e sem móveis. Entretanto, as justificativas deles são variadas como vemos dos exemplos acima: Enquanto um diz “...há a ampliação do som...” o outro diz “...mobiliada tem mais elementos que absorvem...”.

A questão 7, mostrada na Figura 4.14, trata da opinião dos alunos sobre a qualidade acústica da sua sala de aula e sobre o significado de ‘boa acústica’.

QUESTÃO 7

Você acredita que a sala de aula possui boa acústica? O que é uma boa acústica? Ouvir o professor? Entender o que ele fala?

Figura 4.14: Questão sobre qualidade acústica da sala de aula.

Resposta de uma aluna da primeira série:

“Sim. Um bom som. Sim. Sim.”

Resposta de uma aluna da segunda série:

“Sim. Ter a capacidade de ouvir e entender ao mesmo tempo. Sim. Sim.”

De maneira geral os alunos acreditam que a sala de aula possui boa acústica. No entanto, o significado disso varia de aluno para aluno, como vemos nos exemplos acima. Enquanto a aluna da primeira série relaciona essa boa acústica a *um bom som*

sem deixar claro o que seria o bom som, a aluna da segunda série é mais específica ao mencionar *a capacidade de ouvir e entender ao mesmo tempo*.

A questão 8, mostrada na Figura 4.15, estimula o estudante a pensar sobre efeitos indesejáveis da reflexão do som pelas paredes da sala de aula.

QUESTÃO 8

A reflexão do som pelas paredes da sala de aula pode atrapalhar a compreensão das palavras pronunciadas pelo professor? Comente sua resposta.

Figura 4.15: Questão sobre os efeitos da reverberação na sala de aula.

Resposta de um aluno da primeira série:

“Sim, pois dependendo do tamanho dessa reflexão pode acabar confundindo o aluno na hora da explicação.”

Resposta de um aluno da segunda série.

“Depende. No caso da minha sala, a quantidade de alunos é mínima logo o som refletido pelas paredes ajudam o professor e os alunos para um entendimento melhor.”

Observe que nessas respostas os alunos se posicionam de forma diferente, enquanto um acredita que a reflexão do som pode atrapalhar a explicação, o outro relaciona a reflexão do som com a quantidade de alunos na sala de aula, presumindo que o som refletido melhora o entendimento.

Ruído de fundo: questões 9, 10 e 11

Além da reverberação, citada de forma indireta nas questões anteriores, o ruído também é importante e deve ser considerado para avaliar a acústica de um ambiente. Por isso as três próximas questões envolvem a percepção dos alunos sobre o ruído e seus efeitos. A questão 9, mostrada na Figura 4.16, trata do ruído no ambiente doméstico e suas fontes.

QUESTÃO 9

A sua casa é silenciosa ou barulhenta? Quais as principais fontes de barulho na sua casa? Nas proximidades da sua residência existe algum ambiente que gera muito barulho? Qual?

Figura 4.16: Questão sobre o nível de ruído no ambiente doméstico.

Resposta de uma aluna da primeira série:

“Barulhenta, carros, vizinhos com som alto. As vezes eu quero ver tv ou fazer alguma coisa e o barulho atrapalha.”

Resposta de uma aluna da segunda série:

“Silenciosa. A varanda. Sim, a casa do vizinho que possui caixa de som.”

As respostas mostram que os alunos diferenciam ambientes barulhentos e silenciosos, e que identificam as principais fontes de ruídos altos nas proximidades de suas casas. A aluna da primeira série, como a maioria dos estudantes, reconhece que o ruído tem efeitos negativos. Esse aspecto é aprofundado na questão 10, mostrada na Figura 4.17.

QUESTÃO 10

Você já se sentiu muito incomodado por barulhos? Que tipo de incômodo você sentiu?

Figura 4.17: Questão sobre o efeito de barulhos.

A resposta de um aluno da primeira série foi:

“Sim, em um show. Eu comecei a sentir incômodo no ouvido e dor de cabeça.”

A resposta de um aluno da segunda série foi:

“Sim. A impossibilidade de compreender o que é falado.”

A maioria dos alunos disse que já se sentiram incomodados por ruídos altos, sendo que para alguns esse incômodo se reflete na saúde e para outros o barulho atrapalha a comunicação.

A questão 11, mostrada na Figura 4.18, discute o barulho na escola e seus efeitos na sala de aula.

QUESTÃO 11

Quais ambientes da sua escola são mais e menos barulhentos? Esses barulhos chegam a dificultar o entendimento da aula? Por quê?

Figura 4.18: Questão sobre o nível de ruído na escola.

A resposta de um aluno da primeira série foi:

“A sala de aula é um dos mais silenciosos, já o pátio é bem ao contrário. Sim, além de tirar a atenção, a voz do professor não consegue ser maior do que o barulho.”

Um aluno da segunda série respondeu:

“O pátio é o mais barulhento e o menos barulhento é na sala de aula. Algumas vezes chegam a dificultar porque a quantidade de alunos presentes no tal horário multiplica assim o som refletido na sala de aula durante a explicação do professor.”

Em ambas as respostas, os ambientes mais e menos barulhentos citados pelos alunos são respectivamente o pátio e a sala de aula. Além destes alunos, uma boa parte dos estudantes respondeu praticamente a mesma coisa.

Som alto: questões 12 e 13

As duas últimas questões, 12 e 13, abordam o nível de intensidade sonora excessivo com o uso do fone de ouvido, equipamento utilizado por boa parte dos alunos. É sabido que ouvir música durante muito tempo com o som no último nível pode comprometer a saúde auditiva do aluno [West 2008, cap. 1]. A questão 12 é apresentada na Figura 4.19.

<p>QUESTÃO 12 Quando você ouve música no fone de ouvido, você consegue ouvir outros tipos de sons ao seu redor? Geralmente em que nível de potência você costuma ouvir as músicas com o fone, baixo, médio ou máximo? Existe algum motivo para isso?</p>

Figura 4.19: Questão sobre o nível de intensidade do som.

Uma aluna da primeira série respondeu:

“Não. Máximo. É mais emocionante escutar música no máximo, dependendo da pessoa.”

Resposta de uma aluna da segunda série:

“Depende do volume que estou escutando. Médio. Eu prefiro assim, porque eu posso escutar a música e o que falam perto de mim.”

A resposta da aluna da primeira série foi também a resposta da grande maioria dos alunos de todas as séries. No caso dessa aluna, o nível do som é diretamente

proporcional à emoção gerada pela música. Já a aluna da segunda série é mais comedida e procura ouvir no nível médio para poder escutar o que as pessoas ao redor falam. A questão 13 exibida na Figura 4.20, pergunta o que o aluno pensa sobre possíveis danos à audição causados por altos níveis sonoros da música que ele ouve.

QUESTÃO 13

Você acredita que pode ouvir sons de qualquer nível de potência sem prejudicar seu ouvido? Por quê?

Figura 4.20: Questão sobre a potência sonora e seus efeitos.

Resposta de uma aluna da primeira série:

“Não, pois o ouvido é sensível e com o tempo vai prejudicando a audição.”

Resposta de uma aluna da segunda série:

“Não, pois nosso ouvido é muito sensível e em alguma hora isso pode nos prejudicar de alguma forma porque o som está em contato direto com o tímpano.”

É interessante comparar as respostas às questões 12 e 13. Na última, praticamente todos os alunos dizem que não se pode ouvir som de qualquer potência, mas na questão 12 quase todos os alunos disseram que ouvem o som no nível máximo.

4.3. Os encontros com os alunos

Primeiro encontro

Como já mencionamos, realizamos dois encontros com alunos do ensino médio para discutir a acústica da sala de aula e outros ambientes. Os encontros tiveram duração de 1 hora e 40 minutos cada e ocorreram em semanas diferentes. A exposição do professor no primeiro encontro foi elaborada de acordo com a análise feita das repostas dos alunos e utilizou, entre outros recursos, a apresentação de slides, simuladores e vídeos. Esse material encontra-se no Apêndice E. Nesta etapa os estudantes foram estimulados a discutir entre si e com o professor sobre as respostas dadas no questionário. As respostas de alguns alunos foram mencionadas para motivar a reflexão de todos. A identidade desses alunos não foi inicialmente revelada para evitar qualquer forma de constrangimento, mas ainda assim a maior parte se identificou por

vontade própria. Participaram do primeiro encontro dez alunos da primeira série e cinco da segunda série. Mesmo alunos que responderam o questionário e esqueceram de enviar as respostas engajaram-se nas discussões. A ordem das questões seguida durante o encontro não foi a mesma do questionário. Por exemplo, a questão 3 (relâmpago e trovão) foi a primeira a ser debatida. Durante a discussão foi mostrada uma simulação computacional¹ que mostra um raio caindo num local distante, conforme ilustrado na Figura 4.21.



Figura 4.21: Um raio cai emitindo ondas sonoras.

Depois que os alunos observaram a simulação, alguns deles quiseram mudar a resposta dada à questão 1 (sobre propagação do som) para a opção correta (A). Isso mostra que no decorrer da discussão houve uma mudança na compreensão da propagação do som pelos alunos. Na sequência, os alunos foram apresentados a conceitos como frequência e intensidade sonora, incluindo uma tabela níveis de ruídos aceitáveis (ver Tabela 3.1). A unidade de intensidade sonora, o decibel, foi absorvida com certa naturalidade pelos estudantes. A tabela sobre ruídos também foi útil para estimular os alunos a refletirem sobre a pergunta: *Será que o nível de ruído na sua sala de aula é aceitável?* Diante desta pergunta, relacionada a vários itens do questionário, vários alunos disseram que não era possível responder pois não tinham nenhuma forma ou equipamento para medir o nível de ruído. Para resolver o problema, foram apresentados a eles alguns aplicativos para *smartphone* que permitem medir a intensidade do som em um ambiente. Ao final do encontro, os estudantes receberam material impresso que sugeria aplicativos a serem utilizados em diferentes modelos de smartphones e solicitava que esses fossem utilizados para registrar em uma tabela o

¹ Disponível em <http://www.vascak.cz/physicsanimations.php?l=pt>

nível de ruído na sala de aula e outros ambientes, inclusive fora da escola. Esse material encontra-se no Apêndice D.

O encontro prosseguiu com a apresentação e debate sobre reflexão de ondas sonoras, eco e, posteriormente, reverberação e seus efeitos em um ambiente. Os estudantes demonstraram dificuldades para entender a reverberação, ainda que tenham compreendido facilmente os conceitos envolvidos na reflexão e eco. Tendo em vista a dificuldade exposta pelos alunos, foi exibido um vídeo¹ que mostra o som reverberando em um ambiente em duas situações, com e sem painéis absorvedores de som. Os alunos notaram que o som permaneceu “vivo” no ambiente durante algum tempo, e que esse tempo era consideravelmente diferente nos dois casos. Após a apresentação do vídeo a dificuldade com o conceito de reverberação foi aparentemente superada por boa parte dos alunos.

Ainda no que diz respeito ao tempo de reverberação, foi perguntado aos alunos se tal prolongamento do som em uma sala de aula seria bom ou não, tema abordado nos itens 6, 7 e 8 do questionário. Após a argumentação, que refletiu basicamente as respostas dos estudantes ao questionário – alguns dizendo que o prolongamento era bom e outros que era ruim –, foi mostrado o tempo de reverberação apropriado a salas de aula e outras instalações escolares (ver Figura 2.3). No caso das salas de aula, viu-se que os dois argumentos eram válidos: algum prolongamento é bom pois reforça o som, mas o prolongamento excessivo é ruim pois prejudica a compreensão do que é dito.

Em seguida foi discutido como definir e medir o tempo de reverberação. A relação da reverberação com o decréscimo da intensidade de um som produzido de forma abrupta (um pulso sonoro muito curto) foi apresentada e o tempo de reverberação TR_{60} foi introduzido. Isso mostrou como os alunos podem medir o tempo de reverberação de sua sala de aula, compará-lo com os valores recomendados e a partir daí estimar se a qualidade acústica da sala é boa ou ruim.

Isso nos levou à questão do que é uma boa acústica, ou seja, se o tempo de reverberação é a única variável a ser considerada nessa avaliação.

Segundo alguns alunos, uma boa acústica seria ouvir o que é dito na sala de aula. Isso levou à seguinte pergunta: *Mesmo que o tempo de reverberação da sala de aula seja o ideal, seria possível entender o que o professor diz se houver muito barulho na sala ou próximo a ela?* Os alunos responderam que não, como era de se esperar. Com

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=JPYt10zrc1Q>

isso ficou claro que para avaliar a qualidade acústica de um ambiente é necessário saber, além do tempo de reverberação, o nível de ruído no local. Como já mencionamos, os alunos receberam ao final do encontro um material impresso que os estimulava a medir e anotar o nível de ruído na sala de aula e outros ambientes. A Figura 4.22 mostra fotos dessas atividades. O professor possuía um aplicativo calibrado com um decibelímetro profissional, que por sua vez foi utilizado para calibrar os aplicativos instalados pelos alunos.



Figura 4.22: Alunos registrando o nível de ruído de vários lugares.

O conteúdo exposto pelo professor no primeiro encontro foi distribuído aos alunos em cópia impressa e digital (enviada por email). Esse material está apresentado no Apêndice A.

Segundo encontro

O segundo encontro foi dedicado essencialmente ao aspecto operacional da medida do tempo de reverberação TR_{60} . A medida envolvia a gravação de um som de curta duração (a explosão de uma bexiga de festa ou uma batida de palmas) e a análise da forma de onda registrada. Diversas opções de equipamento para realizar a gravação foram apresentadas aos alunos: computador, *smartphone*, *tablet*, gravador digital, etc, e por conveniência o computador, um laptop, foi escolhido. Um programa de edição de áudio, o *Audacity*¹, foi utilizado para gravar e analisar os sons produzidos. A operação do equipamento e do programa durante a gravação foi descrita pelo professor. A medida do tempo de reverberação a partir da gravação foi explicada detalhadamente analisando um resultado obtido durante a própria aula. O método de análise, que utilizava os recursos gráficos do programa PowerPoint já estava descrito no material impresso

¹ <http://www.audacityteam.org/>

distribuído no encontro anterior (Apêndice A). Material extra contendo as instruções passo a passo para realização da gravação e análise foi distribuído no segundo encontro (ver Apêndice E). Nessa oportunidade os alunos realizaram suas próprias medidas de TR_{60} , reproduzindo o procedimento apresentado pelo professor.

Os alunos também mediram o nível de ruído na sala de aula e calcularam a relação sinal ruído S/R considerando que a voz do professor (o sinal) seria em média 70 dB. Esse valor havia sido previamente medido pelos alunos na aula anterior, a uma distância de aproximadamente 1 metro do professor. Foi explicado a eles que S/R é a diferença em decibéis entre o sinal que se deseja ouvir (no caso a voz do professor) e o ruído de fundo existente na sala.

Os resultados obtidos para o tempo de reverberação e a relação sinal ruído foram registrados numa folha distribuída pelo professor (ver Apêndice D), que continha um gráfico com curvas que mostravam o grau de inteligibilidade da fala (a porcentagem de palavras entendida, ver Seção 2.3, Figura 2.5) como função de TR_{60} e S/R. A Figura 4.23 mostra uma parte dessa folha.

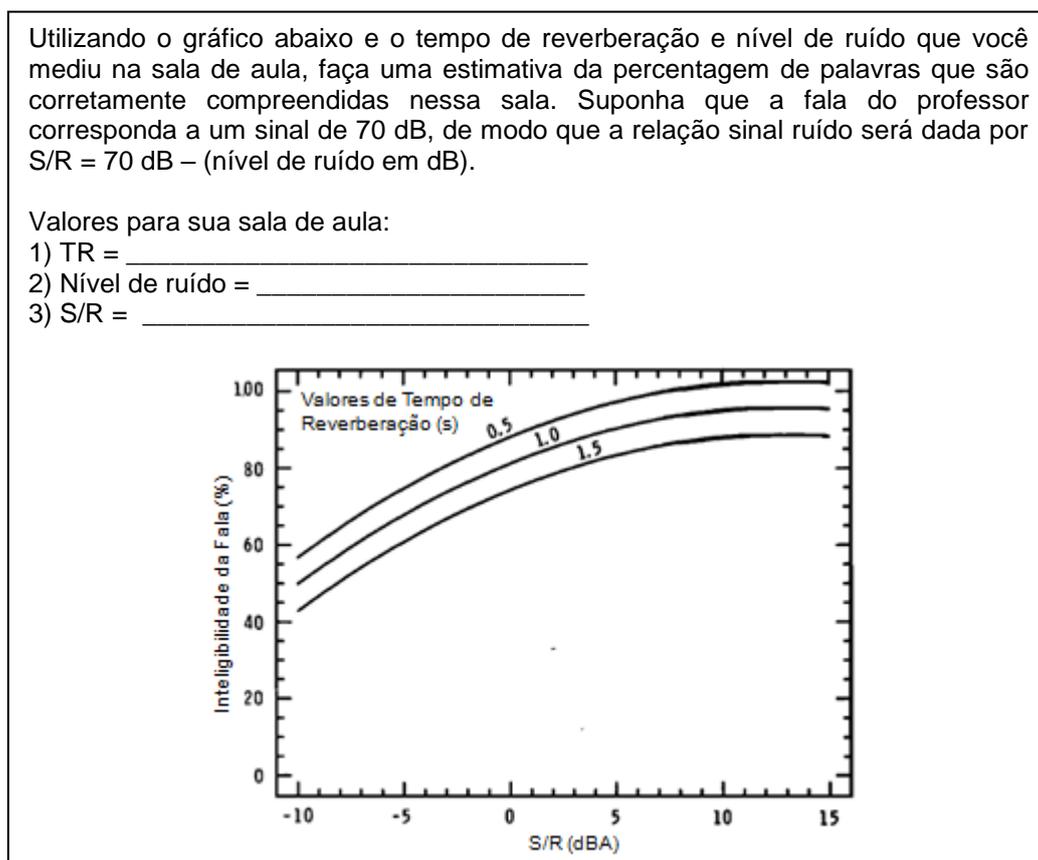


Figura 4.23: Parte da folha de dados preenchida pelos alunos para avaliação da qualidade acústica de sua sala de aula. Gráfico adaptado de [Bradley 1986].

4.4. Resultados das atividades práticas

Conforme descrevemos, após o primeiro encontro os estudantes fizeram medidas do nível de ruído em vários ambientes da escola e fora dela. Como exemplo, os valores obtidos por um aluno da primeira série estão mostrados na Figura 4.24. Para facilitar a leitura, apresentamos esses valores também na Tabela 4.1. Os demais alunos apresentaram resultados semelhantes.

The image shows two handwritten tables. The first table lists noise levels in dB and times in hours for various school and outdoor locations. The second table lists noise levels in dB and times in hours for other locations like a restaurant, library, and church.

Ambiente onde foi feita a medida	Nível de intensidade sonora (dB)	Horário (h)
SALA DE AULA - QUIETA	65,8 dB	10:43
PÁTIO - VAZIO	66,5 dB	10:45
SALA - PROFESSOR	48,9	10:46
BANHEIRO - M	63,6	10:47
ESTACIONAMENTO	59,1	10:47
PONTO BUSÃO	82,1	10:53
Banco do Brasil	78 dB	14:30

Ambiente onde foi feita a medida	Nível de intensidade sonora (dB)	Horário (h)
Restaurante	35 dB	15:10
Biblioteca	89,2	16:30
Igreja	30 dB	16:00
Igreja	58 dB	17:30
Gratuito Escolar	61,6	7:1
Academia	61,4	19:40

Figura 4.24: Níveis de ruído medidos por um aluno da 1ª série.

Ambiente onde foi feita a medida	Nível de intensidade sonora (dB)	Horário (h)
Sala de aula quieta	65,8	10 : 43
Pátio vazio	66,5	10 : 45
Sala dos professores	48,9	10 : 46
Banheiro masculino	63,6	10 : 47
Estacionamento	59,1	10 : 47
Ponto do 'busão'	82	10 : 53
Banco do Brasil	78	14 : 30
Restaurante	35	15 : 10

Bienal do livro	89,2	16 : 32
Igreja	30	16 : 00
Igreja	58	17 : 30
Ônibus escolar	61,6	07 : 01
Academia	61,4	19 : 40

Tabela 4.1: Os dados da Figura 4.25.

Alguns valores encontrados por esse aluno para determinados ambientes como restaurante e igreja estão dentro ou pouco acima dos limites apresentados na Tabela 3.1 da Seção 3.3. Já o valor encontrado para sala de aula está bem acima do limite aceitável. O estudante também mediu o nível de ruídos em muitos outros ambientes, o que provavelmente mostra que ele se interessou pela atividade sugerida em aula.

Durante o segundo encontro, para realizar as medidas de reverberação os alunos foram divididos em dois grupos. Alguns alunos tiveram inicialmente dificuldade para realizar a gravação, edição (com o programa *Audacity*) e análise dos dados (com os recursos gráficos do programa *PowerPoint*). Apenas um notebook, pertencente ao professor, foi utilizado pelos estudantes.

Com o intuito de familiarizar os estudantes com o procedimento de gravação do sinal sonoro, alguns deles utilizaram o equipamento para registrar e visualizar sons como o de sua voz, batidas de palmas, etc. A Figura 4.25 mostra um exemplo dessa atividade inicial.



Figura 4.25: Um aluno da 1ª série falando ao microfone e vendo a forma da onda.

Enquanto os alunos falavam ao microfone, a seguinte pergunta foi feita à turma: *Por que não podemos utilizar a gravação de uma pessoa falando para medir o tempo de reverberação?*

Os estudantes não tiveram dificuldade em responder essa questão, pois afirmaram que quando uma pessoa fala, ela emite sons praticamente contínuos e que isso não acontece quando se estoura um balão. Na sequência, um grupo de alunos se preparou para a produção e gravação de sons abruptos para obter o TR_{60} , conforme mostra a Figura 4.26. Em seguida eles realizaram a análise gráfica e fizeram seus cálculos no quadro da sala de aula, como ilustrado nas Figuras 4.27 e 4.28.



Figura 4.26: Alunos da 1ª série gravando a explosão de uma bexiga e observando a forma da onda registrada.

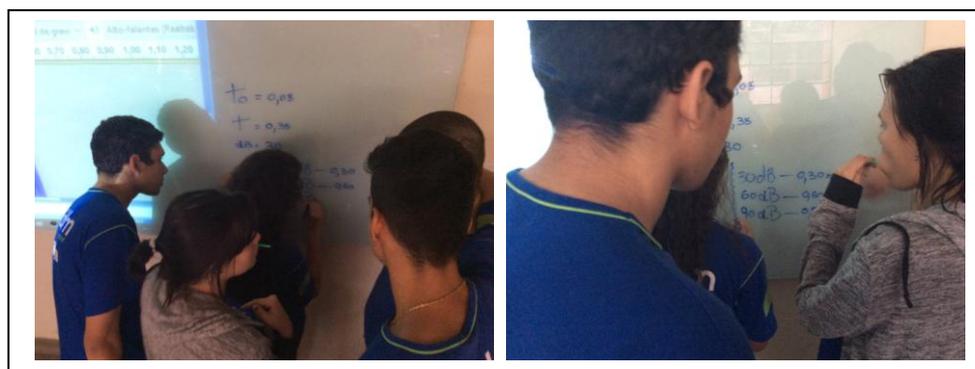


Figura 4.27: Alunos da 1ª série estimando o tempo de reverberação da sala de aula.

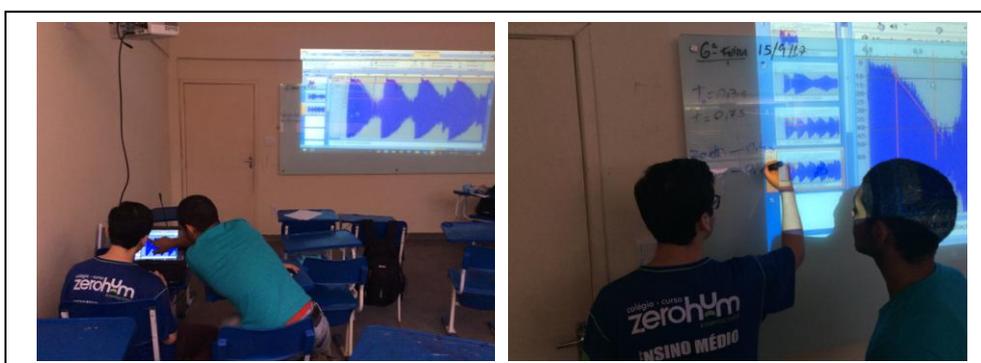


Figura 4.28: Alunos da 2ª série estimando o tempo de reverberação da sala de aula.

Os estudantes foram aconselhados a obter três valores de tempo de reverberação. A média aritmética desses valores seria sua estimativa do tempo de reverberação da sala

de aula. Os resultados encontrados pelos grupos da primeira série foram $TR_{60} = 0,74$ s e $0,70$ s. Os grupos da segunda série, em outra sala, encontraram $TR_{60} = 0,90$ s e $1,2$ s. Os resultados mostram que os tempos de reverberação nas duas salas de aula são maiores que o recomendado, principalmente na sala da segunda série. Lembramos que em salas de aula os valores aceitáveis de TR_{60} vão de $0,4$ s a $0,6$ s, como foi mostrado na Figura 2.3. No entanto, esses valores são típicos das salas em escolas internacionais e brasileiras, conforme pode ser visto na Tabela 2.5 e na Figura 2.4.

Além do tempo de reverberação, os alunos já sabiam como medir o nível de ruído na sala de aula utilizando seus *smartphones*. Foi então possível obter a relação sinal-ruído S/R (supondo um sinal de 70 dB) e estimar o grau de inteligibilidade da fala (percentagem de palavras compreendidas) nessa sala. A Figura 4.29 mostra um aluno realizando essa medida.



Figura 4.29: Aluno da 1ª série medindo a relação S/R na sala de aula.

As Figuras 4.30 e 4.31 mostram o grau de inteligibilidade da fala encontrado por alunos da primeira e segunda séries.

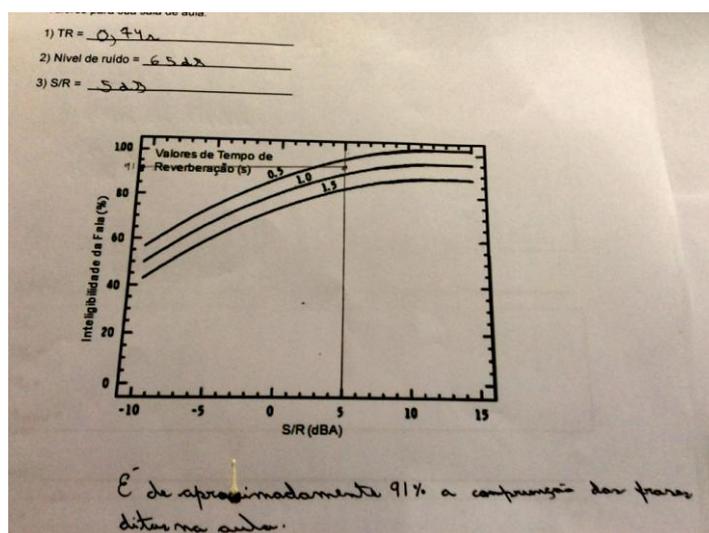


Figura 4.30: Um grupo da 1ª série obteve $TR_{60} = 0,74$ s e S/R = 5 dB (nível de ruído igual a 65 dB). Com tais valores estimaram como sendo de 91% o grau de compreensão da fala na sua sala de aula.

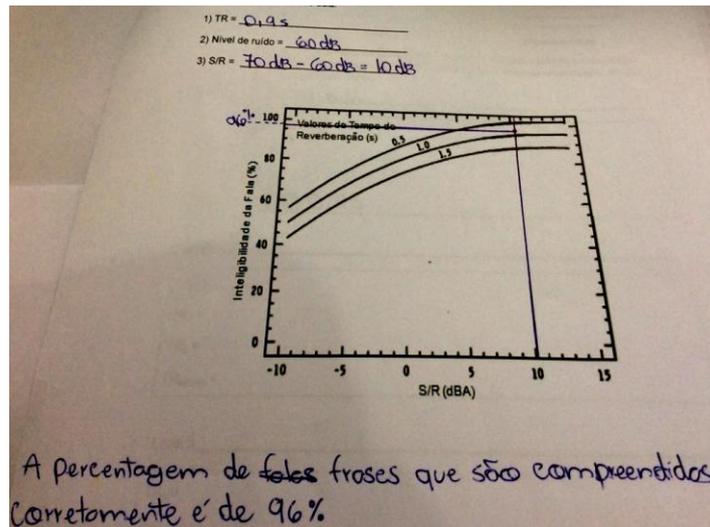


Figura 4.31: Um grupo da 2ª série obteve $TR_{60} = 0,90\text{ s}$ e $S/R = 10\text{ dB}$ (nível de ruído igual a 60 dB). Com tais valores estimaram como sendo de 96% o grau de compreensão da fala na sua sala de aula.

Observe que a relação S/R em sala de aula alcançada pelos alunos da primeira e segunda série foram, respectivamente, de 5 dB e 10 dB , supondo que a voz do professor (o sinal) tinha um nível de 70 dB . Esse nível é razoável para um aluno próximo ao professor, mas diminui gradativamente à medida que a distância entre eles aumenta. Com isso a taxa de reconhecimento da fala também diminui, como vemos na Figura 4.23 (ver também a Figura 2.6). Nesse sentido, os resultados encontrados pelos alunos correspondem à melhor taxa de inteligibilidade possível nas salas de aula investigadas. Uma sala com qualidade acústica considerada ótima permite uma taxa de reconhecimento acima de 90% [Fernandes 2006]. Logo, os valores das taxas de inteligibilidade encontrados pelos alunos, 91% e 96% correspondem a uma boa inteligibilidade. É importante ressaltar, no entanto, que esse resultado pode mudar devido a fatores como a distância professor-aluno, o nível de voz do professor ou o número de alunos (que influenciaria o nível de ruído). Por exemplo, se o nível de voz do professor for 60 dB , um valor bem comum, a taxa de inteligibilidade de palavras nas duas salas investigadas cairá para cerca de 70% e 80% .

Capítulo 5

Conclusão

Nesta dissertação descrevemos o significado e métodos de medida de parâmetros importantes para a avaliação da qualidade acústica de salas de aula (e outros ambientes): o tempo de reverberação, o nível de ruído e a relação sinal-ruído. No caso da sala de aula, o conhecimento dessas variáveis torna possível estimar a taxa de inteligibilidade da fala do professor, um elemento essencial à prática pedagógica. Também apresentamos atividades práticas em que alunos foram estimulados a realizar medidas e análises da qualidade acústica em suas salas de aula e em ambientes que frequentam cotidianamente. Antes dos estudantes realizarem essas atividades eles responderam a um questionário baseado nos princípios do “ensino sob medida”. Com as respostas em mãos, elaboramos uma aula sobre som e qualidade acústica que levava em conta as concepções apresentadas pelos alunos nesses questionários. As atividades práticas foram realizadas em dois encontros. No primeiro, os alunos foram estimulados a explicar o porquê de suas respostas ao questionário, promovendo um debate entre eles e o professor. Houve também uma exposição sobre som e qualidade acústica por parte do professor, após a qual os alunos foram convidados a realizar medidas do nível de ruído na sua sala de aula e em outros ambientes da escola e fora dela. Essa atividade pareceu cativar os estudantes, talvez por ter proporcionado a eles uma oportunidade de, ao realizarem suas medidas, sair um pouco da rotina de sala de aula. O engajamento dos alunos pôde ser constatado pelo fato deles terem buscado ambientes muito diversos para as medições de nível de ruído, como igreja, restaurante, biblioteca do livro, ônibus escolar e academia de ginástica.

No segundo encontro, os alunos foram orientados sobre como usar um programa de edição de áudio para fazer gravações, análises e medidas do tempo de reverberação em sua sala de aula. Durante essas atividades os alunos foram separados em dois grupos e os estudantes que tinham dificuldades com o uso do computador eram auxiliados pelos colegas do mesmo grupo que já haviam compreendido o que se deveria fazer e como fazê-lo. Na turma da primeira série, um dos grupos conseguiu fazer as medidas de forma relativamente rápida. Já o outro grupo inicialmente teve dificuldades com o uso do equipamento e a realização das medidas. Essas dificuldades, que posteriormente foram superadas, fizeram com que a aula demorasse mais tempo que o esperado e impediram que a exposição sobre a matemática da reverberação fosse realizada. Os dois

grupos da segunda série realizaram as atividades sem encontrar grandes problemas. Entretanto, como suas aulas tiveram menos tempo que o previsto, também não foi possível apresentar a eles a descrição matemática da reverberação.

Os resultados encontrados pelos grupos que melhor executaram as medidas do tempo de reverberação, nível de ruído e relação sinal-ruído estão na Tabela 5.1. Os valores obtidos nas (diferentes) salas de aulas das duas turmas são razoavelmente próximos uns dos outros e, ainda que não estejam em estrita concordância com as recomendações técnicas, não diferem muito dos parâmetros tipicamente encontrados em escolas no Brasil e outros países.

Série	Variáveis Acústicas		
	Tempo de Reverberação (s)	Nível de Ruído (dB)	Relação S/R (dB)
1ª Série	0,74	65	5
2ª Série	0,90	60	10

Tabela 5.1: Parâmetros acústicos encontrados pelos alunos nas salas de aula da 1ª e 2ª séries. O valor do sinal (voz do professor) foi tomado como 70 dB.

Os alunos utilizaram esses valores para aferir o grau de compreensão da fala em suas salas de aula, utilizando para isso resultados empíricos fornecidos pelo professor [Bradley 1986]. Nas duas salas a taxa de compreensão de palavras foi estimada em aproximadamente 94%, um resultado que pode ser considerados bom.

As atividades práticas também reforçaram o conhecimento dos estudantes sobre leitura de gráficos e tabelas, análise de relações de proporcionalidade e realização de medidas através de gráficos. Todos esses conhecimentos são importantes no estudo da Física e de outras disciplinas, e mesmo em atividades cotidianas.

O presente trabalho mostrou que a qualidade acústica de ambientes escolares é um tema que pode ser introduzido com facilidade num currículo tradicional de física ondulatória e som. Uma consulta a livros-texto do ensino médio mostrou que a maioria faz apenas referências sucintas à reverberação (às vezes de forma inadequada), sem discutir seus efeitos sobre a qualidade acústica de ambientes. O mesmo pode ser dito sobre o nível de ruído e suas consequências, que podem chegar a danos à saúde. Até onde pudemos averiguar os periódicos dedicados ao ensino de física também não possuem muito material sobre esses aspectos da acústica.

A ausência de propostas didáticas contrasta com a importância do tema. Estudos mostram que a qualidade acústica da sala de aula afeta diretamente o desempenho

acadêmico dos estudantes, aferido por testes padronizados em disciplinas como Matemática, Ciência e outras [Shield 2008]. Os professores também têm seu rendimento comprometido, pois tendem a aumentar a intensidade da voz para superar as deficiências acústicas das salas de aula, o que pode prejudicar sua saúde vocal.

Para o aluno também é interessante ser capaz de investigar se a sua sala de aula possui uma boa acústica e, com isso, contribuir para a identificação e solução de possíveis problemas. Se encontrados, esses problemas podem ser levados à direção da escola, com pedido de que avaliações técnicas mais precisas sejam realizadas por profissionais, por haver risco das atividades escolares serem comprometidas.

Há várias maneiras de continuar este trabalho em atividades futuras. Por exemplo, a descrição matemática da reverberação não foi apresentada aos alunos por falta de tempo, como já mencionamos. Seria importante testar em sala de aula se a abordagem proposta nesta dissertação é eficiente. Outra linha de desenvolvimento interessante é o estudo dos danos à audição causados por níveis elevados de ruído. É comum que os jovens considerem que um bom aparelho de som seja aquele que forneça o maior volume sonoro, ou que um bom *show* tenha música muito alta. Também é comum que aparelhos com fone de ouvido sejam utilizados no volume máximo. A maioria dos adolescentes não demonstra qualquer receio quanto a futuros danos auditivos que esses hábitos possam causar. Por isso seria de grande interesse desenvolver com os alunos um trabalho no qual fosse possível ao menos estimar o nível do som ao qual eles estão submetidos ao escutar música a alto volume e o correspondente período de exposição. Com essas estimativas seria possível avaliar o risco à saúde que o aluno corre com essa prática, o que pode conscientizá-lo a evitar níveis sonoros excessivos que terminarão por causar danos irreversíveis aos seus ouvidos.

Apêndice A.
Qualidade Acústica da Sala de Aula



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

QUALIDADE ACÚSTICA DA SALA DE AULA

(Material para o aluno)

Marcio Ferreira Lacerda
&
Carlos Eduardo Aguiar

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Marcio Ferreira Lacerda, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Janeiro de 2018

QUALIDADE ACÚSTICA DA SALA DE AULA

1. Propagação do som

Ondas sonoras são ondas mecânicas, ou seja, necessitam de um meio material (ar, água, etc) para se propagar. Essas ondas comprimem e distendem o meio, produzindo zonas alternadas de pressão alta e baixa.

O som se propaga com uma velocidade finita, aproximadamente 340 m/s no ar. Por exemplo, se um raio cai em longe de uma pessoa, o som do trovão só será ouvido por essa pessoa após um determinado intervalo de tempo. Ela verá primeiramente a luz emitida pelo raio e somente depois ouvirá o barulho do trovão. A distância a que caiu o raio pode ser estimada multiplicando a velocidade do som pelo tempo transcorrido entre a chegada da luz e a do som. Por exemplo, se você ouve o som com um segundo de ‘atraso’, o raio caiu a aproximadamente 340 m; se o atraso fosse de 5 segundos a distância seria de 1.700 m.

2. Frequência e intensidade do som

A frequência com que as zonas de compressão e distensão se alternam em uma onda sonora é uma grandeza característica dessas ondas. O que chamamos de som audível são ondas em uma determinada faixa de frequência, que vai tipicamente de 20 Hz até 20.000 Hz. Esses limites não são fixos, variando de pessoa para pessoa. A figura a seguir mostra o espectro sonoro da audição humana e de alguns animais.

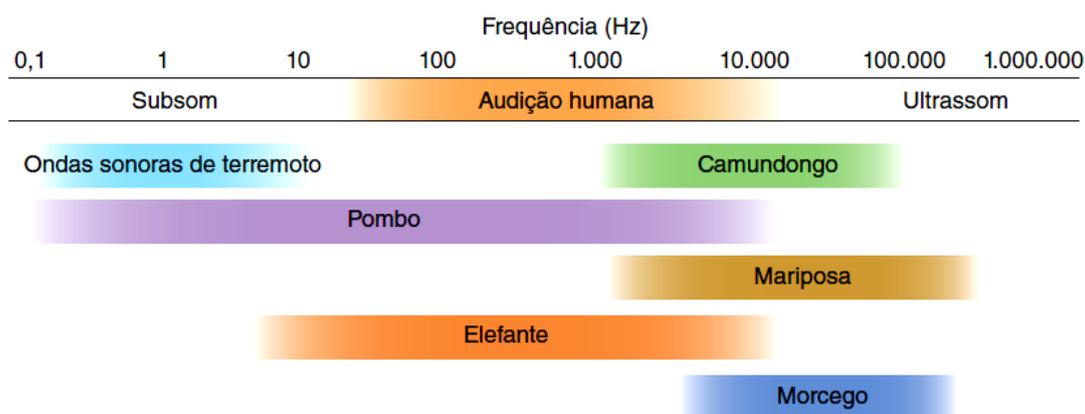


Figura 1: O espectro sonoro ouvido por alguns animais.

A intensidade de uma onda sonora é medida em unidades de *bel*, abreviada como B (o nome foi dado em homenagem a Alexander Graham Bell, um dos inventores do telefone). Geralmente um bel representa uma diferença muito grande de intensidade

sonora; por esta razão se usa mais o seu submúltiplo decibel (assim como usamos centímetro ou milímetro para medir comprimentos pequenos e deixamos o metro de lado muitas vezes). O decibel representa 1/10 do bel (deci = décima parte) e é abreviado como dB.

Já vimos que a audição humana é limitada, em termos de frequência, entre 20 Hz e 20.000 Hz. Em relação ao nível de intensidade sonora, nossa audição possui um limite inferior de 0 dB, aproximadamente. O limite superior é determinado, grosso modo, pela sensação de dor que pode ser provocada pelo som. O gráfico a seguir mostra em que valores de frequência (eixo horizontal) e nível de intensidade sonora (eixo vertical) o ouvido humano é capaz de ouvir o som.

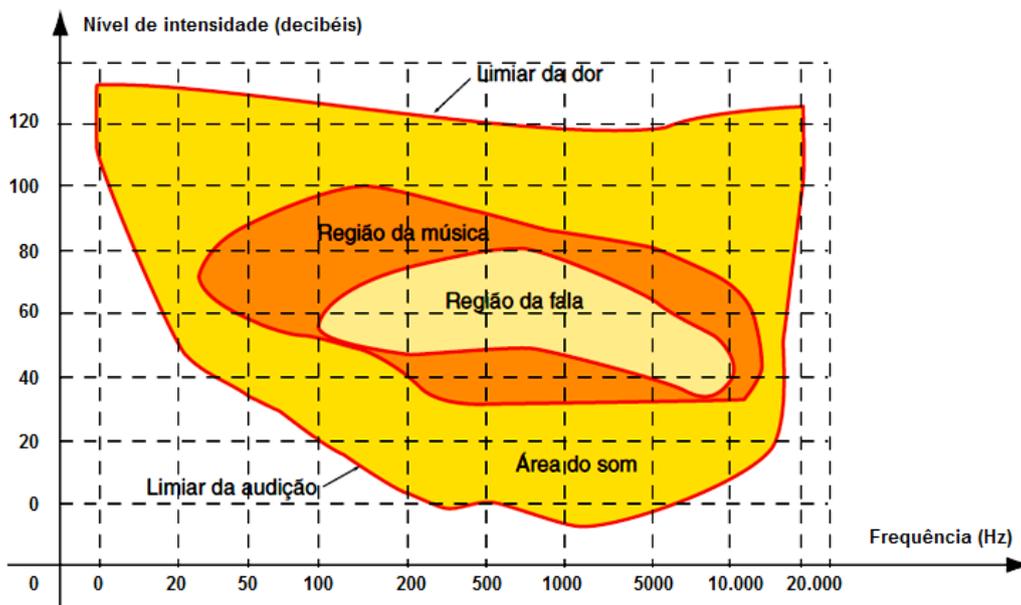


Figura 2: Região de intensidade sonora e frequência que o ouvido humano é capaz de ouvir.

3. Níveis de ruídos aceitáveis

Qualquer pessoa que seja exposta excessivamente a sons de alta intensidade pode sofrer danos auditivos irreversíveis. Os níveis aceitáveis de ruído são estabelecidos por normas técnicas e alguns exemplos para ambientes internos estão apresentados na Tabela 1. Níveis aceitáveis em diferentes tipos de áreas externas estão mostrados na Tabela 2.

Ambiente	dB
Hospitais (apartamentos, enfermarias)	40-50
Escolas (salas de aula)	40-50
Residências (dormitórios)	35-45
Residências (sala de estar)	40-50
Sala de concertos e teatros	30-40
Sala de conferência, cinemas de múltiplo uso	35-45
Restaurante, bares e confeitaria	40-50
Escritórios (salas de reuniões)	30-40
Igrejas e templos (cultos meditativos)	40-50
Pavilhão para atividades esportivas	45-60

Tabela 1: Níveis aceitáveis de ruído, em decibéis, para alguns tipos de ambientes internos (adaptado da norma NBR 10152).

Tipo de área	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Áreas estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Áreas mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Tabela 2: Níveis aceitáveis de ruído, em decibéis, para áreas externas (adaptado da norma NBR 101521).

Para proteger trabalhadores que estão submetidos a ruídos excessivos, a Legislação de Segurança, Higiene e Medicina do Trabalho estabelece limites de tolerância para ruídos contínuos e intermitentes conforme pode ser observado na tabela abaixo:

Nível de ruídos (dB)	Máxima exposição diária permitida
80	16 horas
85	8 horas
90	4 horas
95	2 horas
100	1 hora
105	30 minutos
110	15 minutos
115	7 minutos

Tabela 3: Máxima exposição diária permitida para ruídos (adaptado da norma NR-15 do Ministério do Trabalho).

É possível medir o nível de ruído de um ambiente através de um aparelho chamado *decibelímetro*. Existem aplicativos que permitem que você use seu celular como um decibelímetro (não tão preciso quanto um aparelho profissional). Há diversos

aplicativos desse tipo para Android e iOS e muitos são gratuitos. A Figura 3 mostra um desses aplicativos durante a medida do nível de intensidade sonora em um ambiente.

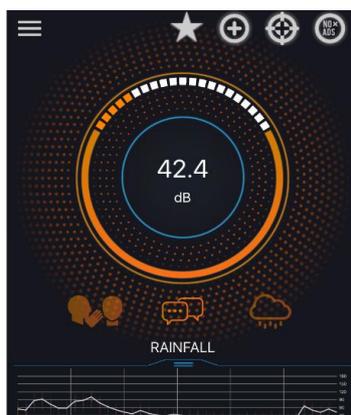


Figura 3: Aplicativo em um celular medindo o nível de intensidade sonora em decibéis.

4. Reflexão e Eco

A reflexão do som ocorre quando uma onda sonora encontra um obstáculo e retorna para o meio no qual estava se propagando. O eco é um fenômeno associado à reflexão do som. Por exemplo, quando uma pessoa grita em um ambiente amplo, como uma caverna, ou em uma região de montanhas, após alguns instantes pode ouvir novamente a própria voz. É o som emitido que, refletido, volta à sua origem.

A ecolocalização, ou biossonar, é um sentido encontrado em alguns animais (morcegos e golfinhos, por exemplo) que lhes permite determinar a posição de objetos por meio de emissão de ondas sonoras, no ar ou na água. Pelo tempo gasto para que essas ondas sejam refletidas no alvo e voltem como eco, o animal descobre a localização de corpos e obstáculos à sua volta.

Além dos animais, alguns seres humanos excepcionais também utilizam a ecolocalização. Por exemplo, o norte-americano Ben Underwood, que foi diagnosticado com câncer na retina e por isso teve seus olhos removidos aos três anos, era capaz de detectar objetos com batidas de palmas, cliques e estalos com a boca. Com esses sons ele era capaz de localizar o que estava ou seu redor, o que lhe permitia dispensar o auxílio de bengalas, cães guia, etc.

O princípio do eco também é utilizado na construção de instrumentos para avaliar distâncias, dimensões e formas, como o sonar e os aparelhos de ultrassonografia. O sonar é empregado, por exemplo, para estudar perfil do fundo do mar e na pesca, para localizar cardumes.

5. Reverberação: múltiplos ecos

O som produzido em um ambiente fechado (uma sala de aula, por exemplo) se propaga em várias direções e pode passar por múltiplas reflexões antes de chegar a um ouvinte. Essas múltiplas reflexões chegam ao ouvinte em instantes diferentes, muito próximos um do outro, gerando uma persistência do som mesmo após cessar sua emissão pela fonte sonora. Esse efeito é conhecido como *reverberação*.

A Figura 4 ilustra como múltiplas reflexões de um mesmo som podem chegar a um ouvinte, sobrepondo-se e gerando a reverberação.

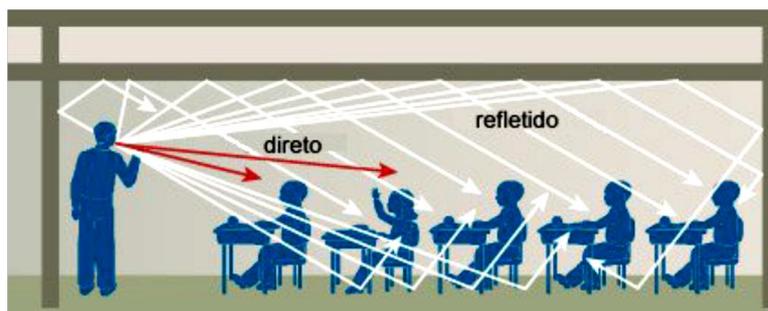


Figura 4: Ilustração do fenômeno da reverberação.

Como a cada reflexão o som perde uma fração da sua energia inicial, a reverberação tende a desaparecer com o tempo. Esse efeito está representado esquematicamente no gráfico da Figura 5.

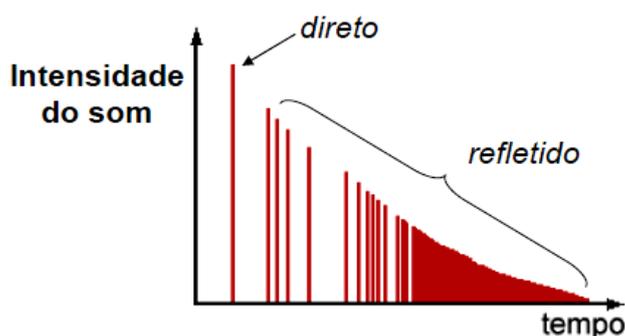


Figura 5: Reverberação de um pulso sonoro quase instantâneo.

Eco e reverberação não são sinônimos embora ambos sejam causados pela reflexão do som. O eco é o som que chega ao ouvinte após, essencialmente, uma única reflexão por um obstáculo distante, que é percebida após um intervalo de tempo suficiente para ser distinguida do som original. Na reverberação, como já foi dito, o som chega ao ouvinte após várias reflexões no próprio local, criando um prolongamento

auditivo. Se alguém está em um lugar muito reverberante, está pessoa ouve o som de sua voz sobreposto ao que acabou de dizer nos instantes anteriores.

6. Tempo de reverberação

Um ambiente muito reverberante pode trazer problemas no que diz respeito à inteligibilidade das palavras emitidas. Ao pronunciar-se um vocábulo com várias sílabas, os sons sobrepõem-se, ou seja, ao emitir uma sílaba o som da sílaba anterior ainda pode ser ouvido, prejudicando a compreensão do que foi dito. Por outro lado alguma reverberação pode ser útil acusticamente, pois as reflexões produzem um reforço ao som percebido diretamente, permitindo que pessoas distantes da fonte sonora possam ouvi-la mais facilmente.

O tempo de reverberação de um recinto é um dos principais parâmetros para caracterizar sua qualidade acústica. Em um ambiente que possui tempo de reverberação muito longo, vemos que o som enviado por uma fonte permanece perceptível por mais tempo. Numa sala de aula, por exemplo, isso pode prejudicar a comunicação verbal entre professor e alunos. Por outro lado, se o tempo de reverberação for muito curto torna-se mais difícil a um aluno distante do professor escutar o que este diz.

É importante que se tenha cuidado antes de julgar se a reverberação é prejudicial, visto que isso depende da finalidade para a qual o ambiente foi projetado. Também é necessário ter um padrão quantitativo do grau de reverberação. Uma medida muito usada para isso é o tempo de reverberação TR_{60} (ou simplesmente TR), definido como o tempo necessário para que a intensidade do som decaia 60 decibéis a partir do momento no qual a fonte cessa de emití-lo.

Para medir o tempo de reverberação de um ambiente, uma possibilidade é produzir um som abrupto (como uma bexiga de festa sendo estourada) e gravá-lo com um celular, por exemplo. Muitos aplicativos de gravação mostram a forma da onda registrada (a pressão sonora em função do tempo), o que permite estimar visualmente a reverberação do ambiente. A Figura 6 mostra a gravação do estouro de uma bexiga, feita com um desses aplicativos. Vemos que o som do estouro leva alguns décimos de segundo para tornar-se imperceptível.

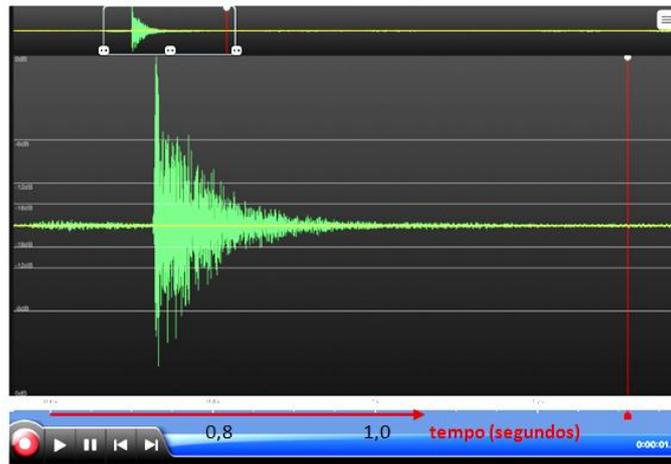


Figura 6: Reverberação do som produzido pelo estouro de uma bexiga de festa.

A Figura 6 mostra a forma da onda sonora produzida pelo estouro da bexiga. Para obter o tempo de reverberação TR_{60} precisamos de um gráfico que mostre o nível de intensidade sonora, medido em decibéis, em função do tempo. Um gráfico desse tipo está mostrado na Figura 7, também para o estouro de uma bexiga. Vemos que, medida em decibéis, a intensidade sonora decai proporcionalmente ao tempo transcorrido.

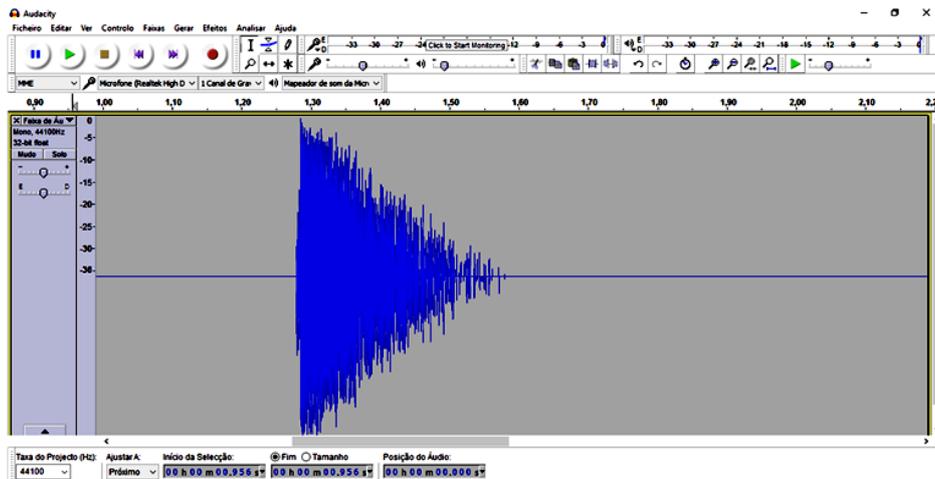


Figura 7. O nível sonoro, medido em decibéis, após o estouro de uma bexiga.

A Figura 8 mostra esquematicamente como a reverberação de um som abrupto, medida em decibéis, diminui linearmente com o tempo. Ou seja, seu gráfico é uma reta inclinada para baixo. O tempo de reverberação TR_{60} pode ser obtido diretamente desse gráfico, como também está mostrado na Figura 8.

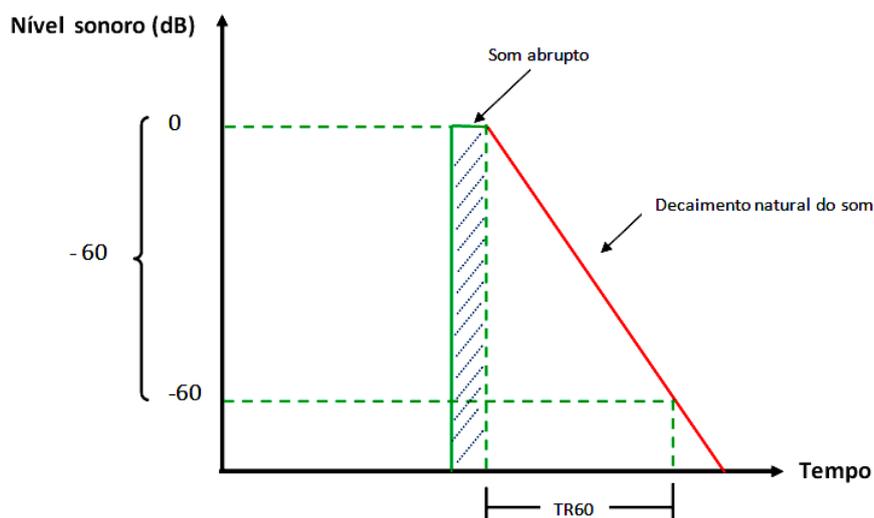


Figura 8: Tempo de reverberação (TR_{60}) de um som abrupto.

Vamos utilizar essas observações para obter o tempo de reverberação do som do estouro da bexiga mostrado na Figura 7. O nível sonoro registrado na figura cai de 0 dB a aproximadamente -30 dB, de modo que não podemos obter diretamente o tempo de reverberação TR_{60} como indicado na Figura 8. Só podemos medir diretamente o tempo necessário para cair 30 dB, que chamaremos de TR_{30} . Entretanto, como a queda do nível sonoro é proporcional ao tempo, o tempo TR_{60} é o dobro de TR_{30} , ou seja, medindo TR_{30} e multiplicando o resultado por 2 obtemos o tempo de reverberação TR_{60} .

Essa medida está ilustrada na Figura 9. Podemos utilizar um programa que permita fazer desenhos (Word, Powerpoint ou um editor de figuras) para inserir uma reta diagonal que acompanha o decaimento do nível sonoro, uma reta horizontal no nível de -30 dB e duas retas verticais. a primeira correspondente ao instante em que a diagonal passa por 0 dB e a segunda ao instante em que a diagonal passa por -30 dB. O tempo TR_{30} corresponde ao intervalo entre as retas verticais. Da escala de tempo mostrada na parte superior da Figura 9, vemos que esse intervalo vai de 1,0 s a 1,2 s, ou seja, $TR_{30} = 0,2$ s. Com isso, obtemos que o tempo de reverberação é $TR_{60} = 2 \times TR_{30} = 2 \times 0,2 \text{ s} = 0,4 \text{ s}$.

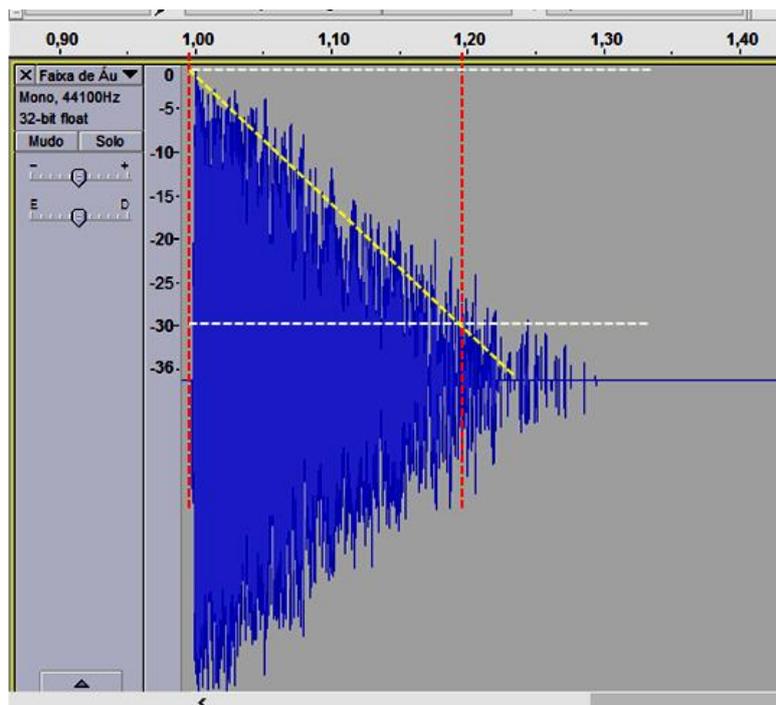


Figura 9: Medida do tempo de reverberação.

7. Tempo de reverberação e qualidade acústica

O tempo de reverberação adequado a cada ambiente é determinado por especialistas em acústica e arquitetura. A Figura 10 mostra as faixas aceitáveis de TR_{60} para alguns ambientes encontrados em escolas.

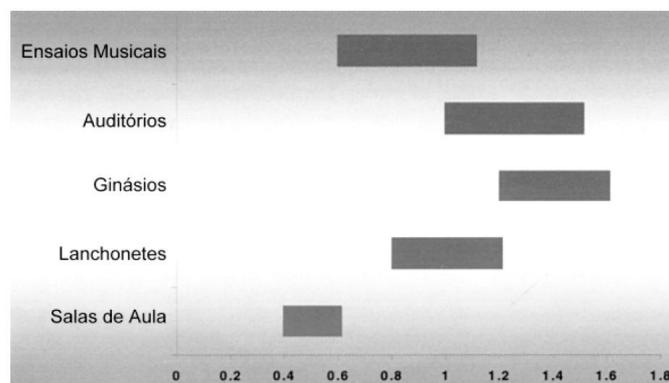


Figura 10: Tempos de reverberação (TR_{60} em segundos) apropriados a ambientes encontrados em instalações escolares.

Podemos ver na Figura 10 que o tempo de reverberação em uma sala de aula deve estar entre 0,4 e 0,6 s, aproximadamente. Se o tempo de reverberação ficar muito distante dessa faixa, a compreensão do que é dito pelo professor pode ficar comprometida.

8. Ruído e qualidade acústica da sala de aula

O tempo de reverberação não é o único elemento relevante para a qualidade acústica de uma sala de aula. Outro fator, tão ou mais importante, é o nível de ruído na sala. De acordo com as normas brasileiras, o nível de ruído aceitável em uma sala de aula está, no máximo, entre 40 e 50 dB (veja a Tabela 1). Para que o professor seja compreendido pelos alunos, sua voz deve estar acima do ruído na sala de aula. Em turmas de crianças pequenas a voz do professor deve estar no mínimo 15 dB acima do nível de ruído. Para alunos mais velhos essa diferença diminui, chegando a cerca de 5 dB no caso de turmas de adultos. Os alunos ouvem a voz do professor a cerca de 60 dB, em média, o que significa que ruídos ambientais muito acima do limite 40-50 dB tornam difícil entender o que está sendo dito na sala de aula.

A diferença em decibéis entre a voz do professor e o ruído da sala é chamada de *relação sinal-ruído* (S/R). Quanto maior for o valor da relação S/R, maior será a capacidade de compreensão da fala. A Figura 11 mostra como a taxa de compreensão de palavras depende da relação sinal-ruído e do tempo de reverberação da sala de aula. Vemos que quanto menor for a relação sinal-ruído e maior for o tempo de reverberação, pior será a qualidade acústica da sala de aula.

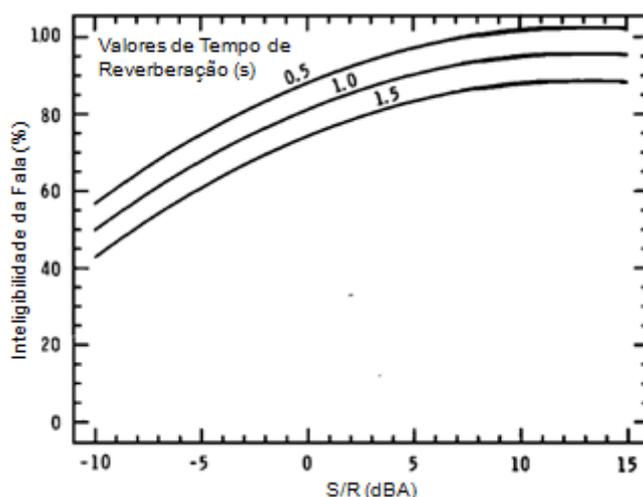


Figura 3.11: Percentagem de reconhecimento de palavras em função da relação sinal-ruído S/R e do tempo de reverberação.

Apêndice B.
A Matemática da Reverberação



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

A MATEMÁTICA DA REVERBERAÇÃO

(Material para professores e alunos)

Marcio Ferreira Lacerda
&
Carlos Eduardo Aguiar

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Marcio Ferreira Lacerda, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Janeiro de 2018

A Matemática da Reverberação

Vamos supor que uma pessoa se encontra no centro de um ambiente (sala, quarto, etc.) de comprimento L e emite um som. Este som vai em direção a uma das paredes, onde é refletido e parcialmente absorvido, como mostra a Figura 1.

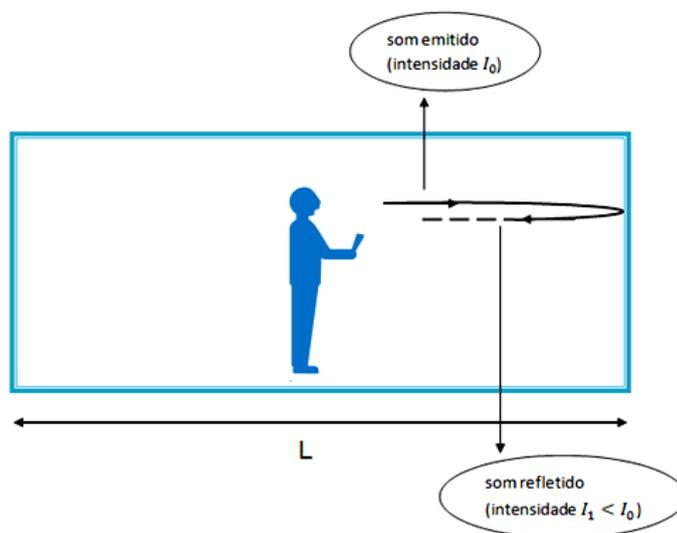


Figura 1: Primeira reflexão do som emitido.

Para simplificar nosso estudo, vamos desconsiderar as reflexões que ocorrem no chão, no teto e nas paredes laterais. O som emitido, com intensidade inicial igual a I_0 , vai ser ouvido pela pessoa após a primeira reflexão. Entretanto, sua intensidade agora será I_1 , menor que I_0 , pois parte da energia sonora que incidiu sobre a parede foi absorvida por ela durante a reflexão.

Essa primeira reflexão é seguida por outra, na parede oposta, e daí em diante o som é sucessivamente refletido pelas paredes conforme ilustrado na Figura 2.

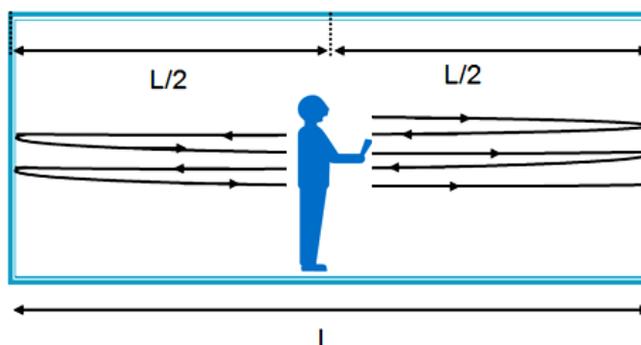


Figura 2. Reflexões sucessivas do som emitido.

A cada reflexão mostrada na Figura 2 o som é um pouco atenuado. Inicialmente, temos que a intensidade é I_0 . Após a primeira reflexão, já vimos que a intensidade

diminui devido à absorção. Podemos caracterizar essa absorção pelo “fator de atenuação” α , um número (maior que 1) que define como a intensidade diminui a cada reflexão. Com isso a intensidade após a primeira reflexão é

$$I_1 = \frac{I_0}{\alpha}.$$

Após a segunda reflexão, a mesma atenuação ocorrerá e a intensidade será

$$I_2 = \frac{I_1}{\alpha},$$

e substituindo

$$I_1 = I_0/\alpha$$

teremos

$$I_2 = \frac{I_0}{\alpha^2}.$$

Após a terceira reflexão,

$$I_3 = \frac{I_2}{\alpha},$$

e substituindo $I_2 = I_0/\alpha^2$ teremos

$$I_3 = \frac{I_0}{\alpha^3}.$$

Continuando esse raciocínio, após n reflexões a intensidade será

$$I_n = \frac{I_0}{\alpha^n}$$

ou,

$$I_n = I_0 \alpha^{-n}. \quad (1)$$

É possível relacionar a distância percorrida pelo som com o número n de reflexões da seguinte forma:

$$d = nL.$$

O tempo que o som leva para percorrer a distância d é

$$t = \frac{d}{c} = \frac{nL}{c}$$

onde c é a velocidade do som. O número de reflexões n pode ser escrito, então, como

$$n = \frac{c}{L}. \quad (2)$$

Com isso, podemos obter a intensidade do som em função do tempo, $I(t)$, substituindo a equação (2) na fórmula (1) para I_n , obtendo

$$I(t) = I_0 \alpha^{-\frac{c}{L}t}. \quad (3)$$

Vamos definir o Nível de Pressão Sonora (NPS), medido em decibéis (dB), como

$$NPS (dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_{ref}} \right).$$

Substituindo a equação (3) na fórmula acima encontramos

$$NPS (dB) = 10 \log_{10} \left(I_0 \cdot \alpha^{-\frac{c}{L}t} / I_{ref} \right)$$

ou seja,

$$NPS (dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{I_0}{I_{ref}} \right) + 10 \log_{10} \alpha^{-\frac{c}{L}t}.$$

Usando as propriedades do logaritmo, temos

$$NPS (dB) = - \left(\frac{c}{L} 10 \log_{10} \alpha \right) t + N_0$$

onde N_0 é independente do tempo:

$$N_0 = 10 \log_{10} \left(\frac{I_0}{I_{ref}} \right).$$

Definindo uma constante b como

$$b = \frac{c}{L} 10 \log_{10} \alpha \quad (4)$$

teremos

$$NPS (dB) = -bt + N_0. \quad (5)$$

Note que a fórmula (5) é a equação de uma reta, cujo gráfico está representado na Figura 3 (onde tomamos $N_0 = 0$). Podemos ver que a queda do nível sonoro é proporcional ao tempo transcorrido desde a emissão do som.

O tempo de reverberação TR_{60} é definido como o intervalo de tempo necessário para que a intensidade sonora caia 60 dB, ou seja, de N_0 para $N_0 - 60$ dB, como mostrado na Figura 3. Usando a equação (4) obtemos

$$N_0 - 60dB = -b TR_{60} + N_0$$

e, portanto,

$$TR_{60} = \frac{60}{b}.$$

Substituindo na fórmula anterior a equação (4) obtemos

$$TR_{60} = \frac{60}{\frac{c}{L} 10 \log_{10} \alpha}$$

e, com isso,

$$TR_{60} = \frac{6L}{c \log_{10} \alpha}$$

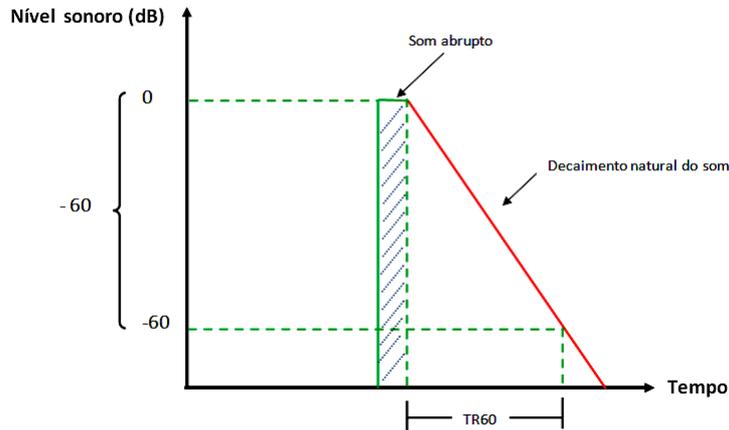


Figura 3: Diminuição do nível sonoro após a emissão de um som abrupto. O tempo de reverberação (TR_{60}) está indicado na figura.

No nosso modelo simplificado, o som é refletido apenas pelas paredes que se encontram à frente e atrás do ouvinte representado nas Figuras 1 e 2. Se a área total das paredes refletoras for S , a área de cada parede será $S/2$. Multiplicando por $S/2$ o numerador e o denominador da fórmula acima obtemos

$$TR_{60} = \frac{6L \frac{S}{2}}{c \frac{S}{2} \log_{10} \alpha} .$$

Mas o produto da área $S/2$ pelo comprimento L , será igual ao volume V do ambiente. Portanto

$$TR_{60} = \frac{12V}{c S \log_{10} \alpha}$$

Trocando a base do logaritmo na equação anterior, $\log_{10} \alpha = \log_{10} e \ln \alpha$, teremos

$$TR_{60} = \frac{12V}{c S \log_{10} e \ln \alpha}$$

e como $\log_{10} e = 0,43$ chegamos a

$$TR_{60} = \frac{12V}{c S 0,43 \ln \alpha}$$

Vamos considerar que a velocidade do som seja $c \approx 344 \text{ m/s}$, e vamos definir o coeficiente de absorção da superfície como $a = \ln \alpha$. Com isso obtemos

$$TR_{60} = \frac{0,08 V}{aS}$$

onde o tempo é medido em segundos e os comprimentos em metros. Esta é uma aproximação para a *fórmula de Sabine*, um resultado empírico obtido no século XIX por Wallace Sabine:

$$TR_{60} = \frac{0,161 V}{aS} .$$

Apêndice C.
Questionário Pré-Aula

QUESTIONÁRIO

Escola: _____ Professor: _____

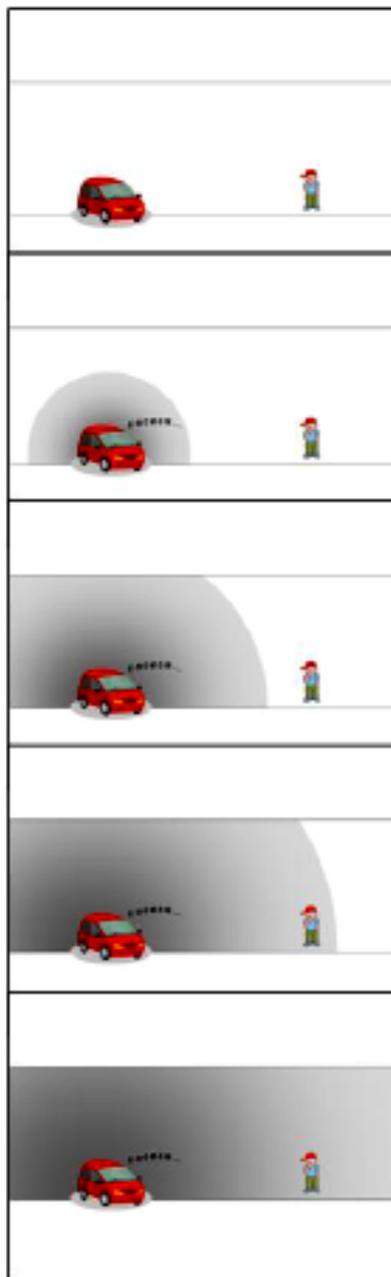
Aluno: _____

Série: _____ Turma: _____ Disciplina: _____

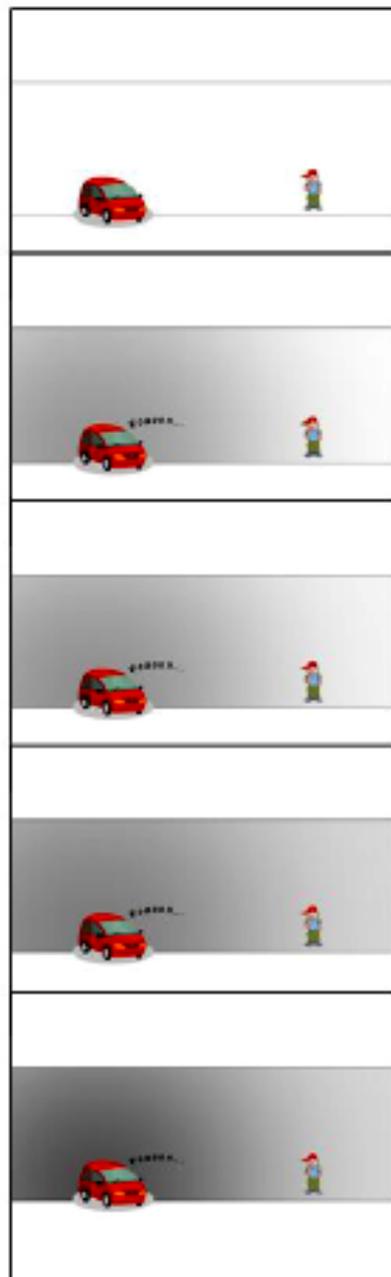
QUESTÃO 1

A buzina de um carro começa a soar de repente. Qual das situações apresentadas a seguir melhor descreve o som que é produzido? Quando o menino está na zona cinza ele pode ouvir o som.

Opção A

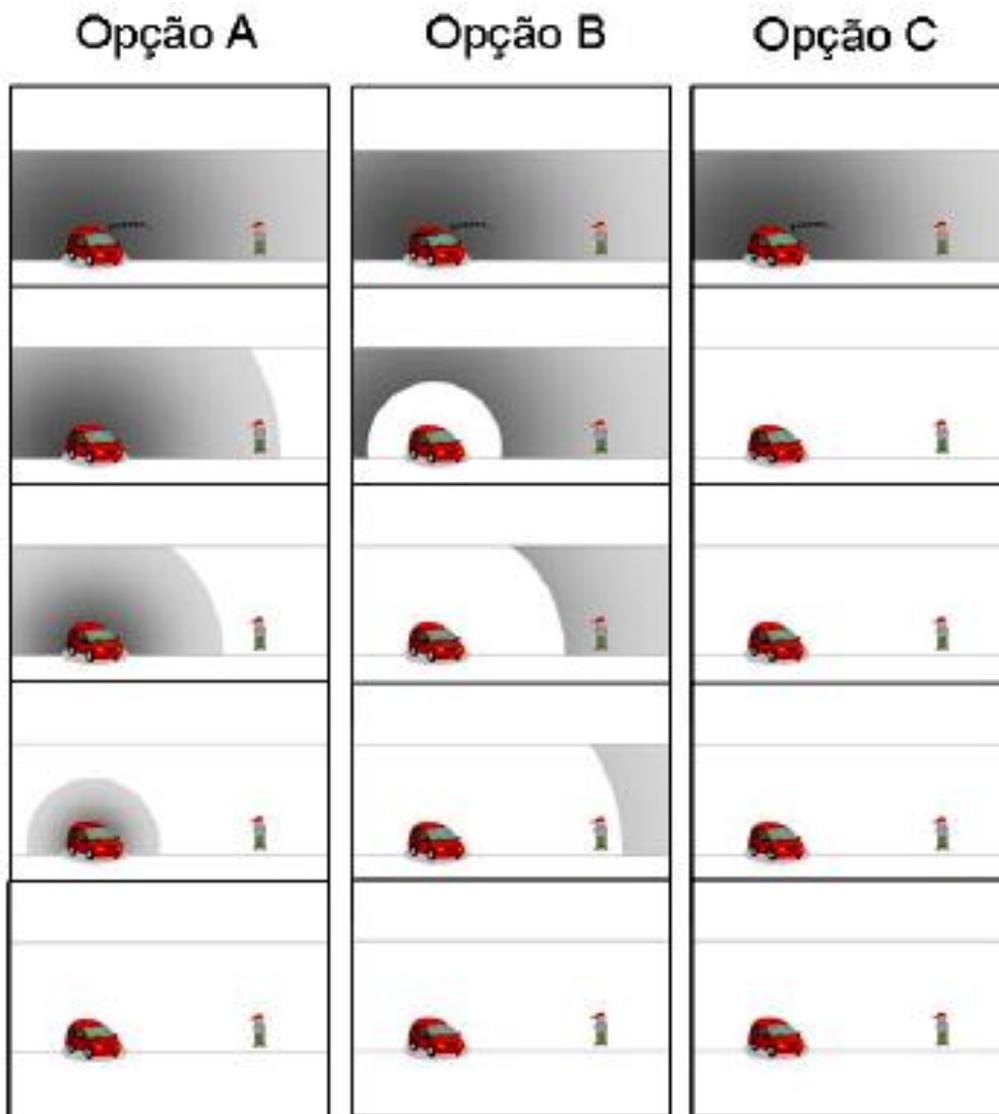


Opção B



QUESTÃO 2

A buzina de um carro para de soar de repente. Qual das situações apresentadas a seguir melhor descreve o desaparecimento do som? Quando o menino está na zona cinza ele pode ouvir o som.



QUESTÃO 3

Por que você vê o relâmpago e só depois ouve o som emitido?

QUESTÃO 4

Você já ouviu um eco? Descreva em que circunstâncias isso aconteceu. Como você explicaria esse eco?

QUESTÃO 5

Explique como alguns mamíferos como os morcegos, os golfinhos e as baleias utilizam o eco de sons que eles emitem para substituir a visão em condições onde esta é insuficiente, de noite no caso dos morcegos ou em águas escuras ou turvas para os golfinhos. Faça um desenho para complementar sua explicação.

QUESTÃO 6

O som que se percebe em uma sala ampla e vazia é igual ao som em uma sala mobiliada e decorada com carpetes e cortinas? Comente sua resposta.

QUESTÃO 7

Você acredita que a sala de aula possui boa acústica? O que é uma boa acústica? Ouvir o professor? Entender o que ele fala?

QUESTÃO 8

A reflexão do som pelas paredes da sala de aula pode atrapalhar a compreensão das palavras pronunciadas pelo professor? Comente sua resposta.

QUESTÃO 9

A sua casa é silenciosa ou barulhenta? Quais as principais fontes de barulho na sua casa? Nas proximidades da sua residência existe algum ambiente que gera muito barulho? Qual?

QUESTÃO 10

Você já se sentiu muito incomodado por barulhos? Que tipo de incômodo você sentiu?

QUESTÃO 11

Quais ambientes da sua escola são mais e menos barulhentos? Esses barulhos chegam a dificultar o entendimento da aula? Por quê?

QUESTÃO 12

Quando você ouve música no fone de ouvido, você consegue ouvir outros tipos de sons ao seu redor? Geralmente em que nível de potência você costuma ouvir as músicas com o fone, baixo, médio ou máximo? Existe algum motivo para isso?

QUESTÃO 13

Você acredita que pode ouvir sons de qualquer nível de potência sem prejudicar seu ouvido? Por quê?

Apêndice D.
Guias das Atividades Práticas

RUÍDO AMBIENTAL: ATIVIDADE PRÁTICA

Escola: _____ Professor: _____
 Aluno: _____
 Série: _____ Turma: _____ Disciplina: _____

Em algumas situações pode ser conveniente medir o nível de ruído do ambiente através de um aparelho chamado decibelímetro. Existem aplicativos que permitem que você use seu celular como um decibelímetro (não tão preciso quanto um aparelho profissional). As figuras abaixo mostram aplicativos (ambos chamados Sound Meter, o primeiro para iPhone e o segundo para aparelhos Android), que você pode baixar e utilizar para medir o nível de intensidade sonora de alguns ambientes.



Figura 1: Decibelímetros: Sound Meter, para iPhone (esquerda) e Android (direita).

De acordo com as informações sobre ruídos que foram discutidas, seria interessante você medir o nível de ruídos em diversos ambientes, inclusive em áreas externas, e preencher a tabela abaixo com os valores registrados. Feito isto, compare seus resultados com os níveis aceitáveis dados pela norma NBR 101521. Você também pode registrar ruídos de ambientes e áreas que não sejam mencionadas na norma, se porventura for do seu interesse. Qual sua opinião sobre os níveis de ruído que você encontrou com suas medidas? Sugestões de alguns ambientes: casa ou apartamento (diferentes cômodos e horários), a rua próxima da sua casa ou qualquer outra, a sala de aula e a quadra da sua escola, uma discussão entre pessoas, bares e restaurantes, dentro ou próximo a uma igreja etc.

Ambiente onde foi feita a medida	Nível de intensidade sonora (dB)	Horário (h)

QUALIDADE ACÚSTICA DA SALA DE AULA: ATIVIDADE PRÁTICA

Escola: _____ Professor: _____
Alunos do Grupo: _____

Série: _____ Turma: _____ Disciplina: _____

Para avaliar a qualidade acústica de um ambiente devemos considerar variáveis como o nível de ruído e o tempo de reverberação TR. Meça o nível de ruído em sua sala de aula e anote o resultado. Na mesma sala faça três medidas do tempo de reverberação e obtenha seu valor médio. Se desejar repita as medidas em outras salas ou auditórios da escola.

Sala: _____

Nível de ruído em dB =

$TR_1 =$

$TR_2 =$

$TR_3 =$

$TR_{MÉDIO} =$

Sala: _____

Nível de ruído em dB =

$TR_1 =$

$TR_2 =$

$TR_3 =$

$TR_{MÉDIO} =$

Sala: _____

Nível de ruído em dB =

$TR_1 =$

$TR_2 =$

$TR_3 =$

$TR_{MÉDIO} =$

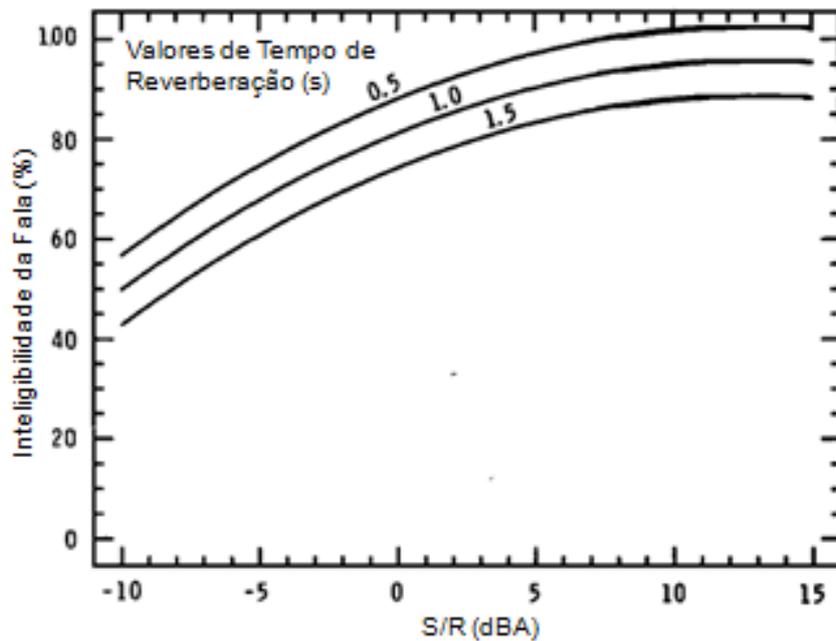
O gráfico abaixo mostra a relação entre a percentagem de palavras que são corretamente compreendidas numa sala e o tempo de reverberação e nível de ruído nesse ambiente. Marque os valores que você mediu na sua sala de aula (e em outras se for o caso) nesse gráfico e faça uma estimativa da percentagem de palavras que são corretamente compreendidas ali. Suponha que a fala do professor ou professora corresponda a um sinal de 70 dB, de modo que a relação sinal ruído será dada por $S/R = 70 \text{ dB} - (\text{nível de ruído em dB})$.

Valores para sua sala de aula (e outras que tenham sido medidas):

1) TR = _____

2) Nível de ruído em dB = _____

3) S/R em dB = _____



Comente seus resultados. Você acha que sua sala de aula tem boa qualidade acústica?

Apêndice E.
Roteiros das Aulas

Aula 1: Reverberação e acústica em sala de aula

REVERBERAÇÃO E ACÚSTICA EM SALA DE AULA

Professor
Marcio Ferreira Lacerda

FÍSICA

RESUMO

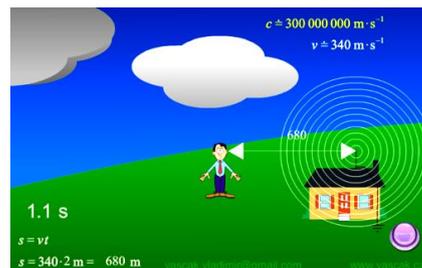
- 1. Introdução
- 2. Propagação do som
- 3. Frequência e intensidade do som
- 4. Níveis de ruídos aceitáveis
- 5. Reflexão e eco
- 6. Reverberação: múltiplos ecos
- 7. Tempo de reverberação
- 8. Tempo de reverberação e qualidade acústica
- 9. Qualidade acústica da sala de aula

1. INTRODUÇÃO

• A qualidade de uma aula pode não depender apenas das metodologias e dos recursos didáticos utilizados pelo docente, pois existem fatores intrínsecos à sala de aula (arquitetura, acústica, iluminação, etc.) que podem prejudicar o ensino e a aprendizagem.

• O presente trabalho apresenta os fenômenos do ruído e reverberação, discute como esses podem influenciar a aula ministrada pelo professor e propõe uma atividade prática na qual os alunos avaliam a qualidade acústica da sala de aula e outros ambientes.

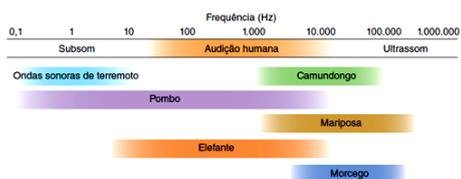
2. Propagação do som



Um raio cai emitindo ondas sonoras. O aplicativo ilustra como o som se propaga.

3. Frequência e intensidade do som

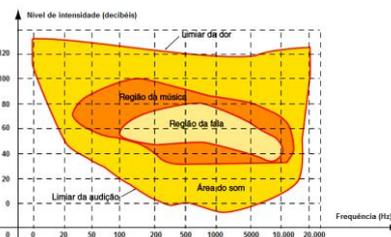
O que chamamos de som audível são ondas em uma determinada faixa de frequência, que podem ser percebidas pelo ouvido humano. Essa faixa vai de 20 Hz até 20.000 Hz.



O espectro sonoro ouvido por alguns animais.

3. Frequência e intensidade do som

A intensidade de uma onda sonora é medida em unidades de decibel, que é abreviado como dB.



Região de intensidade sonora e frequência que o ouvido humano é capaz de ouvir.

4. Níveis de ruídos aceitáveis

Qualquer pessoa que seja exposta excessivamente a sons de alta intensidade pode sofrer danos auditivos irreversíveis.

Ambiente	dB
Hospitais (apartamentos, enfermarias)	40-50
Escolas (salas de aula)	40-50
Residências (dormitórios)	35-45
Residências (sala de estar)	40-50
Sala de concertos e teatros	30-40
Sala de conferência, cinemas de múltiplo uso	35-45
Restaurante, bares e confeitaria	40-50
Escritórios (salas de reuniões)	30-40
Igrejas e templos (cultos meditativos)	40-50
Pavilhão para atividades esportivas	45-60

Níveis aceitáveis de ruído, em decibéis, para alguns tipos de ambientes internos (adaptado da norma NBR 10152).

4. Níveis de ruídos aceitáveis

Para proteger trabalhadores que estão submetidos a ruídos excessivos, a Legislação de Segurança, Higiene e Medicina do Trabalho estabelece limites de tolerância para ruídos contínuos e intermitentes conforme pode ser observado na tabela abaixo:

Nível de ruídos (dB)	Máxima exposição diária permitida
80	16 horas
85	8 horas
90	4 horas
95	2 horas
100	1 hora
105	30 minutos
110	15 minutos
115	7 minutos

Máxima exposição diária permitida para ruídos (adaptado da norma NR-15 do Ministério do Trabalho).

4. Níveis de ruídos aceitáveis

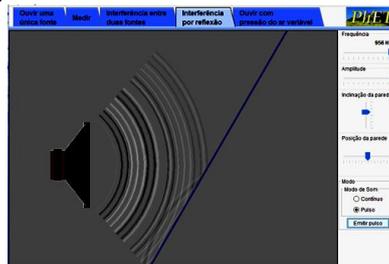
É possível medir o nível de ruído de um ambiente através de um aparelho chamado decibelímetro. Existem aplicativos que permitem que você use seu celular como um decibelímetro.



Decibelímetros: Sound Meter, para iPhone (esquerda) e Android (direita).

5. Eco e reflexão do som

A reflexão do som ocorre quando uma onda sonora encontra um obstáculo e retorna para o meio no qual estava se propagando.



Reflexão da onda ao incidir em uma parede.

5. Eco e reflexão do som

O eco é um fenômeno associado à reflexão do som. Por exemplo, quando uma pessoa grita em um ambiente amplo, como uma caverna, ou em uma região de montanhas, após alguns instantes pode ouvir novamente a própria voz. É o som emitido que, refletido, e que volta à sua origem.



Ilustração do eco.

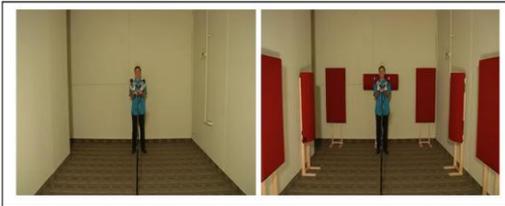
6. Reverberação: múltiplos ECOS

O som produzido em um ambiente fechado (uma sala de aula, por exemplo) se propaga em várias direções e pode passar por múltiplas reflexões antes de chegar a um ouvinte.



Ilustração do fenômeno da reverberação.

6. Reverberação: Múltiplos ecos



<https://www.youtube.com/watch?v=JPYt10zrcIQ>

O vídeo acima mostra o som se propagando em um ambiente em duas situações, com e sem painéis absorvedores de som.

6. Reverberação: múltiplos ecos

Como a cada reflexão o som perde uma fração da sua energia inicial, a reverberação tende a desaparecer com o tempo.

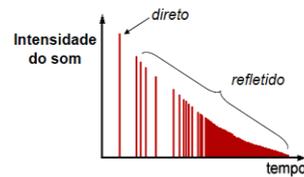
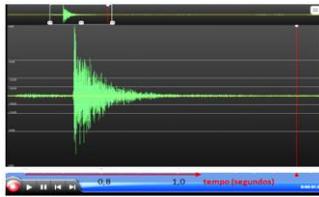


Gráfico da reverberação de um pulso sonoro quase instantâneo.

7. Tempo de reverberação

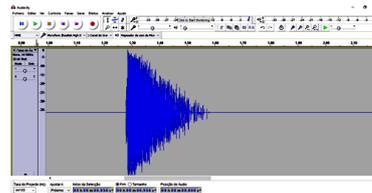
O tempo de reverberação é definido como o tempo necessário para que a intensidade de um som se reduza a um milionésimo de seu valor inicial (60 dB), a partir do momento no qual a fonte cessa de emití-lo.



Reverberação do som produzido pelo estouro de uma bexiga de festa.

7. Tempo de reverberação

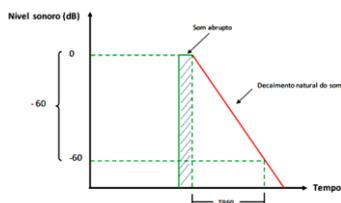
O tempo de reverberação é definido como o tempo necessário para que a intensidade de um som se reduza a um milionésimo de seu valor inicial (60 dB), a partir do momento no qual a fonte cessa de emití-lo.



Reverberação do som produzido pelo estouro de uma bexiga de festa, mostrado na escala de decibéis.

7. Tempo de reverberação

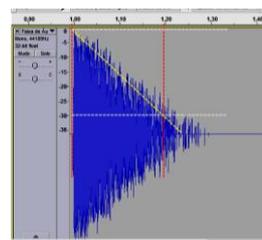
A figura abaixo ilustra como após a emissão do som, o nível sonoro (em dB) diminui linearmente no decorrer do tempo, ou seja, seu gráfico é uma reta inclinada para baixo. O tempo de reverberação, chamado de TR60, pode ser obtido diretamente desse gráfico.



Tempo de reverberação (TR60) de um som abrupto.

7. Tempo de reverberação

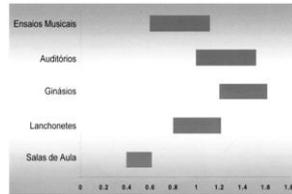
O Tempo de Reverberação pode ser medido através de um programa que permita fazer desenhos (Word, Powerpoint ou um editor de figuras).



Medida do Tempo de reverberação.

7. Tempo de reverberação e Qualidade Acústica

Medido o tempo de reverberação, podemos avaliar a qualidade acústica do ambiente. O tempo de reverberação adequado a cada ambiente é determinado por especialistas em acústica e arquitetura.



Tempo de reverberação (TR60 em segundos) apropriados a ambientes encontrados em instalações escolares.

8. Ruído e qualidade acústica da sala de aula

O tempo de reverberação não é o único elemento relevante para a qualidade acústica de uma sala de aula. Outro fator, tão ou mais importante, é o nível de ruído na sala. Para que o professor seja compreendido pelos alunos, sua voz deve estar acima do ruído na sala de aula.

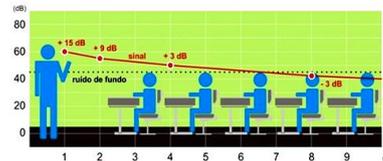


Ilustração da relação entre sinal e ruído em uma sala de aula.

9. Qualidade acústica da sala de aula

reverberação	Test environment	sinal/ruído	percentagem de palavras reconhecidas	
			Hearing sensitivity Normal	Slightly impaired
RT	SNR			
0.0 second	quiet		94.5	83.0
	+12 dB		89.2	70.0
	+6 dB		79.7	59.5
	0 dB		60.2	39.0
0.4 second	quiet		92.5	74.0
	+12 dB		82.8	60.2
	+6 dB		71.3	52.2
	0 dB		47.7	27.8
1.2 seconds	quiet		76.5	45.0
	+12 dB		68.8	41.2
	+6 dB		54.2	27.0
	0 dB		29.7	11.2

Estimando a qualidade acústica de uma sala de aula.

Aula 2: Medida do Tempo de Reverberação

Medida do Tempo de Reverberação

Orientação Passo a Passo

Professor
Marcio Ferreira Lacerda
Física

Gravação e análise do som

- Existem vários equipamentos que podem realizar a gravação de um som: gravadores digitais, computadores, tablets, smartphones, etc.
- Dependendo das condições e local da gravação, alguns desses aparelhos podem ser mais apropriados que outros.
- Nos computadores, tablets e smartphones a gravação é controlada por programas especializados.
- Também existem programas (editores de áudio) que podem analisar e editar os arquivos de som gravados digitalmente.

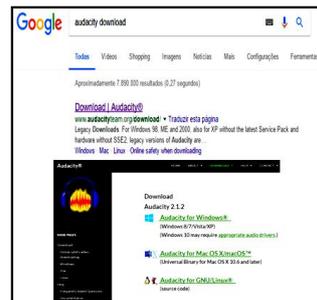
Gravação e análise do som

Neste primeiro momento, vamos nos limitar a fazer a gravação e análise utilizando o programa Audacity.

1. Instalação do Audacity

Instale o programa Audacity no seu computador, para isso, utilize um site de pesquisa (pode ser o google) e digite: audacity download.

Você pode clicar na primeira opção fornecida pela pesquisa e em seguida baixar e instalar o Audacity de acordo com as características do seu sistema operacional.



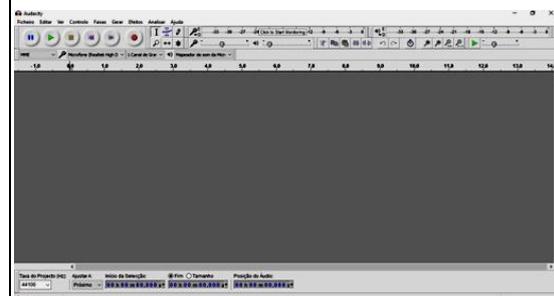
2. Executando o Audacity

Com o Audacity instalado, basta clicar neste ícone para abrir o programa.



Ícone do Audacity.

2. Executando o Audacity



Abrindo o programa Audacity.

3. Gravação com o Audacity

Para fazer a gravação, é necessário um microfone. Verifique se seu computador ou notebook já possui um microfone embutido. Caso não tenha, conecte um microfone externo ao equipamento.



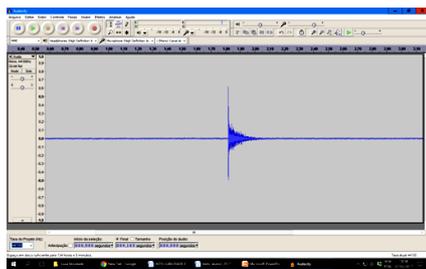
Microfones embutido e externo para gravação.

3. Gravação com o Audacity

Alguns ícones e suas funções.

- Clique neste ícone para iniciar uma gravação.
- Clique neste ícone para interromper (parar) uma gravação.
- Clique neste ícone para fazer pausa durante uma gravação.
- Clique neste ícone para reproduzir uma gravação.

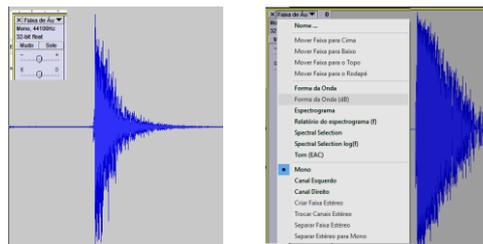
3. Gravação com o Audacity



Som de uma batida de palmas.

Uma vez que a gravação foi feita, você pode ampliar a imagem da forma da onda para facilitar a análise dos dados.

4. Análise da Gravação



Mudando a forma da onda.

Vá até a faixa de áudio e selecione forma da onda (dB).

4. Análise da Gravação

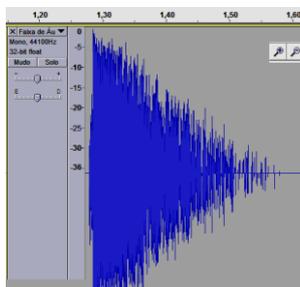
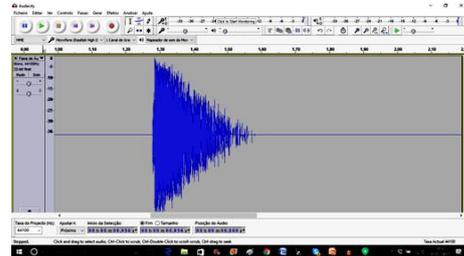


Figura 7: Ampliando a forma da onda.

É possível aumentar a forma da onda para facilitar a visualização.

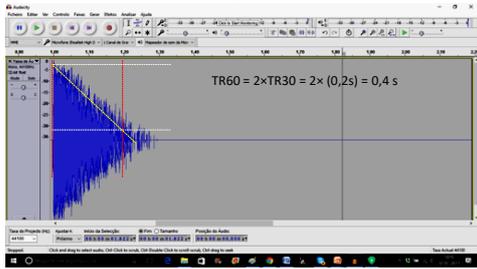
5. Medida do Tempo de Reverberação



Capturando a imagem da forma da onda.

Na tela que deseja capturar, pressione a tecla "Print Screen" em seu teclado, abra um arquivo no PowerPoint (ou algum outro programa de sua preferência) e pressione as teclas CTRL V ao mesmo tempo.

5. Medida do Tempo de Reverberação



Capturando a imagem da forma da onda.

Para obter o tempo de reverberação, basta utilizar as funções do PowerPoint nas seguintes ordens: inserir - formas - linhas. Como o decaimento da reta é constante, é possível obter o TR60 através do TR30, ou TR20 etc.

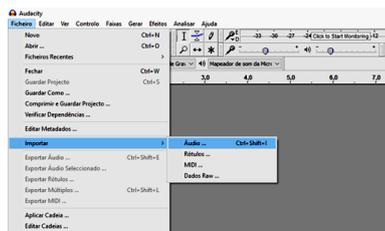
6. Importando Áudio Para o Audacity



Abrindo o Audacity.

Você pode fazer a análise de uma gravação ou de qualquer áudio que já está no seu pc ou notebook com o auxílio do Audacity. Abra o programa Audacity, e siga as próximas orientações.

6. Importando Áudio Para o Audacity

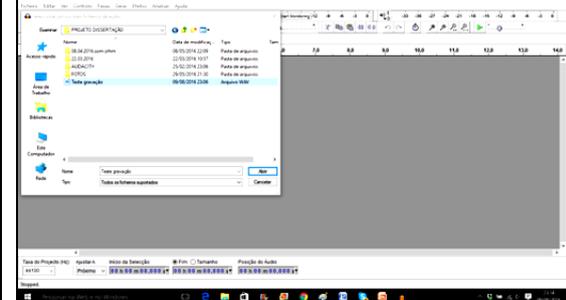


Abrindo o Audacity.

Para abrir o arquivo no Audacity devemos seguir como é mostrado na figura acima:

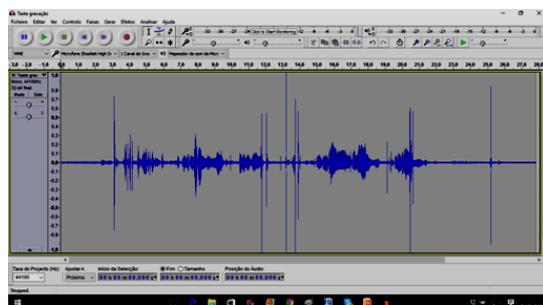
Ficheiro → Importar → Áudio

6. Importando Áudio Para o Audacity



Após ter feito a etapa anterior, o programa Audacity vai procurar o arquivo de áudio que você deseja abrir.

6. Importando Áudio Para o Audacity



Agora é só fazer a análise do som obtido como já foi mostrado anteriormente.

Referências Bibliográficas

- [AAS 2000] American Acoustical Society, *Classroom Acoustics I*. Tradução para o português: *Acústica de salas de aulas*, Revista de Acústica e Vibração, v. 29, p. 2-22, 2002.
- [ANSI 2002] American National Standards Institute (ANSI), *Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools*, 2002.
- [Araújo 2013] I. S. Araújo, E. Mazur, *Instrução pelos colegas e ensino sob medida: Uma proposta para o engajamento dos alunos no processo de ensino aprendizagem de física*, Caderno Brasileiro de Ensino Física, v. 30, n. 2, p. 362-384, 2013.
- [Bradley 1986] J. S. Bradley, *Speech intelligibility studies in classrooms*, The Journal of the Acoustical Society of America, v. 80, p. 846-854, 1986.
- [Crandell 2000] C. Crandell, J. Smaldino, *Classroom acoustics for children with hearing impairment*, Language, Speech, and Hearing Services in Schools, v. 31, n. 4, p. 362-371, 2000.
- [Fernandes 2006] J. C. Fernandes, *Padronização das condições acústicas para salas de aula*, Anais do XIII Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru, SP, 2006.
- [Finitzo-Hieber 1978] T. Finitzo-Hieber, T. W. Tillman, *Room acoustics effects on monosyllabic word discrimination ability for normal and hearing-impaired children*, Journal of Speech and Hearing Research, v. 21, p. 440-458, 1978.
- [Guidini 2012] R. Guidini, F. Bertencello, S. Zanchetta, M. Dragone, *Correlações entre ruído ambiental em sala de aula e voz do professor*, Revista da Sociedade Brasileira de Fonoaudiologia, v. 17, n. 4, p. 398-404, 2012.
- [Kardous 2014] C. A. Kardous, P. B. Shaw, *Evaluation of smartphone sound measurement applications*, The Journal of the Acoustical Society of America, v. 135, EL186, 2014.
- [Kardous 2016] C. A. Kardous, P. B. Shaw, *Evaluation of smartphone sound measurement applications (apps) using external microphones – A follow-up study*, The Journal of the Acoustical Society of America, v. 140, EL327, 2016.

- [Losso 2004] M. Losso, E. Viveiros, *Acoustical quality in educational buildings : measurements in Brazilian public schools*, XI International Congress on Sound and Vibration (St. Petersburg, Russia), p. 599-606, 2004.
- [Shield 2008] B. M. Shield, J. E. Dockrell , *The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children*, The Journal of the Acoustical Society of America, v. 123, p. 133-144, 2008.
- [Shield 2012] B. Shield, C. Hopkins, *Acoustic Design of Schools*, Building Bulletin 93, v. 37, n. 1, p. 36-44, 2012.
- [Silva 2011] Sergio Tobias da Silva, *Propagação do som: conceitos e experimentos*, Dissertação de Mestrado em Ensino de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [West 2008] E. West, *Teaching About Sound, Hearing And Health*, Subject Matter Education in Practice - New Ways for Teaching Science, n. 8, Department of Education, University of Gothenburg, 2008.