



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

PROPAGAÇÃO DO SOM: CONCEITOS E EXPERIMENTOS

Sergio Tobias da Silva

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
Março de 2011

PROPAGAÇÃO DO SOM: CONCEITOS E EXPERIMENTOS

Sergio Tobias da Silva

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:

Prof. Carlos Eduardo Aguiar (Presidente)

Prof. Antonio Carlos Fontes dos Santos

Prof. João Alberto Mesquita Pereira

Rio de Janeiro
Março de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA

S586p Silva, Sergio Tobias da
Propagação do Som: Conceitos e Experimentos / Sergio
Tobias da Silva - Rio de Janeiro: UFRJ / IF, 2011.
ix, 77 f.: il.;30cm.
Orientador: Carlos Eduardo Aguiar
Dissertação (mestrado) – UFRJ / Instituto de Física /
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2011.
Referências Bibliográficas: f. 74-77.
1. Ensino de Física. 2. Som. 3. Velocidade do som. I. Aguiar,
Carlos Eduardo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto
de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. III.
Propagação do Som: Conceitos e Experimentos.

Dedico esta dissertação aos meus pais Geraldo e Lydia.

Agradecimentos

À minha família pelo apoio constante.

Ao professor Anderson pelas conversas animadoras.

Ao professor Carlos Eduardo pela insistência salvadora.

O SOM

o som é da Terra
não há nenhuma música das esferas
como pensou Aristóteles

música barulho
o trepidar cristalino
da água
sob as folhas
é coisa terrestre

o cosmo é um vastíssimo silêncio
de bilhões e bilhões de séculos
nenhum ruído

as estrelas são imensas explosões mudas
um desatino
a matéria estelar
(em explosão)
é silêncio
e energia

Para outros ouvidos talvez
poderia ser o universo
uma insuportável barulheira
não para os nossos
terrenos

Viver na Terra é ouvir
entre outras vozes
o marulho do mar salgado e azul
ouvir a ventania a rasgar-se nos galhos
antes do temporal

só aqui
neste planeta é que
se pode ouvir teu límpido gorjeio,
passarinho,
pequenino cantor
da praça do Lido.

(Ferreira Gullar, do livro “em alguma parte alguma”)

RESUMO

PROPAGAÇÃO DO SOM: CONCEITOS E EXPERIMENTOS

Sergio Tobias da Silva

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 física do som está pouco presente nos currículos escolares, onde geralmente aparece como mera aplicação do estudo de ondas. Esse enfoque não apenas minimiza a importância dos fenômenos sonoros; ele torna mais difícil superar algumas convicções intuitivas, mas errôneas, que desenvolvemos sobre o som a partir de nossa experiência diária. Isso é notado, particularmente, quando se discute a propagação do som. Uma parcela significativa das crianças tem dificuldade para conceber que o som se propaga. Essas dificuldades persistem, em diferentes formas, entre estudantes mais velhos. A maioria parece imaginar a propagação do som como o movimento de um objeto ou substância através de um meio material, não como um movimento do meio. Nesta dissertação nós verificamos a existência e extensão dessas dificuldades entre estudantes do ensino médio brasileiro, e propomos uma sequência de ensino-aprendizagem sobre propagação do som que procura abordá-las diretamente. A sequência é composta de quatro unidades, cada uma das quais é iniciada com a apresentação aos alunos de questões de múltipla escolha sobre propagação sonora. As opções de resposta contemplam as concepções espontâneas mais frequentemente encontradas nas investigações relatadas na literatura. A sistematização e discussão das respostas às questões revelam as diferentes noções sobre som que são utilizadas pelos estudantes. Em seguida, experimentos são realizados para determinar qual das noções apresentadas está em melhor acordo com o comportamento real do som. Nós desenvolvemos um método para investigar a propagação sonora que é muito mais simples que os comumente usados em laboratórios didáticos, e que permite que os experimentos da sequência de ensino-aprendizagem sejam realizados em praticamente qualquer sala de aula. A etapa final do processo envolve a discussão dos resultados experimentais e sua comparação com as expectativas dos alunos. Essa confrontação é a base para a revisão e aprimoramento das concepções que eles têm sobre a propagação do som. A sequência foi aplicada em uma escola do ensino médio, e os resultados e lições dessa experiência preliminar são relatados.

Palavras-chave: Ensino de Física, som, velocidade do som.

Rio de Janeiro
Março de 2011

ABSTRACT

SOUND PROPAGATION: CONCEPTS AND EXPERIMENTS

Sergio Tobias da Silva

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 physics of sound is usually presented in schools as just an example of wave physics. This approach not only minimizes the importance of acoustic phenomena; it also makes it harder to overcome some of the misconceptions about sound that students bring to the classroom. This is especially noticed when the propagation and speed of sound are discussed. Children do not appear to think that sound travels from one point to another – for many of them, sound is part of its source. Older students present different, but related, difficulties. Few understand that sound is a kind of motion of a continuous medium, and that the speed of sound is a property of the medium. Most students picture sound propagation as the motion of a material substance through the medium, and apply to it an intuitive dynamics that resembles “impetus” models. In this dissertation we verify that such misconceptions are widely held by Brazilian high-school students and propose a teaching-learning sequence on sound propagation that addresses these difficulties. The sequence has four units, each beginning with the presentation to the students of multiple choice questions about sound, with possible answers contemplating common misconceptions reported in the literature. Systematization and discussion of the answers given by the students reveal the ways they reason about sound. The next step is to perform experiments to determine which of these notions better describes sound phenomena. We developed a method to investigate sound propagation that is much simpler than the ones typically used in school labs, allowing the experiments in the teaching-learning sequence to be performed in almost every classroom. The final step in the sequence is the discussion of the experimental result and its comparison to the students' conceptions revealed by the questionnaire. This confrontation should be the basis for the revision and improvement of their reasoning about sound propagation. The teaching-learning sequence was applied in a Brazilian public high-school, and results and lessons of this preliminary test are reported.

Keywords: Physics education, sound, speed of sound

Rio de Janeiro
March, 2011

Sumário

Capítulo 1	Introdução	1
Capítulo 2	Concepções sobre a propagação do som	5
2.1	A propagação (ou não) do som	5
	As investigações de Piaget	5
	Outras investigações	6
2.2	A velocidade do som	7
2.3	Capital dinâmico, ímpeto ou <i>p-prims</i> ?	10
2.4	Resumo das concepções dos aprendizes sobre som	12
2.4	Concepções dos professores sobre a propagação do som	13
Capítulo 3	Propagação do som: perguntas e respostas	17
3.1	Atividades de previsão-observação-explicação (POE)	17
3.2	Propagação do som: as idéias dos alunos	18
	Como o som chega até nós	19
	Propagação do som forte e do som fraco	25
	Propagação a pequenas e grandes distâncias	28
	Propagação em ambientes fechados e abertos	29
3.3	Após os questionários	31
Capítulo 4	Métodos de medida da velocidade do som	32
4.1	Medidas indiretas da velocidade do som	32
	Ressonâncias	32
	Diferenças de fase	36
	Comentário sobre as medidas indiretas da velocidade do som	37
4.2	Medidas diretas da velocidade do som	37
	Medidas com sonares	38
	Medidas com alto-falante e microfone	40
	Medidas com dois microfones	41
	Comentário sobre as medidas diretas da velocidade do som	43
Capítulo 5	Um método simples para estudar a velocidade do som	45
	Outros métodos de medida da velocidade do som	48
Capítulo 6	Aplicação da sequência de ensino-aprendizagem	53
	Um experimento preliminar	53
	Aplicação da unidade I	55
	Aplicação das unidades II, III e IV	57
	Comentários sobre a aplicação da sequência de ensino-aprendizagem	57
Capítulo 7	Conclusões	59
Apêndice A	Propagação do som: uma sequência de ensino-aprendizagem	62
	Unidade I: A propagação (ou não) do som	62
	Unidade II: A propagação de sons fortes e fracos	67
	Unidade III: A propagação do som a pequenas e grandes distâncias	68
	Unidade IV: A propagação do som em ambientes fechados e abertos	70
	Discussão final	73
	Referências Bibliográficas	74

Capítulo 1

Introdução

Crianças pequenas não concebem o som como algo que se propaga. Para elas não há nada “viajando” da fonte sonora até o ouvido – o som é simplesmente uma coisa que existe na vizinhança do objeto que faz barulho. A partir dos 6-7 anos a idéia de propagação do som começa a tomar forma, embora concepções sobre a natureza do que está se propagando demorem mais tempo para se desenvolver. O conceito que parece surgir com maior frequência é o de que o som é algo material que se desloca de um ponto a outro. Ou seja, ao processo sonoro são atribuídas propriedades características de um objeto. Essa idéia se manifesta de diferentes maneiras e é muito resistente a mudanças, sendo encontrada mesmo em estudantes universitários que passaram por instrução específica em física ondulatória. A associação entre a propagação sonora e o deslocamento de uma substância através do ar tem sido apontada como causa de muitas das concepções errôneas sobre a velocidade do som apresentados por estudantes em diferentes níveis de escolaridade.

Não existem muitos estudos sobre as dificuldades encontradas por estudantes para entender que o som é algo que se propaga, e para conceber que o que está se propagando não é um objeto material em si próprio. Pouco tem sido feito, também, no sentido de desenvolver materiais didáticos e sequências de ensino-aprendizagem que os ajudem a superar tais dificuldades. Em particular, como veremos mais à frente, quase não existem experimentos sobre a propagação do som que possam ser realizados facilmente em um ambiente escolar típico.

Demonstrações e experimentos podem desempenhar um papel importante no desenvolvimento de modelos apropriados da propagação do som. Entretanto, para que isso ocorra de maneira eficiente, é necessário criar um ambiente que favoreça o confronto entre os resultados experimentais e as expectativas intuitivas dos estudantes. O presente trabalho é uma iniciativa nesse sentido. Nós desenvolvemos um método particularmente simples para investigar experimentalmente a propagação do som, que pode ser implementado sem dificuldade em salas de aula comuns. Experimentos sobre som realizados com esse método foram inseridos em uma sequência de ensino-aprendizagem que estimula os alunos a reconhecerem suas concepções a respeito da

propagação sonora e a compararem essas noções com o resultado de observações e medidas.

A sequência de ensino-aprendizagem que propomos tem quatro unidades, cada uma das quais semelhante a uma atividade do tipo POE (*previsão-observação-explicação*) [White 1992]. Como o nome já sugere, uma atividade POE tem três etapas: na primeira, os alunos fazem uma *previsão* sobre determinado evento; na segunda, eles *observam* a ocorrência do evento; finalmente, na terceira etapa, eles tentam *explicar* um eventual conflito entre a previsão e a observação.

As quatro unidades da sequência de ensino-aprendizagem abordam aspectos que investigações demonstraram ser de compreensão particularmente difícil aos estudantes:

- I. A propagação (ou não) do som;
- II. A propagação de sons de diferentes intensidades;
- III. A propagação de sons a diferentes distâncias;
- IV. A propagação de sons em diferentes ambientes.

Uma unidade da sequência de ensino-aprendizagem tem sempre início com a apresentação aos alunos de questões de múltipla escolha sobre a propagação do som. As questões, e principalmente as opções de respostas, são formuladas com base nos relatos de pesquisas sobre as dificuldades encontradas na aprendizagem da física do som. Uma revisão dos trabalhos e resultados nessa área é feita no capítulo 2 da dissertação. Também discutimos nesse capítulo alguns modelos mentais (semelhantes ao *ímpetus* medieval) e mecanismos cognitivos (como os *p-prims*) que podem explicar essas dificuldades. As questões que utilizamos nas unidades estão mostradas no capítulo 3, assim como as respostas dadas por alunos do ensino médio de um colégio público brasileiro. A distribuição estatística das respostas fornece uma visão útil a respeito dos conceitos de propagação sonora empregados pelos estudantes. Os resultados encontrados são compatíveis com os de investigações anteriores, notadamente as realizadas por Laurence Maurines [Maurines 1993], e mostram a extensão e profundidade das dificuldades que os estudantes encontram ao tentar compreender os fenômenos sonoros.

Embora importantes e reveladores, os resultados estatísticos não são o objetivo primordial do questionário. A função principal das questões é ajudar cada aluno a reconhecer e explicitar suas próprias idéias sobre o comportamento do som, além de tomar conhecimento das concepções apresentadas pelos colegas. Para isso, procuramos dar a elas um formato que enfatiza o aspecto visual, tentando com isso reduzir ao

máximo possíveis dificuldades dos alunos com relação à interpretação de textos. No mesmo sentido, as questões são todas de múltipla escolha, para evitar problemas com a expressão escrita. Isso também permite uma maior agilidade na aplicação dos questionários e levantamento das respostas, essencial às etapas seguintes do processo.

A variedade de respostas dos estudantes às questões leva à discussão de qual é a concepção mais apropriada. É nesse ponto que experimentos tornam-se importantes. O confronto com observações empíricas é uma forma eficiente de demonstrar aos estudantes a (possível) inadequação de suas concepções intuitivas, e facilitar a revisão destas idéias. No mínimo, é um método mais produtivo que o recurso usual à palavra do professor ou ao conteúdo dos livros-texto. Mas é claro que isso só é viável se experimentos relevantes puderem ser realizados e compreendidos com facilidade. No capítulo 4 descrevemos os métodos mais utilizados em laboratórios didáticos para medir a velocidade do som, e discutimos sua inadequação às condições do ensino médio brasileiro. Mostramos que, basicamente, os métodos fáceis de entender são difíceis de montar, e os fáceis de montar são difíceis de entender. No capítulo 5 propomos um método para estudar a propagação do som que é simples de montar e entender. Ele não exige equipamento sofisticado (apenas um computador doméstico) e pode ser facilmente implementado em ambientes escolares. A simplicidade de compreensão vem do fato que o método não exige conhecimentos de física ondulatória, utilizando apenas conceitos de cinemática – a velocidade do som aparece como a razão entre uma distância e o tempo gasto para percorrê-la. Experimentos baseados nesse método são o ponto de partida para discussões que buscam apontar qual das concepções apresentadas pelos alunos em suas respostas ao questionário é a mais adequada. Resultados experimentais típicos também são apresentados no capítulo 5. Outros dois métodos de medida da velocidade do som são também propostos no capítulo 5. Ambos são bastante fáceis de entender e montar, embora sejam de execução um pouco mais trabalhosa e de nem sempre apresentarem bons resultados.

Um teste preliminar da sequência de ensino-aprendizagem, realizado com alunos do ensino médio do Colégio Pedro II (escola pública federal do estado do Rio de Janeiro), está descrito no capítulo 6. A sequência foi bem recebida pelos alunos e parece ter contribuído de maneira eficiente para a revisão de seus conceitos sobre a propagação do som. Algumas sugestões para o aprimoramento de futuras aplicações da sequência de ensino-aprendizagem também são feitas no capítulo 6. As conclusões e

perspectivas de continuação do trabalho apresentado nesta dissertação estão no capítulo 7.

Um roteiro da sequência de ensino-aprendizagem está no apêndice A, de forma a ser facilmente destacado do corpo da dissertação e utilizado por professores que desejem aplicá-lo em suas aulas.

Capítulo 2

Concepções sobre a propagação do som

2.1 A propagação (ou não) do som

As investigações de Piaget

As primeiras observações sobre o desenvolvimento do conceito de propagação do som parecem ter sido realizadas por Piaget [Piaget 1977]. Segundo ele, crianças de 4-5 anos imaginam que o som é parte integrante – não destacável – do objeto sonoro. O diálogo com uma criança de seis anos relatado por Piaget é revelador:

— O ruído (batemos na mesa neste instante) vai em direção a seus ouvidos?

— Não.

— Será que ele percorre algum caminho?

— Ele permanece lá.

— E se pessoas disserem que ele vem em direção a nossos ouvidos?

— Isso é falso.”

(tradução livre de [Piaget 1977] p. 106).

Apenas por volta dos 5-6 anos as crianças começam a esboçar idéias envolvendo a propagação do som. Por exemplo, algumas tendem a pensar que o som se esconde nos objetos sonoros quando não é ouvido – ele só sai de lá para ser escutado, e em seguida retorna “para casa”. Nas palavras de Piaget:

“O problema é apresentado por meio do som produzido por uma haste metálica pendurada, atingida por outra haste. Para crianças entre 4 e 5 anos, o som permanece na haste e se move dentro dela. Dos 5 aos 6 anos o som chega aos ouvidos, mas, para a maioria, volta em seguida para a haste.” (tradução livre de [Piaget 1977], p. 106).

Piaget nota que crianças na faixa de 4-6 anos acreditam que o pensamento é produzido pela própria voz. Ele sugere que essa é a origem da noção de que o som reside nos objetos:

“Quando pedimos a uma criança para fechar a boca e dizer-nos se ela ainda pode pensar, por vezes obtemos respostas do tipo: ‘É a minha boca pequena atrás da minha cabeça que fala para a minha boca na frente.’ [...] É difícil não ver a influência psicomórfica dessa situação nas reações de crianças que pensam que o som existe nos objetos mesmo quando não o

escutamos e, quando isso ocorre, vai apenas até os ouvidos retornando em seguida para sua fonte.” (tradução livre de [Piaget 1977], p. 106-107).

Alguns anos mais tarde já é comum encontrar entre as crianças a idéia de que o som se afasta da fonte, propagando-se em linha reta e em todas as direções. A partir dos 11 anos as explicações do som podem envolver o papel mediador do ar, ou mesmo a identificação do som com o ar:

“Em torno dos 7-8 anos o som é uma agitação que se espalha através do ar e, por volta dos 11-13 anos, o próprio ar torna-se capaz de vibrar e, assim, de transmitir o som.” (tradução livre de [Piaget 1977], p. 106).

Outras investigações

Pesquisas posteriores encontraram resultados semelhantes aos de Piaget. Em um estudo conduzido com 260 crianças e adolescentes ingleses de idades entre 4 e 16 anos, Asoko, Leach e Scott [Driver 1994, West 2008] notaram que, entre as crianças mais novas, poucas pensavam que o som é transmitido de um ponto a outro. Até os 14 anos, ao referir-se ao que acontecia quando ouviam algo, as crianças concentravam sua atenção no objeto causador do som (“escutei o relógio porque alguma coisa lá dentro faz *tic-tac*”) e no próprio ato de escutar (“escutei o relógio porque estava prestando atenção a ele”). A idéia de propagação do som pelo ar só foi encontrada, de forma significativa, entre os estudantes de 16 anos. Observações semelhantes foram feitas por Watt e Russel [Driver 1994]; numa investigação envolvendo 57 crianças, poucas manifestaram espontaneamente a idéia de que o som se propaga.

Em outro estudo, Boyes e Stanisstreet [Boyes 1991] investigaram as idéias sobre propagação do som manifestadas por cerca de 1900 estudantes com idades entre 11 e 16 anos. Perguntados sobre como ouviam o som de um rádio, apenas 40% dos alunos mais jovens (11/12 anos) responderam que o som ia do aparelho até o ouvido; no grupo mais velho (15/16 anos) esse número crescia para 78%. Entre os alunos mais jovens, 9% afirmava que o som partia do ouvido e ia até o rádio; dos mais velhos, somente 2% sustentavam isso. Uma concepção interessante apresentada por alguns estudantes foi a de que o som não se propagava porque “preenchia o ambiente”, como se fosse um fluido sonoro.

Guided sound: more intense, therefore faster?

Summary of the question

Peter is speaking to John. The only difference between situations 1 and 2 is that, in situation 2, Peter is speaking through a long steel tube.

Explain

- 1) whether, in situation 2, the intensity of the sound is greater, smaller, or identical to the intensity of the sound in situation 1. Why?
- 2) whether, in situation 2, John begins to hear Peter after the same amount of time as in situation 1, or sooner, or later. Why?

Results

For grade 11 science section students⁷ (N=28) before instruction on propagation

- question 1, on the intensity of the sound:

different intensities^a 89%	Identical intensities 11%
---	-------------------------------------

- question 2, on the speeds of propagation:

different speeds^b 79%	identical speeds 11%
V2>V1: 54%	
V2<V1: 25%	

- Pupils who answered "John hears the sound sooner in situation 2" (54%) used arguments such as "John receives more sound" and "The tube prevents sound loss", as if "louder" meant "faster."

Figura 2.3. Questão sobre a velocidade do som em um tubo e no ar aberto [Maurines 2003, Viennot 2005].

Segundo Maurines, os resultados dessas três questões estão relacionados. A primeira questão revela que um número expressivo de alunos supõe que a velocidade de propagação depende da intensidade do som. De acordo com a autora, isso explicaria o resultado das outras duas questões. Por exemplo, é fato notório que o som vai se tornando mais fraco à medida que o ouvinte se afasta da fonte sonora. Para os alunos que associam velocidade à intensidade, a atenuação do sinal sonoro com a distância faz com que o som fique cada vez mais lento. Um comentário típico é "o som vai diminuindo cada vez mais e por isso anda mais devagar" [Maurines 1993]. Isso explicaria as respostas à questão da figura 2.2. O mesmo tipo de raciocínio explicaria a propagação mais rápida num tubo que no ar aberto: o tubo concentra o som, aumentando sua intensidade – logo, o sinal sonoro andaria mais rápido por ele.

Para Maurines, a associação entre velocidade de propagação e intensidade deve-se à noção de que o som “é um objeto material criado e colocado em movimento pela fonte sonora” [Maurines 1993]. Os alunos que nutrem essa concepção “substancialista” do som, imaginam que o sinal sonoro recebe da fonte um “capital dinâmico” – uma noção híbrida, pouco definida, que combina força, velocidade e energia. É essa concepção, segundo Maurines, que norteia o raciocínio espontâneo dos alunos sobre a propagação do som. Quanto maior for o capital dinâmico transferido ao sinal sonoro, mais intenso ele será e mais rapidamente se moverá. Isso explicaria a relação que muitos estudantes estabelecem entre velocidade e intensidade do som.

2.3 Capital dinâmico, ímpeto ou *p-prims*?

Embora não seja explicitamente mencionado por Maurines ou Viennot, parece haver um paralelo entre a noção de capital dinâmico descrita por elas e as idéias de “ímpeto” que, segundo McCloskey, sustentam as explicações espontâneas do movimento de corpos sólidos [McCloskey 1983a, 1983b]. Para McCloskey, nossas concepções intuitivas da dinâmica têm dois aspectos básicos: (i) quando colocamos um objeto em movimento damos a ele uma “força interna” – o ímpeto – que o mantém em movimento mesmo após perder contato conosco; (ii) o ímpeto que o objeto ganhou no lançamento é dissipado gradativamente (espontaneamente ou por influência externa), fazendo com que o movimento diminua até cessar. Ainda segundo McCloskey, há uma grande semelhança entre essas idéias e a teoria medieval do *impetus*, uma evolução pré-newtoniana das concepções aristotélicas de movimento proposta por Philoponus, Avicenna, Buridan, Alberto de Saxônia e outros.

É possível que a associação do som a uma substância material leve à aplicação intuitiva da “teoria do *impetus*” à propagação sonora. Desse ponto de vista, os alunos estabeleceriam naturalmente uma analogia entre a emissão de um som e, por exemplo, o lançamento de um projétil. Quanto mais fortemente chutamos uma bola, maior é sua velocidade – logo, quanto mais alto gritarmos, mais rapidamente o som se moverá. Nesse sentido, a propagação do som seria parte de uma mecânica intuitiva mais ampla, aplicável a todos os corpos providos de substância, dos sólidos à suposta “matéria sonora”.

Mas é também concebível que as explicações espontâneas da propagação do som e do movimento de corpos não tenham um grau tão elevado de coerência e abrangência. A semelhança entre elas pode vir da aplicação dos mesmos elementos cognitivos

básicos – as “primitivas fenomenológicas” (*p-prims*) de diSessa [diSessa 1993], por exemplo – tanto ao movimento de corpos quanto ao do som.

As primitivas fenomenológicas são um conjunto pouco estruturado de elementos explicativos simples, irreduzíveis, adquiridos através da experiência cotidiana com relações de causa e efeito. Elas correspondem ao nosso “senso de mecanismo”, às concepções mais elementares sobre “como as coisas funcionam, que tipos de eventos são necessários, prováveis, possíveis ou impossíveis” [diSessa 1993]. É com esse senso de mecanismo, segundo diSessa, que (i) avaliamos a probabilidade de ocorrência de eventos diversos, (ii) fazemos previsões e “pósvisões”, relacionando a observação de eventos presentes a possíveis ocorrências futuras ou passadas, e (iii) criamos descrições e explicações causais, ou seja, observamos um evento e atribuímos sua ocorrência a determinadas circunstâncias e a fatos gerais sobre o mundo.

Um exemplo de primitiva fenomenológica é “mais esforço, mais resultado” (que diSessa chama de *p-prim ôhmico*). No caso do movimento de um projétil, o uso dessa primitiva estabeleceria uma relação entre o esforço efetuado no lançamento e a velocidade do projétil; no caso da propagação sonora, a mesma primitiva poderia ser utilizada para relacionar a intensidade sonora (o grito mais alto demanda mais esforço) à velocidade do som. Outro *p-prim* importante diz respeito à dissipação: “deixadas por si só, as coisas tendem gradualmente a parar” (*dying away p-prim*). Aplicado à mecânica, esse *p-prim* “explica” porque os corpos colocados em movimento acabam em repouso. No caso da acústica, ele justificaria a noção de que a intensidade e velocidade de um sinal sonoro vão diminuindo à medida que ele se propaga. É importante ressaltar a generalidade desses elementos explicativos básicos. O *p-prim* dissipativo, por exemplo, pode ser invocado para justificar a atenuação gradual do som de uma badalada de sino ou o esfriamento de um corpo quente. *P-prims* também podem ser aplicados a situações bem distantes da física: por exemplo, quando fazemos afirmativas do tipo “estudou mais e por isso melhorou suas notas”, estamos usando o *p-prim* ôhmico.

Não é claro qual das duas perspectivas apresentadas acima melhor descreve a compreensão intuitiva que os estudantes têm da propagação do som. Uma extensão da teoria do ímpeto aos fenômenos sonoros parece possível, o que apontaria para uma notável coerência nas concepções espontâneas em áreas tão distintas como a mecânica e a acústica. A outra possibilidade, que nos parece mais plausível, é que essas concepções não refletem uma “teoria” coerente e sim a aplicação de elementos explicativos mais

fundamentais e fragmentados, os *p-prims*, tanto aos fenômenos sonoros quanto aos da mecânica de corpos.

2.4 Resumo das concepções dos aprendizes sobre som

As principais concepções espontâneas sobre som e audição encontradas em diferentes pesquisas foram resumidas por Eva West em um quadro [West 2008], do qual retiramos a parte relativa à propagação do som. O resultado está mostrado na tabela 2.1. Os conceitos estão reunidos em dois grupos: a transmissão (ou não) do som e a velocidade do som.

Aspecto conceitual	Concepções intuitivas
A transmissão do som	<p>O som é uma propriedade da fonte de som, algo que não é transmitido.</p> <p>O som é algo material, um objeto que se move de um lugar para outro.</p> <p>O som é uma substância discreta, “uma coleção única de partículas ou moléculas” que é transportada de um local a outro (por ex. o ar e o vento).</p> <p>O som se propaga através de espaços vazios no meio.</p> <p>A transmissão de vibrações do som não tem nada a ver com a matéria (nenhuma menção é feita ao ar ou outro tipo de matéria).</p> <p>O som é transmitido na água porque há oxigênio ou ar na água.</p> <p>O som é transmitido nos sólidos através de pequenos buracos ou aberturas no interior do material.</p> <p>O som só se propaga em uma determinada direção, como num dominó.</p> <p>As ondas sonoras são algo material e podem, por exemplo, colidir umas com as outras ou chocar-se com as partículas do ar.</p>
A velocidade do som	<p>Som de baixa frequência (som grave, abafado) move-se a uma velocidade diferente do som de alta frequência (estridente).</p> <p>Sons de alto volume (sons fortes) são transmitidos mais rapidamente que os sons de baixo volume (sons fracos)</p>

Tabela 2.1. Concepções intuitivas sobre o som (adaptado de [West 2008]).

O resumo de West mostra o que já discutimos: quando a idéia de transmissão do som é aceita, este tende a ser imaginado como algo provido de substância, semelhante a um fluido ou objeto. Um aspecto interessante dessa noção, que não havíamos mencionado, é que ele leva naturalmente à conclusão de que o meio material é um obstáculo à propagação do som: num sólido o som seria transmitido por frestas; num líquido, as bolhas de ar seriam os ‘espaços’ por onde passa o som.

2.4 Concepções dos professores sobre a propagação do som

Não são apenas os estudantes que encontram dificuldades na compreensão da propagação do som. Muitos professores também têm problemas nessa área, embora de natureza diferente. Um desses problemas é a idéia, amplamente difundida, de que um entendimento correto do som envolve necessariamente a descrição *atomística* da matéria. É verdade que o som só se propaga em meios materiais, e esse é um ponto que deve ser enfatizado em qualquer apresentação da física do som. Mas muitos concluem daí que, já que a matéria é composta de átomos, a teoria molecular é essencial para a compreensão do som. Por exemplo, em seu (quase sempre) ótimo texto, West afirma que “aprendizes que trabalham com base na teoria corpuscular da matéria terão a chance de compreender que o som se propaga através de vibrações que são transmitidas pelas partículas” ([West 2008] p. 59, tradução livre). West apresenta até modelos macroscópicos, como bolinhas penduradas (ver figura 2.4), na tentativa de construir uma “visão molecular” dos fenômenos sonoros [West 2008].



Figura 2.4. Modelo de gás com bolas de pingue-pongue [West 2008].

Embora a propagação do som deva-se, em última instância, às colisões entre moléculas, não é correto afirmar que os estudantes terão mais facilidade de entender os fenômenos sonoros se utilizarem modelos corpusculares. Em um gás, as vibrações sonoras não são oscilações das moléculas individuais em torno de um ponto de

equilíbrio, como leva a crer o modelo da figura 2.4. O que oscila é a posição média de um número muito grande moléculas. Cada molécula percorre uma trajetória caótica, em zigue-zague, mudando aleatoriamente de velocidade a cada colisão com outra molécula. É muito difícil criar uma imagem intuitiva do som a partir desse movimento caótico. Keith Taber, *senior lecturer* em Ensino de Ciências na Universidade de Cambridge, ilustra bem essa dificuldade:

“Cheguei à conclusão de que não entendo realmente como o som se propaga no ar. [...] Quando tento fazer uma simulação mental do que está acontecendo no nível molecular, não consigo ver porque um sinal sonoro não desaparece antes mesmo de percorrer qualquer distância.” ([Taber 2009], p. 450-451, tradução livre).

A complexidade do movimento molecular no ar torna muito difícil usar um modelo mental corpuscular para descrever o som. Tentar imaginar o que ocorre com cada molécula durante a passagem do som corresponde a procurar modelos baseados na física newtoniana do século 17 ou 18 e não na física estatística dos séculos 19 e 20. Esta última foi desenvolvida justamente para descrever enormes quantidades de moléculas em movimento caótico (ver comentário de Peter Campbell em [Taber 2009]). Linder relata a dificuldade que um estudante encontra para compatibilizar o movimento térmico caótico da teoria cinética dos gases com a oscilação sonora em torno de um ponto de equilíbrio:

“Eu sei que há uma contradição... Eu teria muita dificuldade para colocar juntas as duas explicações. [...] é algo que nunca aparece porque você não pensa sobre isso. Você usa uma ideia aqui e a outra ali, e até que pare e pense a respeito, ou seja forçado a compará-las, você não nota isso.” ([Linder 1992], p. 260, tradução livre).

Outro estudante tem dificuldades semelhantes, ‘resolvidas’ por ele através de uma dicotomia entre *pensar e saber* (ou seja, entre conceitualização e conhecimento):

“Eu não imagino as moléculas como estando em movimento no ar [...]. Eu penso nelas como ficando sempre no mesmo lugar, embora eu saiba que elas estão em movimento” ([Linder 1992], p. 260, tradução livre).

As dificuldades para se relacionar o modelo molecular a oscilações sonoras diminuem quando passamos dos gases para materiais sólidos ou líquidos. Nesses meios as moléculas têm uma distribuição espacial mais organizada e a descrição molecular da propagação sonora pode ser útil. Por exemplo, modelos de estruturas cristalinas em que

as moléculas estão ligadas umas às outras por molas ajudam a criar uma visão intuitiva de como o som se propaga em sólidos.

Outra dificuldade na compreensão do som diz respeito à “propagação no vácuo”. Professores e livros-texto afirmam, corretamente, que o som não se propaga no vácuo. O problema é que não há vácuo perfeito, de modo que a questão verdadeiramente interessante é qual a menor densidade que o meio pode ter para permitir a propagação de um determinado som. Um critério para a existência de ondas sonoras é que o livre caminho médio das moléculas seja bem menor que o comprimento de onda [Sharipov 2008]. À pressão e temperatura ambientes, o livre caminho médio das moléculas de ar é da ordem de 10^{-7} m (0,1 μm); portanto, não faz sentido falar de som no ar com comprimento de onda inferior a 1 μm . A uma pressão de 10^{-3} atm (um milésimo da pressão atmosférica, um “vácuo” bem razoável) o livre caminho médio é 0,1 mm, ou seja, há som com comprimento de onda maior que 1 mm. Mesmo a um “alto vácuo” de 10^{-6} atm (um milionésimo da pressão atmosférica), o livre caminho médio é de 10 cm, e sons de comprimentos de onda maiores que 1 m podem ser produzidos. Portanto, mesmo num gás extremamente rarefeito, sempre há propagação de som – apenas comprimentos de onda menores que o livre caminho médio das moléculas são suprimidos pelo “vácuo”.

Um experimento muito citado por professores e livros-texto, a “campainha numa jarra”, é um bom exemplo de como a propagação do som em um meio rarefeito costuma ser mal compreendida. O experimento consiste em colocar uma campainha sob uma campânula de vidro bem vedada, conectada a uma bomba de vácuo. Inicialmente, quando há ar no interior da campânula, a campainha pode ser ouvida claramente do lado de fora. À medida que a bomba retira o ar, o som vai diminuindo até que não se escuta mais nada. O experimento é apresentado aos alunos como evidência de que o som não se propaga no vácuo. O problema com essa ‘demonstração’ é que e o (pouco) ar deixado pela bomba no interior da campânula permite facilmente a propagação de ondas sonoras. Para ver isso basta notar que mesmo as melhores bombas de vácuo encontradas em laboratórios escolares não são capazes de produzir pressões inferiores a 10^{-3} atm. Como já notamos, a essas pressões qualquer onda sonora de comprimento de onda superior a 1 mm (o que inclui o espectro audível a seres humanos) pode propagar-se. Portanto, *há* som no interior da campânula. Ele não é ouvido do lado de fora porque as impedâncias acústicas da campainha, do ar rarefeito e da parede da campânula ficam ‘descasadas’ a baixas pressões [Rossing 2007, p. 10].

Outra idéia errônea associada ao som no “vácuo” é a de que não há propagação sonora no espaço interestelar. Novamente, o problema é que esse espaço não é vazio. Por exemplo, em uma nuvem interestelar com densidade de 10 átomos de hidrogênio por cm^3 , o livre caminho médio é da ordem de 10^{14} cm, cerca de 10 vezes a distância da Terra ao Sol. Ondas sonoras de comprimentos de onda comparáveis ao tamanho do sistema solar podem propagar-se nessa nuvem de gás. É claro que ouvido algum pode escutar tais sons, mas eles existem e parecem desempenhar um papel importante nos processos de formação estelar, via a *instabilidade de Jeans* [Jeans 1902].

Capítulo 3

Propagação do som: perguntas e respostas

As concepções sobre propagação do som apresentadas no capítulo anterior são o ponto de partida da sequência de ensino-aprendizagem que propomos neste trabalho. A sequência tem quatro unidades, cada uma das quais começa com a apresentação aos alunos de questões sobre a propagação sonora. As questões são de múltipla escolha e as opções de resposta incluem as principais concepções intuitivas reveladas pelos estudos descritos no capítulo 2. O objetivo do questionário não é fazer mais uma pesquisa sobre concepções espontâneas embora, como veremos, alguns resultados tenham interesse desse ponto de vista. O propósito principal das questões é ajudar cada estudante a reconhecer e explicitar suas próprias idéias sobre o comportamento do som, além de tomar conhecimento das concepções apresentadas pelos colegas. A apresentação e sistematização das respostas obtidas e a constatação de sua diversidade, levam naturalmente ao debate sobre qual é a noção mais correta da propagação do som. A discussão é resolvida nas etapas seguintes da sequência de ensino-aprendizagem, com a realização de experimentos. Neste capítulo apresentaremos as questões entregues aos alunos e discutiremos suas respostas. As etapas posteriores serão descritas mais à frente, em outros capítulos. Como a sequência de ensino-aprendizagem que propomos tem semelhança com as atividades de *previsão-observação-explicação* (POE) [White 1992, Gunstone 2005], começaremos com uma breve discussão desse método.

3.1 Atividades de previsão-observação-explicação (POE)

A estratégia previsão-observação-explicação (POE) – desenvolvida na década de 1980 na Universidade de Monash, Austrália – é uma revisão da maneira tradicional de realizar demonstrações e experimentos didáticos. Como o próprio nome sugere, uma atividade POE é dividida em três partes. Na primeira, os alunos fazem uma *previsão* sobre o resultado de determinado evento. A previsão deve ser acompanhada de uma justificativa, evitando a simples adivinhação. Na segunda etapa um experimento é realizado, no qual os alunos *observam* a ocorrência do evento. Cada aluno descreve suas observações por escrito. Esse registro é importante, pois o que eles ‘vêm’ no experimento pode variar muito (por influencia de suas expectativas, por exemplo).

Finalmente, eles devem tentar *explicar* um eventual conflito entre a previsão e a observação. Do ponto de vista da aprendizagem, este o ponto chave da estratégia POE. A reconciliação entre previsão e observação não é tarefa simples; os alunos devem expor e discutir suas próprias explicações, chegando até, se for o caso, a propor novos experimentos para resolver questões ainda em aberto. Nas palavras de White e Gunstone:

“Fazer previsões sem registrar os motivos é um pouco como ignorar a natureza das relações nos mapas conceituais: muito do que poderia ser revelado sobre a compreensão do tema é descartado. Quando a ação ocorre, todos os alunos têm que anotar suas observações individuais. [...] há muitas ocasiões em que diferentes alunos verão coisas diferentes. Se as observações não são anotadas no momento em que são feitas, alguns irão mudar suas observações ao ouvir o que os outros afirmam ter visto. A última etapa é para que os estudantes ajustem qualquer discrepância entre o que previram e o que observaram. Muitas vezes eles acham isso difícil e tudo o que você pode fazer nesses casos é incentivá-los a considerar todas as possibilidades que conseguem imaginar. Esse incentivo é importante, porque as explicações que os alunos dão nesta etapa revelam muito sobre sua compreensão.” (tradução livre de [White 1992], p. 46).

A sequência de ensino-aprendizagem que propomos tem semelhança com as atividades POE, mas existem diferenças importantes. Não insistimos para que os alunos justifiquem por escrito as suas respostas às questões, que são sempre de múltipla escolha. Eles provavelmente encontrariam dificuldades para descrever em palavras as idéias intuitivas que nortearam suas opções. Além disso, a inevitável diversidade das justificativas complicaria a identificação e comparação das principais linhas de pensamento. Também não exigimos que cada aluno apresente por escrito uma explicação da possível divergência entre sua previsão e o resultado do experimento, como em algumas implementações do POE. Mas insistimos para que, em discussões dos alunos entre si e com o professor, o significado das expectativas iniciais seja esclarecido à luz das observações experimentais.

3.2 Propagação do som: as idéias dos alunos

As questões apresentadas aos alunos são, como já mencionamos, de múltipla escolha. A opção pela múltipla escolha restringe a diversidade de respostas, mas tem duas vantagens. A primeira é que, assim, torna-se muito mais simples apresentar, sistematizar e comparar as diferentes noções apresentadas pelos alunos. A segunda vantagem da múltipla escolha é que esta não adiciona o problema da expressão escrita

às dificuldades que os alunos já têm para identificar suas próprias noções sobre a natureza do som. Como as opções de resposta às questões incluem as concepções sobre propagação sonora mais frequentemente identificadas na literatura, a limitação imposta pela múltipla escolha não deve ser muito severa.

Sempre que possível, apresentamos as opções de resposta em forma pictórica. Novamente, o objetivo é facilitar ao estudante o reconhecimento de suas próprias imagens sobre a questão, sem embaraços adicionais que podem ser criados por dificuldades na interpretação de textos.

Como o som chega até nós

As duas primeiras questões que apresentamos aos alunos dizem respeito à maneira como o som chega a nossos ouvidos. Essas questões foram propostas a 164 alunos do ensino fundamental (9º ano) e médio de uma escola pública da cidade do Rio de Janeiro. A distribuição dos alunos pela série letiva está mostrada na tabela 3.1. A maioria desses alunos não havia estudado física ondulatória. Isso não representou um problema, pois todas as perguntas que formulamos tinham base puramente cinemática, com conceitos (velocidade, distância, tempo) conhecidos por todos.

Série letiva	9º ano	1ª série	2ª série	3ª série	Total
Alunos	25	44	22	73	164

Tabela 3.1. Número de alunos que responderam às questões 1 e 2, divididos de acordo com a série letiva. O nono ano refere-se ao ensino fundamental e as três séries ao ensino médio.

A primeira pergunta (questão 1) está apresentada na figura 3.1. Ela trata do que acontece quando a buzina de um carro começa a soar. As opções de resposta envolvem a propagação do som com velocidade finita (A), a “propagação instantânea”, em que o som se instala imediatamente em todos os pontos onde pode ser ouvido (C), e a noção de que o som não se propaga, mas vai ficando mais forte e “preenche” gradativamente o ambiente (B) [Boyes 1991]. As zonas cinzentas nos desenhos da questão indicam os locais onde se pode ouvir o som.

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.

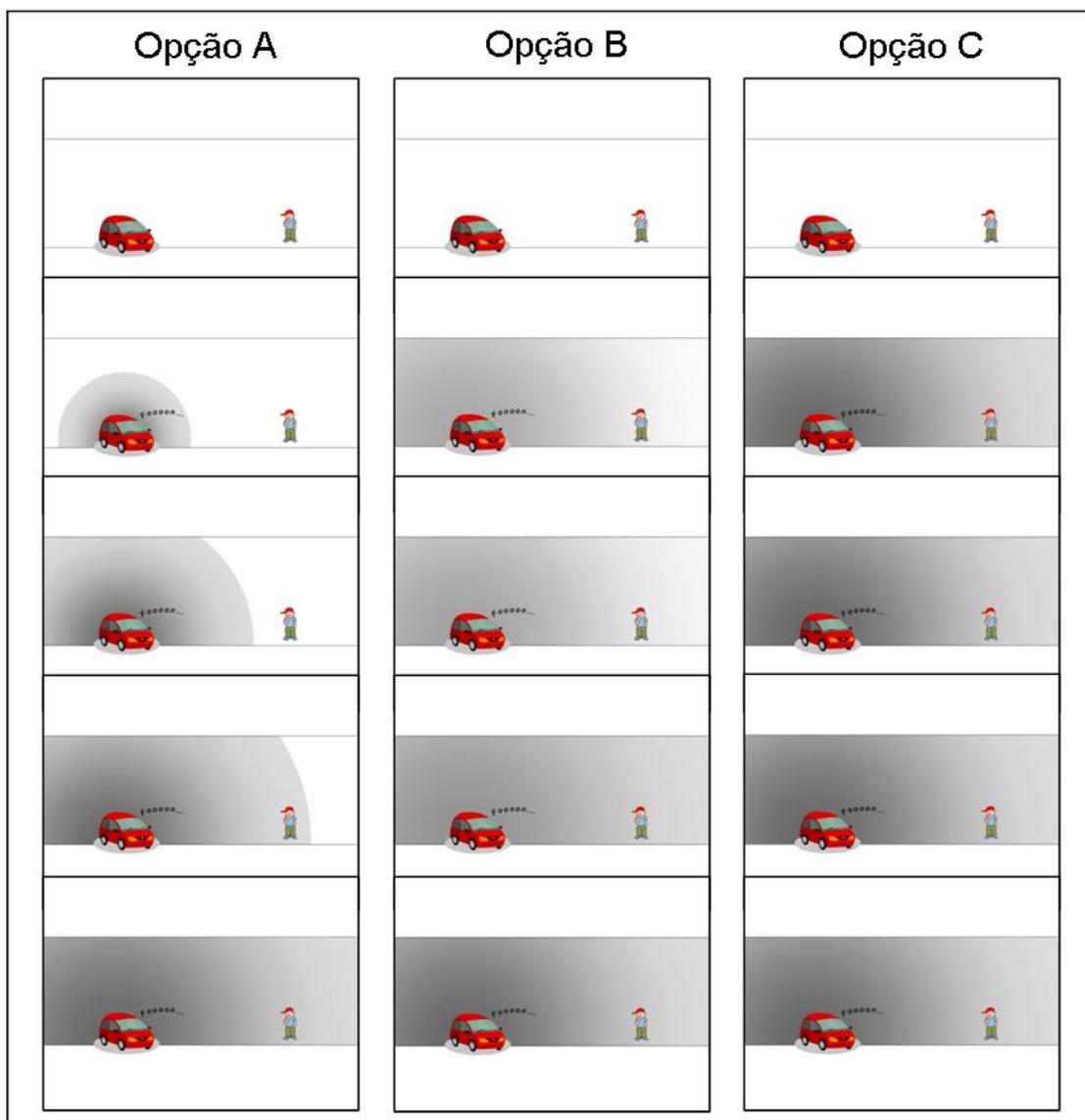


Figura 3.1. A primeira questão apresentada aos alunos. Na opção *A* o som da buzina se propaga com velocidade finita até o menino; em *B* a propagação é instantânea, mas a intensidade cresce gradativamente [Boyes 1991]; em *C* o som se instala imediatamente em todos os pontos.

A tabela 3.2 mostra a distribuição estatística das respostas à questão 1, separadas pela série à qual pertenciam os alunos. Os percentuais são calculados em relação ao número de alunos em cada série letiva.

	9º ano	1ª série	2ª série	3ª série
A	52%	61%	68%	78%
B	24%	20%	14%	8%
C	24%	18%	18%	14%

Tabela 3.2. Distribuição das respostas à questão 1. As percentagens são calculadas em relação ao número de alunos de cada série letiva.

A figura 3.2 mostra a taxa de acerto na questão (resposta *A*) dos alunos nas diversas séries. Cerca de metade dos alunos do nono ano dão a resposta correta, e a percentagem de acertos aumenta à medida que se vai para as séries superiores, chegando a três quartos dos estudantes ao final do ensino médio.

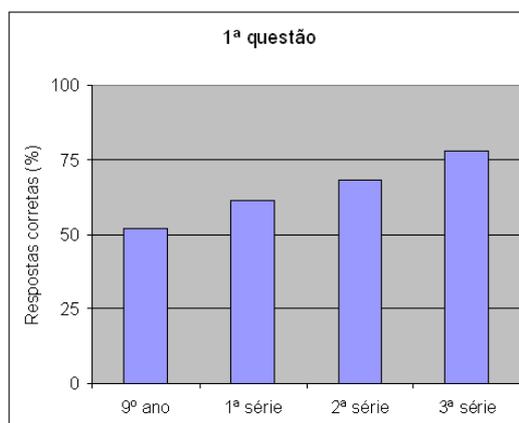


Figura 3.2. Taxa de acerto na 1ª questão.

Uma visão mais completa dos resultados da tabela 3.2 está apresentada na figura 3.3. Vemos que as duas alternativas incorretas (*B* e *C*) receberam aproximadamente o mesmo número de respostas. Nas séries superiores ambas são escolhidas cada vez menos, mas a idéia de que o som preenche gradativamente o ambiente (*B*) parece diminuir mais rapidamente.

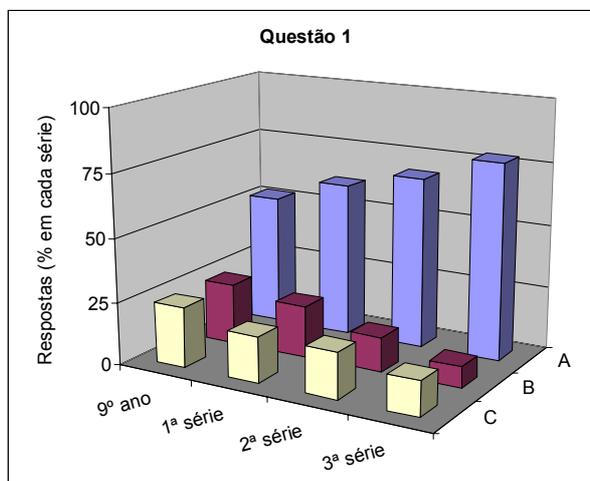


Figura 3.3. Distribuição das respostas à questão 1.

A segunda pergunta apresentada aos alunos é complementar à primeira, e trata do que ocorre com o som quando a buzina pára de soar. A questão está mostrada na figura 3.4. Novamente, as opções de resposta incluem a propagação do som com velocidade finita (*B*), o desaparecimento imediato do som em todos os pontos onde ele era escutado (*D*) e a diluição gradativa da intensidade sonora (*C*). Nesta questão foi incluída uma quarta opção (*A*), segundo a qual o som “retorna” à fonte após ser escutado [Piaget 1977].

Questão 2

A buzina de um carro pára 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.

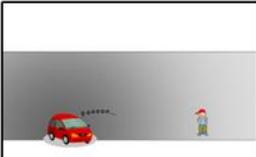
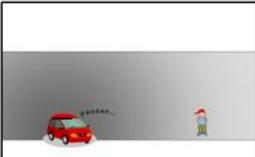
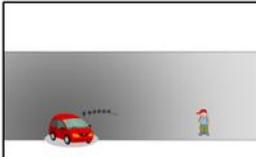
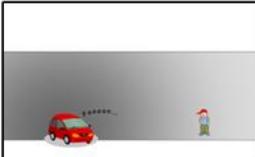
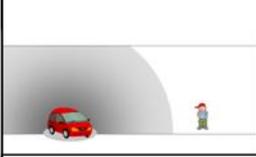
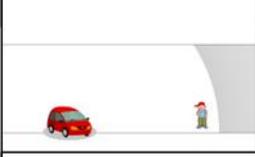
Opção A	Opção B	Opção C	Opção D
			
			
			
			
			

Figura 3.4. A segunda questão apresentada aos alunos. Na opção *A* o som da buzina “volta” para o carro quando a buzina pára de tocar [Piaget 1977]; em *B* o final do sinal sonoro se propaga com velocidade finita até o menino; em *C* a intensidade sonora é dissipada gradativamente [Boyes 1991]; e em *D* o som se desaparece imediatamente em todos os pontos onde era escutado.

A distribuição das respostas à questão 2 está mostrada na tabela 3.2. As percentagens estão calculadas com base nos alunos de cada série.

	9º ano	1ª série	2ª série	3ª série
A	12%	5%	9%	3%
B	56%	80%	68%	73%
C	24%	9%	5%	14%
D	8%	7%	18%	11%

Tabela 3.3. Distribuição das respostas à questão 2. As percentagens são calculadas em relação ao número de alunos de cada série letiva.

A fração de respostas corretas à questão 2 (opção *B*) está mostrada, por série letiva, na figura 3.5. Há dois aspectos intrigantes nesses resultados. Primeiro, a taxa de acerto tende a ser maior que a da questão 1, apesar da questão 2 ser, em nossa opinião, mais difícil. Segundo, os acertos não parecem aumentar nas séries superiores, pelo menos não de forma tão clara e sistemática quanto a encontrada na questão 1.

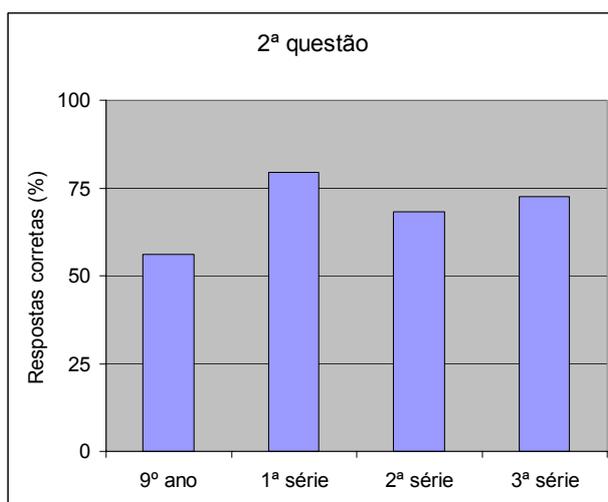


Figura 3.5. Taxa de acerto na 2ª questão.

A figura 3.6 dá uma visão geral das respostas à segunda questão. Vemos que, à medida que progredem nas séries letivas, os alunos tendem a manter suas idéias, certas ou erradas, sobre como o som desaparece quando a fonte sonora é desligada. A única concepção que dá indícios de tornar-se menos frequente é a de que o som cessa porque “volta para casa” (opção *A*). As outras duas noções incorretas – a de que o som desaparece no mesmo instante em todos os lugares (*D*) e a de que ele vai se dissipando gradativamente (*C*) – sofrem alterações quando se passa de uma série para outra, mas não apresentam uma tendência clara de diminuição.

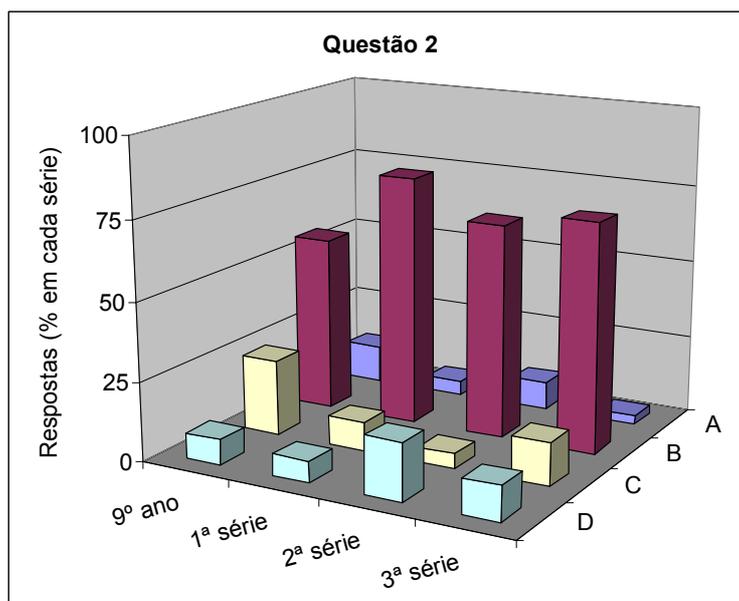


Figura 3.6. Distribuição das respostas à questão 2.

Correlações entre as respostas às duas questões também são de interesse. A tabela 3.4 mostra a fração de alunos em cada série que acertou as duas questões, errou as duas, e acertou uma errando a outra.

	9º ano	1ª série	2ª série	3ª série
Questões 1 e 2 certas	40%	41%	50%	64%
Questões 1 e 2 erradas	36%	16%	14%	16%
Questão 1 certa, questão 2 errada	12%	11%	18%	12%
Questão 2 certa, questão 1 errada	12%	32%	18%	7%

Tabela 3.4. Resultados combinados das respostas às duas questões.

O acerto nas duas questões pode ser tomado como critério para afirmar que o aluno possui, de forma razoavelmente sedimentada, a noção de que o som emitido por uma fonte se afasta dela com velocidade finita. O número desses alunos em cada série letiva está mostrado na figura 3.7. Na nona série, menos da metade dos estudantes parece conceber o som como algo que se propaga. Essa fração vai subindo gradativamente nas séries posteriores até chegar a cerca de dois terços dos estudantes ao final do ensino médio. A figura 3.8 apresenta o quadro geral das relações entre as respostas às duas questões.

Esses resultados estão em bom acordo com as pesquisas relatadas no capítulo 2. Vimos nesse capítulo que Asoko, Leach e Scott encontraram que a idéia de propagação do som só aparece de forma significativa entre estudantes de 16 anos ou mais [Driver 1994, West 2008], e que Boyes e Stannisstreet mostraram que esse conceito é cerca de

duas vezes mais comum entre alunos de 15/16 anos que entre os de 11/12 anos [Boyes 1991].

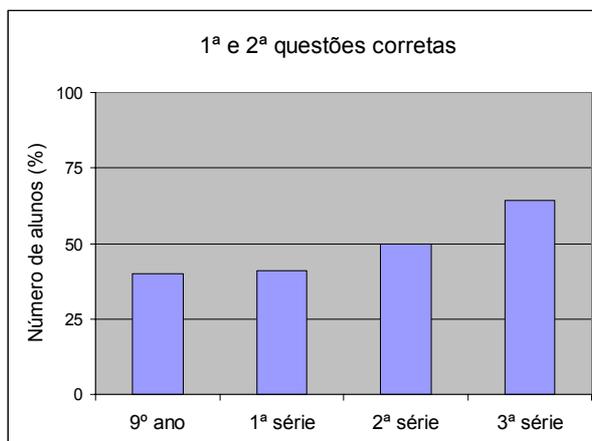


Figura 3.7. Percentagem de alunos que responderam corretamente às questões 1 e 2.

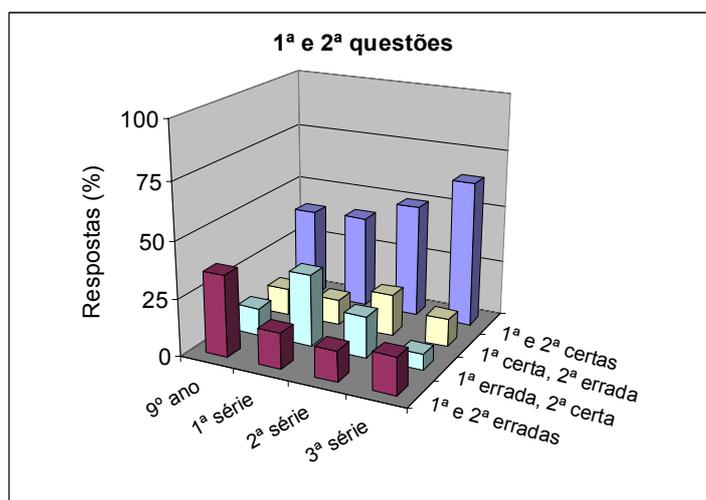


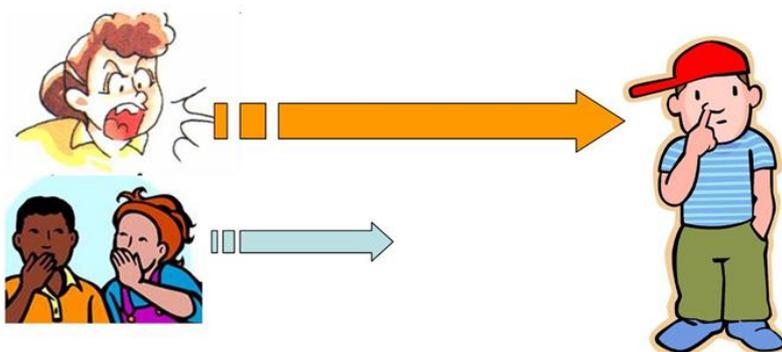
Figura 3.8. Relações entre as respostas às questões 1 e 2.

Propagação do som forte e do som fraco

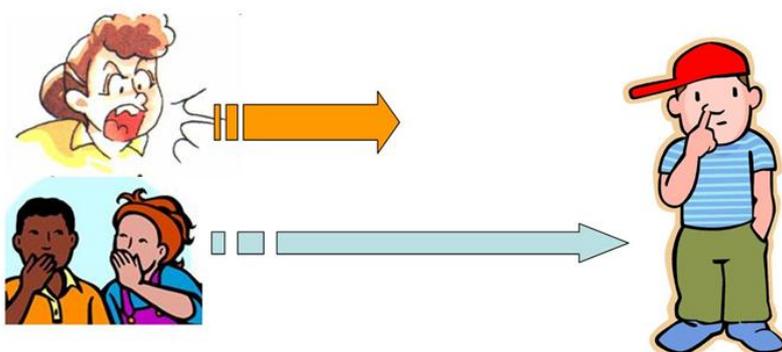
A segunda unidade da sequência de ensino-aprendizagem diz respeito à velocidade de sons fortes e fracos. Como vimos no capítulo 2, Maurines [Maurines 1993, Viennot 2001] mostrou que a idéia de que sons fortes deslocam-se mais rapidamente que sons fracos é muito difundida entre os estudantes, e essa é a questão abordada na unidade. A pergunta apresentada aos alunos no início da discussão está mostrada na figura 3.9. Note-se que tanto a pergunta quanto as opções de respostas pressupõem que os alunos já estão familiarizados com a noção de que o som se propaga, ou seja, a segunda unidade não deve ser iniciada antes que a primeira tenha sido inteiramente realizada.

Questão 3

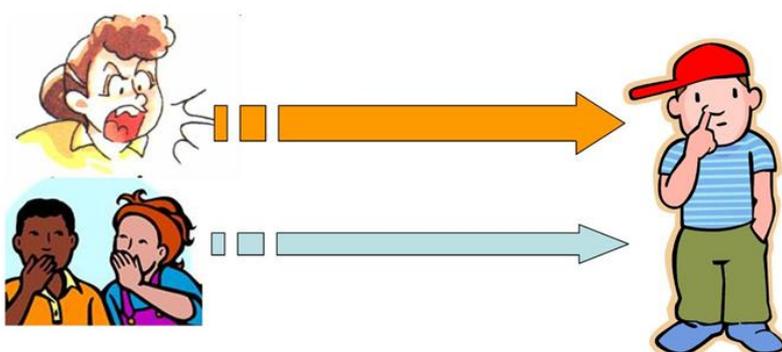
Um som forte e um som fraco (um grito e um cochicho) são produzidos no mesmo instante, à mesma distância do garoto. Qual dos dois sons ele escuta primeiro?



a) O som forte chega ao garoto antes do som fraco.



b) O som forte chega ao garoto depois do som fraco.



c) Os sons forte e fraco chegam ao mesmo tempo.

Figura 3.9. Questão sobre a propagação de sons fortes e fracos.

A questão foi apresentada a um grupo mais restrito que o anterior, composto por 10 alunos da primeira série do ensino médio. Esses foram os estudantes que se propuseram a realizar todas as etapas da sequência de ensino-aprendizagem. As respostas dadas por eles à questão 3 estão mostradas na tabela 3.5 e na figura 3.10.

Opção	Respostas
a	6
b	0
c	4

Tabela 3.5. Número de respostas dadas a cada opção da questão 3.

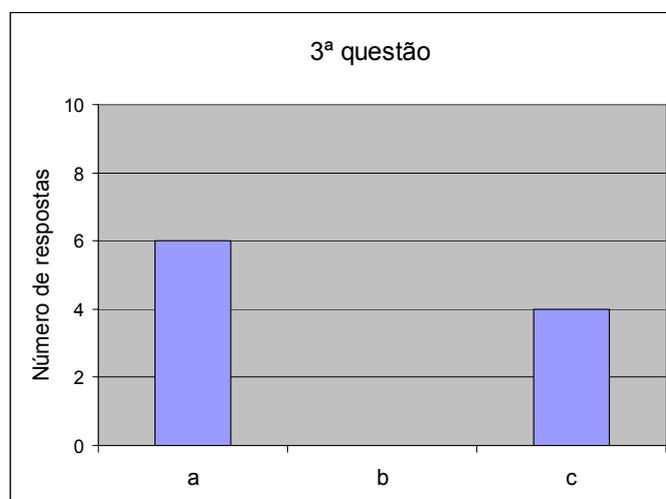


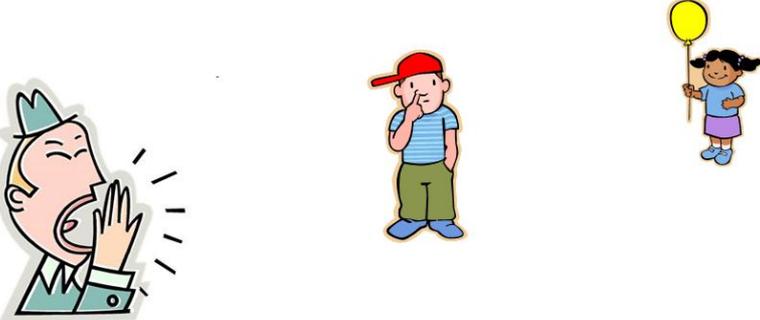
Figura 3.10. Distribuição das respostas à questão 3. Na opção *a* o som forte anda mais rápido que o fraco, em *b* o som fraco é o mais rápido e em *c* os dois têm a mesma velocidade.

Vemos que a idéia de que sons mais fortes são mais rápidos é dominante entre os alunos. Nenhum deles respondeu que o som fraco chegaria primeiro, e uma parcela apreciável, mas não majoritária, considera corretamente que a velocidade é independente da intensidade do som. Esses resultados são compatíveis com os relatados por Maurines e Viennot, em um estudo realizado com 62 estudantes franceses da 9ª série, sem instrução específica no assunto [Maurines 1993, Viennot 2001]. Nesse estudo, 40% dos alunos afirmaram que o som se propaga mais rapidamente quando gritamos mais alto, 42% disseram que não haveria diferença, e 18% não souberam responder. A semelhança entre os resultados que obtivemos e os de Maurines e Viennot é bastante expressiva, principalmente se considerarmos o pequeno tamanho do grupo que investigamos.

Propagação a pequenas e grandes distâncias

A terceira unidade da sequência de ensino-aprendizagem trata da propagação do som a pequenas e grandes distâncias. Especificamente, discutimos se o som vai perdendo velocidade à medida que se propaga pelo ar. Como demonstrado por Maurines [Maurines 1993, Viennot 2001], essa é uma concepção muito comum entre os estudantes. A questão que inicia a discussão nessa unidade está apresentada na figura 3.11.

Questão 4
Uma pessoa dá um grito, que pode ser ouvido por um menino e uma menina. O menino está próximo da pessoa que grita, e a menina está mais distante. Das afirmativas abaixo, qual lhe parece a mais correta?



a) Quando o som do grito passar pela menina, ele terá *velocidade maior* do que quando passou pelo menino.

b) Quando o som do grito passar pela menina, ele terá *velocidade menor* do que quando passou pelo menino.

c) Quando o som do grito passar pela menina, ele terá a *mesma velocidade* que quando passou pelo menino.

Figura 3.11. Questão sobre a propagação do som a curtas e longas distâncias.

A questão foi apresentada aos mesmos 10 alunos que realizaram a unidade anterior. A distribuição das respostas está mostrada na tabela 3.6 e figura 3.12.

Opção	Respostas
a	1
b	3
c	6

Tabela 3.6. Número de respostas dadas a cada opção da questão 4.

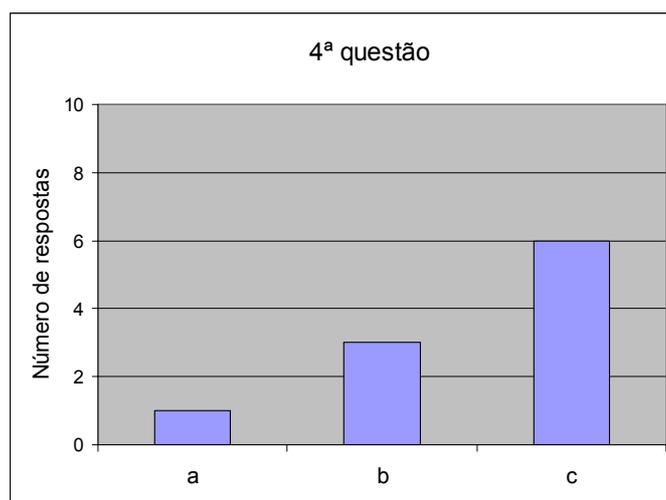


Figura 3.12. Distribuição das respostas à questão 4. Na opção *a*, a velocidade do som aumenta com a distância percorrida, em *b* a velocidade diminui à medida que o som se propaga, e em *c* a velocidade mantém-se constante.

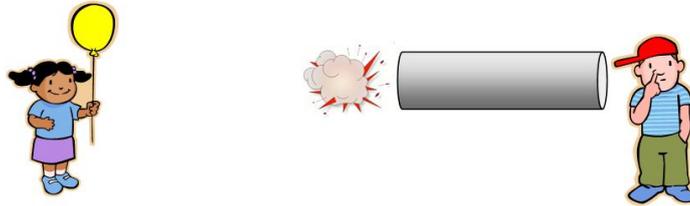
Vemos que a concepção correta é a dominante – mais da metade dos alunos considera que a velocidade do som não muda com a distância percorrida. Uma parcela significativa, entretanto, parece pensar que o som vai perdendo “ímpeto” à medida que se propaga. Um único aluno respondeu que o som andaria mais rápido a distâncias maiores. O estudo de Maurines – envolvendo 25 estudantes franceses da 9ª série, sem instrução específica no tema – chegou a resultados notavelmente semelhantes. Perguntados sobre se o som progride mais lentamente quando percorre distâncias maiores, 48% dos alunos afirmaram que a velocidade do som era a mesma qualquer que fosse a distância percorrida, 32% responderam que o som “ia parando” à medida que se propagava, e 20% não deram resposta [Maurines 1993, Viennot 2001].

Propagação em ambientes fechados e abertos

A última unidade da sequência de ensino-aprendizagem discute a propagação do som em um tubo, e a compara com a propagação no espaço aberto. A questão básica é descobrir se a velocidade do som no interior do tubo é maior, igual ou menor que a velocidade no ar livre. A questão apresentada aos alunos (o mesmo grupo de 10 que participou das unidades anteriores) está mostrada na figura 3.13.

Questão 5

Uma pequena explosão pode ser ouvida por um menino e uma menina. As duas crianças estão à mesma distância do ponto onde ocorre a explosão, mas o som tem que passar por um tubo para chegar ao menino. Das afirmativas abaixo, qual lhe parece a mais correta?



- a) O menino ouvirá o som da explosão *antes* da menina.
- b) O menino ouvirá o som da explosão *depois* da menina.
- c) O menino ouvirá o som da explosão *ao mesmo tempo* que a menina.

Figura 3.13. Questão sobre a propagação do som em ambientes abertos e confinados.

A distribuição das respostas dos alunos está mostrada na tabela 3.7 e na figura 3.14. A grande maioria dos estudantes parece considerar que a passagem pelo tubo atrapalha a propagação do som, diminuindo sua velocidade. Apenas um aluno respondeu que a velocidade do som no tubo e no ar aberto seriam iguais, e outro afirmou que a velocidade no tubo seria maior.

Opção	Respostas
a	1
b	8
c	1

Tabela 3.7. Número de respostas dadas a cada opção da questão 5.

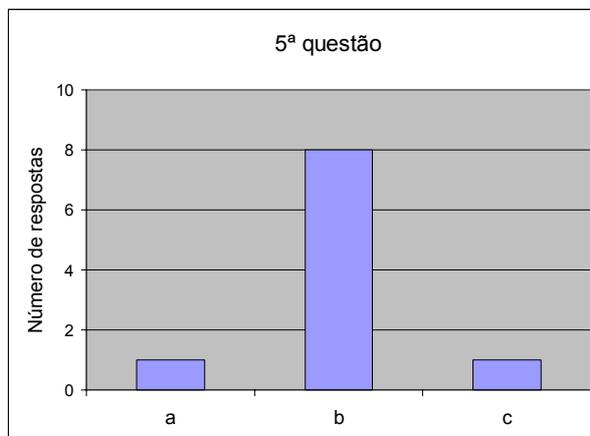


Figura 3.14. Distribuição das respostas à questão 5. Na opção *a* o som é mais rápido no tubo que no espaço aberto (o tubo ajuda a propagação do som). Em *b* a velocidade do som no tubo é menor que no ambiente aberto (o tubo atrapalha a propagação), e em *c* as duas velocidades são iguais (o tubo não faz diferença).

Como nos casos anteriores, os resultados que obtivemos estão em bom acordo com os encontrados por Maurines. Em seu estudo – realizado com 28 estudantes franceses da 11ª série, sem instrução específica no tema – ela observou que 25% dos alunos respondiam que a velocidade seria menor no tubo que no ar aberto, 54% afirmavam que a velocidade no tubo seria maior, e 11% diziam não haver diferença entre as velocidades. Novamente, deve ser destacada a notável semelhança entre nossos resultados e os da pesquisa francesa.

3.3 Após os questionários

Dentro de cada uma das quatro unidades da sequência de ensino-aprendizagem, o passo seguinte à aplicação dos questionários é a discussão das diferentes concepções manifestadas pelos alunos em suas respostas. O propósito da discussão não é encontrar a resposta correta, e sim estimular cada aluno a refletir sobre sua própria noção a respeito da propagação do som e sobre o que a diferencia das concepções dos colegas. Tendo tornado claro (na medida do possível) quais são as idéias em confronto e que alunos as sustentam, surge a pergunta de qual é concepção correta. Isso leva à próxima etapa do processo: responder essa pergunta através de um experimento. Em ambientes escolares não é usual buscar respostas dessa maneira – diferenças de opinião são geralmente resolvidas pelo professor ou livro-texto. Há duas vantagens em recorrer ao experimento. Uma delas é que a revisão de concepções incorretas acontece mais facilmente quando os alunos observam diretamente, em situações concretas, a inadequação dessas idéias. A outra vantagem é que os alunos realizam algo que pode ser comparado ao processo científico. Em vez de perguntar ao professor qual é a resposta correta, ou de buscá-la em livros, os estudantes resolvem o problema com um experimento. Esse procedimento envolve uma idéia básica em ciência, a de que a qualidade de nossas teorias deve ser julgada pela sua concordância com fatos empíricos, não pela opinião de pessoas, por mais sábias que sejam.

É claro que, numa escola, o recurso ao experimento só é viável se for possível montá-lo, executá-lo e compreendê-lo com facilidade. Como veremos no capítulo 4, é difícil encontrar experimentos sobre a propagação do som que tenham essas características. Uma solução para esse problema será apresentada no capítulo 5.

Capítulo 4

Métodos de medida da velocidade do som

Em princípio, a velocidade do som pode ser medida dividindo-se a distância percorrida por um pulso sonoro pelo tempo gasto no percurso. Essas são as chamadas *medidas diretas* da velocidade do som. Tais medidas são, conceitualmente, muito simples; um conhecimento elementar de cinemática é suficiente para compreendê-las. O problema é que o som desloca-se muito rapidamente – o tempo que ele leva para atravessar uma sala de aula, por exemplo, é da ordem de centésimos de segundo, algo impossível de medir com cronômetros manuais. Por isso os métodos utilizados para medir a velocidade do som em laboratórios didáticos são, na maior parte, *indiretos*, o que significa que eles são baseados nas propriedades ondulatórias do som, não na cinemática. Neste capítulo descreveremos vários métodos de medida da velocidade do som. Nosso objetivo é duplo: apresentar uma visão abrangente e atualizada da literatura existente sobre medidas da velocidade do som em laboratórios de ensino, e demonstrar que nenhum dos métodos propostos é apropriado para um estudo introdutório da propagação sonora. Começaremos a discussão pelos métodos indiretos, e passaremos em seguida aos diretos.

4.1 Medidas indiretas da velocidade do som

As medidas indiretas da velocidade do som são quase sempre baseadas na observação de ressonâncias ou de diferenças de fase. Discutiremos esses dois tipos de experimento separadamente.

Ressonâncias

A observação de ressonâncias tem sido o método de medida da velocidade do som mais utilizado em ambientes didáticos. O livro clássico de Sutton, *Demonstration Experiments in Physics* [Sutton 1938], já descrevia um experimento desses. O método apresentado por Sutton é muito simples e está ilustrado na figura 4.1 [Cavalcante 2003]. Um tubo com cerca de 1 metro de comprimento, feito de material transparente e rígido, é mantido na vertical e ligado a um reservatório de água por um cano de borracha flexível. O nível da água dentro do tubo pode ser ajustado com facilidade mudando-se a altura relativa entre o reservatório e o tubo. A fonte sonora é um diapasão de frequência

conhecida f , colocado próximo à extremidade aberta do tubo. O experimento consiste em fazer soar o diapasão e ir variando gradativamente a quantidade de água no tubo. Em determinados pontos do nível da água o som no tubo torna-se particularmente forte, indicando que a coluna de ar no interior do tubo encontra-se em ressonância com o diapasão. Isso ocorre quando o comprimento da coluna de ar é

$$L_n = (2n + 1)\lambda / 4, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.1)$$

onde λ é o comprimento de onda do som. O menor comprimento ressonante, $L_0 = \lambda/4$ (mostrado na figura 4.1), é o mais fácil de determinar: basta iniciar o experimento com o tubo quase cheio de água e ir diminuindo o nível gradativamente. Medindo o valor de L_0 , o comprimento de onda $\lambda = 4L_0$ pode ser calculado. Outra maneira simples de calcular λ é medindo a diferença de altura entre dois níveis ressonantes sucessivos, $\Delta L = L_{n+1} - L_n = \lambda/2$. A determinação do comprimento de onda por $\lambda = 2\Delta L$ é mais precisa que a fornecida por L_0 , uma vez que não é afetada por ‘efeitos de ponta’ [LoPresto 2005]. Uma vez encontrado o comprimento de onda, a velocidade do som é obtida com auxílio da relação ondulatória básica

$$v_{som} = \lambda \cdot f. \quad (4.2)$$

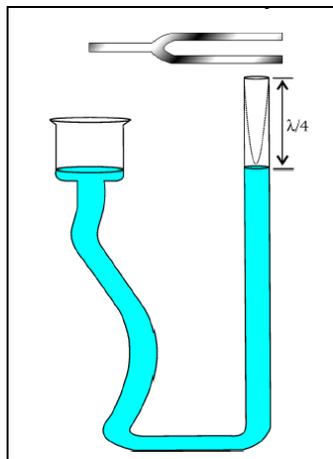


Figura 4.1. Esquema do experimento para medida da velocidade do som por ressonância [Cavalcante 2003].

O procedimento descrito acima foi simplificado por Silva *et al.* [Silva 2005], como está mostrado na figura 4.2. O reservatório móvel foi substituído por um balde cheio de água no qual o tubo é mergulhado, e a caixa de som de um computador produziu o som no lugar do diapasão.

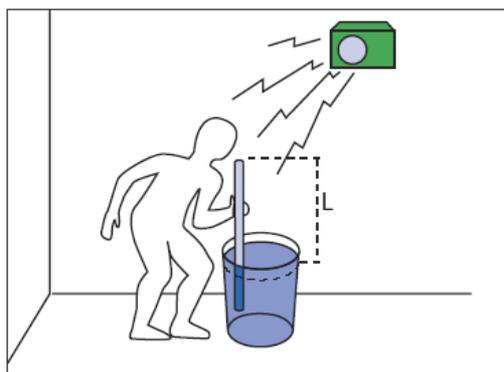


Figura 4.2. Outra maneira de medir a velocidade do som por ressonância [Silva 2005].

Uma terceira variação do experimento, que pode evitar inundações na sala de aula, está descrita na figura 4.3 [Warden 2005]. No lugar da água é usado um peso que vede razoavelmente bem o tubo, mas que deslize por ele com facilidade. O peso é levantado e baixado com auxílio de um barbante, mudando o tamanho da coluna de ar como era feito pela água nos experimentos anteriores.

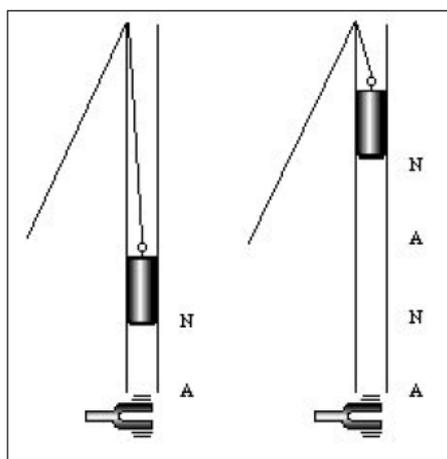


Figura 4.3. Uma terceira versão do experimento para medir a velocidade do som por ressonância [Warden 2005].

Todas as versões do método descrito acima dependem da sensação auditiva para determinação das ressonâncias, o que torna seus resultados pouco precisos. É possível identificar as ressonâncias de forma menos subjetiva, mas isso em geral complica a montagem e realização do experimento (ver [Eddy 1987], por exemplo).

Existem outras maneiras de usar as ressonâncias de um tubo para medir a velocidade do som. No método discutido acima, a frequência está fixa e o comprimento da coluna de ar é variável, sendo medido nas condições de ressonância. Também é possível fazer o contrário: usar um tubo com comprimento fixo e medir as frequências

de ressonância. Medidas da frequência de sons audíveis são, obviamente, mais difíceis de realizar que medidas de comprimento, e geralmente envolvem alguma forma de análise espectral. Esse problema é diminuído pela existência de programas de computador que podem gravar um som e determinar as frequências que o compõem (uma boa opção é o *Audacity* [Audacity 2010]). Uma medida desse tipo foi proposta por Cavalcante e Tavolaro [Cavalcante 2003] e está descrita esquematicamente na figura 4.4. O experimentador bate com a palma da mão na extremidade de um tubo de comprimento conhecido e grava o som produzido no processo. As frequências dominantes desse som correspondem às ressonâncias da coluna de ar e são dadas por

$$f_n = (2n + 1) \frac{v_{som}}{4L}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.3)$$

onde L é o comprimento do tubo e v_{som} é a velocidade do som. Embora o tubo tenha as duas extremidades abertas, a palma da mão fecha uma delas durante a batida, de modo que as ressonâncias são as de um tubo com uma extremidade aberta e outra fechada. A figura 4.4 mostra o espectro de frequências de um tubo com comprimento $L = 20$ cm [Cavalcante 2003]. As quatro primeiras ressonâncias ($n = 0, 1, 2, 3$) são claramente visíveis. Uma vez identificadas as frequências de ressonância, a velocidade do som pode ser calculada com auxílio da equação (4.3).

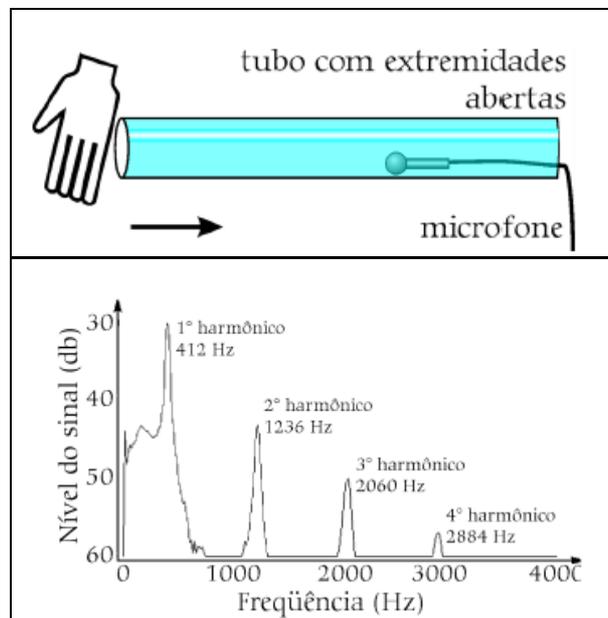


Figura 4.4. Procedimento para medida da velocidade do som em um tubo de comprimento fixo. As frequências de ressonância encontradas estão mostradas na parte inferior da figura [Cavalcante 2003]

Existem variações desse método. Uma possibilidade é usar tubos fechados, o que torna possível estudar a velocidade do som em gases diferentes do ar [Martin 2001] ou a

diferentes temperaturas [Velasco 2004]. O preço pago por essa maior flexibilidade é uma montagem experimental mais complicada.

Diferenças de fase

A velocidade do som também pode ser medida a partir das diferenças de fase em uma onda sonora [Lestz 1963, Christensen 1964, El Hakeem 1965, Vickery 1965, Berg 2005]. A figura 4.5 mostra a montagem de um desses experimentos [Christensen 1964]. Um gerador de sinais é ligado a um alto-falante (S), produzindo um som de frequência f bem determinada. Um microfone (R) registra o som a uma distância L do alto-falante. Os sinais do gerador e do microfone são enviados a um osciloscópio, com o gerador é ligado à entrada horizontal e o microfone à entrada vertical. A combinação dos dois sinais cria uma figura de Lissajous na tela do osciloscópio, que pode ser uma elipse ou uma reta. Quando a distância L for um múltiplo do comprimento de onda, $L = n\lambda$, os sons no alto-falante e no microfone estarão em fase e a figura formada no osciloscópio será uma linha reta. Se o microfone for deslocado, mudando a distância ao alto-falante, os dois sinais não estarão mais em fase e o osciloscópio mostrará uma elipse. Continuando o deslocamento até $L = (n + \frac{1}{2})\lambda$, novamente uma reta será encontrada, desta vez com inclinação oposta à da primeira. Nessa posição a diferença de fase entre os dois sinais é de 180° . A evolução do padrão de Lissajous durante o processo está mostrada na figura 4.6 [Berg 2005].

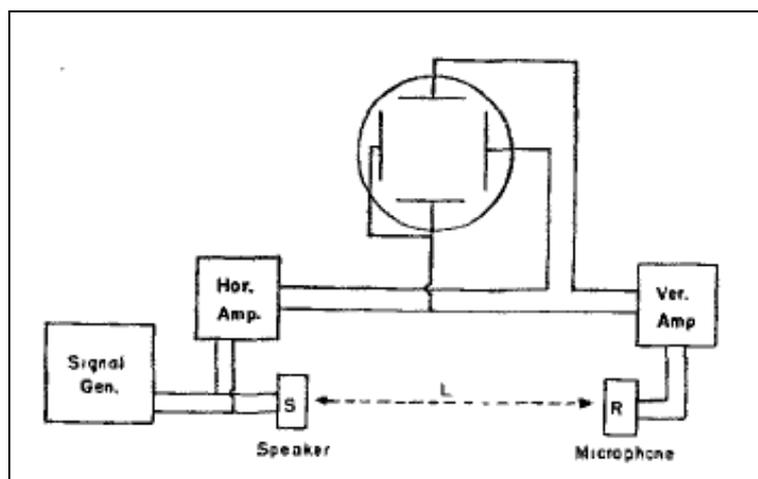


Figura 4.5. Esquema do experimento para medição da velocidade do som pela observação de diferenças de fase [Christensen 1964].

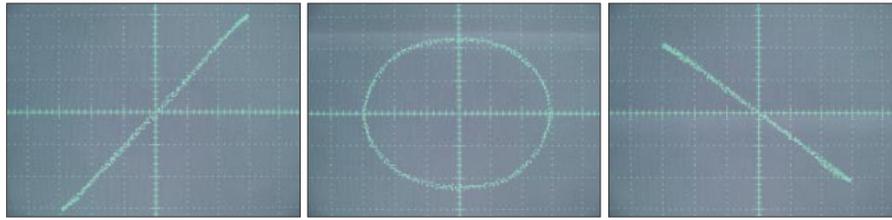


Figura 4.6. Padrões de Lissajous na tela do osciloscópio correspondentes a diferenças de fase de 0° , 90° e 180° , da esquerda para a direita [Berg 2005].

O deslocamento do microfone necessário para que a diferença de fase passe de 0° a 180° , ou seja, para que o padrão na tela do osciloscópio vá do primeiro ao último quadro da figura 4.6, é $\Delta L = \lambda/2$. Medida essa distância, o comprimento de onda é dado por $\lambda = 2 \Delta L$ e a velocidade do som pode ser encontrada pela equação (4.2).

Comentário sobre as medidas indiretas da velocidade do som

A compreensão dos métodos de medida que descrevemos acima pressupõe que os estudantes possuem um conhecimento razoável de física ondulatória. Este não deve ser o caso quando estamos discutindo o som de um ponto de vista puramente cinemático, tentando mostrar que ele viaja de um ponto a outro e procurando determinar com que velocidade ele faz isso. Diferenças de fase e ressonâncias são conceitos que só ganham sentido em um estágio posterior, quando o som é reconhecido como onda e seu estudo integrado ao da física ondulatória. A nosso ver, a questão da propagação do som deve preceder a abordagem ondulatória dos fenômenos sonoros. Esse aspecto é quase sempre ignorado nos currículos, onde a acústica é apresentada como mera aplicação da física ondulatória e a propagação do som é, portanto, um fato aceito *a priori*.

Se desejarmos estudar a propagação sonora antes de tratar de seus aspectos ondulatórios, métodos diretos de medida da velocidade do som são indispensáveis. Existem experimentos, propostos para ambientes escolares, com os quais é possível medir o tempo que um pulso sonoro leva para percorrer uma dada distância e assim obter diretamente a velocidade do som. Entretanto, como veremos a seguir, poucos são realmente simples e utilizam materiais disponíveis em escolas.

4.2 Medidas diretas da velocidade do som

Uma das primeiras propostas de medida direta da velocidade do som em laboratórios de ensino está descrita no livro de Sutton [Sutton 1938]. O método é uma versão acústica do experimento com rodas dentadas empregado por Fizeau para medir a

velocidade da luz. Não há indícios de que esse procedimento tenha sido muito usado em ambientes escolares. Propostas mais exequíveis foram feitas anos mais tarde e serão descritas a seguir.

Medidas com sonares

No final dos anos 70 a Polaroid começou a vender máquinas fotográficas com foco automático. Essas câmeras utilizavam um sonar ultrassônico para determinar a distância do objeto a ser fotografado. Logo surgiram propostas de utilização desses sonares para medir a velocidade do som [Albergotti 1981, Ouseph 1984]. Tais propostas tinham problemas, entretanto. O sinal de ultrassom emitido pelo sonar não é percebido pelo ouvido humano, e não é fácil aos alunos entender medidas da velocidade do som em situações onde não se ouve nada. Mais ainda, a adaptação do sonar a um experimento didático exigia bastante experiência em eletrônica e material nem sempre disponível em um laboratório de ensino.

O último problema foi parcialmente resolvido quando surgiram os sensores ultrassônicos de movimento, vendidos por vários fabricantes de material didático. Esses sensores são os mesmos sonares da Polaroid, convenientemente adaptados para uso em experimentos de mecânica. Em 2002, Pettersen propôs utilizar sensores ultrassônicos para medir a velocidade do som [Pettersen 2002]. Infelizmente, o tipo de medida que é possível realizar com essa proposta é bastante limitado. O problema está no processo de calibração dos sensores, que exige que a velocidade do som no ar seja fornecida. Isso limita o método ao estudo de como a velocidade do som muda quando o meio de propagação é modificado. Um exemplo de aplicação da proposta é apresentado na figura 4.7, que mostra a montagem de um experimento para medir a velocidade do som no dióxido de carbono (CO_2) [Pettersen 2002]. O sensor de movimento é colocado dentro de uma caixa, apontando para cima de modo a medir a distância até o topo desta. O CO_2 é introduzido na caixa através de uma mangueira ligada a um frasco contendo gelo seco. A substituição do ar pelo dióxido de carbono ‘descalibra’ o sonar, fazendo com que ele registre uma altura diferente para a caixa. Como a velocidade do som no CO_2 é menor que no ar, o pulso ultrassônico leva mais tempo para ir ao alto da caixa e voltar, o que é interpretado pelo sensor como um aumento da distância percorrida. Um pouco de álgebra mostra que a razão entre as velocidades do som no CO_2 e no ar é dada por

$$\frac{v_{som}(CO_2)}{v_{som}(ar)} = \frac{H(ar)}{H(CO_2)} \quad (4.4)$$

onde $H(ar)$ e $H(CO_2)$ são as alturas fornecidas pelo sonar quando a caixa está cheia de ar e de CO_2 , respectivamente. O gráfico da figura 4.8 mostra o resultado de uma medida feita com esse método [Pettersen 2002]. Inicialmente a caixa contém ar e a altura fornecida pelo sonar permanece constante. A partir do instante em que o CO_2 é injetado, o sonar passa a informar uma distância maior. Com a caixa cheia de CO_2 , a razão entre as distâncias é $H(ar)/H(CO_2) = 0,56/0,71 = 0,79$. Ou seja, a velocidade do som no CO_2 é cerca de 20% menor que no ar, em bom acordo com resultados conhecidos [Pettersen 2002].

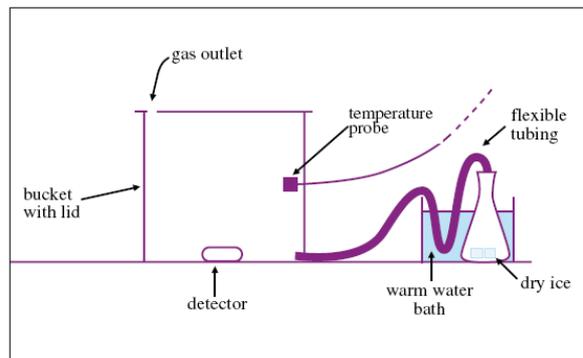


Figura 4.7. Esquema do experimento para medir a velocidade do som no CO_2 com um sonar [Pettersen 2002].

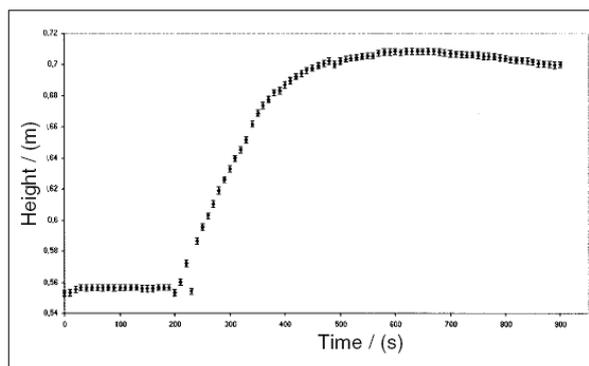


Figura 4.8. Resultado de uma medida com o sensor de movimento. A altura da caixa parece mudar abruptamente no instante em que o CO_2 é injetado [Pettersen 2002].

Do que vimos acima, é razoável concluir que os sonares não representam uma boa solução para o problema da medida direta da velocidade do som. Isso levou à busca por outros métodos, que passaremos a descrever.

Medidas com alto-falante e microfone

A velocidade do som pode ser obtida medindo-se o tempo que um pulso sonoro produzido por um alto-falante leva para chegar a um microfone colocado a certa distância [Karshner 1989, Worland 1999, Barbeta 2000]. A figura 4.9 descreve a montagem desse tipo de experimento [Barbeta 2000]. O pulso sonoro é produzido por um gerador de ‘onda quadrada’ ligado ao alto-falante, e o mesmo sinal é utilizado para disparar a varredura de um osciloscópio. O microfone também é ligado ao osciloscópio, de modo que é possível medir o tempo transcorrido entre a produção do som e sua detecção.

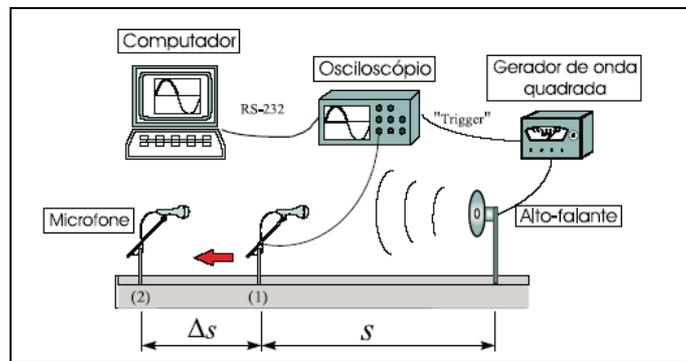


Figura 4.9. Esquema da medida da velocidade do som através do tempo que um pulso sonoro leva para chegar ao microfone [Barbeta 2000].

O traço formado na tela do osciloscópio durante uma dessas medidas está mostrada na figura 4.10 [Worland 1999]. O pico registra a chegada do pulso sonoro ao microfone. O tempo que o pulso leva para ir do alto-falante ao microfone pode ser lido na tela do osciloscópio, pois a varredura deste é disparada pela emissão do som. Movendo o microfone por uma distância ΔS (ver a figura 4.9), a posição do pico na tela será deslocada de Δt , que pode ser medido. A velocidade do som é então calculada por $v_{som} = \Delta S / \Delta t$.

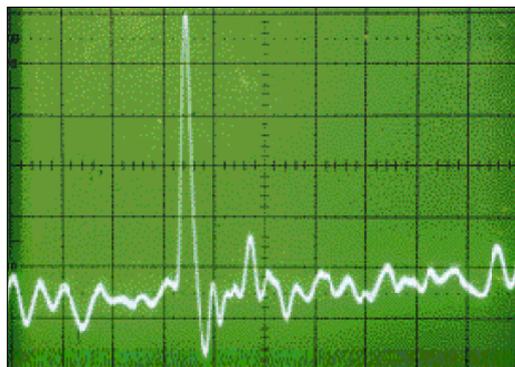


Figura 4.10. O sinal do microfone mostrado na tela do osciloscópio. Cada divisão horizontal corresponde a 0,5 ms [Worland 1999].

Comparado com as medidas com sonar, o procedimento descrito acima tem a vantagem de ser mais simples, fornecer valores absolutos para a velocidade do som, e não depender da compreensão da equação (4.4) por parte dos alunos. Mas o procedimento ainda usa técnicas relativamente elaboradas e equipamento difícil de encontrar em muitas escolas.

Medidas com dois microfones

Os recursos de áudio dos computadores atuais tornaram possível simplificar ainda mais a medida da velocidade do som [Aguiar 2005, Grala 2005, Carvalho 2008]. A idéia é ligar dois microfones à placa de som de um computador e usá-los para gravar um som forte e de curta duração (uma batida de palmas ou o estouro de um balão, por exemplo), como está ilustrado na figura 4.11 [Aguiar 2005]. O tempo que o som leva para ir de um microfone até o outro é medido analisando-se arquivo de áudio onde foi registrada a gravação. De posse desse tempo, e conhecendo a distância entre os microfones, a velocidade do som pode ser calculada.

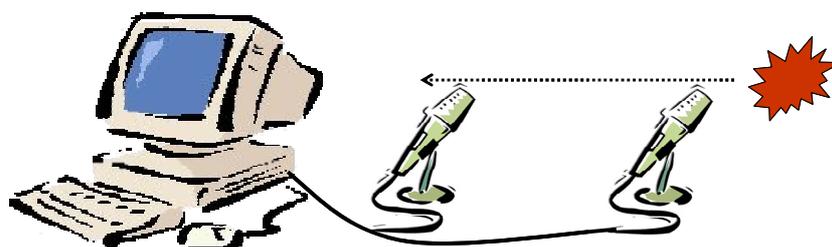


Figura 4.11. Medida da velocidade do som com dois microfones ligados à placa de som de um computador [Aguiar 2005].

O resultado uma medida realizada dessa maneira está mostrado na figura 4.12 [Aguiar 2005]. Os gráficos na figura mostram a intensidade do som em cada microfone como função do tempo. Vemos que o pulso sonoro (o estouro de um balão de festa) passa primeiro por um microfone e depois pelo outro. O intervalo de tempo entre as passagens é $\Delta t = 5,71$ ms. Como a distância entre os microfones é conhecida, $\Delta x = 2,00$ m, a velocidade do som é dada por $v_{som} = \Delta x / \Delta t = 350$ m/s. A repetição da medida para diferentes distâncias entre os microfones fornece uma estimativa mais precisa da velocidade do som. Um gráfico com o resultado de quatro medidas diferentes está na figura 4.13. Os resultados estão alinhados em uma reta cujo coeficiente angular é a velocidade do som. O valor obtido do gráfico é $v_{som} = 347$ m/s. Para comparação, o valor ‘teórico’ da velocidade do som nas condições do experimento (25 °C) é 346 m/s.

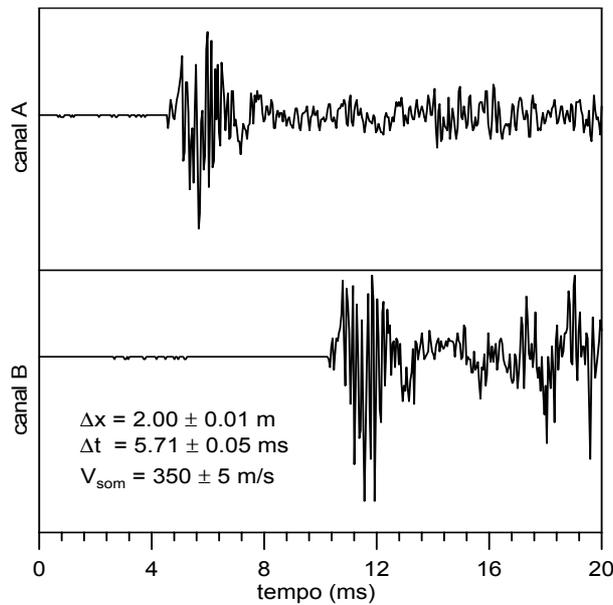


Figura 4.12. O estouro de um balão de festa gravado por dois microfones colocados a uma distância de 2 metros um do outro [Aguiar 2005]

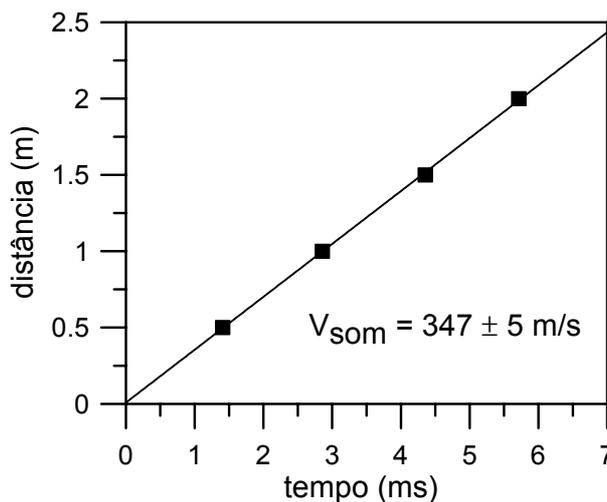


Figura 4.13. A relação entre a distância percorrida pelo pulso sonoro (a distância entre os microfones) e o tempo gasto no percurso [Aguiar 2005].

Assim como os anteriores, o presente método também tem problemas. Não é fácil ligar os dois microfones à placa de som do computador. A ligação tem que ser feita em estéreo, de forma a permitir a gravação do som registrado por cada microfone em um canal diferente. Isso não é possível com a conexão usual dos microfones à placa de som (feita pela entrada “Mic”), que aceita apenas sinais monocanal. Gravações em estéreo podem ser feitas pela entrada “Line-in” da placa de som, usada para ligar aparelhos de áudio ao computador. Infelizmente, os microfones comuns para PCs não podem ser ligados a essa entrada; para isso é necessário construir um circuito adaptador

[Aguiar 2005, Grala 2005, Carvalho 2008]. Os circuitos propostos em [Grala 2005] e [Carvalho 2008] estão mostrados na figura 4.14.

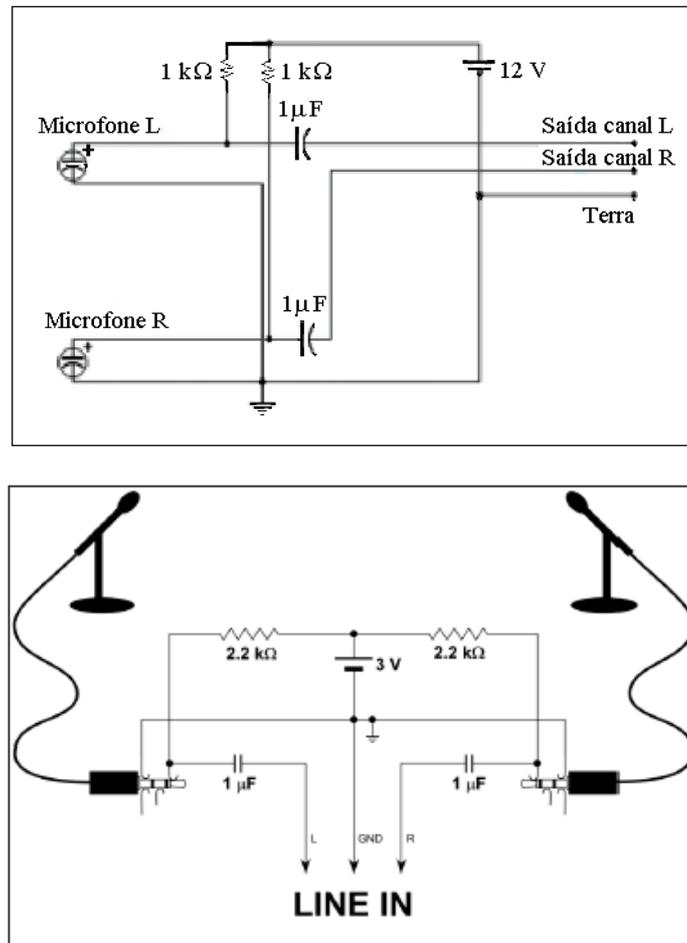


Figura 4.14. Circuitos adaptadores para conectar dois microfones em estéreo à entrada Line-in da placa de som [Grala 2005, Carvalho 2008]. Os dois circuitos diferem apenas na especificação dos componentes.

Embora seja de montagem simples, o circuito adaptador ainda representa um obstáculo à realização do experimento em sala de aula.

Comentário sobre as medidas diretas da velocidade do som

O princípio básico envolvido em uma medida direta da velocidade do som é muito fácil de compreender: a velocidade é uma distância percorrida dividida pelo tempo gasto em percorrê-la. Já as medidas indiretas exigem um conhecimento não trivial de física ondulatória: a velocidade do som é o produto de um comprimento de onda por uma frequência, e pelo menos uma dessas grandezas deve ser obtida pela observação de ressonâncias ou defasagens.

Entretanto, quando consideramos os experimentos propriamente ditos, esses papéis se invertem: as medidas indiretas são muito mais fáceis de realizar que as diretas. Mesmo o experimento direto mais simples encontrado na literatura – o que usa dois microfones ligados a um computador – exige a montagem de um circuito elétrico que provavelmente impedirá sua utilização em muitos ambientes escolares.

Como já mencionamos, a nosso ver a questão da propagação do som deve ser tratada antes do estudo da física ondulatória, pois esta última já pressupõe que as ondas (sonoras, no caso) se deslocam com certa velocidade . Em termos experimentais, isso significa que métodos diretos de medida da velocidade do som são indispensáveis. Nesse contexto é essencial encontrar uma maneira realmente simples de realizar essas medidas. Faremos isso no próximo capítulo, onde proporemos um método direto de medir a velocidade do som que pode ser utilizado em praticamente qualquer ambiente escolar.

Capítulo 5

Um método simples para estudar a velocidade do som

Como vimos no capítulo anterior, não se encontram na literatura métodos realmente simples de medir a velocidade do som. Os experimentos fáceis de montar exigem conhecimentos relativamente avançados de física ondulatória, e os experimentos fáceis de entender necessitam montagens complicadas.

Nós desenvolvemos um método para medir a velocidade do som que é tão simples de compreender quanto montar. A facilidade de compreensão vem do fato do método ser direto: a velocidade do som é encontrada dividindo-se uma distância pelo tempo que um pulso sonoro leva para percorrê-la. A montagem, por sua vez, é muito mais simples que a dos métodos diretos usuais: não há necessidade de circuitos especiais ou de equipamentos eletrônicos relativamente especializados como osciloscópios ou geradores de sinais.

O aparato necessário para medir a velocidade do som está mostrado esquematicamente na figura 5.1. Um tubo flexível de alguns metros de comprimento é disposto de forma que suas duas extremidades fiquem próximas uma da outra. Entre elas é colocado um microfone, ligado à placa de som de um microcomputador.

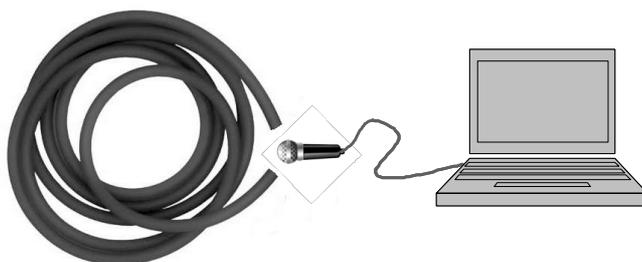


Figura 5.1. Esquema do experimento para medir a velocidade do som.

Uma vez montado o arranjo descrito acima, colocamos o computador a gravar os sons captados pelo microfone, e produzimos um ruído de curta duração em uma das extremidades do tubo (por exemplo, estourando um pequeno balão de borracha inserido numa das pontas). O resultado de uma gravação típica está mostrado na figura 5.2. Dois pulsos sonoros podem ser claramente observados. O primeiro, mais intenso, é o som que chegou diretamente ao microfone. O segundo pulso corresponde ao som que

percorreu todo o tubo e saiu pela extremidade oposta, sendo captado em seguida pelo microfone. O intervalo entre os dois sinais é o tempo que o som levou percorrendo o tubo. Esse tempo pode ser facilmente encontrado com auxílio de um programa de análise e edição de áudio. Todos os programas desse tipo possuem recursos de *zoom* que permitem localizar o início dos pulsos com precisão de fração de milissegundos (usamos o *Audacity* [Audacity 2010]).

No experimento mostrado na figura 5.2, o tempo de propagação do som foi $T = 0,0142$ s. O comprimento do tubo utilizado era $D = 4,97$ m, de modo que a velocidade do som é dada por $c = D / T = 350,0$ m/s. Esse resultado está em excelente acordo com o que sabemos sobre a velocidade do som no ar: $c = \sqrt{\gamma RT / M}$, onde γ é a razão de calores específicos, R a constante universal dos gases, T a temperatura absoluta e M a massa molar média. Note que M é sensível à umidade do ar. À temperatura de 28°C e umidade relativa de 63% (medidas no local do experimento) temos $c = 349,3$ m/s. O erro é extraordinariamente pequeno, da ordem de 0,2%.

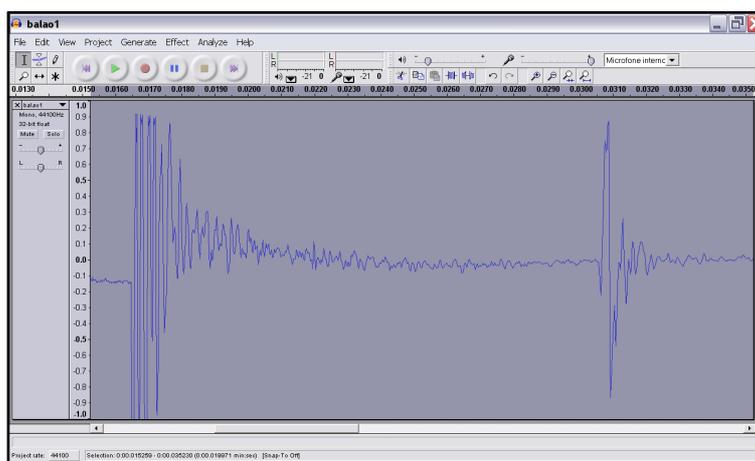


Figura 5.2. Gravação de um som produzido numa das pontas do tubo. O primeiro sinal é o som que chega diretamente ao microfone. O segundo corresponde ao som que percorreu o tubo e saiu pela outra ponta.

Dados como o da figura 5.2 mostram que o som se propaga com velocidade finita, uma constatação que pode ser comparada às concepções que os alunos manifestam em suas respostas às questões 1 e 2 apresentadas no capítulo 3 (figuras 3.1 e 3.4). É importante notar que o resultado do experimento não é facilmente interpretado pelos alunos – é necessária de uma ‘leitura’ que esclareça o significado dos dois pulsos vistos na figura 5.2. Uma vez compreendido o que é mostrado pela gravação, os estudantes podem confrontar o resultado obtido com suas respostas às questões. Há uma

importante diferença entre descobrir experimentalmente qual é a resposta correta e ver o ‘gabarito’ do questionário. No primeiro caso a estrutura conceitual dos estudantes sofre um impacto, facilitando a mudança das concepções errôneas (ou consolidando as corretas). No segundo caso os alunos geralmente aprendem apenas qual é a resposta certa, sem alterar os conceitos fundamentais que têm sobre o assunto. Como já mencionamos anteriormente, no primeiro processo há também um aprendizado sobre a natureza do conhecimento científico. Outra lição importante que pode ser extraída dessa comparação refere-se a como uma questão científica é resolvida: diferenças de opinião sobre um dado fenômeno são melhor esclarecidas observando-se a natureza, não recorrendo à autoridade de professores ou de autores de livros.

A questão sobre se um som intenso anda mais rápido que um som fraco (questão 3, mostrada na figura 3.9) também pode ser resolvida com esse tipo de experimento. A figura 5.3 mostra a propagação pelo tubo de um som de amplitude bem menor que o da figura 5.2. O tempo que o sinal mais fraco leva para percorrer o tubo é 0,0142 s, exatamente o mesmo do sinal forte. Isso mostra que a velocidade com que o som se propaga não depende da intensidade sonora.

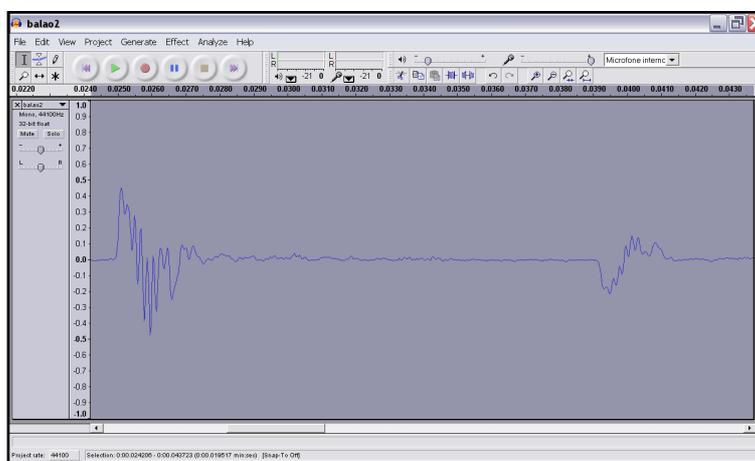


Figura 5.3. Propagação de um som pouco intenso pelo tubo.

Um experimento semelhante pode decidir se o som vai ficando mais lento à medida que se propaga (questão 4, que está na figura 3.11). Basta repetir a medida com tubos de comprimentos diferentes e comparar as velocidades encontradas. A figura 5.4 mostra o resultado de uma medida feita em um tubo de comprimento 10,08 m, duas vezes (mais exatamente, 2,03 vezes) maior que o tubo utilizado nos experimentos anteriores. O tempo de propagação do som no tubo longo foi de 0,0290 s, também duas

vezes (2,04 vezes, para ser mais exato) maior que o tempo de 0,0142 s encontrado no tubo curto. Ou seja, o som leva duas vezes mais tempo para percorrer um tubo duas vezes maior. Esse resultado mostra que a velocidade independe da distância percorrida: o som não perde ‘ímpeto’ à medida que se propaga.



Figura 5.4. Propagação de um pulso sonoro por um tubo longo.

A pequena discrepância entre a razão dos comprimentos e a dos tempos nos tubos curto e longo (2,03 vs. 2,04, ou seja, 0,5%) é compatível com a precisão do experimento. A medida no tubo de 10 m foi feita a 26,7 °C e 63% de umidade relativa. A velocidade do som nessas condições é 348,5 m/s. O resultado da experiência como o tubo longo é $c = 10,08 \text{ m} / 0,0290 \text{ s} = 347,6 \text{ m/s}$, que difere do valor esperado por 0,3%, precisão semelhante à encontrada no tubo curto.

Outros métodos de medida da velocidade do som

O método que descrevemos acima permite estudar a propagação do som em um tubo, não no ar livre. Uma pergunta relevante é se as duas situações (tubo e ar aberto) são equivalentes. Já vimos no capítulo 3 que a maioria dos alunos acredita que o som é mais lento no tubo que num ambiente aberto (questão 5, mostrada na figura 3.13). Para resolver essa questão é essencial encontrar uma forma simples de medir a velocidade do som no ar aberto.

Descreveremos aqui dois procedimentos com os quais é possível medir a velocidade do som em ambientes abertos. Ambos dispensam montagens eletrônicas complicadas e, como veremos, dão bons resultados.

1) Medida com dois gravadores

O primeiro método usa dois gravadores de *mp3*, um aparelho que muitos estudantes carregam consigo. A idéia básica é colocar os gravadores a uma distância D um do outro, e fazê-los gravar um som produzido na vizinhança de um deles. O atraso entre os registros do som nos dois gravadores, T , é o tempo que a onda sonora levou para percorrer a distância entre um e outro, de modo que a velocidade do som pode ser calculada por $c = D / T$. O problema com essa idéia é que os dois gravadores não estão sincronizados, e é impossível medir o atraso de um registro em relação ao outro se não tivermos certeza de que as duas gravações foram iniciadas simultaneamente. A sincronização manual não é viável, pois os dois gravadores dificilmente serão iniciados com a precisão de milissegundos necessária às medidas.

Nós testamos com sucesso uma forma simples de sincronizar as gravações. Com os dois gravadores ligados, fazemos com que um dê uma batida leve no outro (figura 5.5a). O som da batida fica registrado em ambos os gravadores, e serve como ponto de sincronização entre eles. Após o contato, sempre com a gravação em andamento, os dois aparelhos são colocados a uma distância D um do outro (uma forma simples de fazer isso é ligar os gravadores por um barbante de comprimento D). Em seguida, um som abrupto – uma batida de palmas ou o estouro de um balão de festa, por exemplo – é produzido próximo a um deles (figura 5.5b).

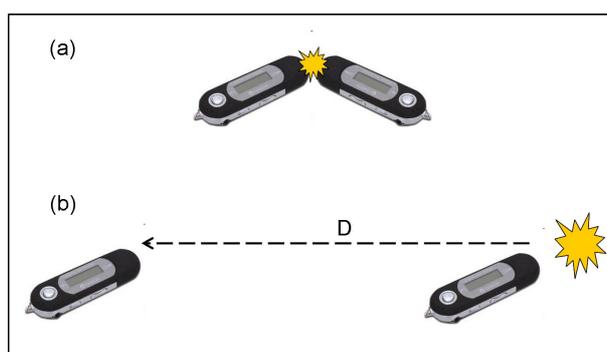


Figura 5.5. Medida da velocidade do som com dois gravadores de *mp3*. (a) Os gravadores ligados são encostados um no outro, de forma a produzir um ruído que fica registrado nos dois aparelhos e serve como ponto de sincronização entre eles. (b) Em seguida, os gravadores, sempre ligados, são colocados a uma distância D um do outro, e um som é produzido próximo a um deles. O tempo que o som leva para percorrer a distância D pode ser obtido a partir do atraso entre as duas gravações.

O próximo passo é transferir as duas gravações um computador, onde elas podem ser analisadas em editores de áudio como o *Audacity*. Todos os gravadores de *mp3* possuem meios para realizar essa transferência. A figura 5.6 mostra os sinais

registrados pelos dois gravadores em um experimento típico, no qual os gravadores foram colocados a uma distância de $D = 1,77$ m um do outro. Cada faixa na figura corresponde a um gravador, e ambas têm início no instante em que os dois aparelhos se chocaram. A faixa superior é a do aparelho mais próximo à fonte do som (uma batida de palmas), como pode ser notado pela maior intensidade do sinal.

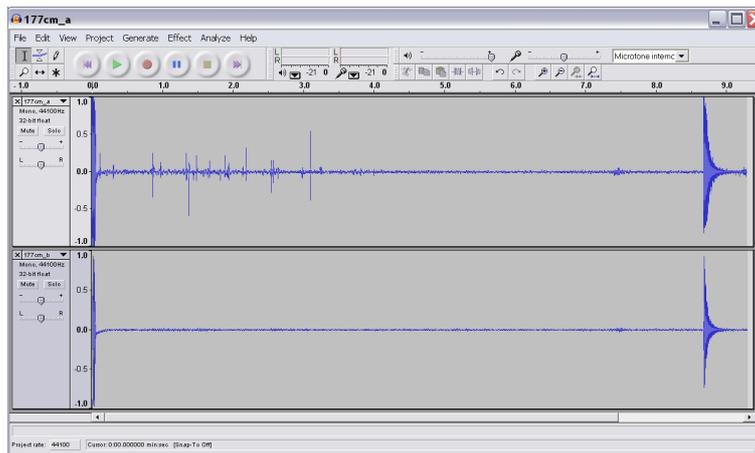


Figura 5.6. O registro sonoro dos dois gravadores a partir do instante em que um bateu no outro. Após a batida de sincronização, os aparelhos foram separados a uma distância de 1,77 m, e um ruído abrupto foi produzido perto de um deles. As duas gravações, uma em cada faixa, mostram esse ruído (uma batida de palmas).

Devido à escala de tempo, não é possível perceber o atraso entre os dois registros de som mostrados na figura 5.6. Ele aparece, entretanto, se fizermos um *zoom* na região do início dos pulsos, como está mostrado na figura 5.7. Esta mostra que o registro do gravador mais distante está atrasado de $T = 5,15$ ms em relação ao do aparelho mais próximo à fonte sonora.

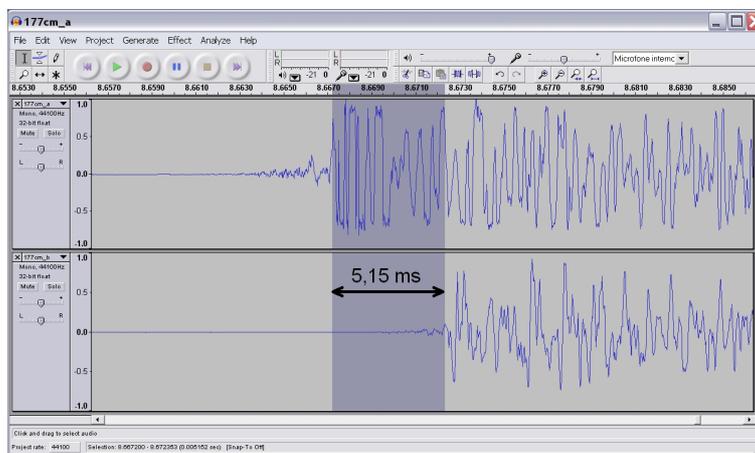


Figura 5.7. Diferença entre os sinais registrados pelo gravador próximo à fonte sonora (faixa superior) e o gravador mais distante (faixa inferior).

Com a medida de T podemos obter a velocidade do som: $c = D / T = 344$ m/s. Esse valor é praticamente igual ao encontrado com os tubos, o que mostra que a velocidade do som é a mesma em ambientes abertos e confinados. As discrepâncias podem ser explicadas pela diferença de temperaturas. O experimento em ambiente aberto foi realizado a 22 °C, e a esta temperatura a velocidade do som é 345 m/s, em excelente acordo com a medida.

Deve ser notado, entretanto, que nem sempre esse procedimento dá resultados tão bons. A principal dificuldade parece ser a atenuação do som no gravador mais distante, que torna difícil determinar o início do pulso com a mesma precisão daquela obtida no primeiro gravador. Por isso é recomendado utilizar pulsos muito fortes e com início bem definido, e manter gravadores a uma distância relativamente pequena um do outro.

2) Medida com campainha e interruptor

O segundo método de medida utiliza uma campainha elétrica e um interruptor. A campainha fica a uma distância D do interruptor, e é acionada por ele através de um fio elétrico. Um microfone ligado à placa de som de um computador é colocado bem próximo ao interruptor, como está mostrado na figura 5.8.

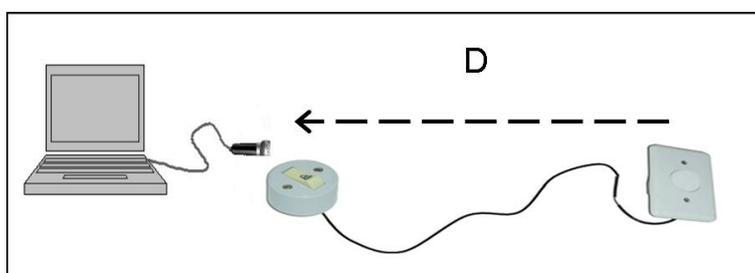


Figura 5.8. Medida da velocidade do som com uma campainha elétrica e um interruptor.

O experimento consiste em colocar o computador para gravar o sinal do microfone e, em seguida, apertar o botão do interruptor, acionando a campainha. O resultado de uma gravação está mostrado na figura 5.9. Dois sinais podem ser percebidos na figura. O primeiro é o som produzido no próprio interruptor quando ele é apertado (o ‘clique’ do botão). É um som fraco, e por isso é importante deixar o microfone bem próximo ao interruptor. O segundo som é da campainha, que chega à posição do microfone e interruptor um pouco atrasado, já que tem que percorrer a distância D .



Figura 5.9. Os sons produzidos pelo botão do interruptor e pela campainha. O tempo que o som leva para ir da campainha ao interruptor está indicado na figura.

O experimento foi realizado com uma distância $D = 9,92$ m entre a campainha e o interruptor (o comprimento do fio entre eles). O tempo que o som levou para percorrer essa distância (o intervalo entre o clique do interruptor e o ruído da campainha) foi $T = 0,0282$ s. Com isso, a velocidade do som é $c = D / T = 352$ m/s. A uma temperatura de 24 °C e umidade relativa de 50% (as condições do experimento) a velocidade do som é 347 m/s, uma diferença da ordem de 1,5% em relação à medida. Portanto, esse procedimento também é capaz de deixar claro que a velocidade do som é a mesma ao ar livre e no interior de um tubo. Entretanto, assim como na medida com dois gravadores, muitas vezes o método produz resultados pouco precisos. O principal motivo parece ser que, em alguns casos, a campainha não soa imediatamente após o acionamento do interruptor. Outra possibilidade é que o ‘clique’ do interruptor não corresponda sempre ao instante do acionamento.

Capítulo 6

Aplicação da sequência de ensino-aprendizagem

A sequência de ensino-aprendizagem que propomos neste trabalho foi testada de forma preliminar com 10 alunos da 1ª série do ensino médio do Colégio Pedro II, uma escola pública federal na cidade do Rio de Janeiro. A sequência aplicada teve as quatro unidades já discutidas em capítulos anteriores:

- I. A propagação (ou não) do som;
- II. A propagação de sons fortes e fracos;
- III. A propagação do som a pequenas e grandes distâncias;
- IV. A propagação do som em ambientes fechados e abertos.

Cada uma dessas unidades foi dividida, grosso modo, em três etapas:

- a) Identificação, sistematização e discussão das idéias prévias dos alunos, a partir de respostas a questões de múltipla escolha;
- b) Realização de experimentos capazes de determinar, em cada questão, qual das opções de resposta é a mais correta;
- c) Discussão envolvendo alunos e professor sobre a interpretação dos resultados experimentais e seu confronto com as respostas dadas às questões.

As questões apresentadas na primeira etapa de cada unidade foram as mesmas apresentadas no capítulo 3:

- Unidade I – questões 1 e 2;
- Unidade II – questão 3;
- Unidade III – questão 4;
- Unidade IV – questão 5.

Um experimento preliminar

Para que os alunos tomassem contato com o equipamento utilizado nos experimentos – microfone, computador e programa de gravação e análise de áudio –, propusemos a realização de uma atividade introdutória: medir a velocidade de uma bola chutada por eles. A montagem desse ‘experimento’ está esquematizada na figura 6.1 [Aguiar 2011]. Uma bola é colocada a uma distância D de uma parede, e um computador com microfone é posicionado em um lugar seguro, a igual distância da bola

e da parede. O experimento consiste em fazer um aluno chutar a bola na direção da parede, enquanto o computador grava os sons produzidos durante esse processo.

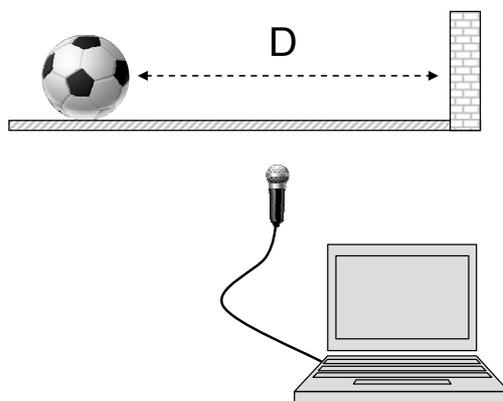


Figura 6.1. Montagem do experimento preliminar, no qual se mede a velocidade de uma bola chutada pelos alunos [Aguiar 2011].

A gravação foi realizada com o mesmo equipamento que seria utilizado mais à frente nos experimentos sobre a propagação do som (inclusive o programa *Audacity* [Audacity 2010]). O resultado típico de uma gravação está mostrado na figura 6.2. Dois pulsos sonoros podem ser percebidos: o primeiro corresponde ao som do chute e o segundo à bola batendo na parede. O tempo de ‘voo’ da bola, T , pode ser obtido através de um *zoom* no início de cada pulso, que permite determinar os instantes em que o pé atinge a bola e a bola atinge a parede com precisão de milissegundo. Com isso o valor de T pode ser obtido, e velocidade da bola é calculada por $V = D / T$.

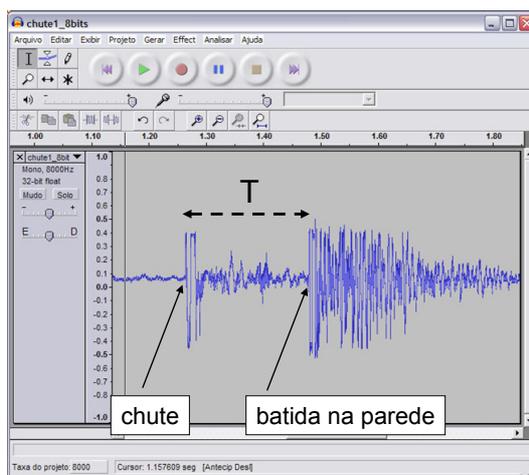


Figura 6.2. Janela do *Audacity* mostrando a gravação de um chute na bola. O som do chute e da batida da bola na parede são claramente percebidos.

Essa atividade introdutória revelou-se muito útil por dois motivos. Primeiro, os alunos familiarizaram-se com o equipamento e, principalmente, com a operação do *Audacity* (gravação, cortes, *zoom*, etc.) Em particular, a interpretação e compreensão da linha de tempo mostrada pelo programa como uma representação gráfica do som gravado pelo microfone foi essencial para a realização das etapas posteriores da sequência de ensino-aprendizagem. Segundo, a atividade teve caráter lúdico (não é sempre que se pode chutar uma bola na sala de aula), o que serviu como elemento de atração para as etapas seguintes do processo.

Aplicação da unidade I

A unidade I da sequência de ensino aprendizagem teve início com a apresentação aos alunos das questões 1 e 2. No capítulo 3 já discutimos essas perguntas e as respostas dadas pelos estudantes, e vimos que cerca de metade deles não apresentou uma concepção apropriada da propagação do som, manifesta pelo acerto nas duas questões. A montagem do experimento destinado a determinar se o som se propaga ou não foi então introduzida, nos moldes descritos no capítulo 5 (figura 5.1). O resultado típico de um experimento também está apresentado (figura 5.2) e discutido naquele capítulo.

A parte final da unidade I, a discussão do resultado do experimento e seu confronto com as possíveis respostas às questões 1 e 2, mostrou ser de realização delicada. É importante notar que resultados como o da figura 5.2 não são imediatamente interpretados pelos alunos como prova de que o som se propaga com velocidade finita. Essa ‘leitura’ dos dados deve ser construída ao longo da discussão dos alunos com o professor, e dos alunos entre si. Como a realização do experimento introduz um certo grau de desordem na classe, pode ser difícil ao professor organizar apropriadamente essa discussão. Foi o que aconteceu no nosso caso: embora os comentários dos alunos após o experimento mostrassem que a maioria entendeu o resultado com evidência a favor da propagação do som, não foi possível verificar ou discutir o tipo de raciocínio que os levou a essa conclusão. Uma lição importante que tiramos de nossa aplicação da sequência de ensino-aprendizagem é que a etapa de discussão pós-experimento deve ser cuidadosamente organizada pelo professor, de modo a facilitar a compreensão do resultado experimental pelos alunos e tornar possível a comparação desse resultado com as respostas dadas às questões.

Um ponto interessante surgido durante a discussão da unidade I foi o ‘valor’ da velocidade do som. Um aluno, que já estudara acústica em um curso técnico, mencionou que a velocidade encontrada no experimento (346 m/s) era bem diferente da que aparecia no seu livro-texto (340 m/s). Este questionamento criou uma ótima oportunidade para ampliar a discussão da unidade I, abordando os fatores que influenciam a velocidade do som no ar. Procurando em tabelas e programas de cálculo da velocidade do som disponíveis na internet¹, logo verificamos que as dependências principais eram na temperatura e umidade relativa do ar. Durante a realização do experimento a temperatura estava a 24 °C e a umidade relativa a 50%. Com esses dados a velocidade do som deve ser 347 m/s, bem próximo do valor de 346 m/s encontrado no experimento, o que todos consideraram muito satisfatório. Verificamos também que a velocidade de 340 m/s citada no livro do aluno corresponderia a uma temperatura de 14 °C. A tabela 6.1, que mostra a velocidade do som para alguns valores da temperatura e umidade relativa, nos levou a especular sobre a possibilidade de medir indiretamente a umidade relativa do ar com esse experimento, a partir do valor da velocidade do som e da temperatura.

	10 °C	15 °C	20 °C	22 °C	25 °C	28 °C	30 °C
20%	337.59	340.61	343.61	344.82	346.62	348.42	349.62
25%	337.62	340.65	343.68	344.89	346.70	348.52	349.73
30%	337.66	340.70	343.74	344.96	346.79	348.62	349.85
35%	337.69	340.74	343.80	345.03	346.87	348.73	349.97
40%	337.72	340.79	343.87	345.10	346.96	348.83	350.08
45%	337.75	340.83	343.93	345.17	347.04	348.93	350.20
50%	337.79	340.88	343.99	345.24	347.13	349.03	350.31
55%	337.82	340.92	344.05	345.31	347.22	349.14	350.43
60%	337.85	340.97	344.12	345.38	347.30	349.24	350.55
65%	337.88	341.02	344.18	345.46	347.39	349.34	350.66
70%	337.91	341.06	344.24	345.53	347.47	349.45	350.78
75%	337.95	341.11	344.30	345.60	347.56	349.55	350.89
80%	337.98	341.15	344.37	345.67	347.65	349.65	351.01
85%	338.01	341.20	344.43	345.74	347.73	349.75	351.13
90%	338.04	341.24	344.49	345.81	347.82	349.86	351.24

Tabela 6.1. Velocidade do som no ar (em m/s) para diferentes valores da temperatura e umidade relativa do ar.

¹ Por exemplo, <http://www.sengpielaudio.com/calculator-airpressure.htm>

Aplicação das unidades II, III e IV

Na unidade II, que tratou da propagação de sons de diferentes intensidades, mais da metade dos estudantes respondeu ao questionário afirmando que a velocidade de um som forte é maior que a de um som fraco. O teste desta concepção foi feito repetindo a medida da velocidade do som com ruídos de diferentes intensidades. Estes foram obtidos estourando na entrada do tubo um pequeno balão com pressão relativamente baixa, para conseguir um som “fraco”, e outro balão com a borracha bem esticada, para obter um som “forte”. Os resultados mostraram que a velocidade do som é a mesma nos dois casos.

Na unidade III, que estuda a relação entre a velocidade do som e a distância percorrida, 40% dos alunos que responderam ao questionário afirmaram que a velocidade depende da distância. Para testar essa ideia, os estudantes mediram a velocidade do som em dois tubos de comprimentos diferentes. Um dos tubos tinha cerca da metade do comprimento do outro, o que facilitou a comparação dos tempos. Como vimos no capítulo 5, os resultados confirmaram que a velocidade do som se mantém constante durante a propagação. Nesta unidade a discussão foi mais tranqüila que o habitual, e os alunos não apresentaram muitas dificuldades na aceitação do resultado, talvez porque a maioria já o esperasse.

A unidade IV tratou da diferença entre a propagação do som num tubo e no ar livre. A grande maioria dos alunos respondeu ao questionário afirmando que a velocidade do som no tubo é menor que num ambiente aberto. O teste dessas idéias foi baseado no experimento com um interruptor e campainha, descrito ao final do capítulo 5. Como discutimos naquele capítulo, o experimento é capaz de mostrar que a velocidade do som é a mesma nos tubos e ao ar livre, embora os resultados de algumas medidas fossem inconclusivos. A medida com dois gravadores não foi utilizada nesse primeiro teste da sequência, mas pode ser uma opção em futuras aplicações.

Comentários sobre a aplicação da sequência de ensino-aprendizagem

Os resultados dessa aplicação preliminar da sequência de ensino-aprendizagem foram animadores. Alguns pontos fracos foram identificados. O maior problema parece ter sido a pouca preparação da fase de discussão, principalmente na unidade I. O experimento com a campainha na unidade IV também se mostrou problemático, com

uma precisão inferior à das medidas com tubos e, principalmente, com resultados nem sempre confiáveis.

Uma das coisas mais importantes que pudemos observar ao final desse processo foi a confiança que os alunos passaram a ter no processo de investigação e seus resultados. Embora com uma saudável e sutil desconfiança, talvez criada por verem tantas certezas serem derrubadas pelos experimentos, os alunos parecem ter ganho consciência de que o som se propaga com uma velocidade que depende apenas das propriedades do ar. Como exatamente se dá essa propagação é assunto para estudos posteriores de física ondulatória. Podemos apenas sugerir que contribuimos para auxiliar cada um no aprendizado e desenvolvimento desse e outros conhecimentos. O depoimento de uma estudante nos faz acreditar nesta possibilidade:

Meu nome é Yara Cavalcante Dias, tenho 16 anos e realizei com a ajuda do professor Sergio Tobias e com meus amigos de turma um trabalho sobre o som e sua propagação.

Antes de iniciarmos as experiências foi sugerido realizar um questionário onde pudemos perceber o nosso "conhecimento" sobre o som. Assim ficou claro quantas dúvidas podem surgir sobre algo que temos contato ininterruptamente. Como por exemplo de que forma se propaga o som, antes eu tinha uma ideia superficial de como "seria" o som, mas nada muito concreto, depois das experiências conseguimos observar que o som possui uma velocidade, que por ser tão grande nossos ouvidos não percebem o tempo que leva para as ondas sonoras se propagarem. Também observamos que alguns fatores interferem nessa velocidade, por exemplo a umidade relativa da ar.

A respeito da iniciativa do professor, acho que foi muito válida, pois dessa forma conseguimos ter contato com o que aprendemos em sala, algo mais real, o que é MUITO bom pra variar um pouco.

Enfim, acho que depois dessas experiências o som não parece mais tão desconhecido o que me leva a pensar em quantas coisas não sabemos tanto sobre, mesmo estudando em sala de aula, logo espero que mais professores tenham essa iniciativa, de tirar o aluno de sala e colocá-lo em contato com o que está aprendendo.



Figura 6.1. Alunos do Colégio Pedro II durante a realização e discussão dos experimentos,

Capítulo 7

Conclusões

O som está presente em qualquer situação cotidiana – nos comunicamos por sinais sonoros, apreciamos música, e vivemos imersos nos mais diversos ruídos. O estudo do som gerou aplicações importantes em todos os setores da atividade humana, das artes à tecnologia. Apesar disso, a física do som ocupa um lugar pequeno nos currículos escolares, onde geralmente aparece como exemplo no estudo de ondas. Esse enfoque não apenas minimiza a importância dos fenômenos sonoros; ele torna mais difícil superar convicções intuitivas, mas errôneas, que desenvolvemos sobre o som a partir de nossa experiência diária. Isso é notado, particularmente, quando se discute a propagação do som. Como vimos, uma parcela significativa das crianças tem dificuldade para conceber a propagação do som. Essas dificuldades persistem, embora em diferentes formas, entre estudantes mais velhos. Poucos entendem que o som é um tipo de movimento que um meio contínuo pode apresentar, e que a velocidade do som é uma propriedade desse meio. A maioria parece pensar em termos de um mecanicismo rudimentar, estabelecendo paralelos entre emitir um som e, por exemplo, atirar uma pedra. Daí surgem idéias fundamentalmente erradas, como “quanto mais alto gritamos, mais rápido vai o som”, o análogo de “quanto mais força fizermos ao jogar a pedra, mais rapidamente ela se moverá”.

Nesta dissertação nós descrevemos uma sequência de ensino-aprendizagem sobre propagação de som que procura enfrentar diretamente esses problemas. A sequência tem quatro unidades, focadas em dificuldades conceituais comuns entre os estudantes, conforme revelado por diferentes investigações. Uma unidade é iniciada com a apresentação aos alunos de questões de múltipla escolha. As opções de resposta nessas questões contêm as concepções sobre propagação sonora mais frequentemente encontradas entre os estudantes, segundo os estudos disponíveis. A aplicação das questões mostrou que as concepções sobre propagação do som apresentadas por estudantes brasileiros do ensino médio são semelhantes às encontradas nas investigações anteriores, em sua maior parte realizados em outros países.

A discussão das respostas dos alunos às questões é o ponto de partida para a etapa seguinte do processo. Nesta, experimentos são realizados para determinar qual dos conceitos expressos nas questões está em melhor acordo com o comportamento do som.

Nós desenvolvemos um método muito simples para investigar a propagação do som, com o qual experimentos podem ser realizados em praticamente qualquer sala de aula. Apesar de sua simplicidade, o método permite medir a velocidade do som com precisão melhor que 0,5%, tornando possível comparar diferentes condições de propagação: temperatura, intensidade sonora, distância percorrida, etc. No contexto da sequência de ensino-aprendizagem, a discussão dos resultados experimentais e seu confronto com as expectativas dos alunos (manifestas nas respostas às questões) é a base para a revisão e aprimoramento das concepções que eles têm sobre a propagação do som. É também uma boa oportunidade para que eles percebam o papel da experimentação no processo científico.

As unidades da sequência de ensino-aprendizagem que propomos neste trabalho tem semelhança com as atividades de POE (*predição-observação-explicação*) de White e Gunstone [White 1992], mas existem diferenças importantes. Não insistimos para que os alunos justifiquem por escrito suas respostas às questões, que são sempre de múltipla escolha. Eles provavelmente encontrariam dificuldades para descrever em palavras as idéias intuitivas que nortearam suas opções. Além disso, a inevitável diversidade das justificativas complicaria a identificação e comparação das principais linhas de pensamento. Também não exigimos que cada aluno apresente a explicação da possível divergência entre sua previsão e o resultado do experimento. Essa etapa das atividades POE é substituída pela discussão do professor com os alunos sobre o significado das expectativas iniciais à luz das observações experimentais.

A sequência de ensino-aprendizagem foi testada com 10 alunos da 1ª série do ensino médio do Colégio Pedro II (RJ). O teste sugeriu que a sequência tem um impacto positivo sobre os alunos, tanto na aprendizagem sobre a propagação do som quanto no aspecto mais geral da construção do conhecimento a partir do confronto entre ideias e experimentos. Essa aplicação-piloto também revelou a necessidade de aperfeiçoamentos em alguns aspectos da sequência, principalmente na etapa de discussão que finaliza cada unidade. É importante que os alunos tenham liberdade para discutir sua visão do experimento e como ele se compara com as expectativas expressas no questionário. Por outro lado, o professor deve ter em vista que os alunos nem sempre fazem uma leitura

apropriada dos resultados experimentais, e um certo grau de orientação pode ser necessário para que a discussão torne-se produtiva.

É importante mencionar que o método de medida da velocidade do som que desenvolvemos não precisa, necessariamente, ser utilizado num contexto como o da sequência de ensino-aprendizagem que propusemos. A precisão e simplicidade do método faz dele um instrumento útil em muitas outras situações de interesse didático. Por exemplo, ele pode ser usado para demonstrar a variação da velocidade do som com a temperatura, mergulhando o tubo em um balde com gelo ou jogando nitrogênio líquido no seu interior. Outra possibilidade é colocar gelo seco (CO_2) dentro do tubo e verificar como a mudança na composição do ar afeta a velocidade do som.

Efeitos ondulatórios também podem ser estudados com esse sistema. Por exemplo, em algumas medidas é possível observar a inversão de fase que ocorre durante uma reflexão na extremidade (aberta) do tubo.

Até algumas descobertas, merecedoras de maiores investigações, foram realizadas durante as medidas da velocidade do som. Observamos, por exemplo, que a velocidade do som em tubos rugosos é substancialmente menor que em tubos lisos (que é a mesma do ar livre), um efeito que parece ser pouco conhecido.

O trabalho que descrevemos nesta dissertação não está encerrado. Há muito o que fazer, principalmente no que diz respeito a aplicações da sequência de ensino-aprendizagem a um número maior e mais diversificado de estudantes. Outro aspecto que pretendemos investigar é em que medida a aplicação da sequência traz benefícios à aprendizagem dos alunos, não apenas nos aspectos relativos ao som, mas também naqueles relacionados à natureza da ciência e à construção do conhecimento.

Apêndice A

Propagação do som: uma sequência de ensino-aprendizagem

Este é o roteiro de uma sequência de ensino-aprendizagem sobre a propagação do som. Ela tem quatro unidades, que devem ser aplicadas em sequência e cujos temas são:

- I. A propagação (ou não) do som;
- II. A propagação de sons fortes e fracos;
- III. A propagação do som a pequenas e grandes distâncias;
- IV. A propagação do som em ambientes fechados e abertos.

Cada unidade tem três etapas. Na primeira, as concepções prévias dos alunos sobre o tema da unidade são identificadas, sistematizadas e discutidas a partir das respostas que eles dão a questões de múltipla escolha. Na segunda etapa, um experimento é realizado para por a teste as concepções apresentadas. A última etapa consiste numa discussão sobre a interpretação dos resultados experimentais e seu confronto com os conceitos expressos pelos alunos.

Cada unidade será abordada separadamente neste roteiro, com a apresentação das questões iniciais sobre as concepções dos alunos, dos experimentos que procuram testá-las, e dos principais pontos que devem ser tratados na discussão final.

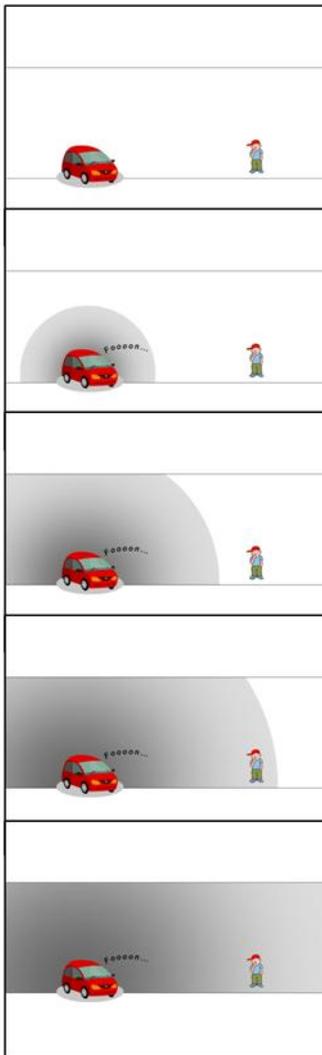
Unidade I: A propagação (ou não) do som

O objetivo da primeira unidade é discutir de o som se propaga ou não. As concepções dos alunos sobre esse tema são avaliadas por duas questões. Na primeira (questão 1) pergunta-se o que acontece quando a buzina de um carro começa a soar. As opções de resposta contemplam a propagação com velocidade finita (A), a propagação instantânea (C) e uma situação intermediária, onde a intensidade do som cresce simultaneamente em todos os pontos (B). A segunda pergunta (questão 2) é sobre o que ocorre quando a buzina do carro para de soar. A opção (B) corresponde à propagação sonora com velocidade finita, na opção (A) o som ‘volta’ para o carro, em (D) o som se propaga instantaneamente e em (C) a intensidade diminui simultaneamente em todos os pontos. As duas questões estão apresentadas a seguir.

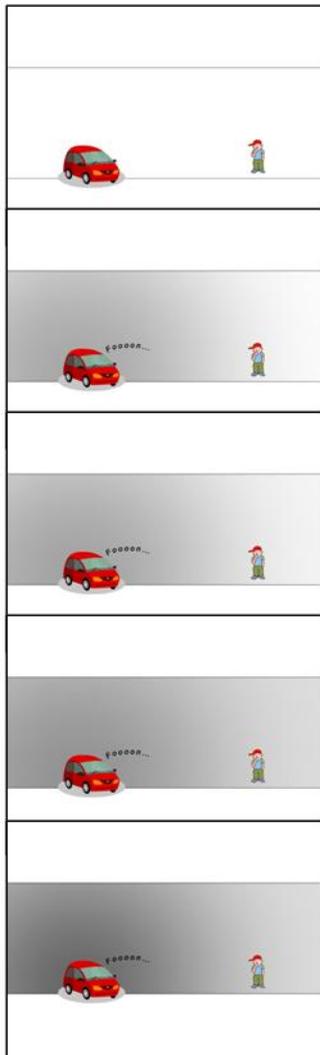
Questão 1

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.

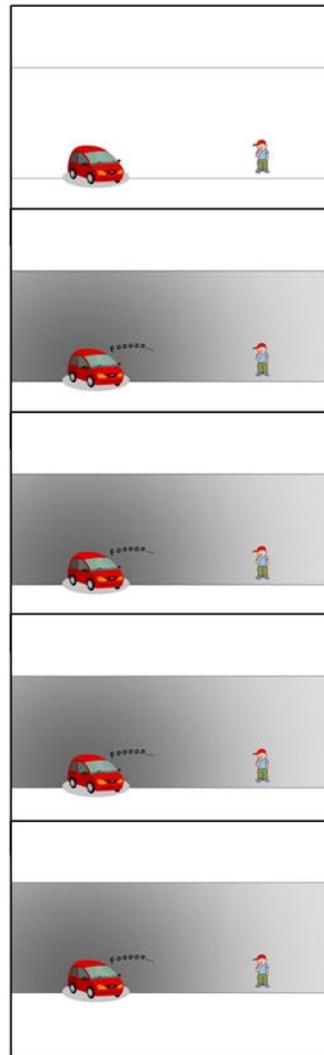
Opção A



Opção B

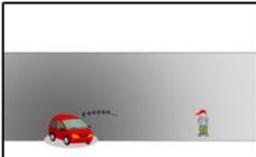
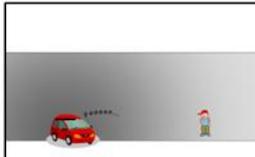
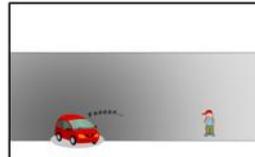
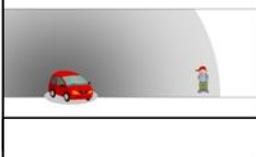
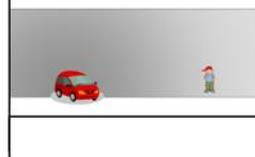
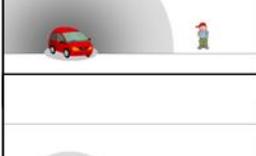
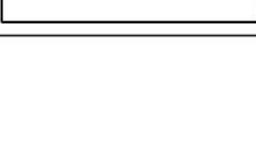
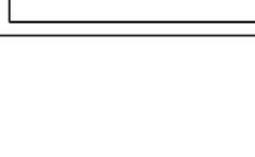


Opção C

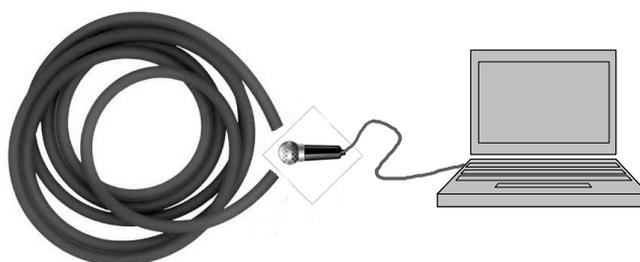


Questão 2

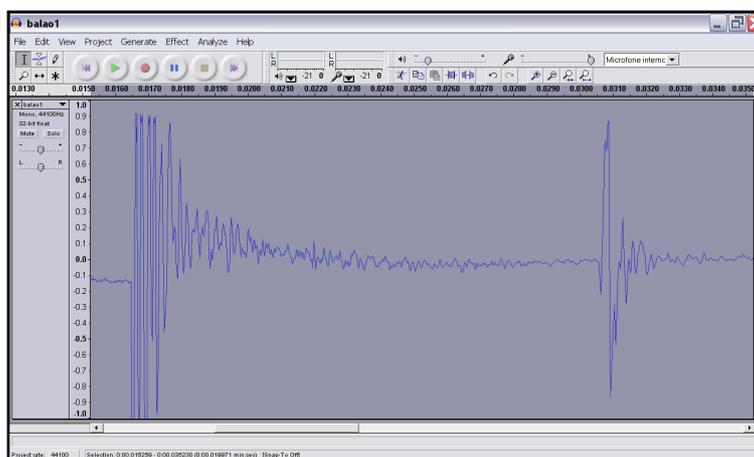
A buzina de um carro pára de soar de repente. Qual das situações apresentadas a seguir melhor descreve o desaparecimento do som? Quando o menino está na zona cinza ele pode ouvir o som.

Opção A	Opção B	Opção C	Opção D
			
			
			
			
			

O passo seguinte à apresentação das questões 1 e 2 aos alunos é a sistematização das respostas dadas por eles e sua discussão. O professor deve abster-se de dizer quais são as respostas corretas. Em vez disso ele deve propor um experimento para descobrir a melhor resposta às questões. Esse experimento é muito simples, e sua montagem está esquematizada na figura abaixo. O material é, basicamente, um tubo de borracha liso (um rugoso não serve) de comprimento entre 3 m e 5 m, um computador com placa de som e um microfone, arrumados como indica a figura.



Um pequeno balão de borracha (desses usados em festas de aniversário) bem cheio de ar é colocado em uma das extremidades do tubo, se possível na parte interna. O microfone é posicionado em um ponto equidistante das extremidades do tubo e o computador é colocado para gravar. A gravação deve ser realizada com um programa de edição de áudio, como o *Audacity*. Em seguida, estoure a bola com um alfinete e encerre a gravação. O editor de áudio deve estar mostrando uma figura com a gravação. Fazendo um *zoom* sobre a região correspondente ao ruído da explosão do balão, irá surgir um padrão semelhante ao que está mostrado na figura abaixo.



O primeiro pulso visto na figura (o mais intenso, à esquerda) corresponde ao som que atingiu diretamente o microfone, vindo do balão explodindo. O segundo pulso (o menos intenso, à direita) é o som que percorreu todo o tubo e saiu pela extremidade oposta, só então chegando ao microfone. O intervalo entre os dois pulsos é o tempo que o som levou para atravessar o tubo.

O professor deve ajudar os alunos a compreenderem a representação gráfica da onda sonora mostrada pelo editor de áudio, estabelecendo sua relação com o som que é captado pelo gravador. Em seguida ele deve solicitar aos alunos que interpretem o resultado do experimento e expliquem o que deve ter acontecido com som emitido pelo balão. O passo seguinte é voltar ao questionário e pedir para que eles façam uma nova avaliação das suas respostas. A discussão deve ser centrada na verificação de quais das respostas são compatíveis ou incompatíveis com o resultado do experimento.

Finalmente, se todos concordarem que o som se propaga com velocidade finita, a velocidade do som no ar pode ser calculada dividindo o comprimento do tubo (que deve ser medido com cuidado) pelo tempo de percurso, obtido com o editor de áudio. É uma boa idéia medir a temperatura (e se possível a umidade do ar) durante a realização do experimento, de modo que o resultado da medida possa ser comparado com o valor esperado nessas condições. A seguinte tabela de valores de velocidade do som no ar em função da temperatura e da umidade relativa do ar pode ser útil para essa comparação.

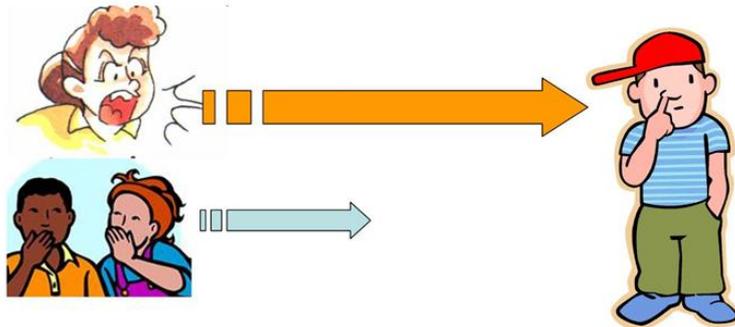
	10 °C	15 °C	20 °C	22 °C	25 °C	28 °C	30 °C
20%	337.59	340.61	343.61	344.82	346.62	348.42	349.62
25%	337.62	340.65	343.68	344.89	346.70	348.52	349.73
30%	337.66	340.70	343.74	344.96	346.79	348.62	349.85
35%	337.69	340.74	343.80	345.03	346.87	348.73	349.97
40%	337.72	340.79	343.87	345.10	346.96	348.83	350.08
45%	337.75	340.83	343.93	345.17	347.04	348.93	350.20
50%	337.79	340.88	343.99	345.24	347.13	349.03	350.31
55%	337.82	340.92	344.05	345.31	347.22	349.14	350.43
60%	337.85	340.97	344.12	345.38	347.30	349.24	350.55
65%	337.88	341.02	344.18	345.46	347.39	349.34	350.66
70%	337.91	341.06	344.24	345.53	347.47	349.45	350.78
75%	337.95	341.11	344.30	345.60	347.56	349.55	350.89
80%	337.98	341.15	344.37	345.67	347.65	349.65	351.01
85%	338.01	341.20	344.43	345.74	347.73	349.75	351.13
90%	338.04	341.24	344.49	345.81	347.82	349.86	351.24

Unidade II: A propagação de sons fortes e fracos

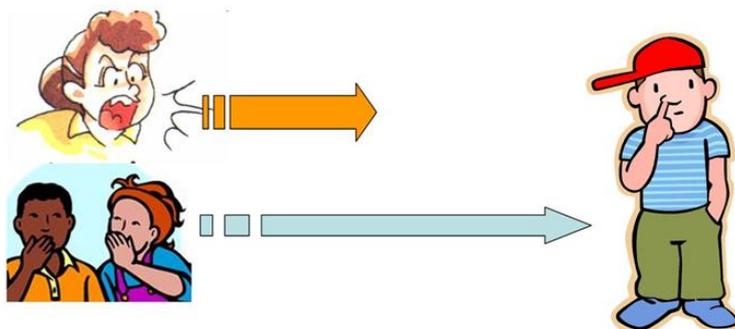
A segunda unidade investigar se um som forte viaja mais rápido que um fraco. A pergunta que inicia a unidade (questão 3) está mostrada abaixo.

Questão 3

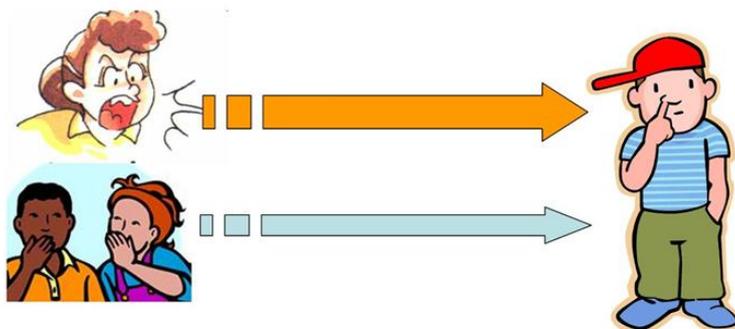
Um som forte e um som fraco (um grito e um cochicho) são produzidos no mesmo instante, à mesma distância do garoto. Qual dos dois sons ele escuta primeiro?



a) O som forte chega ao garoto antes do som fraco.

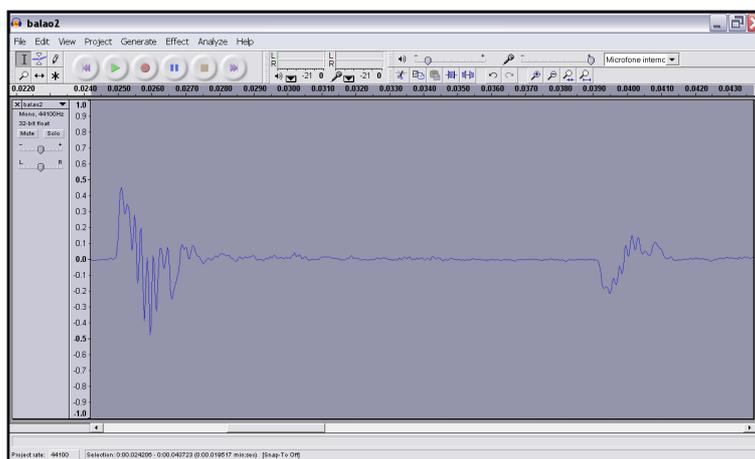


b) O som forte chega ao garoto depois do som fraco.



c) Os sons forte e fraco chegam ao mesmo tempo.

O experimento que irá ajudar a responder a questão 3 é, essencialmente, uma repetição do experimento da unidade I. A única diferença é que a bola de aniversário deve estar menos cheia que a anterior, de modo a produzir um som mais fraco. Um resultado típico está mostrado abaixo.



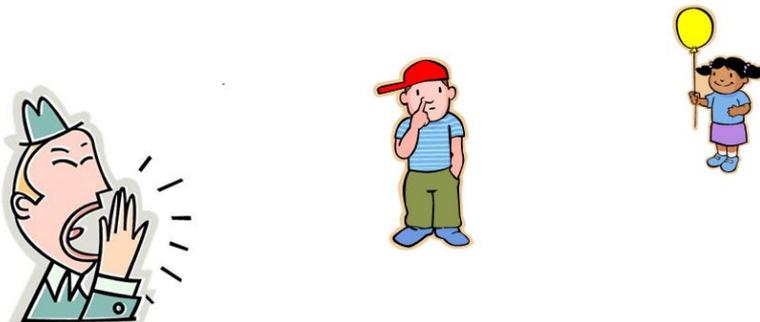
O professor deve chamar a atenção dos alunos para a maneira como a intensidade sonora é representada graficamente nos editores de áudio, de modo que eles possam reconhecer que o som está realmente mais fraco que no caso anterior. Uma vez calculada a nova velocidade do som, o professor deve sugerir o retorno ao resultado do questionário e promover uma discussão sobre a comparação das respostas ao resultado do experimento. Se todos concordarem que a velocidade do som é independente da intensidade, uma nova discussão pode ser iniciada, comparando o comportamento do som ao de um objeto. O professor pode perguntar se uma bola chutada com força tem velocidade maior que uma chutada fracamente, e pedir que os alunos confrontem o comportamento da bola com o do som.

Unidade III: A propagação do som a pequenas e grandes distâncias

A unidade III investiga se o som ‘vai parando’ à medida que percorre distâncias cada vez maiores. A pergunta (questão 4) que inicia a unidade está mostrada abaixo.

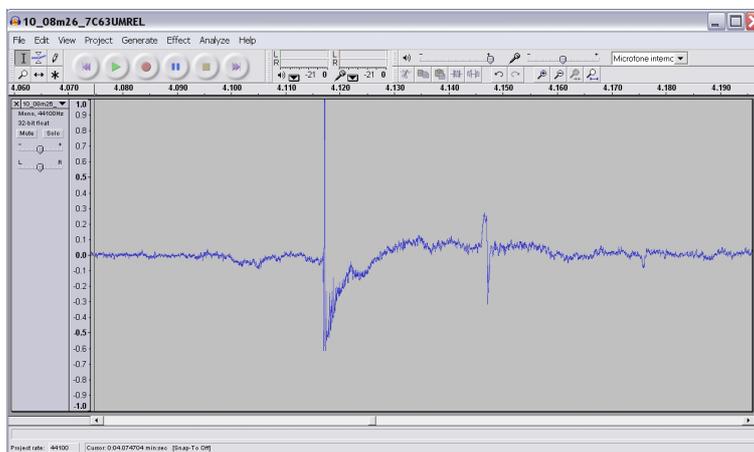
Questão 4

Uma pessoa dá um grito, que pode ser ouvido por um menino e uma menina. O menino está próximo da pessoa que grita, e a menina está mais distante. Das afirmativas abaixo, qual lhe parece a mais correta?



- a) Quando o som do grito passar pela menina, ele terá *velocidade maior* do que quando passou pelo menino.
- b) Quando o som do grito passar pela menina, ele terá *velocidade menor* do que quando passou pelo menino.
- c) Quando o som do grito passar pela menina, ele terá a *mesma velocidade* que quando passou pelo menino.

O experimento desta unidade é uma variação do realizado na unidade I, usando um tubo mais comprido (o dobro do tamanho anterior, por exemplo). Se o tubo for muito longo (10 m ou mais) deve-se tentar fazer o experimento em uma sala grande ou em um espaço aberto para evitar reverberações indesejáveis. O resultado de uma medida feita com um tubo longo está mostrado na figura abaixo. Pode-se notar que o som é mais atenuado que no tubo curto.



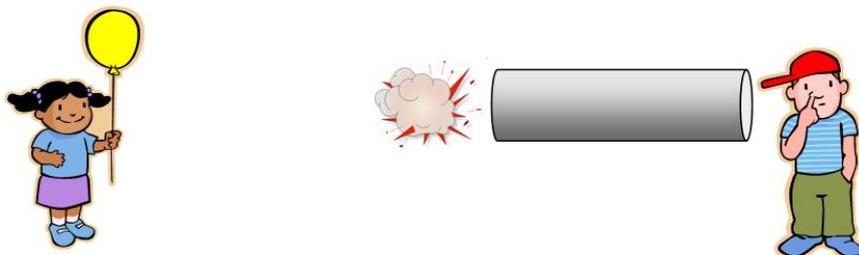
A velocidade obtida com tubos longos é a mesma dos tubos curtos. Novamente, o professor deve promover uma discussão comparando o resultado do experimento com o que foi respondido no questionário. Se todos concordarem que a velocidade do som não depende da distância percorrida, uma nova discussão pode ser iniciada, comparando esse resultado ao comportamento de uma bola que, após ser chutada e entrar em movimento, vai perdendo velocidade e acaba parando.

Unidade IV: A propagação do som em ambientes fechados e abertos

Na unidade IV investigamos se o som se propaga com a mesma velocidade em um tubo e no ar livre. A pergunta inicial (questão 5) está mostrada abaixo.

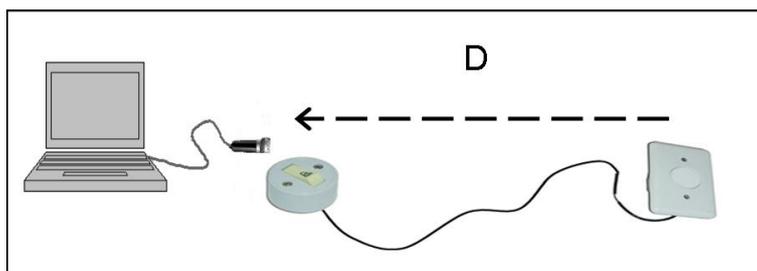
Questão 5

Uma pequena explosão pode ser ouvida por um menino e uma menina. As duas crianças estão à mesma distância do ponto onde ocorre a explosão, mas o som tem que passar por um tubo para chegar ao menino. Das afirmativas abaixo, qual lhe parece a mais correta?



- a) O menino ouvirá o som da explosão *antes* da menina.
- b) O menino ouvirá o som da explosão *depois* da menina.
- c) O menino ouvirá o som da explosão *ao mesmo tempo* que a menina.

Neste caso as medidas feitas com o tubo não são suficientes; temos que medir a velocidade do som em um ambiente aberto. Há duas possibilidades. A primeira é usar um aparato composto por um interruptor ligado a uma campainha por um fio elétrico, com um microfone e computador colocados próximo ao interruptor. Um esquema da montagem está mostrado abaixo.



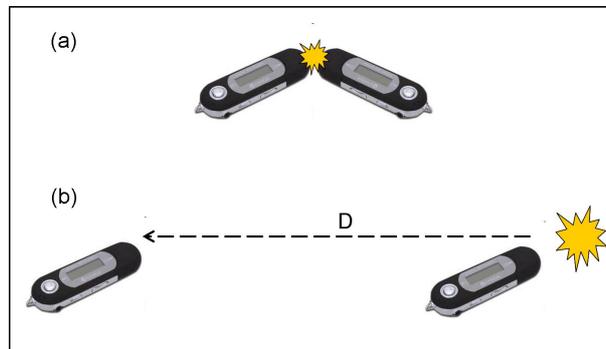
Ao ser pressionado, o interruptor produz um ‘clique’ que é captado pelo microfone. Isso também aciona a campainha, cujo som chega ao microfone um pouco mais tarde, pois tem que percorrer a distância D .

Uma gravação dos ruídos do interruptor e da campainha está mostrada na figura abaixo. O intervalo entre esses sinais é o tempo que o som levou para ir da campainha ao microfone. Conhecendo a distância D e esse tempo a velocidade do som no ar livre pode ser calculada.

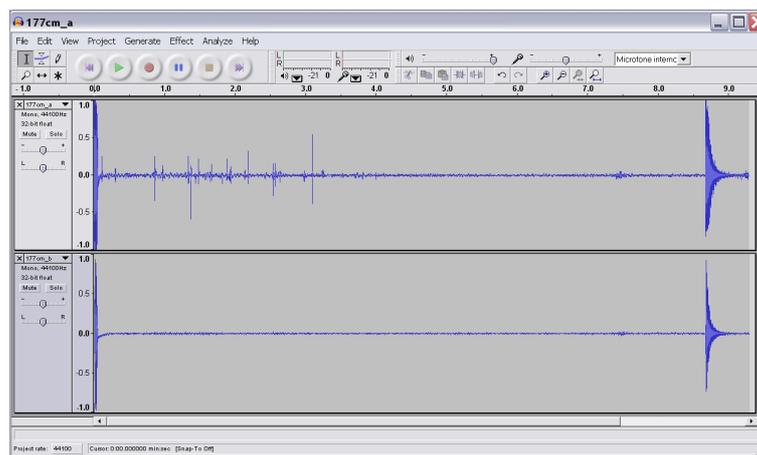


Outra maneira de medir a velocidade do som em ambientes abertos utiliza dois gravadores de *mp3*, ou mesmo dois telefones celulares com capacidade de gravação. A figura abaixo ilustra o procedimento de medida. Com os dois gravadores ligados, faz-se com que um dê uma batida leve no outro. O som da batida fica registrado em ambos os gravadores, e serve como ponto de sincronização entre eles. Sem essa sincronização seria impossível comparar os tempos medidos em cada gravação. Após o contato, sempre com a gravação em andamento, os dois aparelhos são colocados a uma distância D um do outro (uma forma simples de fazer isso é ligar os gravadores por um barbante

de comprimento D). Em seguida, um som abrupto – uma batida de palmas ou o estouro de um balão de festa, por exemplo – é produzido próximo a um deles.

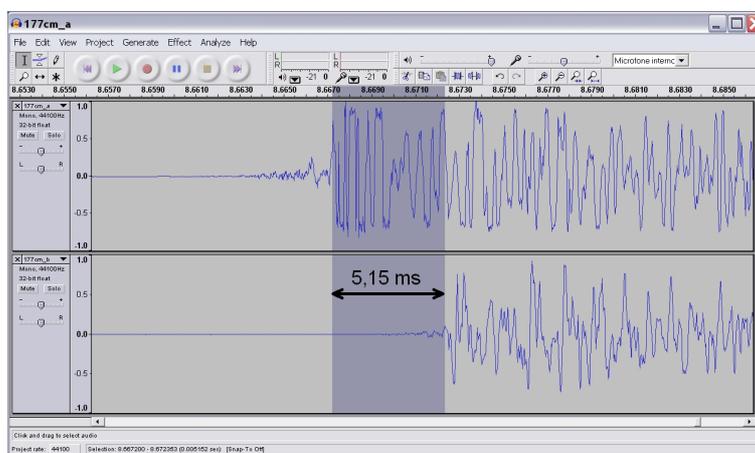


O próximo passo é transferir as duas gravações para um computador, onde elas podem ser analisadas em editores de áudio. Todos os gravadores de *mp3* e celulares possuem meios para realizar essa transferência. A figura abaixo mostra os sinais registrados pelos dois gravadores em um experimento típico. Cada faixa na figura corresponde a um gravador, e ambas são mostradas a partir do instante em que o som do choque entre os aparelhos foi registrado – ou seja, as gravações estão sincronizadas. A faixa superior é a do aparelho mais próximo à fonte do som (uma batida de palmas), como pode ser notado pela maior intensidade do sinal.



Se um *zoom* for feito na região do início dos pulsos sonoros, um resultado semelhante ao da figura abaixo deve surgir. Ele mostra que o registro do gravador mais distante está atrasado de um tempo T (no caso 5,15 ms) em relação ao do aparelho mais próximo à fonte sonora. Esse é o tempo que o som levou para ir de um gravador a outro.

Como conhecemos a distância D entre eles, a medida de T permite o cálculo da velocidade do som no ar livre.



Qualquer que seja o método utilizado, o cálculo da velocidade do som no ar livre pode ser comparado à velocidade obtida nas unidades anteriores. Dentro da precisão das medidas, a velocidade do som é a mesma no ar livre e nos tubos. O professor deve promover o confronto entre esses novos resultados e as respostas ao questionário. Se os alunos ficarem convencidos de que a velocidade num tubo é igual à no ar livre, o professor pode perguntar por que uma bola tem mais dificuldade para mover-se em um tubo estreito que num ambiente aberto.

Discussão final

Ao final das quatro unidades o professor deve resumir junto aos alunos tudo o que foi feito, discutindo com eles as principais conclusões obtidas durante o processo:

- o som se propaga com velocidade finita, da ordem de 340-350 m/s;
- sons fortes e fracos viajam à mesma velocidade;
- a velocidade do som não diminui à medida que ele se propaga;
- a passagem por caminhos estreitos não diminui a velocidade do som.

O professor deve também estimular a discussão sobre as diferenças entre a propagação do som e o movimento de um objeto, como uma bola. Não é fácil para a maioria dos alunos chegar à conclusão de que o som não se move da mesma maneira que um objeto, mesmo após todas as evidências coletadas durante a sequência de ensino-aprendizagem. A discussão final da sequência deve dar atenção a esse ponto.

Referências Bibliográficas

- [Aguiar 2011] C. E. Aguiar, M. M. Pereira, “Using the sound card as a timer”, *The Physics Teacher*, v. 49, p. 33-35, 2011.
- [Albergotti 1981] J. C. Albergotti, “Speed of sound by a time-of-flight method”, *American Journal of Physics*, v. 49, p. 595-596, 1981.
- [Aguiar 2005] C. E. Aguiar, M. A. Freitas, F. Laudares, “Medindo a velocidade do som com o microfone do PC”, *Anais do XVI Simpósio Nacional de Ensino de Física*, Rio de Janeiro, 2005.
- [Audacity 2010] *Audacity*, editor e gravador de áudio. Disponível em <http://audacity.sourceforge.net>. Acessado em dezembro de 2010.
- [Barbeta 2000] V. B. Barbeta, C. R. Marzulli, “Experimento Didático para Determinação da Velocidade de Propagação do Som no Ar, Assistido por Computador”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 22, n. 4, p. 447-455, 2000.
- [Berg 2005] R. E. Berg, D. R. Brill, “Speed of sound using Lissajous figures”, *The Physics Teacher*, v. 43, p. 36, 2005.
- [Boyes 1991] E. Boyes, M. Stanisstreet, “Development of pupils' ideas about seeing and hearing – the path of light and sound”, *Research in Science & Technological Education*, v. 9, n. 2. p. 223-424, 1991.
- [Carvalho 2008] C. C. Carvalho, J. M. Santos, M. B. Marques, “A time-of-flight method to measure the speed of sound using a stereo sound card”, *The Physics Teacher*, v. 46, p. 428-431, 2008.
- [Cavalcante 2003] M. A. Cavalcante, C. R. C. Tavoraro, “Medir a velocidade do som pode ser rápido e fácil”, *A Física na Escola*, v. 4, n. 1, p. 29-30, 2003.
- [Christensen 1964] F. F. Christensen, “Determination of the velocity of sound in air” *The Physics Teacher*, v. 2, p. 390-391, 1964.
- [diSessa 1993] A. A. diSessa, “Toward an epistemology of physics”, *Cognition and Instruction*, v. 10, n. 2-3, p.105-225, 1993.

- [Driver 1994] R. Driver, A. Squires, P. Rushworth, V. Wood-Robinson, *Making Sense of Secondary Science – Research into Children’s Ideas*, RoutledgeFalmer, 1994.
- [Eddy 1987] J. K. Eddy *et al*, “The velocity of sound in a closed tube”, *American Journal of Physics*, v. 55, p. 1136-1138, 1987.
- [El Hakeem 1965] A. El Hakeem, “A refined-tube method for measuring the sound wavelength in gases” *American Journal of Physics*, v. 33, p. 263, 1965.
- [Eshach 2006] H. Eshach, J. L. Schwartz, “Sound stuff? Naïve materialism in middle-school students’ conceptions of sound”, *International Journal of Science Education*, v. 28, n. 7, p. 733-764, 2006.
- [Grala 2005] R. M. Grala, E. S. Oliveira, “Medida da Velocidade do Som no Ar com o Uso do Microcomputador”, *A Física na Escola*, v. 6, n. 2, p. 26-28, 2005.
- [Gunstone 2005] R. Gunstone, “Rethinking physics content – how we teach impacts on what we teach”, *STAV/AIP VCE Physics Teachers’ Conference*, Monash University, 2005.
- [Hrepic 2010] Z. Hrepic, D. A. Zollman, N. S. Rebello, “Identifying students’ mental models of sound propagation: The role of conceptual blending in understanding conceptual change”, *Physical Review Special Topics – PER*, v. 6, art. 020114, 2010.
- [Jeans 1902] J. H. Jeans, “The stability of a spherical nebula”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, v. 199, p. 1–53, 1902.
- [Karshner 1989] G. B. Karshner, “Direct method for measuring the speed of sound”, *American Journal of Physics*, v. 57, p. 920-922, 1989.
- [Lestz 1963] S. S. Lestz, “A method for measuring the sound wavelength in gases”, *American Journal of Physics*, v. 31, p. 96, 1963.
- [Linder 1989] C. J. Linder, G. L. Erickson, “A study of tertiary physics students’ conceptualizations of sound”, *International Journal of Science Education*, v. 11, p. 491-501, 1989.
- [LoPresto 2005] M. C. LoPresto, “Measuring end correction for a quarter-wave tube”, *The Physics Teacher*, v. 43, p. 380, 2005.

- [Martin 2001] B. E. Martin, “Measuring the speed of sound – Variation on a familiar theme”, *The Physics Teacher*, v. 39, p. 424-426, 2001.
- [Maurines 1993] L. Maurines, “Spontaneous reasoning on the propagation of sound”, in *Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*, J. Novak (editor), Cornell University, 1993.
- [Mazens 2003] K. Mazens, J. Lautrey, “Conceptual change in physics: children’s naive representations of sound”, *Cognitive Development*, v. 18, p. 159-176, 2003.
- [McCloskey 1983a] M. McCloskey, “Naive theories of motion”, in D. Gentner, A. L. Stevens (eds.), *Mental Models*, Lawrence Erlbaum Associates, 1983.
- [McCloskey 1983b] M. McCloskey, “Intuitive physics”, *Scientific American*, v. 248, n. 4, p.122-130.
- [Ouseph 1984] P. J. Ouseph, J. J. Link, “Variation of speed of sound in air with temperature”, *American Journal of Physics*, v. 52, p. 661, 1984.
- [Pettersen 2002] I. H. A. Pettersen, “Speed of sound in gases using an ultrasonic motion detector”, *The Physics Teacher*, v. 40, p. 284-286, 2002.
- [Piaget 1977] J. Piaget, *Understanding Causality*, Norton, 1977.
- [Rossing 2007] T. D. Rossing (ed.), *Springer Handbook of Acoustics*, Springer, 2007.
- [Sharipov 2008] F. Sharipov, D. Kalempa, “Numerical modeling of the sound propagation through a rarefied gas in a semi-infinite space on the basis of linearized kinetic equation”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 124, p. 1993-2001, 2008.
- [Silva 2005] W. P. Silva, J. W. Preker, D. D. Silva, C. D. Silva, “The speed of sound in air: an at home experiment”, *The Physics Teacher*, v. 43, p. 219-221, 2005.
- [Sutton 1938] R. M. Sutton, *Demonstration Experiments in Physics*, McGraw-Hill, 1938.
- [Taber 2009] K. Taber, “Having faith in sound knowledge (with comment by Peter Campbell)”, *Physics Education*, v. 44, p. 451-452, 2009.

- [Velasco 2004] S. Velasco, F. L. Román, A. González, J. A. White, “A computer-assisted experiment for the measurement of the temperature dependence of the speed of sound in air”, *American Journal of Physics*, v. 72, p. 276-279, 2004.
- [Vickery 1965] J. P. Vickery, “Determination of the velocity of sound in air”, *The Physics Teacher*, v. 3, p. 170-171, 1965.
- [Viennot 2001] L. Viennot, *Reasoning in Physics – The Part of Common Sense*. Kluwer, 2001.
- [Warden 2005] J. Warden, “Measuring the speed of sound without plumbing”, *The Physics Teacher*, v. 43, p. 308, 2005.
- [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.
- [White 1992] R. White, R. Gunstone, *Probing Understanding*, Falmer Press, 1992.
- [Wittmann 2003] M. C. Wittmann, R. N. Steinberg, E. F. Redish, “Understanding and affecting student reasoning about sound waves”, *International Journal of Science Education*, v. 25, n. 8, p. 991-1013, 2003.
- [Worland 1999] R. S. Worland, D. D. Wilson, “The speed of sound in air as a function of temperature” *The Physics Teacher*, v. 37, p. 53-57, 1999.