



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

## **EXPERIMENTOS EM ONDAS MECÂNICAS**

Anderson Ribeiro de Souza

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 Magalhães de Aguiar.

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2011

## **EXPERIMENTOS EM ONDAS MECÂNICAS**

Anderson Ribeiro de Souza

Orientador: Carlos Eduardo Magalhães de 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 Magalhães de Aguiar (Presidente)

---

Profa. Susana Lehrer de Souza Barros

---

Prof. Paulo Murilo Castro de Oliveira

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2011

## FICHA CATALOGRÁFICA

S719e Souza, Anderson Ribeiro de  
Experimentos em ondas mecânicas / Anderson Ribeiro de Souza.  
Rio de Janeiro: UFRJ / IF, 2011.  
viii, 144f. il.;30cm.  
Orientador: Carlos Eduardo Magalhães de Aguiar  
Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro /  
Instituto de Física / Programa de Pós-graduação em Ensino de Física,  
2011.  
Referências Bibliográficas: f. 136 – 144.  
1. Ensino de Física. 2. Física ondulatória. 3. Ondas mecânicas.  
I. Aguiar, Carlos Eduardo Magalhães de. II. Universidade Federal do  
Rio de Janeiro / Instituto de Física / Programa de Pós-graduação em  
Ensino de Física. III. Experimentos em ondas mecânicas.

## **Agradecimentos**

Agradeço aos professores Eden Vieira, Evandro Vidor, Isa Costa, Jorge Sá, Lúcia Almeida, Sônia Krapas, do Instituto de Física da UFF, pelo incentivo e por terem disponibilizado parte do tempo de suas aulas para a pesquisa.

Agradeço a professora Marta Feijó, do Instituto de Física da UFRJ, pelo apoio às atividades de ensino de Física no Colégio Pedro II – Niterói.

Agradeço aos ex-alunos do Colégio Pedro II – Niterói, Mayanne Rodrigues, Rafael Magalhães, Ruan Senna e Vítor Moraes pelo trabalho que realizamos juntos nas oficinas de Física da escola em 2008 e 2009.

Agradeço aos amigos do mestrado Geraldo Felipe, Leandro Rubino, Marco Adriano, Marta Máximo, Walter da Silva e Sérgio Tobias pelas discussões e apoio em tantos momentos.

Agradeço aos amigos Alcidesio de Oliveira, André Ferreira, Carolina Esteves, Felipe Vagner, Fernando Pitanga, Gabriela Bevilacqua, Karinne Cunha, Leonardo Bueno, Marcela Castro, Marcelos Caldeira, Marcio Medina, Vitor Quintan e Walber Carvalho pelo incentivo de sempre.

Agradeço à minha mãe, Rita de Cassia, pela preocupação e apoio ao longo do mestrado.

Agradeço a Maira Poerner por entender minhas ausências e preocupações com o trabalho e os estudos. Sua presença e carinho foram fundamentais.

Agradeço especialmente ao meu orientador, prof. Carlos Eduardo Aguiar. Sua paciência, incentivo e dedicação foram determinantes para que eu acreditasse que este trabalho seria possível. Sua conduta sempre será uma referência de profissionalismo e sabedoria.

Agradeço à FAPERJ pelo apoio financeiro ao trabalho, no âmbito do projeto “Apoio à Melhoria do Ensino de Ciências e de Matemática em Escolas Públicas Sediadas no Estado do Rio de Janeiro”.

## RESUMO

### EXPERIMENTOS EM ONDAS MECÂNICAS

Anderson Ribeiro de Souza

Orientador

Carlos Eduardo Magalhães de 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.

Apresentamos neste estudo quatro experimentos didáticos em ondas mecânicas. No primeiro, mapeamos a intensidade do som no interior de tubos ressonantes e utilizamos os resultados para discutir as diferentes representações de uma onda sonora e sua relação com a audição. Mostramos que este é um tema onde os estudantes encontram grandes dificuldades, que afetam diretamente sua capacidade de aplicar a teoria ondulatória a situações práticas. No segundo experimento introduzimos a análise espectral do som de cordas vibrantes e tubos sonoros num contexto facilmente acessível a alunos do ensino médio. O terceiro experimento é sobre o uso do efeito Doppler na medida da velocidade de uma bola de futebol chutada pelos alunos. Finalmente, no quarto experimento, determinamos a velocidade de barcos a partir de fotografias obtidas no *Google Earth*. Essas medidas são baseadas no padrão ondulatório da esteira criada pelos barcos, e utilizam diretamente o fato de que a velocidade das ondas na água apresenta dispersão, ou seja, depende do comprimento de onda. A apresentação dos experimentos é precedida por uma revisão da literatura as dificuldades dos estudantes na compreensão de ondas mecânicas, assim como uma discussão sobre o papel dos experimentos na aprendizagem da Física.

Palavras-chave: ensino de Física; experimentos; ondas mecânicas.

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2011

## ABSTRACT

### EXPERIMENTS IN MECHANICAL WAVES

Anderson Ribeiro de Souza

Orientador

Carlos Eduardo Magalhães de 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.

We present four didactic experiments on mechanical waves. In the first one we map the sound intensity inside resonant tubes and use the results to discuss the many representations of sound waves and their relation to the sense of hearing. We show that this is a topic that students find very hard to understand, and affects their capacity of applying wave theory to practical situations. In the second experiment we introduce the spectral decomposition of sounds from vibrating strings and hollow tubes, in a way that is easily accessible to high-school students. The third experiment is on the use of the Doppler effect to measure the speed of a ball kicked by the students. Finally, in the fourth experiment we determine the speed of boats from pictures obtained with *Google Earth*. The measurement is based on the wave pattern of the wake produced by the boat, and uses the fact that the speed of surface waves on water depends on the wavelength. Before the experiments are presented, we review some of the literature on the difficulties students meet when they try to explain mechanical waves. We also discuss the role of experiments on the teaching and learning of physics.

Keywords: physics education; experiments; mechanical waves.

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2011

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 ENSINO E APRENDIZAGEM DE ONDAS MECÂNICAS.....</b>	<b>4</b>
2.1 DIFICULDADES NA APRENDIZAGEM DE ONDAS MECÂNICAS .....	4
2.2 O PAPEL DO EXPERIMENTO NO ENSINO DA FÍSICA.....	18
<b>CAPÍTULO 3 QUATRO EXPERIMENTOS EM ONDAS MECÂNICAS.....</b>	<b>24</b>
<b>CAPÍTULO 4 OBSERVANDO ONDAS SONORAS.....</b>	<b>28</b>
4.1 DIFICULDADES NA COMPREENSÃO DAS ONDAS SONORAS .....	28
4.2 PRESSÃO E DESLOCAMENTO DO AR NUMA ONDA SONORA: O NÓ DA QUESTÃO .....	29
4.3 MAPEANDO O SOM NUM TUBO RESSONANTE .....	34
4.4 ONDAS SONORAS E AUDIÇÃO: AS CONCEPÇÕES DOS ESTUDANTES.....	37
4.5 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES .....	53
<b>CAPÍTULO 5 O SOM DE CORDAS E TUBOS VIBRANTES .....</b>	<b>58</b>
5.1 O ENSINO DAS CORDAS E TUBOS VIBRANTES.....	58
5.2 ANÁLISE ESPECTRAL .....	59
5.3 PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO E TIMBRE.....	63
5.4 COMENTÁRIOS.....	66
<b>CAPÍTULO 6 O EFEITO DOPPLER NUMA BOLA DE FUTEBOL.....</b>	<b>67</b>
6.1 O EFEITO DOPPLER NUMA BOLA DE FUTEBOL .....	67
6.2 COMENTÁRIOS.....	73
<b>CAPÍTULO 7 FÍSICA COM O GOOGLE EARTH .....</b>	<b>74</b>
7.1 ONDAS NA ÁGUA.....	74
7.2 O GOOGLE EARTH .....	75
7.3 A ESTEIRA DE KELVIN.....	76
7.4 MEDINDO A VELOCIDADE DE BARCOS COM O GOOGLE EARTH .....	79
7.5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES .....	82
<b>CAPÍTULO 8 CONCLUSÃO.....</b>	<b>84</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>88</b>
UMA SEQUÊNCIA DE ENSINO-APRENDIZAGEM SOBRE ONDAS SONORAS. ....	88

ABORDAGEM .....	88
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>100</b>
MAPEANDO ONDAS SONORAS NUM TUBO .....	100
MATERIAIS .....	100
OBJETIVO .....	100
PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	100
RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMENTÁRIOS .....	103
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>105</b>
UMA SEQUÊNCIA DE ENSINO-APRENDIZAGEM PARA O ESTUDO DOS MODOS NORMAIS DAS CORDAS VIBRANTES .....	105
ABORDAGEM .....	105
<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>112</b>
ANÁLISE ESPECTRAL DE CORDAS DE VIOLÃO E TUBOS SONOROS .....	112
MATERIAIS .....	112
OBJETIVO .....	112
PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	112
<b>APÊNDICE E .....</b>	<b>117</b>
MEDIDA DOPPLER DA VELOCIDADE DE UMA BOLA DE FUTEBOL .....	117
MATERIAIS .....	117
OBJETIVO .....	117
PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	117
RESULTADOS E COMENTÁRIOS .....	120
<b>APÊNDICE F .....</b>	<b>123</b>
VELOCIDADE DE FASE DAS ONDAS NA SUPERFÍCIE DE ÁGUAS PROFUNDAS E RASAS .....	123
PROPAGAÇÃO DAS ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS .....	123
PROPAGAÇÃO DAS ONDAS EM ÁGUAS RASAS .....	126
<b>APÊNDICE G .....</b>	<b>128</b>
MEDIDA DA VELOCIDADE DE EMBARCAÇÕES COM O <i>GOOGLE EARTH</i> .....	128
MATERIAIS .....	128
OBJETIVOS .....	128
PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	128
RESULTADOS .....	134
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>136</b>



# Capítulo 1

## Introdução

O estudo das ondas mecânicas é base para o entendimento de diversos fenômenos naturais como o som, ondas no mar, vibrações em corpos, ondas sísmicas e muitos outros. A compreensão de ondas mecânicas também é importante porque permite uma introdução simples a efeitos ondulatórios encontrados em outras áreas da física (eletromagnetismo, óptica, física moderna).

Apesar de sua relevância, pouca atenção tem sido dada às dificuldades encontradas pelos estudantes na aprendizagem de ondas mecânicas. Em particular, o número de trabalhos publicados sobre o tema é pequeno, pelo menos quando comparado a áreas como mecânica ou eletromagnetismo. O desenvolvimento de experimentos didáticos sobre ondas mecânicas também é relativamente limitado. Os experimentos clássicos – cuba de ondas, cordas vibrantes, tubo de Kundt e uns poucos mais – são os mesmos há muitas décadas (por isso são clássicos). Eles não exploram as possibilidades abertas pelas tecnologias associadas a computadores e, principalmente, deixam de fora uma grande quantidade de temas importantes como o efeito Doppler, análise espectral, dispersão e outros.

Nesta dissertação apresentamos quatro experimentos didáticos em ondas mecânicas. A proposta dos experimentos é precedida, no capítulo 2, por uma discussão das principais dificuldades que os estudantes têm para compreender as ondas mecânicas. A partir de uma revisão da literatura, veremos como os estudantes organizam suas concepções em diferentes modelos mentais, através dos quais tentam explicar a existência e a propagação dessas ondas. Ainda no capítulo 2, abordamos as diferentes visões que a literatura em ensino de física tem revelado acerca do papel que os experimentos exercem na aprendizagem. Notamos que apesar do tema ser discutido há muitos anos, ainda não existe uma boa compreensão sobre o modo como estas atividades contribuem para a melhoria da aprendizagem. Antecipamos que um dos pontos

de convergência das pesquisas é a condenação dos experimentos didáticos altamente estruturados, isto é, experimentos com temas e roteiros pré-determinados, do tipo **faça isso e verifique aquilo**. Os trabalhos da área criticam insistentemente o hiato que existe entre as propostas de renovação do ensino de física e atividades práticas deste tipo, comumente executadas nos laboratórios do ensino médio e superior.

No capítulo 3 estabelecemos a relação entre os trabalhos discutidos na revisão bibliográfica do capítulo 2 e os quatro experimentos didáticos em ondas mecânicas propostos na dissertação. Nos capítulos subsequentes, apresentamos os experimentos propriamente ditos.

O experimento proposto no capítulo 4 é o mapeamento da intensidade sonora no interior de tubos ressonantes. Ele permite estudar a relação entre as diferentes representações de uma onda sonora e a intensidade do som audível. Mostramos que os estudantes têm sérias dificuldades para compreender que o som pode ser descrito de várias maneiras equivalentes, por exemplo em termos do deslocamento do ar ou de variações de pressão. Essas dificuldades afetam diretamente a habilidade de prever onde um som pode ser escutado e, conseqüentemente, complicam a aplicação da teoria ondulatória a situações práticas.

No capítulo 5 apresentamos um experimento para o estudo da composição espectral dos sons de cordas vibrantes e tubos sonoros. Este tema está praticamente ausente dos currículos de ensino médio, embora tenha grande importância conceitual e uma enorme quantidade de aplicações práticas. O motivo dessa ausência é a dificuldade matemática associada à análise de Fourier, fora do alcance dos estudantes do ensino médio. Entretanto, como mostraremos, isso pode ser superado com auxílio de programas de computador que realizam com facilidade a decomposição espectral de sons gravados. O experimento também permite discutir o princípio da superposição e o conceito de timbre dos instrumentos musicais.

No capítulo 6 apresentamos um experimento sobre o efeito Doppler. Usamos este fenômeno para medir a velocidade de uma bola de futebol

chutada pelos alunos. Os resultados obtidos tinham precisão da ordem de 10%, o que mostra o potencial desta técnica para outras aplicações didáticas.

O último experimento, apresentado no capítulo 7, é a medida da velocidade de um barco a partir de fotografias obtidas no *Google Earth*. A medida é baseada no padrão ondulatório formado na esteira dos barcos. O fenômeno ondulatório relevante nesta medida é a **dispersão**, ou seja, o fato da velocidade das ondas na superfície da água depender do comprimento de onda.

Como os experimentos propostos tratam de temas distintos e são independentes uns dos outros, em cada capítulo apresentamos discussões e conclusões pertinentes às atividades em questão. No capítulo 8 apresentamos as conclusões gerais desta dissertação.

Sete apêndices acompanham a dissertação. Professores do ensino médio encontrarão nestes apêndices sugestões para a aplicação em sala de aula das atividades propostas na dissertação, além de descrições detalhadas sobre as montagens experimentais. O objetivo é tornar mais fácil o uso dos experimentos propostos, de modo que eles possam ser implementados sem necessidade de uma leitura completa da dissertação.

O material da dissertação gerou um artigo publicado na revista *Physics Education* (Aguiar e Souza, 2009) e duas comunicações apresentadas no *XII Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física* (Souza e Aguiar, 2010a e 2010b). Essas publicações podem ser consultadas para uma abordagem sucinta (embora parcial) do conteúdo deste trabalho.

## Capítulo 2

# Ensino e aprendizagem de ondas mecânicas

Como mencionamos na Introdução, o número de artigos publicados sobre as dificuldades no aprendizado de ondas mecânicas é relativamente pequeno. Na primeira seção deste capítulo apresentaremos os principais resultados desses trabalhos. Na seção seguinte discutiremos o papel das atividades experimentais no ensino da Física e seu impacto sobre a aprendizagem dos estudantes.

### 2.1 Dificuldades na aprendizagem de ondas mecânicas

#### 2.1.1 Pulsos e ondas em cordas

O raciocínio dos estudantes de ensino médio e superior a respeito da velocidade de pulsos em cordas esticadas foi analisado por Wittmann et al. (1999) e Viennot (2001). Estes estudos apontam que os estudantes associam a velocidade de propagação do pulso à rapidez do movimento da mão que o criou e à força exercida sobre a corda. Desse modo, eles confundem a velocidade dos pontos da corda com a velocidade de propagação dos pulsos ondulatórios

Em relação ao tamanho dos pulsos, Wittmann et al. (1999) verificaram ainda que os raciocínios dos estudantes variam: há aqueles que associam a velocidade à energia da onda e afirmam que pulsos mais largos são mais rápidos, enquanto outros dizem que os pequenos são os mais rápidos. Sobre este mesmo aspecto, Viennot (2001) constatou que os estudantes relacionam o formato e a amplitude do pulso à sua velocidade: cerca de 70% dos alunos analisados antes da instrução disseram que a diminuição da amplitude do pulso, devido à dissipação, é acompanhada da diminuição da velocidade; após a instrução, a incidência desta concepção diminuiu para 55%.

Wittmann et al. (1999) destacaram que algumas respostas dos estudantes sobre a propagação dos pulsos em cordas podem variar conforme o estilo da pergunta. Quando foram expostos a testes onde existiu uma menção explícita ao meio de propagação, eles tenderam a considerá-lo como um fator importante. Contudo, o mesmo não aconteceu em testes discursivos onde esta opção não existia.

Viennot (2001) apresenta resultados semelhantes, uma vez que poucos estudantes associaram a velocidade com as características do meio de propagação. De fato, os alunos entrevistados usaram as palavras “força”, “movimento”, “velocidade” e “energia” de modo indiferenciado e, segundo Viennot, imaginaram que a fonte envia para a corda algo que se materializa na forma de um pulso. A autora chamou esta noção híbrida, que combina todos os vocábulos citados acima, de **capital dinâmico**. Ela crê que esta ideia é similar à noção intuitiva apresentada pelos alunos quando discutem mecânica dos sólidos, que liga todo movimento a um agente que o criou e que, necessariamente, o mantém. Ou seja, do ponto de vista do raciocínio espontâneo dos alunos, do mesmo modo que é preciso uma força para manter um sólido em movimento (ainda que ele esteja em movimento uniforme), também é necessário “força” (ou “energia” etc.) para sustentar um pulso com velocidade constante.

Wittmann et al. (1999) defendem o argumento de que muitos estudantes buscam descrever a física das ondas através de analogias com a mecânica das partículas, para as quais já desenvolveram modelos mentais estáveis. Segundo Wittmann et al., um modelo mental é constituído por padrões de associações capazes de guiar raciocínios espontâneos e possibilitar respostas em situações físicas não familiares. Modelos mentais são úteis essencialmente porque têm poder preditivo, embora muitas vezes se apresentem inconsistentes e, com frequência, não sejam verbalizados explicitamente. Wittmann et al. buscaram desvendar as características do modelo mental utilizado pelos alunos a respeito da propagação de pulsos em cordas. Seus resultados permitiram caracterizar um **modelo mental de pulsos de partículas**, cujos atributos o situam entre o modelo físico de partícula (ou

corpos rígidos), controlado pelas leis de Newton, e o modelo ondulatório clássico. Tais concepções são comparadas na tabela 2.1 abaixo.

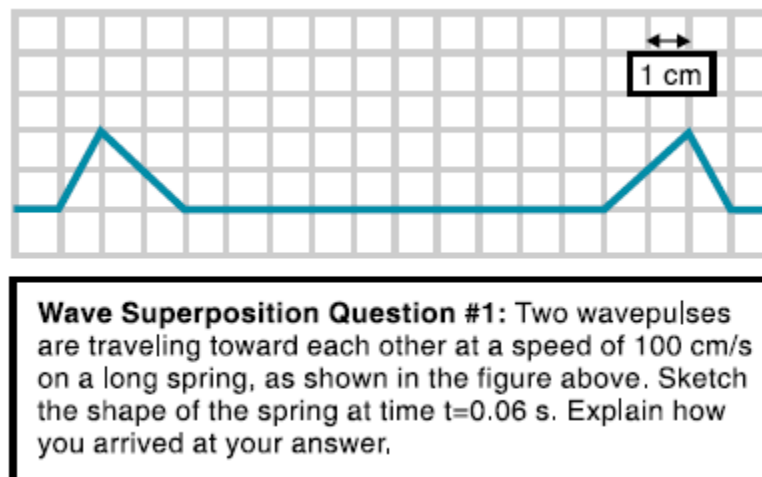
<b>Modelo de partículas</b>	Um lançamento forte implica numa partícula mais rápida.	Objetos pequenos são facilmente lançados com maior rapidez.	O centro de massa do objeto é considerado quando descrevemos seu movimento.	Objetos colidem uns com os outros e seus movimentos mudam.
<b>Modelo de pulsos de partículas</b>	Um puxão súbito na corda implica num pulso mais rápido.	Pulsos menores movem-se mais rapidamente.	Somente o pico de um pulso é considerado quando descrevemos a superposição.	Pulsos colidem uns com os outros e sofrem reflexão
<b>Modelo ondulatório</b>	A velocidade das ondas depende somente da resposta do meio a perturbações.	O tamanho do pulso e a maneira como a onda é criada não afetam sua velocidade.	É necessário considerar todo o formato da onda para descrever seu comportamento (superposição, por exemplo).	As ondas passam umas pelas outras sem qualquer efeito permanente.

**Tabela 2.1** Características dos modelos de partículas, de pulsos de partícula e ondulatório, segundo Wittmann et al. (1999).

Wittmann et al. observaram que os estudantes que usam o modelo de pulsos de partículas não pensam em forças de interação entre as moléculas do meio, como no modelo ondulatório. Alguns deles parecem fazer uma analogia direta entre o lançamento de um objeto sólido e a propagação de um pulso. Por exemplo, se uma bola arremessada com mais “força” ou “energia” obtém maior velocidade, um pulso também deve ser mais veloz se o movimento da mão sobre a corda for mais rápido. Diversos alunos também relatam que a onda

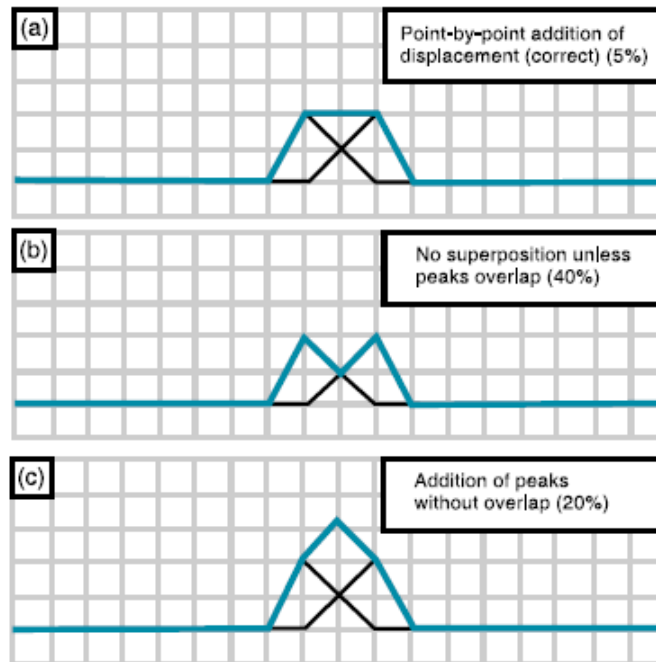
exerce uma força sobre o meio em que viaja, empurrando-o tal qual uma onda no mar empurra um surfista.

Dificuldades na compreensão do princípio da superposição foram observadas por Wittmann (1996) e Wittmann et al. (1999). Os autores solicitaram que os estudantes examinassem uma situação de interferência construtiva dos pulsos da figura 2.1.



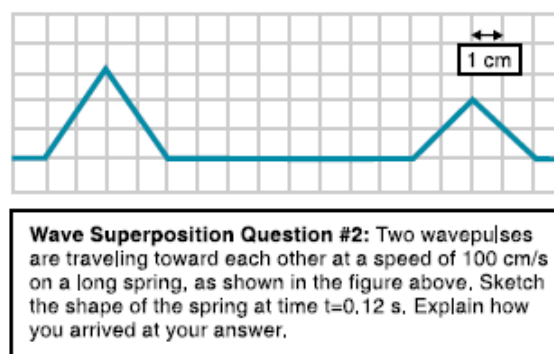
**Figura 2.1** Problema criado por Wittmann et al. (p. 18, 1999) para estudar a compreensão dos alunos a respeito do princípio da superposição.

Os resultados apontaram que, em 40% dos casos, ao invés de somarem os deslocamentos ponto a ponto, os estudantes não reconheceram nenhuma superposição; em 20% dos casos, os valores máximos dos pulsos foram somados ainda que sua posição não coincidissem; somente 5% dos estudantes desenharam o pulso resultante de modo correto. Os autores perceberam que os estudantes tendem a associar a palavra amplitude apenas com o valor de pico da onda. Estas respostas estão reunidas na figura 2.2.



**Figura 2.2** Respostas dos estudantes ao questionamento da figura 2.3 (Wittmann et al., p. 18, 1999).

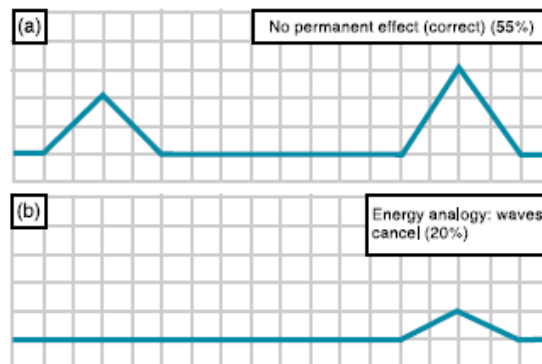
Em seguida, os pesquisadores solicitaram que os estudantes desenhassem dois pulsos após uma situação de interferência, como na figura 2.3.



**Figura 2.3** Outro problema sobre superposição criado por Wittmann et al. (p. 19, 1999).

Nem sempre os estudantes foram capazes de reconhecer que a superposição não tem efeitos permanentes sobre pulsos e ondas: em 20% dos casos os estudantes interpretaram a superposição com uma espécie de colisão inelástica, na qual o pulso resultante apresentava uma amplitude dada pela diferença entre as amplitudes iniciais de cada pulso (figura 2.4). Com este raciocínio, segundo Wittmann et al., eles estariam novamente utilizando seu modelo de pulsos de partículas para interpretar um fenômeno desconhecido.





**Figura 2.4** Respostas dos estudantes ao questionamento da figura 2.3 (Wittmann et al., p. 19, 1999).

Além dos autores mencionados acima, Caleon e Subramaniam (2010) realizaram um interessante estudo com cerca de 300 estudantes do ensino médio sobre a propagação de ondas em cordas. Inicialmente eles responderam um conjunto de perguntas objetivas e, em seguida, suas respostas foram comparadas com as fornecidas por um pequeno grupo de estudantes entrevistados pessoalmente.

A interpretação destas respostas se apoiou nas noções fenomenológicas primitivas (**primitivas fenomenológicas** ou, simplesmente, **p-prims**) de diSessa (1993). Segundo este autor, o raciocínio humano pode ser entendido através de blocos elementares de construção. Tais unidades não são intrinsecamente corretas nem incorretas e, além disso, são compartilhadas por todos os estudantes, sejam eles novatos ou de nível avançado.

Para exemplificar esta teoria, podemos citar uma das primitivas criadas por diSessa e expressa através da frase “quanto mais perto, maior” (*closer means more*). Assim, se imaginarmos que nosso braço se aproxima de uma fogueira, o perigo de uma queimadura aumenta conforme a diminuição da distância. Portanto, neste caso a aplicação da primitiva “mais perto, maior” seria adequada para o entendimento do evento. Contudo, ela não seria correta se tentássemos justificar as estações do ano em função da distância da Terra ao Sol (Wittmann, 2002).

Para diSessa (1993), a distinção entre estudantes novatos e experientes não se dá pela existência de mais ou menos primitivas propriamente, mas sim pela capacidade destes últimos de aplicarem a uma dada situação vários recursos

de raciocínio de modo rápido, seguro e com sucesso. Estudantes novatos muitas vezes não sabem como, quando ou onde aplicar seus recursos de raciocínio. A seguir, a tabela 2.2 resume as primitivas fenomenológicas empregadas por Caleon e Subramaniam (2010) para interpretar o raciocínio dos estudantes sobre a propagação de pulsos e de ondas.

<b>Primitivas fenomenológicas ou Recursos de raciocínio</b>	<b>Significado</b>	<b>Concepções alternativas relacionadas</b>
<i>Working harder</i>	Mais esforço implica em mais resultado.	Um movimento da mão mais rápido ou de maior amplitude faz o pulso se mover mais rápido.
<i>Smaller is faster</i>	Pequenos objetos se movem mais rápido que objetos maiores.	Pulsos pequenos se propagam mais rapidamente através do meio.
<i>Addition</i>	Uma entidade combinada com outra forma uma única combinação.	Quando dois pulsos se encontram, eles se somam somente se seus picos se superpõem.
<i>Actuating agency</i>	Um efeito é iniciado por uma causa.	Uma vez que a onda é criada, é necessário um agente que a mantenha em movimento.
<i>Maintaining agency</i>	A continuidade de um efeito é mantida por uma causa.	
<i>Canceling</i>	Tendências iguais e opostas se cancelam mutuamente.	Pulsos menores cancelam partes de pulsos maiores.
<i>Bouncing</i>	Um objeto em movimento retorna ao atingir outro.	Pulsos retornam quando se encontram uns com os outros.

**Tabela 2.2** Primitivas fenomenológicas de diSessa (1993) frequentemente empregadas pelos estudantes na conceituação da propagação de pulsos e ondas, segundo Caleon e Subramaniam (p. 55, 2010).

Seguindo essas concepções, Caleon e Subramaniam mostraram que aproximadamente 70% dos estudantes acreditavam que a velocidade de propagação das ondas aumenta com o aumento da frequência da fonte. Para eles, os alunos ativam a primitiva que diSessa denomina *working harder*. Este recurso de raciocínio pode ser resumido na afirmação: quanto maior o esforço, maior o resultado. Neste caso, a aplicação desta primitiva ao contexto da mecânica das ondas gera a seguinte relação causal: o aumento da frequência (esforço) provoca o aumento da velocidade (resultado) das ondas propriamente ditas. Além disso, os estudantes justificam matematicamente seu raciocínio conectando estas grandezas através da expressão  $v = \lambda f$ .

Quando perguntados sobre o que acontece com a velocidade das ondas diante do aumento de sua amplitude, cerca de 48% declararam que a velocidade permaneceu imutável. Contudo, 29% disseram que as ondas ficaram mais lentas e outros 23% disseram que elas se tornaram mais rápidas. Assim, um grupo de estudantes ativou a primitiva *smaller is faster*; para estes, a noção de que objetos pequenos tendem a ser mais rápidos foi dominante. Por outro lado, outros ativaram novamente a primitiva *working harder*, dessa vez interpretando esforço como a quantidade de energia ou o tamanho da onda gerada pela fonte, e o resultado como sendo sua velocidade de propagação.

Diante de uma corda tensionada por uma carga em sua extremidade e percutida por um vibrador, cerca de 80% dos estudantes afirmaram novamente que o aumento da frequência está ligado ao aumento da velocidade das ondas; 22% deles combinaram o aumento da frequência com a redução do valor do peso da carga para concluir a favor do aumento da velocidade. Neste caso, os estudantes associaram a primitiva *working harder* com outra, que diSessa denomina *spontaneous resistance*. Este recurso de raciocínio implica na concepção de que a resistência ao movimento da corda será tanto menor conforme se afrouxa a corda. Somente 9% das respostas apresentaram justificativas corretas ao dizer que o peso da carga pendurada deveria aumentar para que as ondas viajassem mais rapidamente.

Durante as entrevistas, Caleon e Subramaniam (2010) tentaram levantar as justificativas dos estudantes para o movimento de um trem de ondas. As respostas obtidas lembram algumas conclusões de Wittmann et al. (1999) e Wittmann (2002) sobre a propagação de pulsos: os estudantes encararam as ondas como formadas por uma sucessão de pulsos individuais e estes, por sua vez, como tendo um comportamento análogo ao de bolas arremessadas uma após a outra. Deste modo, os pulsos apresentam uma espécie de inércia e, portanto, os recursos de raciocínio típicos da mecânica das partículas são extrapolados para a análise do movimento ondulatório.

Caleon e Subramaniam reconheceram o uso da primitiva *maintaining agency*. Segundo os autores, os estudantes pensam que uma “onda” vinda de trás deve empurrar outra “onda”, logo à frente, e gerar a força que a movimenta permanentemente. O aumento da frequência seria análogo ao lançamento de mais bolas por unidade de tempo ou de bolas sucessivamente mais rápidas. Deste modo, as bolas ou ondas de trás empurrariam as bolas ou ondas lançadas anteriormente. Os autores também verificam o uso da primitiva *dying away* que, no contexto das ondas, implica na crença de que as ondas devem ser continuamente empurradas para que seu movimento não se dissipe. Assim, os estudantes entrevistados tiveram dificuldades em justificar o movimento de um único pulso porque não haveria outro que pudesse empurrá-lo.

Apenas um dos estudantes entrevistados justificou o movimento da onda como um processo de transferência de energia de um grupo de partículas da corda, obrigadas a oscilar inicialmente pela fonte, para as partículas adjacentes. Contudo, o estudante ignorou o papel das forças restauradoras entre as partículas e, também ele, declarou que o aumento da frequência leva ao aumento da velocidade das ondas.

Caleon e Subramaniam (2010) defendem que o papel das forças de interação das partículas do meio deve ser enfatizado. Eles sugerem que um modelo onde as partículas são ligadas por molas poderia destacar a rigidez do meio e a forma como ele reage a qualquer deformação. Assim, quanto maior a rigidez das molas, maior seria a força restauradora e, em última análise, a velocidade de propagação das ondas. O trabalho conclui ainda que os

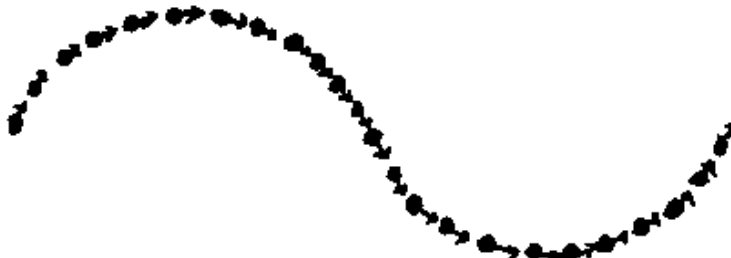
estudantes precisam ter consciência de que as ondas se assemelham mais a processos (transferência de energia) do que a objetos (corpos em movimento).

### 2.1.2 Ondas sonoras

Em 1992, Linder apontou uma série de dificuldades que os estudantes têm na compreensão do som, além de criticar o uso de algumas analogias que, segundo ele, mais atrapalham que ajudam. Linder relata inúmeras concepções equivocadas dos estudantes a respeito do som. Segundo algumas delas, o som é:

- uma entidade carregada por moléculas individuais à medida que se movem através do meio;
- uma entidade que atravessa o meio transferida de uma molécula a outra;
- uma substância com contornos delimitados que viaja com ímpeto, normalmente representada como um fluxo de ar;
- uma substância com contornos delimitados que assume a forma de algum padrão que se movimenta;

As ideias acima aparecem mesmo entre estudantes de nível avançado e, segundo Linder (1992), elas podem ter raízes em analogias incorretas praticadas no ensino da Física. A figura 2.5, por exemplo, mostra o desenho de um estudante que tentou descrever uma onda senoidal. Para este aluno, as colisões entre as moléculas provocavam seu alinhamento numa trajetória senoidal.

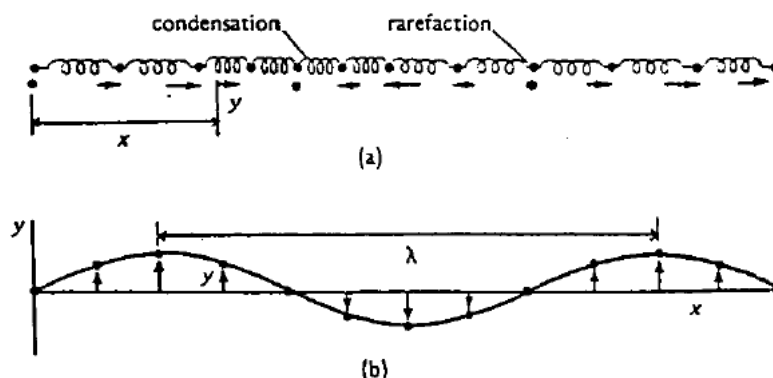


**Figura 2.5** Desenho de um estudante de pós-graduação que tentou explicar a propagação de uma onda senoidal (Linder, p. 259, 1992): as partículas colidem até materializar uma onda transversal.

Linder afirma que, no caso do som, a apresentação de ondas senoidais longitudinais através de gráficos nos quais elas, aparentemente, são transversais, causa muita confusão. Em outras palavras, quando o deslocamento molecular é desenhado perpendicularmente à direção de propagação da onda, num dado instante de tempo, os estudantes muitas vezes interpretam o envelope que engloba o deslocamento como sinônimo de uma onda transversal.

Isso é bastante problemático porque esta representação normalmente não é discutida de modo explícito e, portanto, os professores esperam que os estudantes a compreendam com facilidade. Além disso, a confusão induzida pela forma visual transversal pode ser agravada pela descrição matemática, que também se assemelha a de uma onda transversal numa corda.

A figura 2.6, extraída por Linder de um livro-texto de Física, foi apresentada a muitos estudantes de nível avançado. O autor solicitou que eles imaginassem um modo de explicá-la a estudantes novatos que procurassem ajuda. Em todos os casos eles afirmaram que a representação do autor está errada justamente porque a onda de pressão e o deslocamento das partículas apresenta uma diferença de fase de  $90^\circ$  entre si. Questionamentos adicionais levaram Linder a concluir que, para os estudantes, o deslocamento, a pressão e a velocidade das moléculas numa onda sonora devem estar obrigatoriamente em fase.



**Figura 2.6** Acima, onda longitudinal propagando-se num sistema de partículas conectadas por molas. Abaixo, a onda de deslocamento correspondente. (Weidner, p. 386, 1985 *apud* Linder, p. 259, 1992).

Para Linder, a imagem mental de uma fileira de dominós parados que, em seguida, transmitem momento através de colisões sucessivas, é uma analogia ruim para uma onda sonora. Ela reforça a ideia de que as grandezas posição, velocidade e pressão estão em fase.

Taber (2009) criticou a analogia com a fileira de dominós e declarou sua dificuldade ao tentar imaginar um modelo microscópico para a propagação do som que explique, simultaneamente, o movimento caótico das moléculas do ar e a transmissão de um padrão de vibração em torno de uma posição de equilíbrio. Este autor afirma que é capaz de compreender a descrição estatística (macroscópica) da propagação do som no ar. Contudo, ainda assim, destaca que nenhuma imagem mental microscópica, envolvendo colisões entre moléculas, corresponde satisfatoriamente a essa explicação.

Linder (1992) também especula que a associação entre deslocamento e força (e pressão) pode ter ligação com uma espécie de aristotelismo visceral que sempre tende a ligar qualquer movimento a um esforço.

Uma forte crítica de Linder (1992) se dirige a uma analogia muito comum que equipara o som às ondas na superfície da água. Para Linder, embora ondas na água sejam vistas por todos e frequentemente citadas nos cursos introdutórios, *“elas constituem o pior exemplo de possível porque são diferentes das ondas sonoras e luminosas”* (Feynman et al., pp. 51 – 57, 1963 *apud* Linder, p. 261, 1992). A principal dificuldade reside no fato de que ondas na água têm comportamento dispersivo, isto é, sua velocidade de grupo é função de seu comprimento de onda, o que não acontece para o som no ar.

Outro obstáculo conceitual levantado por Linder se deve à representação de ondas emanadas por uma fonte vibratória. O autor relata que, ao solicitar aos estudantes a estimativa do comprimento de onda do som emitido por um diapasão de 440 Hz, os alunos “sempre” afirmam que este é da ordem de milímetros. Isto é, eles associam o comprimento de onda à amplitude da vibração do próprio instrumento. Contudo, quando o autor pede para que calculem este valor através da equação fundamental das ondas, eles ficam surpresos com o valor da ordem de 1 metro encontrado e, de modo geral, não sabem justificar conceitualmente essa discrepância.

Em relação ao som, Viennot (2001) verificou que uma parcela significativa dos estudantes associa a velocidade de propagação com a potência da fonte e, por conseguinte, com sua amplitude. Todavia, poucos alunos levam em conta o papel do meio material ao analisar a propagação. Quando o fazem, frequentemente se baseiam numa argumentação errônea para afirmar que o aumento da densidade do meio provoca uma diminuição da velocidade do som. De fato, eles tendem a associar o som preferencialmente ao ar e creem que existiriam dificuldades para que se propagasse na água ou no aço. Além disso, alguns estudantes afirmam que o som poderia viajar no vácuo, onde a densidade é nula.

Viennot (2001) destaca que, no ensino dos fenômenos ondulatórios, não apenas grandezas interdependentes devem ser destacadas (por exemplo, a velocidade do pulso e a tensão numa corda), mas também aquelas que surpreendentemente não tem relação entre si (por exemplo, a velocidade do som e sua amplitude).

Hrepic et al. (2002, 2010) tentaram fazer um inventário dos modelos mentais que os alunos constroem a respeito do som. Para isto se basearam na definição: *“um modelo mental é uma representação interna, que atua como um análogo estrutural a situações ou processos”* (*“a mental model is an internal representation, which acts out as a structural analogue of situations or processes”*), de Greca e Moreira (p. 108, 2002 apud Hrepic et al., p. 1, 2002).

Os pesquisadores entrevistaram 16 alunos universitários sobre a propagação do som, sua interação com partículas de poeira em suspensão no ar e com o próprio ar. Os resultados indicaram que diversas características apontadas pelos estudantes sobre o som podem ser reunidas num único modelo alternativo ao modelo ondulatório padrão, denominado *“modelo de entidade”* (*entity model*). Segundo este modelo o som é:

- uma entidade independente do ar e pode se propagar no vácuo;
- é uma entidade material e possui massa;
- apresenta a capacidade de se infiltrar entre os espaços vazios das moléculas de um corpo e se propagar através dele;

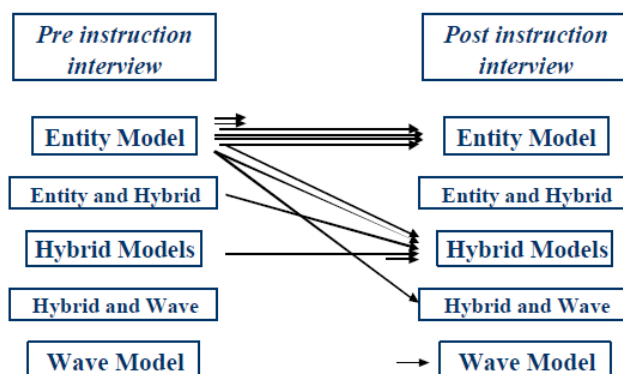


▪ é a propagação de partículas de som que, por sua vez, são diferentes das partículas do meio.

Para Hrepic et al., as concepções dos alunos a respeito do som se apresentam ambíguas, fragmentadas e, na maioria dos casos, se situam entre dois extremos: o modelo de entidade e o modelo ondulatório da Física. Para os autores, os modelos mentais dos alunos muitas vezes são **híbridos**, isto é, apresentam uma ou mais características do modelo de entidade e o do modelo ondulatório mas, além disso, incluem alguma outra característica não contemplada por ambos.

Um exemplo de modelos híbridos é o “modelo de agitação”: o som é uma entidade diferente do meio mas, como se propaga através dele, causa a vibração das partículas do/no meio.

Hrepic et al. procuraram mapear a transição entre os modelos mentais de propagação do som antes e depois do período de instrução, como ilustra a figura 2.7. Os resultados apontam que, com grande frequência, os estudantes partem do modelo de entidade e chegam num modelo híbrido próximo do ondulatório, embora em boa parte dos casos, o modelo de entidade ainda prevaleça. As setas longas da figura indicam modelos identificáveis antes e depois das entrevistas; setas curtas indicam que só foi possível caracterizar o modelo de partida ou o de chegada. Curiosamente, entre os 16 estudantes, houve 3 casos em que não foi possível caracterizar qualquer modelo nem antes nem depois da instrução.



**Figura 2.7** Ilustração das transições entre os diferentes modelos mentais definidos por Hrepic et al (2002, p. 3; 2010, p. 7) para 16 estudantes entrevistados antes e depois da instrução.

## 2.2 O papel do experimento no ensino da Física

Os trabalhos de Hodson (1994), Gil Perez et al. (1999), Borges (2002); Araújo e Adib (2003), Hofstein e Lunetta (1997; 2004), Saraiva-Neves et al. (2006), Moreira (2006) e Maltese et al. (2010), a respeito da relação entre as atividades experimentais e a aprendizagem dos estudantes, têm ao menos um ponto em comum: todos mostram que tal relação não é simples.

Estes autores apontam que os professores de ciências, de modo geral, creem que as atividades experimentais são fundamentais para a melhoria das relações de ensino-aprendizagem em suas disciplinas. Contudo, os professores apresentam uma vasta gama de justificativas para o papel que elas devem exercer.

Hodson (1994) e Hofstein e Lunetta (2004) destacam que a maior parte das razões empregadas pelos professores para defender o ensino a partir atividades experimentais é equivocada, tal como, por exemplo, sua suposta capacidade de motivar os estudantes para o aprendizado da Física. Segundo Hodson, os laboratórios deveriam ser implementados mais frequentemente como desafios cognitivos ao invés de receituários onde os alunos se sentem frustrados quando não obtêm a resposta correta.

Borges (2002) expressa convicção parecida ao apontar o laboratório convencional como sendo excessivamente estruturado. Isto é, segundo ele, os roteiros definidos pelo professor determinam o que será feito, como será feito e através de que técnicas e procedimentos. O autor crítica tais atividades porque costumam consumir muito tempo com a montagem dos equipamentos, coleta de dados, cálculos, execução de medidas e confecção de gráficos e, deste modo, reduzem o tempo que poderia ser dedicado à reflexão sobre os dados obtidos. De maneira semelhante, Hofstein e Lunetta (2004) afirmam que nos laboratórios convencionais as medidas são perseguidas como metas e não vistas como elementos para a análise dos fenômenos físicos.

Saraiva-Neves, Caballero e Moreira (2006) ressaltam que o trabalho experimental *“deve ser entendido como uma atividade investigativa e*

*cooperativa*" (p. 399) transmitindo a ideia de que os problemas reais "*podem não ter solução ou ter mais do que uma solução*" (p. 387). Deste modo, estas atividades poderiam se aproximar mais da prática científica do que os laboratórios usuais.

Hodson (1994) e Hofstein e Lunetta (2004) afirmam que alguns professores creem que as atividades experimentais servem como um espaço para o aprendizado de técnicas de laboratório. Contudo, estes autores veem nisto uma inversão de causa e consequência, porque as habilidades específicas de laboratório servem apenas como um meio para a execução dos experimentos, e não como um fim em si mesmas. Assim, elas deveriam ser ensinadas com o intuito de permitir que os estudantes se engajem nas atividades de modo proveitoso. Além disso, para eles é improvável que tais habilidades sejam úteis no cotidiano ou que possam ser transferidas para outras atividades experimentais. Millar (1991) concorda com essa visão, mas ressalta que realmente há conhecimentos importantes, aprendidos através das atividades experimentais, que podem ajudar qualquer cidadão a se relacionar melhor com objetos tecnológicos e a lidar com problemas práticos do cotidiano.

Hodson (1994), Gil Perez et al. (1999) e Borges (2002) destacam que muitos professores acreditam erroneamente no laboratório como uma oportunidade para que os alunos adquiram atitudes científicas e aprendam "o método científico". Para tais professores, as medidas efetuadas numa atividade prática prescindem de qualquer hipótese a priori e, portanto, teorias e leis poderiam ser inferidas das evidências empíricas. Neste sentido, o laboratório permitiria que os estudantes aprendessem como as ciências são construídas a partir de um discurso imparcial sobre a natureza. Borges (2002) chama esta concepção de "indutivismo ingênuo" (nomenclatura emprestada de Chalmers, 1993) e, assim como Moreira e Ostermann (1993), nos lembra que os filósofos da ciência descartam a existência de um único método científico algorítmico e infalível. Hodson (1994) também discorda desta concepção e oferece como contra-argumento a frequente atitude que os próprios estudantes exibem durante os experimentos: a manipulação dos dados em busca de respostas corretas já indica a parcialidade de suas observações. Borges (2002) e Hodson

(1994) enfatizam que não existem observações livres de ideias pré-concebidas e destacam ainda que a crença neste indutivismo ignora as concepções dos estudantes a respeito da natureza levantadas por muitos anos de pesquisas em ensino de ciências e que, devemos lembrar, quase sempre se mostram muito resistentes a mudanças estruturais de longo prazo.

Maltese et al. (2010) apontam que há professores de Física que acreditam que os laboratórios servem como confirmação dos conteúdos ensinados nas aulas teóricas. Hodson (1994), Borges (2002), Hofstein e Lunetta (2004), Saraiva-Neves, Caballero e Moreira, (2006) criticam a crença de que os laboratórios, por si só, permitem que os estudantes conectem conceitos e teorias estudadas nas aulas e nos livros com as evidências empíricas. Em particular, Borges (2002) defende:

*"... a necessidade de atividades pré e pós laboratório, para que os estudantes explicitem suas ideias e expectativas, e discutam o significado de suas observações e interpretações. Antes de realizar a atividade prática, deve-se discutir com os estudantes a situação ou fenômeno que será tratado. Pode-se pedir que eles escrevam suas previsões sobre o que deve acontecer e justificá-las. Na fase pós-atividade, faz-se a discussão das observações, resultados e interpretações obtidos, tentando reconciliá-las com as previsões feitas." (p. 301)*

Um modo interessante de propor experimentos aos alunos foi organizado por White e Gunstone (1992) através das atividades de Previsão – Observação – Explicação (POE). Treagust et al. (2001) dá uma boa e sucinta explicação sobre como são construídas as atividades POE:

*"White e Gunstone (1992) têm promovido as atividades de previsão – observação - explicação (POE) como uma estratégia eficiente para trazer à tona as ideias dos estudantes e também para promover entre eles a discussão sobre estas ideias. A atividade POE é baseada no modelo clássico de pesquisa onde uma hipótese é declarada e razões são dadas para que elas sejam verdadeiras, os dados relevantes são coletados e os resultados são discutidos (White, 1988). Isto envolve a previsão dos estudantes a respeito do resultado de uma demonstração e a discussão das razões para as suas previsões; a observação da demonstração e, finalmente,*

*explicação das discrepâncias entre as previsões e as observações.” (Treagust et al., 2001, p. 590, tradução livre)*

Hodson (1994) acredita que as atividades experimentais não são necessariamente aquelas que ocorrem no âmbito do laboratório convencional, mas sim aquelas que se desenvolvem com a ampla participação dos estudantes através de experiências diretas. Hodson afirma que:

*“... qualquer método de aprendizagem que exija dos aprendizes que sejam **ativos** no lugar de passivos concorda com a ideia de que os estudantes aprendem melhor através da experiência direta, o que poderia ser descrito como ‘trabalho prático’. Neste sentido, o trabalho prático nem sempre necessita incluir atividades que se desenvolvam na bancada do laboratório” (p. 305, tradução livre).*

Millar (2004) apresentou uma concepção semelhante a esta ao estudar o papel do trabalho prático no ensino-aprendizagem das ciências:

*“... ‘trabalho prático’ significa qualquer atividade de ensino e aprendizagem que envolva de algum modo estudantes observando e manipulando objetos reais e materiais. O termo ‘trabalho prático’ é preferido em relação a ‘trabalho de laboratório’ porque a localização não é o aspecto notável que caracteriza este tipo de atividade. A observação ou manipulação de objetos poderia ter lugar no laboratório da escola, ou em um lugar fora do ambiente escolar, tal como a casa dos estudantes ou trabalhos de campo” (p. 2, tradução livre).*

Borges (2002) destaca ainda a falta de estrutura das escolas brasileiras como um dos fatores que dificultam a realização de atividades experimentais. Por outro lado, o autor também ressalta que é *“um equívoco corriqueiro confundir atividades práticas com a necessidade de um ambiente com equipamentos especiais para a realização de trabalhos experimentais”* (p. 294).

Diferente dos estudos teóricos relacionados acima, Maltese et al. (2010) apresentaram um raro exemplo de pesquisa baseada em argumentos quantitativos para avaliar o impacto das atividades experimentais sobre o aprendizado dos estudantes ou, pelo menos, sobre a melhoria de suas notas nos cursos de Física. Algumas conclusões deste estudo reforçam as críticas

apontadas pelos autores citados, mas outras entram em conflito com parte de seus argumentos.

Maltese et al. (2010) acompanharam a transição de cerca de 1700 estudantes do último ano do ensino médio para diferentes instituições de ensino superior dos EUA, nas quais eles cursaram disciplinas de Física introdutória. O estudo examinou a relação entre as atividades de laboratório que realizaram em suas escolas de origem e as notas obtidas nos cursos superiores.

Os autores verificaram que, apesar dos estudantes participarem de uma quantidade razoável de laboratórios (45% tiveram ao menos 3 laboratórios por mês), 35% deles declararam que tinham pouco ou nenhum domínio dos conteúdos antes da prática e, imediatamente após a sua realização, cerca de 80% disseram que os laboratórios exerceram pouca ou nenhuma ajuda ao tentar reforçar a compreensão dos conceitos da Física.

Estes percentuais são interpretados pelos pesquisadores como uma falta de integração entre as discussões em sala e as aulas práticas. Esta hipótese ganha força quando cerca de 70% dos estudantes declararam que as discussões das atividades após o término dos laboratórios duram menos de 10 minutos. Cerca de 90% dos estudantes também declararam que raramente ou nunca repetiam as atividades práticas com o intuito de reforçar sua compreensão.

Surpreendentemente, os autores não encontraram qualquer relação significativa entre a quantidade de tempo dedicada às atividades de laboratório e as notas obtidas pelos estudantes nos exames. Também não houve relação aparente entre o tempo de discussão após o encerramento das atividades experimentais e as notas alcançadas. Por último, não houve relação entre o tempo gasto na construção dos relatórios e as notas.

Em princípio, essas conclusões parecem contrariar as ideias de Borges (2002). Como citamos anteriormente, este autor defende o aumento das discussões antes e depois das atividades com o intuito de facilitar a compreensão dos conceitos trabalhados.

Por outro lado, o estudo mostrou estatisticamente que, quando as atividades de laboratório foram dirigidas às crenças que os estudantes têm sobre o mundo natural, o impacto sobre suas notas foi positivo. Isto é, aparentemente, quanto maior é a relação dos laboratórios com os interesses e curiosidades dos estudantes sobre a natureza, maiores são as notas alcançadas. Infelizmente, cerca de 50% dos estudantes declararam que seus laboratórios raramente ou nunca se concentraram em atividades com este perfil. Segundo Maltese et al. (2010), de fato, a maior parte dos laboratórios dirigiu os alunos para o aprendizado de procedimentos estéreis e repetitivos e não para a construção de significados a partir de experiências concretas.

## Capítulo 3

### Quatro experimentos em ondas mecânicas

No capítulo anterior, examinamos alguns estudos e opiniões sobre o papel dos experimentos no ensino da Física. Como vimos, embora estes sejam considerados importantes, sua contribuição para o aprendizado dos estudantes não está totalmente compreendida.

Ideias tão simples como aumentar as discussões sobre as atividades antes e depois dos experimentos, e estimular a construção de relatórios parecem, em princípio, contribuir para a compreensão dos conceitos da Física. Contudo, elas estão em aparente conflito com os resultados de investigações recentes (Maltese et al., 2010). Ao que parece, a atividade experimental, ainda que bem preparada e executada, não causa impacto significativo na aprendizagem se não for dirigida às crenças e interesses que os estudantes têm sobre o mundo físico.

É possível encontrar exemplos de experimentos didáticos capazes de despertar o interesse dos estudantes. Muitos deles podem ser realizados em qualquer sala da aula ou até mesmo em casa. LoPresto (2006, 2007, 2008b), Courtney (2006, 2008) e Dias (2009), por exemplo, propuseram experimentos deste tipo sobre ondas sonoras. Eles usaram computadores, placas de som, caixas acústicas e microfones de PC no lugar de cronômetros, osciloscópios e geradores de frequência. O uso do computador viabilizou a tomada de dados com boa precisão sem a necessidade de equipamentos custosos. Essa característica é importante, especialmente porque boa parte das escolas brasileiras sequer possui um laboratório de ciências.

Nos capítulos que se seguem também propomos experimentos que podem ser reproduzidos com facilidade numa sala de aula comum por professores e alunos. Os temas escolhidos procuram abordar aspectos importantes da física ondulatória que são pouco explorados nos laboratórios tradicionais: a relação entre a onda sonora e aquilo que escutamos, a decomposição espectral de sons, o efeito Doppler, e as ondas na superfície da água. Também procuramos



escolher experimentos que despertassem o interesse dos estudantes, envolvendo atividades com instrumentos musicais, futebol, *Google Earth*, etc.

O primeiro experimento, descrito no capítulo 4, é inspirado nas dificuldades que os alunos têm para relacionar as ondas sonoras ao som que escutam. Segundo Linder (1992), os estudantes geralmente não interpretam adequadamente as múltiplas descrições de uma onda sonora. Eles não fazem, por exemplo, distinção entre as representações da onda sonora como onda de pressão ou onda de deslocamento, não reconhecendo a diferença de fase de  $90^\circ$  entre essas descrições. Isso leva muitos estudantes a não serem capazes de reconhecer onde existe som audível no interior de um tubo ressonante, mesmo quando conseguem calcular corretamente suas ondas estacionárias. Nós verificamos a extensão dessas dificuldades através de questionários, respondidos por cerca de 230 alunos do ensino médio e superior. A maior parte não conseguiu estabelecer uma relação apropriada entre a onda sonora e a audição.

O experimento proposto consiste no mapeamento da intensidade sonora em um tubo ressonante, usando apenas um computador com caixa de som e microfone. Os estudantes podem identificar claramente os nós e ventres do padrão sonoro no interior do tubo, e determinam com facilidade se estes estão associados ao deslocamento ou à pressão do ar.

No capítulo 5 descrevemos um experimento sobre a composição espectral do som de cordas vibrantes e de tubos sonoros. O objetivo foi dar aos estudantes uma visão de como som gerado por esses sistemas pode ser entendido como uma superposição de ondas harmônicas, cujas frequências são dadas pelas frequências de ressonância. O experimento mostra que a análise espectral pode ser facilmente incorporada aos currículos do ensino médio. A ausência desse tópico nos cursos introdutórios de física contrasta com sua importância e utilidade. A ideia de que uma onda sonora (ou qualquer outra) pode ser descrita como uma superposição de ondas harmônicas é essencial para o entendimento de vários fenômenos e têm inúmeras aplicações práticas. A omissão desse tema no ensino médio poderia ser justificada pela dificuldade matemática associada à análise de Fourier. Entretanto, uma

compreensão conceitual da composição espectral pode ser obtida de maneira bastante satisfatória sem o recurso explícito a ferramentas matemáticas sofisticadas. Existem programas de computador que fazem a análise espectral de ondas sonoras e apresentam os resultados em formatos gráficos muito fáceis de interpretar. Com auxílio desses programas, não é necessário apresentar aos alunos um formalismo matemático complexo para discutir os conceitos básicos da decomposição espectral e, principalmente, aplicá-los a situações práticas. No experimento que propomos, um dos sons analisados é o de uma corda de violão, o que atrai a atenção de muitos alunos e permite introduzir o conceito de timbre dos instrumentos musicais.

Nos cursos superiores a análise espectral é um tema padrão, embora considerado difícil, tanto que poucas vezes é abordado nas disciplinas de física básica. Curiosamente, não encontramos em nosso levantamento bibliográfico qualquer discussão a respeito das dificuldades que os alunos encontram na aprendizagem desse tópico.

No capítulo 6 apresentamos uma medida da velocidade de uma bola de futebol através do efeito Doppler. No ensino médio esse efeito é muitas vezes ignorado e, quando isso não ocorre, é geralmente apresentado sem qualquer sustentação empírica que não seja a lembrança do som de uma ambulância ao passar próximo de um observador. Novamente, isso não é compatível com a importância científica e prática do fenômeno.

A atividade descrita no capítulo 6 foi criada juntamente com estudantes do Colégio Pedro II a partir de uma variação do experimento proposto por Dias (2009). O experimento mostra que o efeito Doppler pode ser estudado com equipamentos relativamente simples em contextos divertidos e atraentes para os estudantes.

O capítulo 7 apresenta um experimento onde medimos a velocidade de uma embarcação a partir das ondas que ela produz na superfície da água. Tais ondas são registradas em fotos aéreas e podem ser facilmente encontradas nas imagens fornecidas pelo *Google Earth*, um programa muito popular entre os estudantes.

O experimento é um bom exemplo de como as ondas na água podem ser úteis no ensino de física ondulatória. Afinal, elas provavelmente são as primeiras ondas que uma pessoa lembra ao ouvir a palavra “onda”. De fato, as ondas de superfície são interessantes pedagogicamente não apenas por serem familiares, mas porque, ao contrário do som, são visíveis. Além disso, as ondas na água exibem dispersão e, vale a pena destacar, neste caso o tratamento analítico é bem mais simples que o da dispersão de ondas eletromagnéticas. O estudo deste aspecto seria particularmente interessante nos cursos introdutórios de física ondulatória do ensino superior.

Enfatizamos que uma característica comum aos quatro experimentos que apresentamos nesta dissertação é a de abordar problemas pouco explorados tanto nas salas de aula quanto na literatura sobre ensino de Física. Outro ponto que pode ser destacado é de que os experimentos exigem apenas equipamentos e materiais fáceis de encontrar em escolas e, eventualmente, podem até ser executados pelos próprios alunos em casa. Esta característica está de acordo com as ideias de Hodson (1994), Borges (2002) e Millar (2004), segundo as quais um experimento não é definido como tal por ser realizado num ambiente específico, mas sim por ser realizado através de experiências diretas, que envolvem a participação dos estudantes em trabalhos práticos de casa, de campo e, até mesmo, dentro de um laboratório de Física. Finalmente, a ideia de que as atividades de laboratório devem, sempre que possível, se dirigir às crenças e curiosidade dos estudantes sobre a Natureza (Maltese et al., 2010), também inspirou a construção dos experimentos que propusemos.

Nos apêndices deste trabalho sugerimos sequências de ensino-aprendizagem onde mesclamos a abordagem teórica das ondas mecânicas com os experimentos propostos. Em cada um dessas sequências, procuramos conduzir os alunos até uma situação limite onde só através de um experimento eles poderão chegar a uma resposta conclusiva sobre o problema físico apresentado. Assim, de modo semelhante a uma atividade POE (White e Gunstone, 1992; Treagust et al., 2001; Borges e Leboeuf, 2002), os estudantes são instigados a formular hipóteses, realizar experimentos e comparar suas previsões e conclusões.

## Capítulo 4

### Observando ondas sonoras

#### 4.1 Dificuldades na compreensão das ondas sonoras

Como apontamos no capítulo 2, as dificuldades encontradas por estudantes na aprendizagem de ondas mecânicas vêm sendo investigadas há muitos anos (Maurines, 1992; Viennot, 2001; Wittmann, 1999; Wittmann, 2002; Fazio, 2008). Esses estudos mostraram que os alunos tendem a associar a propagação de ondas em um meio ao movimento de objetos materiais através desse meio – uma ideia que, apesar de intuitiva, não está de acordo com fatos empíricos e dificulta a compreensão de descrições corretas dos fenômenos ondulatórios. Essa **objetificação** do movimento ondulatório é adotada pelos estudantes mesmo em situações que podem ser diretamente visualizadas, como as ondas em cordas tensionadas.

Ondas sonoras introduzem um novo patamar de dificuldade nesse quadro já complicado (Linder, 1992). Um dos problemas que surgem é que ondas sonoras são invisíveis. Apesar de estarmos permanentemente expostos a elas, é difícil formular imagens apropriadas sobre sua natureza e comportamento (Taber, 2009). Demonstrações com tubos de Kundt (Saab, 2005), tubos de chamas (Baratto, 1998), análogos mecânicos (Piubelli, 2010) ou simulações computacionais (Barroso, 2005) podem ajudar no processo de conceitualização mas, ainda assim, muitos aspectos importantes da física do som costumam permanecer obscuros. Exemplo disso é o papel desempenhado pelas diferentes grandezas físicas que estão associadas a uma onda sonora. A perturbação criada pela passagem do som gera variações na posição (média) das moléculas do ar, o que, por sua vez, acarreta mudanças na pressão, densidade e temperatura. A relação entre essas grandezas não é simples: há uma diferença de fase de  $90^\circ$  entre o deslocamento das moléculas e a variação da pressão do ar (e da densidade e temperatura). Esse resultado pouco intuitivo é a fonte de muitas dificuldades encontradas pelos alunos no estudo

de ondas sonoras, e responde por parte dos erros que eles cometem ao aplicar o que aprenderam a situações reais. Curiosamente, não há na literatura recente investigações sobre a extensão dessas dificuldades e propostas para superá-las. O trabalho descrito neste capítulo é uma tentativa nesse sentido, e está organizado da seguinte maneira. Na seção 4.2 discutiremos a relação que existe entre a pressão e o deslocamento do ar em uma onda sonora, e mostraremos que a pouca atenção dada a essa relação traz sérias dificuldades à compreensão de sistemas acústicos elementares como, por exemplo, os tubos ressonantes. Na seção 4.3 descrevemos um experimento simples que permite mapear as ondas sonoras no interior desses tubos. Os resultados do experimento apresentam a onda sonora de uma forma visual com grande apelo intuitivo. As medidas também esclarecem os diferentes papéis desempenhados pela pressão e deslocamento sonoros, em particular sua relação com o sentido da audição. Na seção 4.4 apresentamos uma discussão sobre a percepção de diferentes grupos de estudantes a respeito das ondas sonoras após o período de instrução formal. Na seção 4.5 traçamos conclusões a respeito deste capítulo.

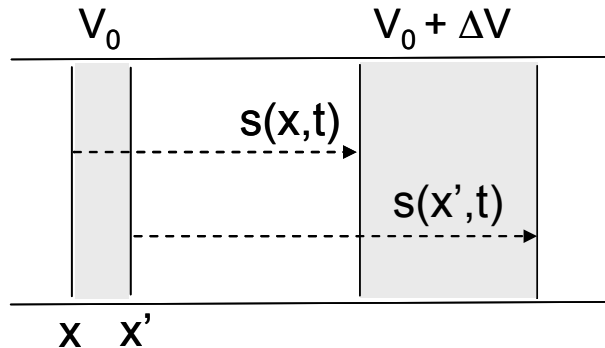
## 4.2 Pressão e deslocamento do ar numa onda sonora: o nó da questão

Uma onda sonora coloca em movimento o ar por onde ela passa. A perturbação causada pela onda pode ser descrita, em um dado instante  $t$ , pelo deslocamento  $s(x,t)$  sofrido pelo ar que encontrava-se originalmente na posição  $x$  (por simplicidade vamos considerar uma situação unidimensional – a propagação do som em um tubo, por exemplo). Pontos distintos podem sofrer deslocamentos diferentes, fazendo com que o ar entre eles seja comprimido ou dilatado. A figura 1 mostra a mudança de volume do ar entre os pontos  $x$  e  $x'$ . É fácil ver que ela é dada por

$$\Delta V = V_0 \frac{s(x',t) - s(x,t)}{x' - x} \quad (4.1)$$

e, se  $x'$  for suficientemente próximo a  $x$ ,

$$\Delta V = V_0 \frac{\partial s(x,t)}{\partial x} . \quad (4.2)$$



**Figura 4.1** Mudança de volume do ar devido à passagem de uma onda sonora.

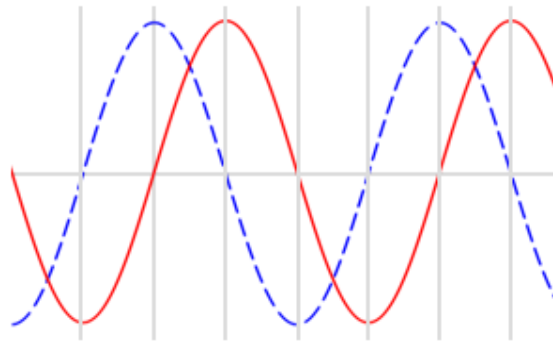
Mudanças de volume causam variações na pressão do ar. A propagação do som é um processo adiabático, de modo que a mudança na pressão pode ser escrita em função de  $\Delta V$  como

$$\Delta P = -\gamma P_0 \frac{\Delta V}{V_0} , \quad (4.3)$$

onde  $\gamma$  é o índice adiabático do ar e  $P_0$  a pressão atmosférica. Juntando as equações (4.2) e (4.3) obtemos

$$\Delta P(x,t) = -\gamma P_0 \frac{\partial s(x,t)}{\partial x} , \quad (4.4)$$

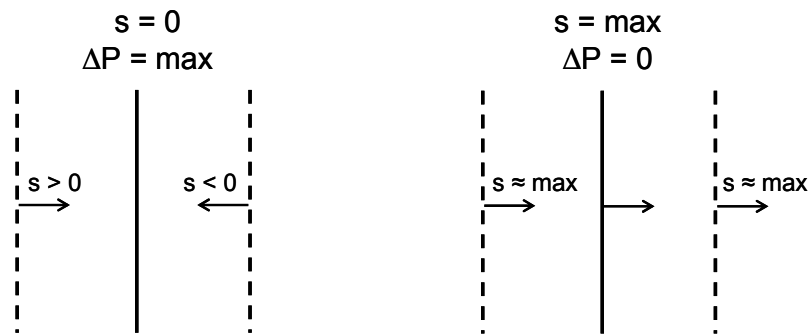
que é a relação entre o deslocamento do ar e a pressão em uma onda sonora. É importante notar que essa relação envolve uma derivada. Em uma onda senoidal (uma nota “pura”), isso significa que deslocamento e pressão estão  $90^\circ$  fora de fase: quando um é máximo (ou mínimo), o outro é zero. Em outras palavras, uma onda de pressão descrita por uma função seno corresponde a uma onda de deslocamento dada pela função cosseno, como indica a figura 4.2.



**Figura 4.2** Diferença de fase de  $90^\circ$  entre o deslocamento médio das moléculas (linha tracejada) e a pressão do ar (linha cheia). O ventre de uma função corresponde a um nó da outra.

A linguagem matemática da discussão acima provavelmente a torna pouco transparente para muitos estudantes. Entretanto, o resultado final pode ser entendido de maneira bastante simples. O argumento está delineado na figura 4.3, que mostra a perturbação que o som produz no ar em duas situações distintas. Na primeira, uma camada de ar tem deslocamento nulo ( $s = 0$ ) num certo instante. Para que isso ocorra, de um lado dessa camada o deslocamento deve ser positivo ( $s > 0$ ) e do outro lado ele deve ser negativo ( $s < 0$ ). Portanto, o ar próximo à camada com  $s = 0$  está sendo comprimido (ou distendido) com máxima eficiência pelo deslocamento das camadas adjacentes: a variação  $\Delta P$  da pressão é a maior possível nesse ponto.

A segunda situação, ainda na figura 4.3, corresponde a uma camada de ar que, num certo instante, tem o maior deslocamento que a onda pode produzir ( $s$  máximo). Nesse caso, as camadas vizinhas têm deslocamentos muito semelhantes, e por isso o ar nessa região não sofre nem compressão nem rarefação ( $\Delta P = 0$ ). Esses resultados são a essência da relação entre pressão e deslocamento na onda sonora: onde a pressão é máxima/mínima o deslocamento é zero, e vice-versa.

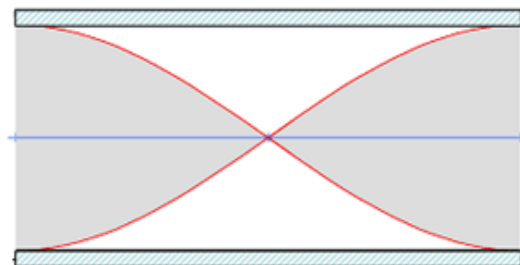


**Figura 4.3** Relação entre o deslocamento do ar e a variação da pressão: quando um é zero o outro é máximo (ou mínimo).

Poucos alunos parecem ter noção desse aspecto importante da física do som. Como destacamos anteriormente, Linder (1992) observou que, mesmo entre estudantes de física de nível superior, praticamente todos acreditam que pressão e deslocamento estão em fase numa onda sonora (ideia que ele atribui a um “aristotelismo visceral” por parte dos alunos).

Esse erro não é um deslize irrelevante, que pode ser cometido sem afetar situações de interesse prático; algumas das aplicações mais corriqueiras da física do som dependem de um bom entendimento da relação entre deslocamento e pressão. Um caso típico é o da ressonância em tubos sonoros.

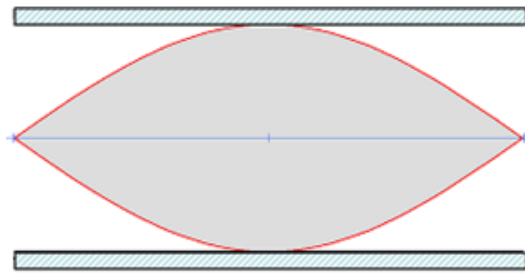
A figura 4.4 mostra a onda sonora de menor frequência (o “primeiro harmônico”) no interior de um tubo que tem as duas extremidades abertas. A região em cinza representa a amplitude do deslocamento do ar causado pela onda em cada ponto do tubo. O deslocamento é máximo nas extremidades do tubo e zero no ponto central.



**Figura 4.4** Onda de deslocamento correspondente ao primeiro harmônico em um tubo com extremidades abertas.



A mesma onda sonora pode ser representada pela variação da pressão, em vez do deslocamento. O resultado está na figura 4.5, onde a região cinza agora representa a amplitude da variação da pressão. À primeira vista, o que vemos na figura 4.5 parece contradizer a figura 4.4: a onda é “forte” no centro do tubo e se anula nas extremidades. Não há, é claro, nenhuma contradição – a diferença apenas reflete a defasagem de  $90^\circ$  entre o deslocamento e a pressão.



**Figura 4.5** Onda de pressão correspondente ao primeiro harmônico em um tubo com extremidades abertas.

A diferença marcante entre essas duas representações da onda pode gerar muita confusão entre os estudantes. Por exemplo, um aspecto básico da acústica é a relação da onda sonora com a sensação auditiva. Nosso ouvido é um sensor de pressão – essa é a quantidade associada à audição, não o deslocamento. A dificuldade em reconhecer a diferença entre deslocamento e pressão numa onda sonora complica qualquer tentativa de relacionar o som “calculado” pela teoria ondulatória ao som percebido por nossos ouvidos.

Os livros didáticos adotados no ensino médio brasileiro geralmente não abordam essas questões (ou o fazem com erros, como relacionar a sensação auditiva ao deslocamento e não à pressão sonora). Mesmo no ensino superior, onde os livros costumam discutir a diferença entre pressão e deslocamento sonoros, a relação dessas grandezas com a audição raramente é mencionada. Essa é, provavelmente, a principal razão (e não o “aristotelismo visceral” de Linder) que leva os estudantes a confundirem pressão e deslocamento: se a audição está indistintamente ligada a qualquer uma dessas grandezas, não há porque preocupar-se com a diferença entre elas.

É importante, portanto, desenvolver abordagens e materiais didáticos que tratem diretamente da relação entre a audição e a onda sonora. Na seção seguinte descreveremos um método que permite mapear com facilidade a intensidade sonora no interior de um tubo. Com ele é possível analisar visualmente o padrão sonoro de uma onda estacionária e determinar se nosso sentido auditivo está diretamente relacionado à pressão ou ao deslocamento do ar.

### 4.3 Mapeando o som num tubo ressonante

O aparato usado para mapear a onda sonora em um tubo está esquematizado na figura 4.6. Um computador é usado para produzir a onda sonora e, ao mesmo tempo, gravar o som no interior tubo. A geração da onda sonora é feita com uma caixa de som do tipo normalmente encontrado em PCs, colocada próxima a uma das extremidades do tubo. A frequência e amplitude do som produzido pela caixa podem ser ajustados com programas como o *SweepGen*<sup>1</sup>, disponível gratuitamente na internet. A gravação é realizada com um microfone de PC. É conveniente controlar a gravação com um programa que permita a visualização imediata dos resultados – nós utilizamos o *Audacity*<sup>2</sup>, um editor de áudio fácil de usar, gratuito e de ótima qualidade.

Uma vez pronta a montagem esquematizada na figura 4.6, a frequência do sinal enviado pelo computador à caixa de som é ajustada a uma das frequências de ressonância do tubo<sup>3</sup>. A onda estacionária produzida dentro do tubo é então mapeada com o microfone. Isso é feito iniciando a gravação no computador e fazendo o microfone percorrer o interior do tubo com velocidade constante. Um resultado típico desse procedimento está na figura 4.7, que mostra o padrão sonoro associado ao primeiro harmônico do tubo. O gráfico na figura descreve a intensidade do som registrada durante o percurso do

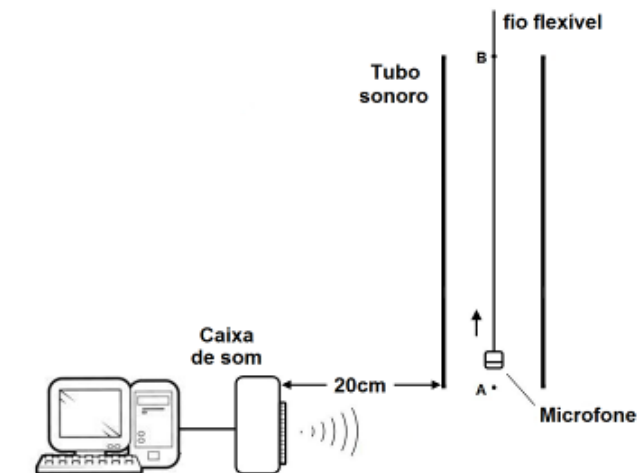
---

<sup>1</sup> SweepGen, disponível em 10/11/2010 no site: <http://www.satsignal.eu/software/audio.html>

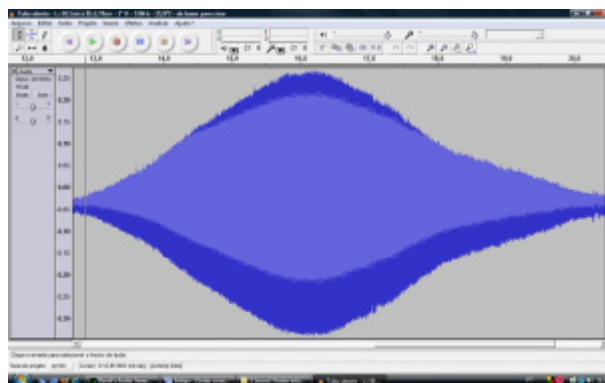
<sup>2</sup> Audacity, disponível em 10/11/2010 no site: <http://audacity.sourceforge.net>

<sup>3</sup> O tubo (de papelão) tinha 30,1 cm de comprimento e 3,8 cm de diâmetro. Sua frequência fundamental é de aproximadamente 536 Hz, a uma temperatura de 26°C.

microfone pelo interior do tubo. O início e o final da gravação correspondem aos instantes em que o microfone passou pelas extremidades do tubo.



**Figura 4.6** Esquema do experimento para mapear a intensidade sonora no interior de um tubo.

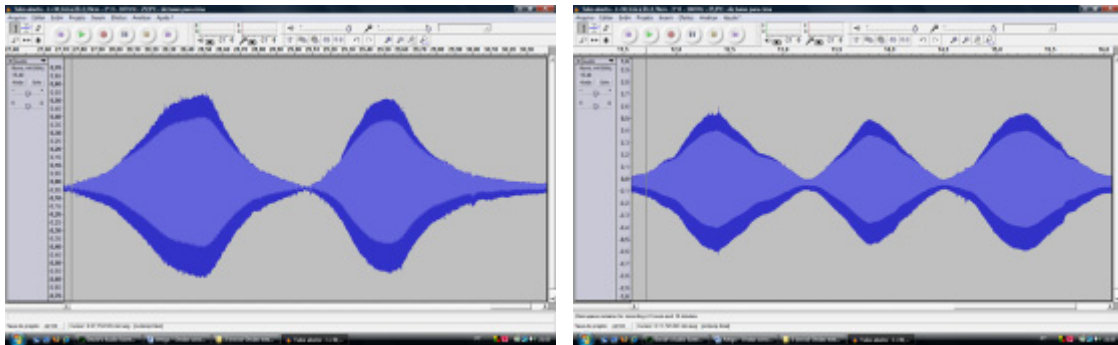


**Figura 4.7** Mapeamento do primeiro harmônico de um tubo sonoro. A intensidade sonora é alta no centro do tubo e próxima de zero nas extremidades abertas.

O deslocamento do microfone é realizado com velocidade constante, de modo que a figura 4.7 também pode ser lida como o gráfico da intensidade do som em função da posição no interior do tubo. Com essa interpretação, o resultado obtido pode ser comparado diretamente às figuras 4.4 e 4.5, que mostram o deslocamento e a pressão no primeiro harmônico. Vemos na figura 4.7 que o som é intenso no centro do tubo e praticamente se anula nas extremidades. Isso corresponde ao padrão espacial apresentado pela pressão (figura 4.5), não pelo deslocamento (figura 4.4).

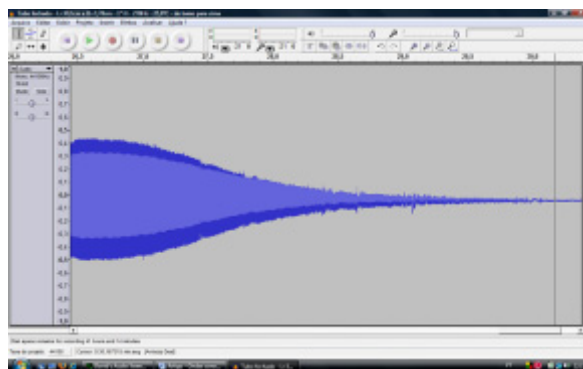
Essa observação resolve a questão de qual grandeza sonora está associada à audição: o que nossos ouvidos (e o microfone) detectam são as variações de pressão. É importante, no entanto, perceber que essa conclusão só faz sentido para comprimentos de onda maiores que as dimensões do sistema auditivo (ou do microfone). Para sons de alta frequência a situação é mais complexa, pois as variações espaciais do padrão sonoro podem ocorrer em escalas pequenas demais para serem notadas pelo ouvido ou microfone.

É possível estudar as outras ondas estacionárias do tubo com o mesmo procedimento – basta reajustar a frequência do som produzido pelo computador. A figura 4.8 mostra a intensidade sonora no segundo e terceiro modos ressonantes de um tubo com extremidades abertas.



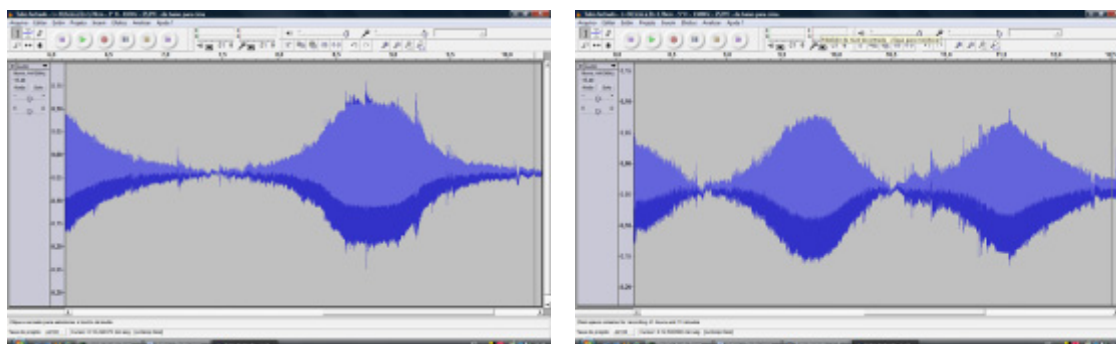
**Figura 4.8** Padrão sonoro do segundo e terceiro modos ressonantes de um tubo com extremidades abertas.

Podemos usar o mesmo método para estudar as ondas estacionárias em um tubo que tem uma das extremidades fechadas. O resultado correspondente ao modo fundamental de um desses tubos está na figura 4.9. A extremidade fechada, agora, é o ponto de maior intensidade sonora. Isso é uma consequência imediata da relação entre deslocamento e pressão: como o ar não pode passar pela extremidade fechada, o deslocamento é zero e a pressão é máxima nesse ponto.



**Figura 4.9** Padrão sonoro do primeiro harmônico de um tubo com uma extremidade fechada (à esquerda) e outra aberta (à direita).

A figura 4.10 mostra os padrões sonoros das duas primeiras ressonâncias acima do modo fundamental do tubo com uma extremidade fechada. Vemos que os comprimentos de onda são, respectivamente,  $1/3$  e  $1/5$  do comprimento de onda fundamental. Ou seja, esses modos ressonantes correspondem ao terceiro e quinto harmônicos; tubos com uma extremidade fechada não têm harmônicos pares.



**Figura 4.10** Padrão sonoro do segundo e terceiro modos ressonantes de um tubo com uma extremidade fechada (à esquerda) e outra aberta (à direita).

#### 4.4 Ondas sonoras e audição: as concepções dos estudantes

Nesta seção examinamos as concepções a respeito da relação entre ondas sonoras e o sentido da audição reveladas por estudantes após um período de instrução formal. Pesquisamos três diferentes grupos, dois deles formados por estudantes do ensino médio e um por estudantes universitários.

O grupo 1, formado por 107 estudantes da 3ª série do Colégio Pedro II estudou física ondulatória no primeiro trimestre de 2010. Nas etapas finais os alunos examinaram os modos normais da corda vibrante e dos tubos sonoros. Nenhuma atividade demonstrativa ou experimental foi realizada com este grupo.

O grupo 2 foi formado por 57 estudantes da Universidade Federal Fluminense (UFF), no Rio de Janeiro. Estes alunos cursavam Física (bacharelado e licenciatura) ou o ciclo básico de Engenharia no segundo semestre de 2010.

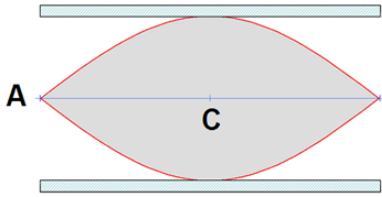
Formulamos duas diferentes versões de um questionário (figuras 4.11 e 4.12) para avaliarmos as concepções destes grupos sobre o som. Os estudantes de cada um deles receberam aproximadamente 50% de questionários I, explicitando a onda de pressão, e 50% de questionários II, com a onda de deslocamento.

O objetivo das perguntas foi avaliar se os estudantes são capazes de associar satisfatoriamente as duas representações de uma onda sonora com a intensidade do som audível.

O grupo 1 foi avaliado 4 meses após a instrução formal. O grupo 2, formado por estudantes universitários, cursava Física III (eletromagnetismo). Alguns dos integrantes desse grupo não haviam estudado física ondulatória na universidade, já que Física II, onde ondas mecânicas são abordadas, não é requisito obrigatório em todos os cursos.

**Questionário I**

O diagrama abaixo representa a **pressão do ar** no primeiro modo de vibração (1º harmônico) do som no interior de um tubo aberto.



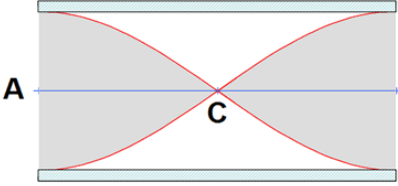
1. Ouvimos som no ponto A? (A) Sim. (B) Não.

2. Ouvimos som no ponto C? (A) Sim. (B) Não.

**Figura 4.11** Questionário I, com o modo fundamental da onda de pressão.

**Questionário II**

O diagrama abaixo representa o **deslocamento do ar** no primeiro modo de vibração (1° harmônico) do som no interior de um tubo aberto.



1. Ouvimos som no ponto A? (A) Sim. (B) Não.

2. Ouvimos som no ponto C? (A) Sim. (B) Não.

**Figura 4.12** Questionário II, com o modo fundamental da onda de deslocamento.

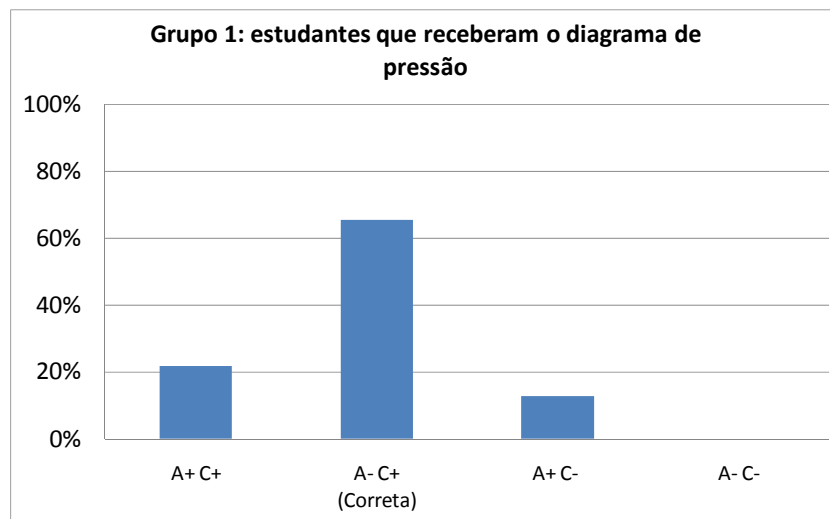
#### 4.4.1 Análise do grupo 1

Apresentamos na tabela 4.1 os resultados obtidos para o grupo 1. Nesta etapa, 55 estudantes receberam o questionário I, com a onda de pressão, e 52 estudantes receberam o questionário II, com a onda de deslocamento. Os símbolos  $A^+$  e  $C^+$  indicam que o aluno previu a existência de som audível nos pontos A e C respectivamente. De modo análogo,  $A^-$  e  $C^-$  indicam a previsão da ausência de som audível nestes mesmos pontos.

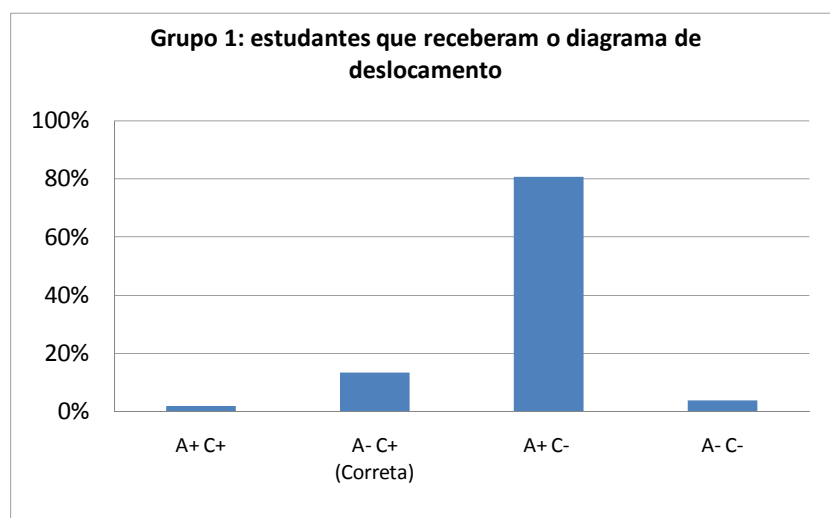
Grupo 1	Receberam o diagrama de pressão do questionário I.	Receberam o diagrama de deslocamento do questionário II.
Respostas	N (%)	N (%)
$A^+ C^+$	12 (22%)	1 (2%)
<b><math>A^- C^+</math> (Correta)</b>	<b>36 (65%)</b>	<b>7 (13%)</b>
$A^+ C^-$	7 (13%)	42 (81%)
$A^- C^-$	0 (0%)	2 (4%)
Total	55 (100%)	52 (100%)

**Tabela 4.1** Grupo 1: resultados dos questionários I e II aplicados aos estudantes de ensino médio que não realizaram o experimento do tubo sonoro.

Os histogramas das figuras 4.13 e 4.14 permitem uma comparação mais clara dos resultados da tabela 4.1. Entre os estudantes que receberam o diagrama de pressão, apenas 13% afirmaram que existe som audível em A e não em C. Entre os estudantes que receberam as questões com a onda de deslocamento, este percentual foi de 81%. Dos estudantes que receberam o diagrama de pressão, 65% disseram que não existe som audível no ponto A, mas que existe em C. Entre os estudantes que receberam a onda de deslocamento, este percentual foi de apenas 13%.



**Figura 4.13** Grupo 1: respostas para o questionário I (onda de pressão).



**Figura 4.14** Grupo 1: respostas para o questionário II (onda de deslocamento).



De acordo com esses dados, aparentemente a frequência das respostas dos estudantes está associada ao tipo de diagrama que observam. Isto é, eles tendem a associar o nó de um gráfico, qualquer que seja ele, com uma intensidade sonora nula. Reciprocamente, tendem a associar o ventre de um gráfico com uma intensidade sonora máxima. Em outras palavras, parece haver uma correlação entre nós e ventres dos diagramas com as respostas dadas.

A tabela 4.2 e o gráfico da figura 4.15 nos permitem examinar a correlação entre a resposta correta  $A^-C^+$ , a resposta inversa  $A^+C^-$  e os diagramas presentes nos questionários.

Grupo 1	Diagrama de pressão	Diagrama de deslocamento
$A^-C^+$ (Correta)	36	7
$A^+C^-$	7	42

**Tabela 4.2** Grupo 1: associação entre as respostas e o tipo de gráfico observado. As variáveis apresentaram coeficiente de correlação  $\Phi = 0,7$ .

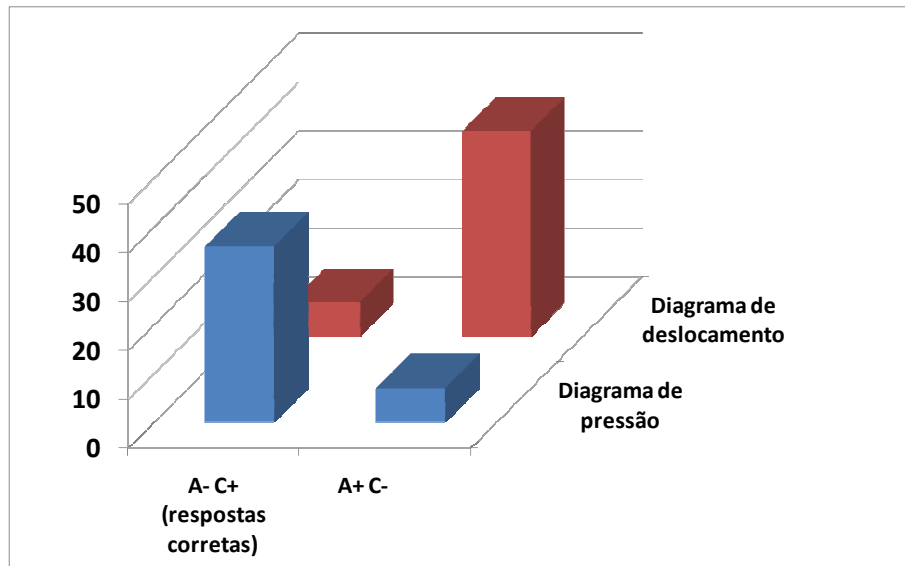
O grau de correlação entre duas variáveis binárias pode ser expresso através do coeficiente  $\Phi$  (Yule, 1912; Warrens, 1997). Num caso típico, como o exemplificado pela tabela 4.3,  $\Phi$  pode ser calculado pela expressão a seguir:

$$\Phi = \frac{ae - bd}{\sqrt{cfgh}} \quad (4.5)$$

	A+	A-	Total
B+	a	b	c
B-	d	e	f
Total	g	h	i

**Tabela 4.3** Exemplo hipotético de distribuição de duas variáveis binárias.

Em geral, podemos assumir que as variáveis A e B têm: (i) pouca ou nenhuma correlação quando  $|\Phi| < 0,3$ ; (ii) correlação fraca quando  $0,3 \leq |\Phi| < 0,7$ ; (iii) correlação forte quando  $0,7 \leq |\Phi| \leq 1,0$ .



**Figura 4.15** Grupo 1: associação entre as respostas e o tipo de gráfico observado.

Para o grupo 1, a tabela 4.2 nos permite calcular  $\Phi = 0,7$ . Assim, este parâmetro denota que o tipo de representação do som está fortemente correlacionado com os padrões de respostas obtidos. Diagramas de pressão estão associados às respostas corretas, o que, em princípio, é desejável. Contudo, diagramas de deslocamento estão fortemente associados às respostas erradas. Portanto, isto reforça o argumento de Linder (1995) segundo o qual os estudantes não relacionam correta e conscientemente a grandeza pressão com a intensidade do som audível, além disso, eles não percebem que diferentes grandezas podem caracterizá-lo de modos distintos.

Destacamos também que os 81% de incidência da resposta incorreta  $A^+C^-$  para o diagrama de deslocamento, é um pouco superior aos 65% de respostas corretas  $A^-C^+$  para o diagrama de pressão. Ou seja, apesar dos diagramas condicionarem as respostas dos estudantes, os histogramas 4.13 e 4.14 não são exatamente simétricos. Entretanto, é importante frisar que os estudantes do grupo 1 não haviam realizado qualquer discussão sobre dualidade da

representação do som como onda de pressão ou de deslocamento. Seus cursos abordaram os modos normais dos tubos sonoros apenas através de diagramas de deslocamento. Deste modo, é possível que os 22% de estudantes que receberam o questionário I e optaram pela resposta  $A^+C^+$ , o tenham feito porque tiveram dificuldades em aceitar a ideia contraintuitiva da inexistência de som nas extremidades abertas. Por este motivo, ao invés de simplesmente interpretarmos estas respostas como erros, elas de fato podem ser resultado de tentativas concretas dos alunos de compreenderem a intensidade do som audível nos tubos. Com isto, para o diagrama de pressão, os 22% da resposta  $A^+C^+$  juntamente com os 65% da resposta  $A^-C^+$  chegam a 87%, valor bastante próximo da incidência 81% da resposta  $A^+C^-$ , induzida pelo diagrama de deslocamento.

#### 4.4.2 Análise do grupo 2

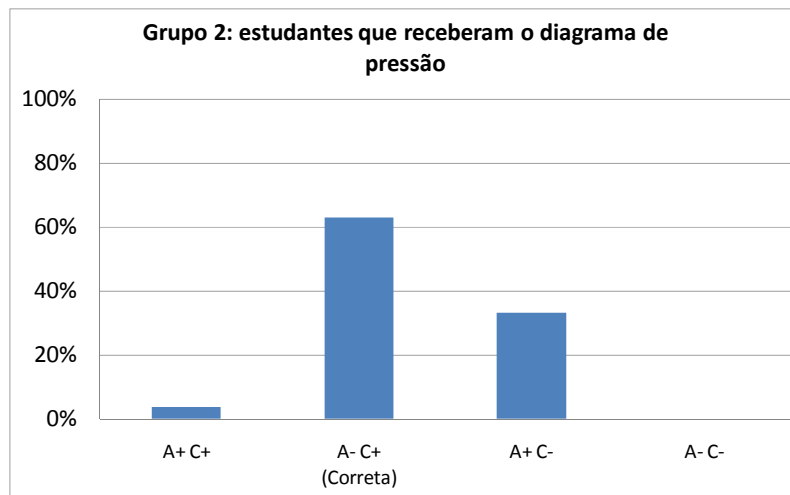
A tabela 4.4 abaixo mostra as respostas de 57 estudantes universitários para os questionários I e II; 27 deles receberam o diagrama de pressão, e 30 receberam o de deslocamento.

Grupo 2	Receberam o diagrama de pressão do questionário I.	Receberam o diagrama de deslocamento do questionário II.
Respostas	N (%)	N (%)
$A^+C^+$	1 (4%)	0 (0%)
<b><math>A^-C^+</math> (Correta)</b>	<b>17 (63%)</b>	<b>8 (27%)</b>
$A^+C^-$	9 (33%)	22 (73%)
$A^-C^-$	0 (0%)	0 (0%)
Total	27 (100%)	30 (100%)

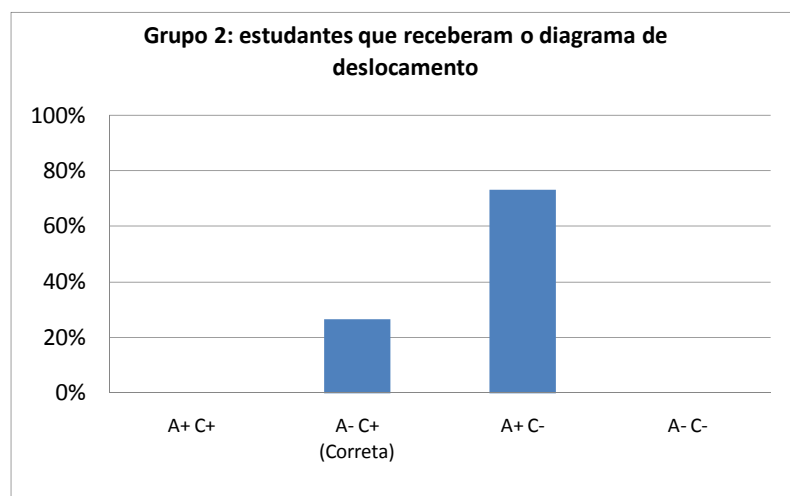
**Tabela 4.4** Grupo 2: resultados dos questionários I e II aplicados aos estudantes de Física (bacharelado e licenciatura) e Engenharia.

As respostas dos alunos estão representadas nas figuras 4.16 e 4.17 a seguir. Da comparação destes gráficos com as figuras 4.13 e 4.14, respectivamente, notamos a semelhança entre as taxas de erros e acertos dos grupos 1 e 2.

Dentre os que receberam a onda de pressão, apenas 33% apresentaram a resposta  $A^+C^-$ . Entre os que receberam a onda de deslocamento, o percentual chega a 73%. Cerca de 63% daqueles que receberam o diagrama de pressão marcaram a opção  $A^-C^+$ . Todavia, entre os que receberam o diagrama de deslocamento, este percentual só atingiu 27%.



**Figura 4.16** Grupo 2: respostas para o questionário I (onda de pressão).

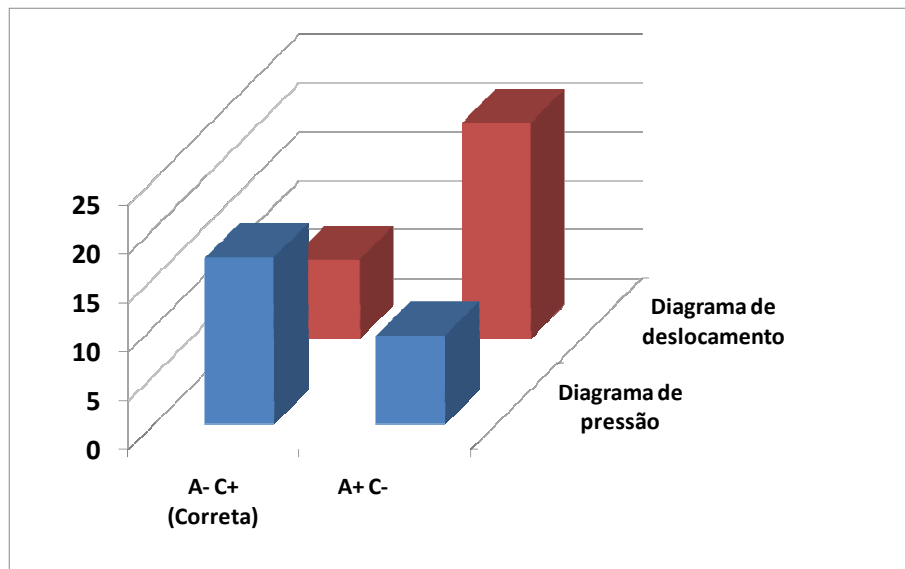


**Figura 4.17** Grupo 2: respostas para o questionário II (onda de deslocamento).

Destacamos as respostas mais frequentes do grupo 2 na tabela 4.5 e na figura 4.18. A partir delas, calculamos o coeficiente de correlação entre os gráficos dos questionários e as respostas dos alunos. Neste caso, obtemos  $\Phi = 0,4$ , indicando que existe uma correlação menos intensa que a apresentada pelo grupo 1 mas, ainda assim, significativa.

Grupo 2	Diagrama de pressão	Diagrama de deslocamento
A <sup>-</sup> C <sup>+</sup> (Correta)	17	8
A <sup>+</sup> C <sup>-</sup>	9	22

**Tabela 4.5** Grupo 2: associação entre as respostas e o tipo de gráfico observado. O coeficiente de correlação entre as variáveis foi  $\Phi = 0,4$ .



**Figura 4.18** Grupo 2: associação entre as respostas e o tipo de gráfico observado.

Ao analisarmos as respostas do grupo 2, notamos que um pequeno conjunto de 14 estudantes de engenharia destacou-se bastante dos demais: 64% (9 em 14) deles acertaram a resposta A<sup>-</sup>C<sup>+</sup>; para este subgrupo, o coeficiente de correlação foi aproximadamente nulo. Estes dados podem ser um indício de que seu curso de acústica discutiu o tema com especial atenção. Se esses estudantes forem retirados da amostra original do grupo 2, as frequências das

respostas se tornam mais próximas daquelas sugeridas pelos nós e ventres dos diagramas vistos nos questionários. E, deste modo, o coeficiente de correlação passa de 0,4 para 0,6, valor bem próximo daquele apresentado pelo grupo 1 ( $\Phi = 0,7$ ).

Nossos resultados indicam que os estudantes do ensino superior que examinamos, assim como os do ensino médio, têm dificuldades em relacionar a onda sonora com aquilo que ouvem.

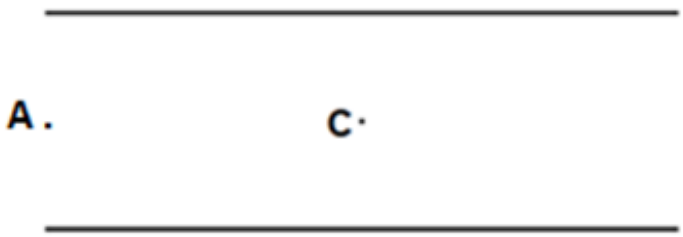
#### **4.4.3 Análise do grupo 3**

Analizamos a seguir a compreensão de um grupo de estudantes que realizou um curso de física ondulatória semelhante ao do grupo 1. Embora a mesma sequência didática tenha sido adotada, seu professor discutiu explicitamente a representação do som como onda de pressão e de deslocamento ao abordar os tubos sonoros. Além disso, a atividade experimental descrita neste capítulo foi realizada de modo demonstrativo.

Chamaremos esse conjunto de 71 estudantes de grupo 3. Assim como os do grupo 1, todos foram alunos da 3ª série do ensino médio no Colégio Pedro II em 2010.

A análise do grupo 3 foi um pouco mais detalhada que a dos grupos anteriores. Em primeiro lugar, através do questionário III (figura 4.19), solicitamos que os estudantes representassem livremente o primeiro modo de vibração de um tubo aberto. A seguir, pedimos que declarassem qual grandeza física foi esboçada e, assim como havíamos feito para os grupos 1 e 2, perguntamos em que pontos existe ou não som audível.

Após a resolução do questionário III, cada estudante recebeu um novo questionário: aqueles que espontaneamente desenharam o diagrama de deslocamento receberam o questionário I (figura 4.11), com o diagrama de pressão; inversamente, aqueles que desenharam o diagrama de pressão receberam o questionário II (figura 4.12), com a onda de deslocamento. Em seguida, novamente perguntamos em que pontos havia som audível.

<p><b>Questionário III</b></p> <p>1. Desenhe o primeiro modo de vibração (primeiro harmônico) do som no tubo aberto mostrado a seguir. O ponto A está na extremidade do tubo, e o ponto C está no meio dele.</p> <p style="text-align: center;">  </p>	
<p>2. Qual grandeza você representou no diagrama acima?</p> <p>(A) O deslocamento das partículas.          (B) A pressão do ar.          (C) O deslocamento das partículas e a pressão do ar.          (D) Outra. Qual? _____</p>	
3. Ouvimos som no ponto A?	(A) Sim.    (B) Não.
4. Ouvimos som no ponto C?	(A) Sim.    (B) Não.

**Figura 4.19** Questionário III: os estudantes desenham o modo fundamental no tubo aberto, identificam a grandeza representada no desenho e apontam os pontos onde é possível ouvir o som.

O objetivo desta estratégia foi identificar se estudantes do grupo 3, que realizaram uma discussão teórica e experimental sobre as diferentes representações do som, apresentavam uma compreensão adequada do modelo científico estudado. Além disso, desejamos saber se, diante de uma representação da onda sonora oposta àquela que escolheu inicialmente, os estudantes tenderiam a trocar suas respostas.

O grupo 3, assim como o grupo 1, foi avaliado cerca de quatro meses após o término do curso de acústica.

A tabela 4.6 abaixo mostra a frequência com que estes estudantes desenharam uma onda ou outra no tubo sonoro.

Pressão		Deslocamento		Total	
59	83%	12	17%	71	100%

**Tabela 4.6** Grupo 3: desenhos espontâneos para o primeiro modo normal.

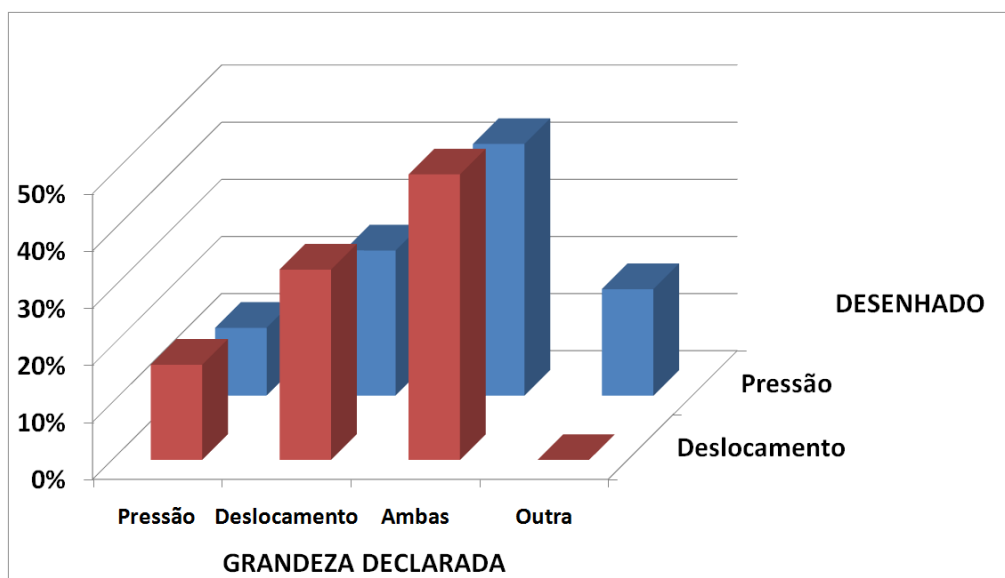
Esses resultados apontam que a memória em relação ao resultado do experimento foi muito acentuada. Cerca de 83% dos estudantes desenharam espontaneamente a onda de pressão, como a mapeada pelo experimento, e não a onda de deslocamento.

A tabela 4.7 e a figura 4.20 mostram a associação dos diagramas desenhados e as grandezas físicas declaradas na segunda pergunta do questionário III.

Grupo 3 Questionário III		Desenhos espontâneos		
		Pressão	Deslocamento	Total
		N (%)	N (%)	N (%)
Declararam	Pressão	<b>7 (12%)</b>	2 (17%)	9 (13%)
	Deslocamento	15 (25%)	<b>4 (33%)</b>	19 (27%)
	Ambas	26 (44%)	6 (50%)	32 (45%)
	Outra	11 (19%)	0 (0%)	11 (15%)
	Soma	59 (100%)	12 (100%)	71 (100%)

**Tabela 4.7** Grupo 3: associação entre os diagramas desenhados e as grandezas declaradas na segunda pergunta do questionário III.





**Figura 4.20** Grupo 3: associação entre os diagramas desenhados e as grandezas declaradas na segunda pergunta do questionário III.

Apesar da lembrança do experimento, poucos estudantes conseguiram relacionar o desenho com a grandeza física de modo correto: dentre os que desenharam o diagrama de pressão, apenas 12% o associaram à pressão do ar; dentre aqueles que desenharam o diagrama de deslocamento, 33% o associaram ao deslocamento das moléculas.

Cerca de 24% dos estudantes trocou a pressão por deslocamento ou vice-versa. Além disso, 45% responderam "ambas". Isto quer dizer que, apesar da discussão teórica anterior ao experimento, 69% do total da amostra não fez a distinção apropriada entre a pressão do ar e o deslocamento.

Aproximadamente 15% da amostra afirmou representar outra grandeza que não a pressão ou o deslocamento. Algumas dessas declarações foram: "onda de som", "onda (energia sonora)", "propagação do som", "frequência" e "deslocamento de energia".

Faremos agora a análise das respostas para a existência ou não de som audível na extremidade e no meio do tubo. A tabela 4.8 mostra as concepções dos estudantes que desenharam a onda de pressão. Ela mostra também a variação das respostas após o recebimento do questionário II, com a onda de deslocamento.

Diagrama de deslocamento (respostas estimuladas)	Diagrama de pressão (desenhado espontaneamente)				
	A <sup>+</sup> C <sup>+</sup>	A <sup>-</sup> C <sup>+</sup> (Correta)	A <sup>+</sup> C <sup>-</sup>	A <sup>-</sup> C <sup>-</sup>	Total
A <sup>+</sup> C <sup>+</sup>	0	0	2	0	2
A <sup>-</sup> C <sup>+</sup> (Correta)	2	3	4	0	9
A <sup>+</sup> C <sup>-</sup>	1	37	9	1	48
A <sup>-</sup> C <sup>-</sup>	0	0	0	0	0
Total	3	40	15	1	59

**Tabela 4.8** Grupo 3: respostas sobre a audição na extremidade aberta (ponto A) e no meio (ponto C) do tubo a partir dos diagramas de pressão desenhados espontaneamente. Observamos também as variações das respostas após as trocas dos questionários.

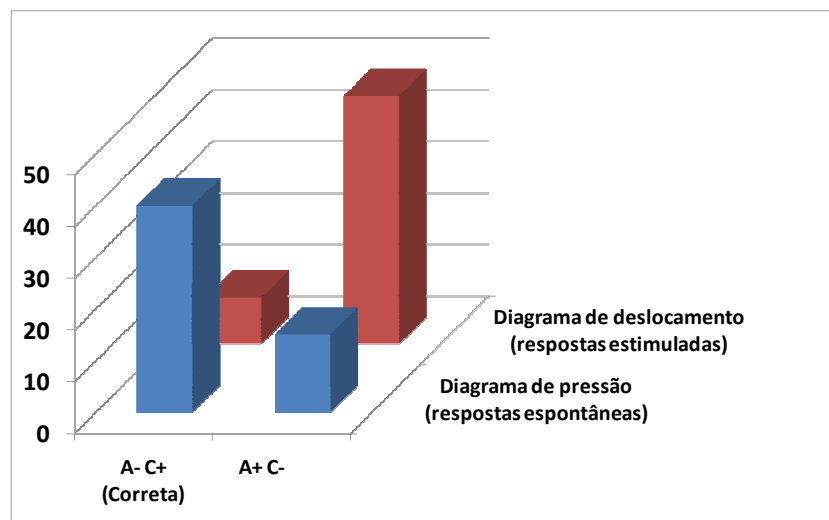
Os resultados mostram que, entre os estudantes que traçaram o diagrama de pressão para o primeiro harmônico do tubo, 68% (40 em 59) apresentaram uma resposta inicial correta para a posição onde existe som audível.

Apesar desse resultado favorável, assim como nos grupos 1 e 2, as respostas dos estudantes que desenharam a onda de pressão no grupo 3 também tenderam à inversão quando os questionários foram trocados. Dos 40 estudantes que acertaram a resposta inicialmente, 37 trocaram de opinião e marcaram a resposta inversa. Para testarmos a hipótese de que os nós dos gráficos sugerem zeros de audição, e os ventres sugerem pontos de audição máxima, destacamos na tabela 4.9 a frequência de respostas certas e erradas da tabela 4.8 e examinamos sua taxa de correlação.

Grupo 3	Onda de pressão	Onda de deslocamento
	Respostas espontâneas	Respostas estimuladas
A <sup>-</sup> C <sup>+</sup> (Correta)	40	9
A <sup>+</sup> C <sup>-</sup>	15	48

**Tabela 4.9** Grupo 3: variação das respostas dos estudantes que desenharam a onda de pressão ao serem provocados pela troca do questionário. O coeficiente de correlação entre as respostas e os gráficos foi  $\Phi = 0,6$ .

O gráfico da figura 4.21 mostra a variação das respostas mais claramente.



**Figura 4.21** Grupo 3: comparação das respostas dos estudantes que desenharam espontaneamente a onda de pressão com suas próprias respostas após a troca dos questionários.

Neste caso, o coeficiente de correlação foi  $\Phi = 0,6$ , indicando uma associação significativa entre estas respostas e os diagramas observados. Este fator foi ligeiramente inferior àquele observado para os estudantes do grupo 1 ( $\Phi = 0,7$ ), que não haviam realizado a atividade experimental.

A tabela 4.10 mostra as concepções a respeito da audição nos pontos A e C para os estudantes que desenharam espontaneamente a onda de

deslocamento. As variações das respostas, motivadas pela troca dos questionários, também são detalhadas.

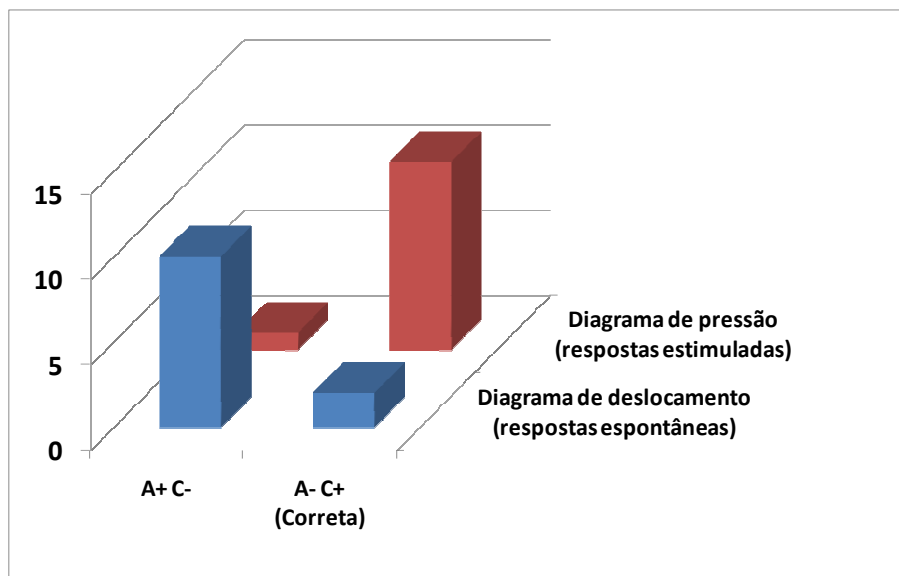
Diagrama de pressão (respostas estimuladas)	Diagrama de deslocamento (desenhado espontaneamente)				
	A <sup>+</sup> C <sup>+</sup>	A <sup>-</sup> C <sup>+</sup> (Correta)	A <sup>+</sup> C <sup>-</sup>	A <sup>-</sup> C <sup>-</sup>	Total
A <sup>+</sup> C <sup>+</sup>	0	0	0	0	0
A <sup>-</sup> C <sup>+</sup> (Correta)	0	1	10	0	11
A <sup>+</sup> C <sup>-</sup>	0	1	0	0	1
A <sup>-</sup> C <sup>-</sup>	0	0	0	0	0
Total	0	2	10	0	12

**Tabela 4.10** Grupo 3: respostas sobre a audição na extremidade aberta (ponto A) e no meio (ponto C) do tubo a partir dos diagramas de deslocamento desenhados espontaneamente. Observamos também as variações das respostas após as trocas dos questionários.

Entre os 12 estudantes que desenharam espontaneamente o diagrama de deslocamento, 10 apresentaram a resposta inicial incorreta A<sup>+</sup>C<sup>-</sup> e, após a troca dos questionários, mudaram para a correta A<sup>-</sup>C<sup>+</sup>. A tabela 4.11 e a figura 4.22 destacam estas inversões. Note que, neste caso, o coeficiente de correlação foi  $\Phi = 0,8$ , indicando uma associação acentuada entre os gráficos e as respostas obtidas.

Grupo 3	Onda de deslocamento	Onda de pressão
	Resposta espontânea	Respostas estimuladas
A <sup>+</sup> C <sup>-</sup>	10	1
A <sup>-</sup> C <sup>+</sup> (Correta)	2	11

**Tabela 4.11** Grupo 3: variação das respostas dos estudantes que desenharam a onda de deslocamento ao serem provocados pela troca do questionário. O coeficiente de correlação entre as respostas e os gráficos foi  $\Phi = 0,8$ .



**Figura 4.22** Grupo 3: comparação das respostas dos estudantes que desenharam espontaneamente a onda de deslocamento com suas próprias respostas após a troca dos questionários.

Como discutimos acima, a porcentagem de alunos que esboçou a onda de pressão e a relacionou corretamente com o sentido da audição foi bastante grande. Contudo, o problema da diferenciação entre as grandezas pressão e deslocamento está longe de ser simples. Ao avaliarmos a sequência completa de respostas dos estudantes do grupo 3, somente 4 deles (5,5%) foram capazes de desenhar o diagrama de pressão, responder corretamente  $A^-C^+$  para a intensidade do som audível e, em seguida, afirmar que a grandeza desenhada de fato se tratava da pressão. Ainda assim, estes 4 alunos inverteram suas respostas para  $A^+C^-$  quando o questionário foi trocado. Fato semelhante se deu com todos aqueles que desenharam o diagrama de deslocamento, isto é, nenhum deles apresentou a sequência completa de respostas corretas.

#### 4.5 Comentários e conclusões

O estudo das ondas estacionárias em tubos sonoros faz parte da maioria dos currículos introdutórios de física, tanto no ensino médio quanto no superior.

Apesar da grande exposição ao tema, muitos alunos terminam a instrução sem perceber aspectos fundamentais do fenômeno estudado. Um dos pontos problemáticos é como diferentes quantidades físicas envolvidas na onda sonora, em particular o deslocamento do ar e sua pressão, variam ao longo do tubo. A diferença de fase entre essas grandezas é fonte de confusões e erros.

Outra dificuldade diz respeito a qual dessas grandezas está relacionada diretamente ao sentido da audição. Esse não é um erro menor e sem grandes conseqüências. Saber em que condições podemos ou não escutar um som é, obviamente, um requisito importante em muitas aplicações práticas da acústica.

A junção desses problemas faz com que muitos alunos sejam incapazes de prever em que pontos do tubo se pode ouvir o som e em que lugares há silêncio. A maioria dos estudantes não percebe que diagramas de pressão e deslocamento devem ser diferentes, embora representem o mesmo fenômeno físico. Eles raciocinam apenas com base na ideia de que “grande amplitude” implica em sensação auditiva intensa, sem atentar para qual grandeza apresenta essa amplitude.

A atividade experimental que propomos descreve um método para, com auxílio de um gravador, mapear o som no interior de um tubo ressonante. Este mapeamento é bastante simples e tem exigências mínimas de material: apenas um computador com equipamento padrão de som (caixas e microfone), facilmente encontrado em quase todas as escolas.

O experimento fornece evidências que enriquecem as discussões com argumentos de forte apelo visual. Ele permite que os alunos comparem os resultados obtidos com modelos teóricos, e identifiquem qual grandeza física é registrada pelo microfone. Essa simplicidade de execução o torna especialmente atraente para o ensino médio, sobretudo porque não é fácil produzir experimentalmente representações deste tipo para um fenômeno invisível como o som. As dificuldades envolvidas na montagem de um tubo de chamas ou de Kundt (Cavalcante, 2004; Moran, 2007) são prova disso, e o experimento criado por Sinick e Lynch (2010) sobre os modos normais de ondas na água é uma rara e louvável exceção neste sentido.

Curiosamente, quase todos os livros didáticos desse nível de ensino abordam o som exclusivamente através do deslocamento das moléculas do ar e, deste modo, constroem diagramas em aparente contradição com os padrões de pressão que efetivamente respondem pela audição humana. Tão ou mais grave que isto é o fato de que, muitas vezes, os autores desses livros nem sequer têm a preocupação de caracterizar a onda sonora como a variação de alguma grandeza. Em outras palavras, a onda sonora é apresentada como uma "onda", sem que seja especificada qual grandeza está "ondulando".

Da análise do grupo 1, verificamos que a forte correlação encontrada entre os nós e a ausência de audição ao longo do tubo, e entre ventres e máximos de audição, revelam que estes estudantes têm pouca compreensão dos problemas levantados neste trabalho. Na verdade, isto pode ser uma evidência do fato deles não terem realizado qualquer discussão que associasse o(s) diagrama(s) da onda sonora com aquilo que podem ouvir. O que parece um contrassenso, em se tratando de um curso de acústica.

A mesma associação errada entre nós (ou ventres) e mínimos (ou máximos) de audição marcou também os membros do grupo 2. Neste caso a situação é mais grave porque se trata de futuros engenheiros, físicos e professores de Física.

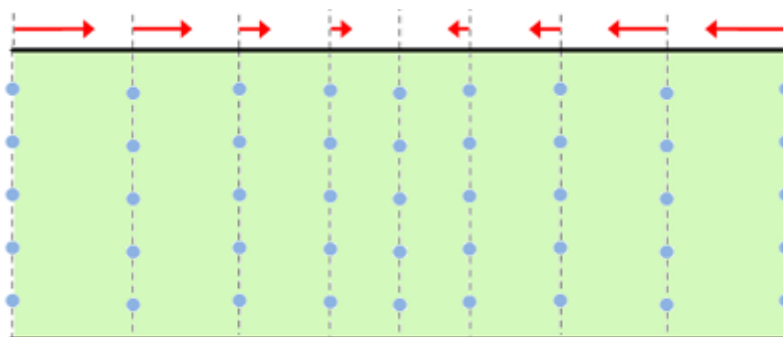
Em contrapartida, a alta taxa de respostas espontâneas corretas no grupo 3 revela que os estudantes relacionaram satisfatoriamente o diagrama de pressão com a audição, e também identificaram em quais pontos podem ouvir ou não o som. No entanto, a realização da atividade não teve sucesso no que diz respeito à associação entre os diagramas e as grandezas físicas correlatas.

Um dos fatores que provavelmente contribuiu para isso foi o fato do experimento ter sido realizado de modo demonstrativo pelo professor. Como discutido no capítulo 2, a participação dos estudantes em todas as etapas do experimento tende a contribuir significativamente para seu sucesso (Hodson, 1994; Borges, 2002; Hofstein e Lunetta, 2004).

No apêndice A deste trabalho propomos uma sequência de ensino-aprendizagem semelhante às atividades POE (previsão – observação – explicação; White e Gunstone, 1992). Segundo esta estratégia, os estudantes

devem fazer previsões sobre o objeto analisado, observações e/ou experimentações sobre seu comportamento e, por último, devem comparar suas previsões iniciais com os resultados obtidos, buscando explicar as divergências entre ambos.

A proposta do apêndice A é uma sugestão para o ensino das ondas sonoras estacionárias que incluiu a atividade experimental descrita. Ela tem início com uma abordagem teórica sobre a vibração do ar no primeiro harmônico que, como ilustra a figura 4.23, lembra a vibração do braço de uma sanfona. Contudo, sabemos que caracterizar simultaneamente duas grandezas físicas distintas a partir de uma imagem estática não é uma tarefa fácil para estudantes novatos. Assim, sugerimos que a discussão dos diagramas de deslocamento e pressão seja enriquecida com a utilização de um modelo dinâmico destas oscilações. Para isto, recomendamos o uso de dois vídeos sobre ondas estacionárias em tubo abertos e fechados. Ambos estão disponíveis no portal de vídeos YouTube<sup>4, 5</sup> e na página<sup>6</sup> do Mestrado Profissional em Ensino de Física, do Instituto de Física da UFRJ.



**Figura 4.23** Movimentação das moléculas do ar no primeiro harmônico do tubo aberto.

A discussão sobre os diferentes modos de representar o primeiro harmônico deve culminar na pergunta chave: onde podemos ouvir o som num tubo ressonante, no meio ou no extremo? E onde temos silêncio?

---

<sup>4</sup> Tubo aberto: [http://www.youtube.com/watch?v=xz3slGyRAj8&feature=mfu\\_in\\_order&list=UL](http://www.youtube.com/watch?v=xz3slGyRAj8&feature=mfu_in_order&list=UL)

<sup>5</sup> Tubo fechado: <http://www.youtube.com/watch?v=T5o-SAHdInI>

<sup>6</sup> [http://www.if.ufrj.br/~pef/producao\\_academica/material\\_didatico.html](http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/material_didatico.html)



Aliás, não é demais lembrar que a associação entre conceitos, teorias e representações do som com a audição deve ser um dos pontos centrais de um curso de acústica. Negligenciar isto é equivalente a não relacionar as imagens dos objetos ao sentido da visão no contexto da óptica geométrica.

As perguntas acima devem estabelecer em clima de "curiosidade científica" entre os alunos justamente porque os diagramas de pressão e deslocamento os induzem a respostas antagônicas. Elas os instigam a realizarem suas previsões pessoais sobre a intensidade do som audível.

Após essa primeira etapa, onde os estudantes verbalizam suas concepções, o experimento surge como uma possibilidade de resolução do conflito porque os permitem mapear o som no tubo por si mesmos – no apêndice B o professor encontra uma descrição sucinta apenas dos materiais utilizados e do procedimento experimental.

Por fim, os estudantes devem comparar suas previsões com os dados experimentais e, então, fazer interpretações adequadas segundo os modelos científicos discutidos. A evidência empírica da onda de pressão captada pelo microfone – uma espécie de ouvido artificial – deve funcionar como critério decisivo para a elucidação do problema. Além disso, todo esse percurso se aproxima mais do fazer científico real que a autoridade do livro didático.

É importante destacar que, com essa estratégia, a atividade experimental ganha um papel mais importante que aquele empregado pelo professor do grupo 3. Ela agora é determinante para a solução de uma questão interessante, não apenas mais uma atividade demonstrativa. Além disso, essa estratégia de ensino busca corrigir o ponto fraco verificado no grupo 3: a dificuldade dos estudantes associarem a evidência observacional com a grandeza física correta.

# Capítulo 5

## O som de cordas e tubos vibrantes

### 5.1 O ensino das cordas e tubos vibrantes

Discutimos ao longo de todo o capítulo 4 as dificuldades que os estudantes têm para compreender as diversas representações de uma onda sonora. Também discutimos como abordagens didáticas que não levam em conta estas dificuldades podem perpetuá-las.

No ensino médio, há pelo menos outro aspecto recorrente no ensino da acústica que prejudica o entendimento do tipo de som produzido por cordas vibrantes, tubos sonoros e instrumentos musicais em geral. O cálculo das frequências dos modos normais de vibração desses sistemas muitas vezes sequer é relacionado ao som que eles emitem. E quando isso ocorre, o mais comum é que o som seja apresentado como tendo uma única frequência, aquela do modo de vibração fundamental.

Isso não permite dar respostas adequadas a questões importantes. Que características têm o som produzido por uma corda ou por um tubo ao vibrar? Qual a diferença entre a nota Lá de um violão e a de uma flauta? Existe alguma razão para que uma corda ou tubo produza ondas sonoras exclusivamente no modo fundamental?

Estas perguntas não são simples, principalmente para os estudantes. Mesmo entre aqueles que estudam música, é possível que a maioria acredite que cada corda de um instrumento, quando tocada individualmente, só produza uma única frequência. Aliás, a própria nomenclatura utilizada em música reforça esta ideia. Ao batermos nas cordas de um violão, os sons ouvidos são chamados pelos nomes das notas de suas frequências fundamentais: Mi, Si, Sol, Ré, Lá e Mi.

Apresentamos a seguir um experimento com o qual podemos dar respostas a essas perguntas. O procedimento experimental está baseado na análise espectral de sons gravados com o auxílio de um computador comum. O

experimento permite que outros aspectos além dos levantados acima sejam discutidos, como o princípio da superposição e o timbre de diferentes instrumentos musicais.

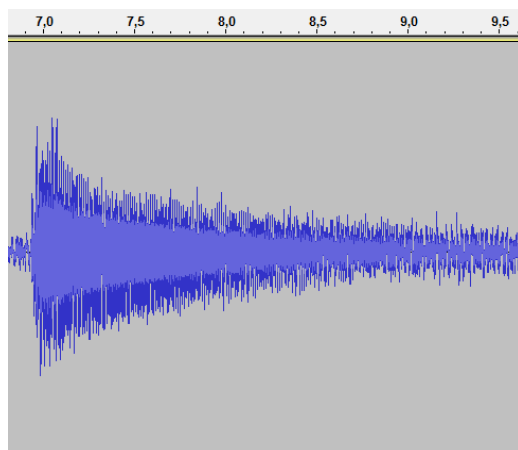
No apêndice C deste trabalho apresentamos uma proposta de atividade de ensino-aprendizagem, semelhante às atividades POE (previsão-observação-explicação; White e Gunstone, 1992), para as cordas vibrantes. O apêndice D traz uma descrição técnica sucinta dos experimentos deste capítulo.

## 5.2 Análise espectral

O estudo do teorema de Fourier não é essencial para a compreensão *conceitual* da análise espectral. Isto é, os estudantes podem apreender a ideia básica de que podemos decompor uma onda em componentes harmônicas, ainda que não tenham as ferramentas matemáticas do ensino superior.

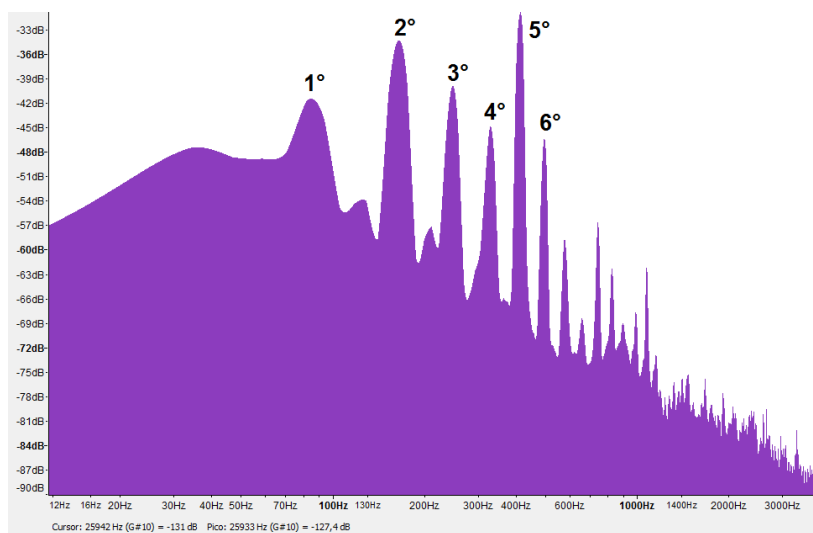
Diversos editores de som disponíveis na Internet, tal como o *Audacity*, citado no capítulo 4, por exemplo, possuem uma função específica capaz de realizar a análise do espectro de um som gravado. O uso desta ferramenta pode ser muito útil para o estudo da acústica. Além disso, assim como na atividade a respeito dos tubos sonoros, um computador portátil, um microfone e um alto-falante comuns podem substituir com praticidade e eficiência equipamentos sofisticados como osciloscópios e geradores de frequências, inalcançáveis para a maior parte das escolas.

A figura 5.1 nos mostra a gravação do som da 6ª corda solta de um violão, chamada de “mi bordão”. Esta corda emite a nota mais grave de todo o espectro sonoro do instrumento. Para um violão bem afinado, sua frequência deve estar próxima de 82,4Hz.

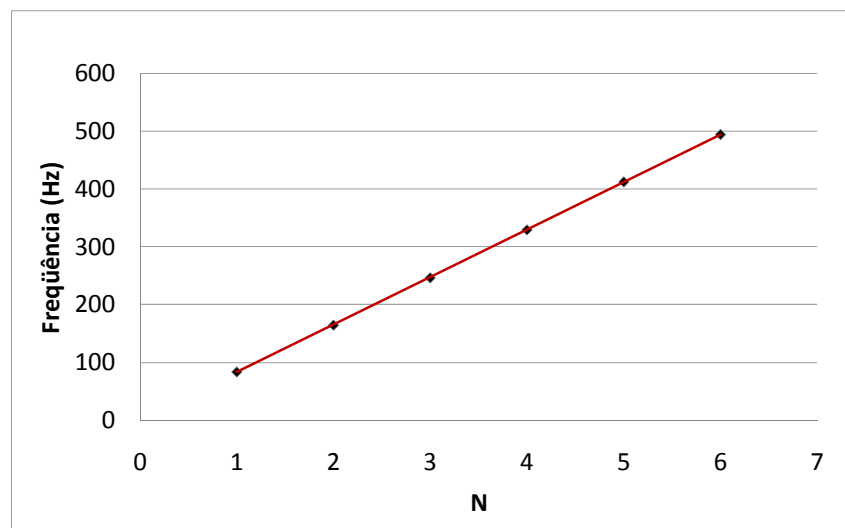


**Figura 5.1** Gravação do som emitido pela 6ª corda do violão.

A figura 5.2 mostra a análise espectral produzida pelo *Audacity*. O gráfico indica a intensidade da onda sonora em diferentes frequências. Os picos correspondem aos modos normais da corda vibrante. Seus valores podem ser lidos diretamente na tela do computador e, neste caso, são: 84, 165, 247, 330, 413, 495 Hz... A figura 5.3 mostra as frequências dos modos normais em função dos números naturais N.



**Figura 5.2** Análise espectral do som da 6ª corda de um violão.



**Figura 5.3** Corda vibrante: relação entre as frequências da análise espectral da figura 5.2 e os números naturais.

Para os alunos, este experimento permite várias conclusões. A primeira diz respeito ao fato de uma única corda, ao ser percutida uma única vez, ser capaz de produzir uma família de tons harmônicos sucessivos, e não apenas uma única frequência.

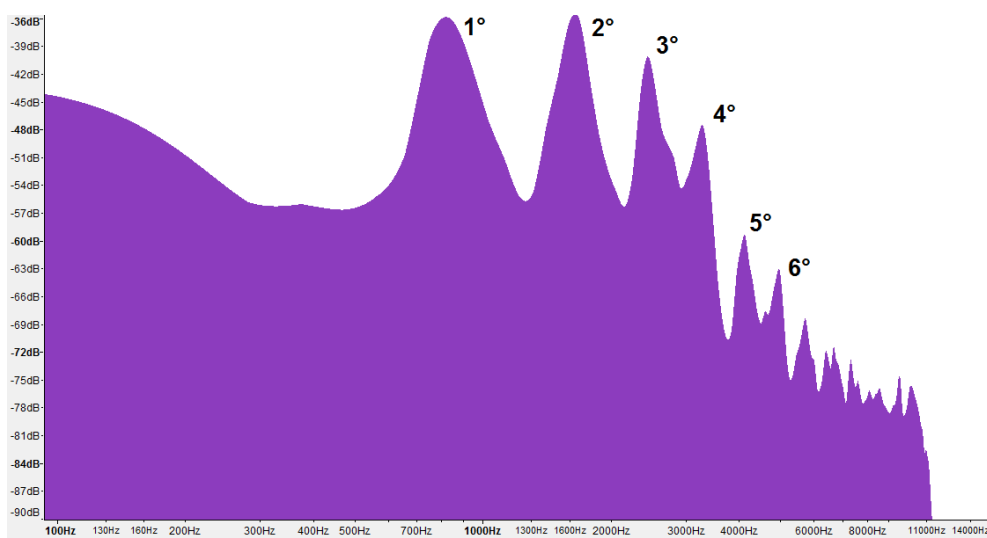
A segunda conclusão é a de que, com boa precisão, estes tons são proporcionais aos números naturais. Isto é, ao dividirmos os valores das frequências dos picos da figura 5.2 pela frequência fundamental de 84 Hz, obtemos: 1; 2,0; 2,9; 3,9; 4,9; 5,9... Este é exatamente o resultado previsto pelo cálculo das ondas estacionárias na corda.

Outra conclusão importante está relacionada ao conceito de timbre. De modo geral, diferentes instrumentos musicais distribuem de maneiras distintas a energia sonora entre os modos normais de vibração, o que caracteriza seu timbre. Aliás, devemos também notar que nem sempre a intensidade da frequência fundamental é dominante, como vemos na análise espectral da figura 5.2. Além disso, se a 6ª corda do violão acima fosse percutida com uma paleta ao invés dos dedos, ou numa posição diferente da primeira batida, é possível que as intensidades dos picos da figura 5.2 fossem ligeiramente alteradas. Músicos são capazes de perceber intuitivamente estas variações de timbre numa mesma corda. Em algumas execuções, a mão de violonistas

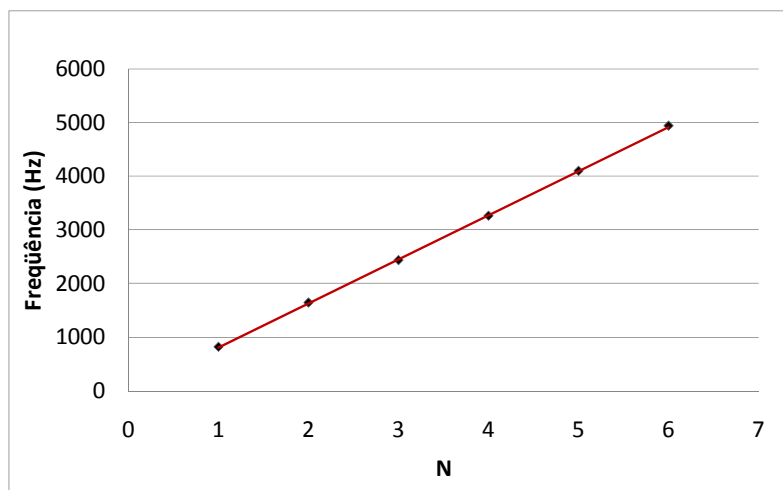
exímios percorre grande extensão do braço do instrumento enriquecendo a execução da música.

De modo semelhante ao empregado na análise da corda de violão acima, podemos estudar os tubos sonoros. Comumente os livros didáticos sugerem que tais tubos são modelos para os diversos tipos de instrumentos de sopro. Contudo, a dinâmica do ar ao entrar e sair por vários furos simultaneamente, e as variações de seus diâmetros internos e materiais, tornam a análise de instrumentos reais mais complexa que a de um simples tubo sonoro cilíndrico. Uma comparação entre ambos foi explorada por LoPresto (2007) ao examinar as frequências de ressonância de flautas e clarinetes.

Como exemplo da aplicação da análise espectral de um tubo sonoro, escolhemos um cilindro metálico com cerca de 20cm de comprimento e 1,7cm de diâmetro interno, aberto de ambos os lados. Sopramos levemente uma de suas extremidades na direção transversal e, simultaneamente, gravamos o ruído gerado com um pequeno microfone em seu interior. Em seguida, realizamos a análise espectral deste som com o Audacity, como mostra a figura 5.4. Os resultados obtidos foram: 817, 1.641, 2.432, 3.259, 4.096, 4.937Hz... A relação entre as frequências dos modos normais e os números naturais está indicada no gráfico da figura 5.5.



**Figura 5.4** Análise espectral do som produzido por um tubo sonoro.



**Figura 5.5** Tubo sonoro: relação entre as frequências presentes na análise espectral da figura 5.5 e os números naturais.

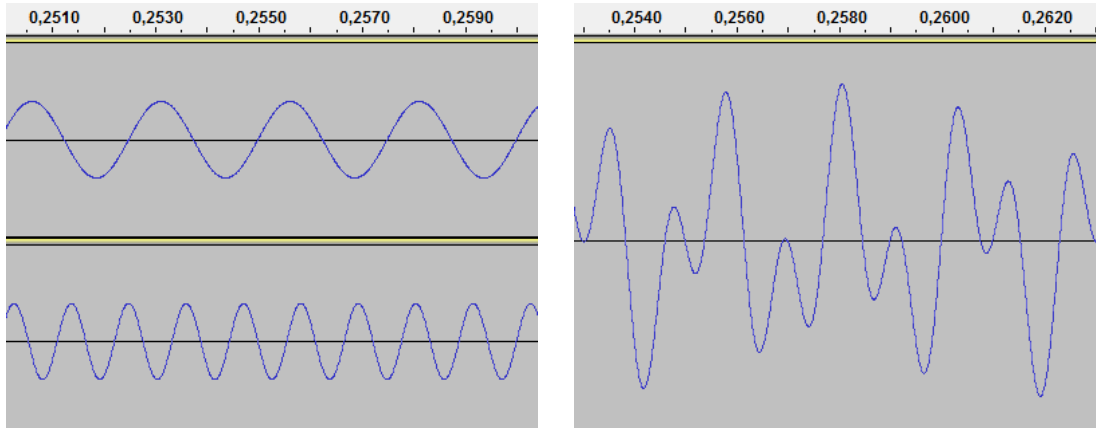
Há uma boa concordância entre os valores experimentais e os teóricos. Para a temperatura de 32°C no momento do experimento, o modo fundamental deveria ser de aproximadamente 834Hz, ou seja, um desvio de apenas 2% em relação aos 817Hz medidos. Se dividirmos toda a sequência de resultados por este último valor, obtemos: 1; 2,01; 2,98; 3,99; 5,01; 6,04...

### 5.3 Princípio da superposição e timbre

Os programas de edição de som possuem funções que permitem a inserção de sons predeterminados. Com o *Audacity*, por exemplo, pode-se escolher a frequência, a intensidade relativa, a duração e até um formato específico (normalmente senoidal, triangular, dente de serra e quadrada) para esses tons. Além disso, pode-se também realizar a superposição de vários sons (mixagem). Estas ferramentas têm um grande potencial didático porque os estudantes podem abordar experimentalmente o princípio da superposição em várias situações de interesse: interferências, batimentos, etc. Sobretudo, os estudantes podem ouvir as ondas sonoras ao mesmo tempo em que as analisam no computador.

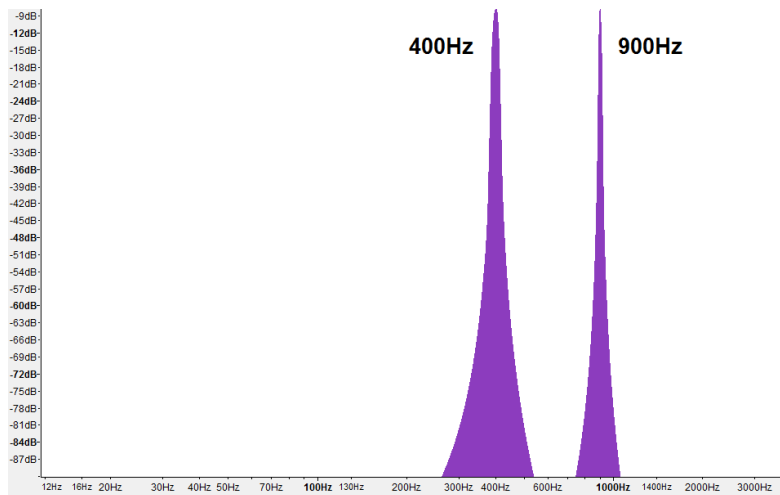
A figura 5.6 à esquerda mostra dois tons harmônicos de mesma amplitude, um de 400Hz e outro de 900Hz. Através do *Audacity*, ambos foram

superpostos, como indicado na mesma figura à direita. Não apenas observarmos a alteração do formato da onda como podemos distingui-los com facilidade ouvindo-os.



**Figura 5.6** À esquerda, tons senoidais de 400Hz e 900Hz; à direita a superposição (mixagem) destes tons.

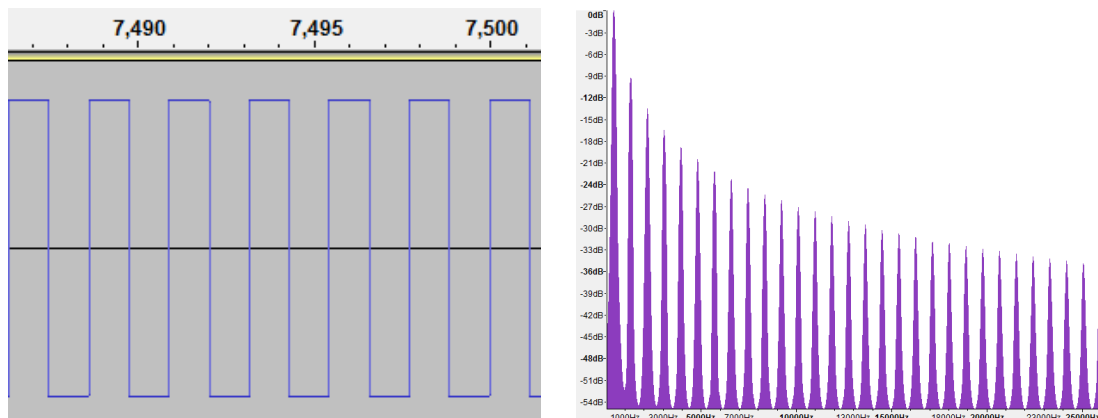
A figura 5.7 apresenta a análise espectral do som mixado anteriormente na figura 5.6. O gráfico confirma a presença dos tons harmônicos de 400Hz e 900Hz com intensidades idênticas.



**Figura 5.7** Análise espectral do som da figura 5.7 onde tons senoidais de 400Hz e 900Hz foram superpostos.

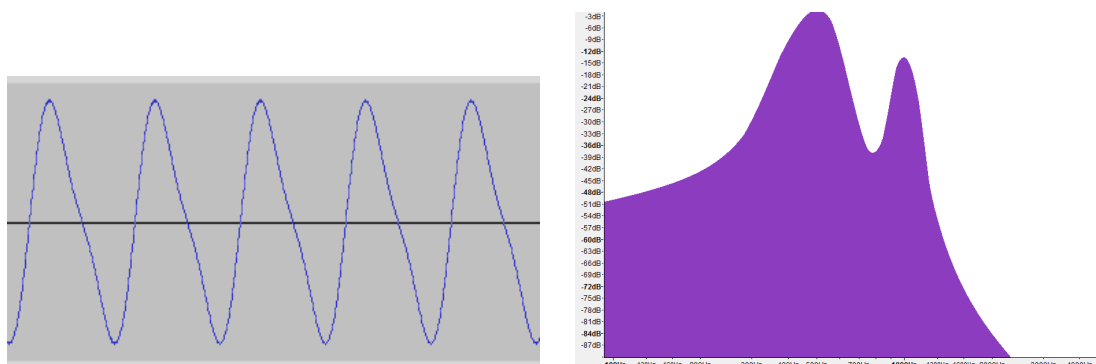


A figura 5.8 à esquerda mostra uma onda quadrada de 440Hz. À direita observamos o resultado de sua análise espectral.

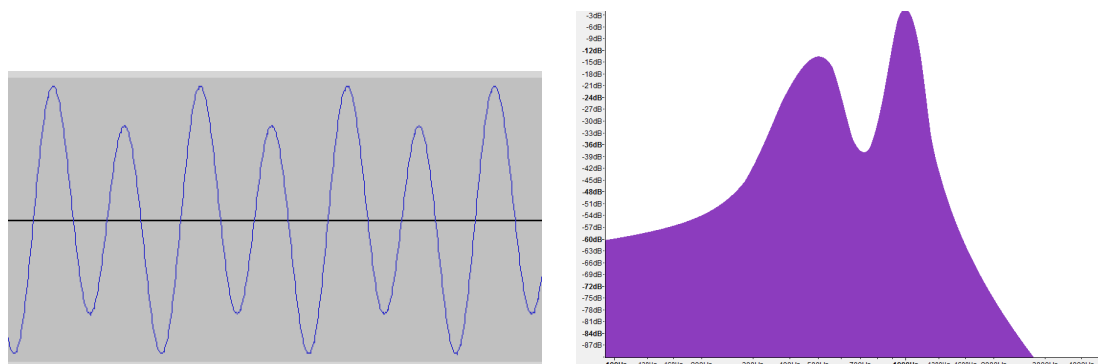


**Figura 5.8** À esquerda, observamos uma onda quadrada de 440Hz; à esquerda, sua análise espectral.

Na figura 5.9 à esquerda observamos uma onda formada pela superposição de dois tons harmônicos, um de 500Hz, outro de 1.000Hz. Ao lado direito, sua análise espectral. A figura 5.10 mostra esta mesma combinação de tons. A diferença entre estes dois casos reside na escolha das intensidades relativas: na figura 5.9 há 80% de energia associada à frequência mais baixa de 500Hz e somente 20% associada ao tom de 1.000Hz; para a onda da figura 5.10 escolhemos a combinação inversa.



**Figura 5.9** Sobreposição de dois tons harmônicos: 80% de energia em 500Hz (Si – B4) e 20% em 1.000Hz (B5).



**Figura 5.10** Sobreposição dos mesmos tons harmônicos da figura 5.11, mas agora com 20% de energia em 500Hz (Si – B4) e 80% em 1.000Hz (B5).

## 5.4 Comentários

Como discutimos, o cálculo das frequências de ressonâncias de cordas e tubos vibrantes é o primeiro passo para o entendimento adequado do som que estes aparelhos produzem ao ressoar. Raramente os livros didáticos do ensino médio apontam que eles emitem uma combinação de notas simultaneamente. Também não discutem que a capacidade de diferenciarmos um dó emitido num piano e num violão, por exemplo, se deve à superposição de tons harmônicos em diferentes proporções, de modo semelhante ao que verificamos nas figuras 5.9 e 5.10.

A análise espectral que apresentamos ao longo deste capítulo poderia ser incorporada ao currículo do ensino médio porque permite um estudo mais consistente e completo das ressonâncias em cordas vibrantes e tubos sonoros, como também sugerem os trabalhos de De Jong (2003), Courtney (2006), Veit (2005), LoPresto (2006, 2008a, 2008b), além de abrir inúmeras possibilidades de aplicações práticas. Os estudantes podem examinar outros sons de seu interesse, como a voz humana ou ruído de máquinas e aparelhos – por exemplo, uma bomba de aquário deve apresentar um intenso tom de 60 Hz correspondente à oscilação da rede elétrica. Até o barulho de insetos pode ser revelador. É possível descobrir com que frequência um mosquito bate asas fazendo a análise espectral do seu zumbido.

## Capítulo 6

### O efeito Doppler numa bola de futebol

A frequência aparente de uma onda sonora está relacionada com as velocidades da fonte e do observador em relação ao meio de propagação. Este fenômeno é conhecido como efeito Doppler.

Embora seja muito importante na Física e em aplicações tecnológicas, o efeito Doppler é pouco abordado no ensino médio e raramente estudado experimentalmente. Na última década, com a disseminação dos computadores, surgiram gradativamente diversos experimentos sobre este fenômeno na literatura de ensino de Física. Em 2000, Bensky e Frey utilizaram a placa de som de um computador para medir a velocidade de objetos em movimento sobre um trilho de ar. Logo em seguida, Saba e Rosa (2001) estudaram o efeito Doppler a partir do som da buzina de um carro em movimento. Em 2003 estes mesmos autores apresentaram um experimento que evidenciava o efeito Doppler para uma fonte sonora em movimento circular. Em 2006, Torres e González-Espada descreveram um experimento para a medida da aceleração da gravidade usando o efeito Doppler. Costa e Mocellin (2007) utilizaram o efeito para medir a velocidade de aviões prestes a pousar. Dias (2009) mostrou um interessante experimento que permite medir a velocidade de um carro de fórmula 1 através do som gravado numa corrida exibida na TV.

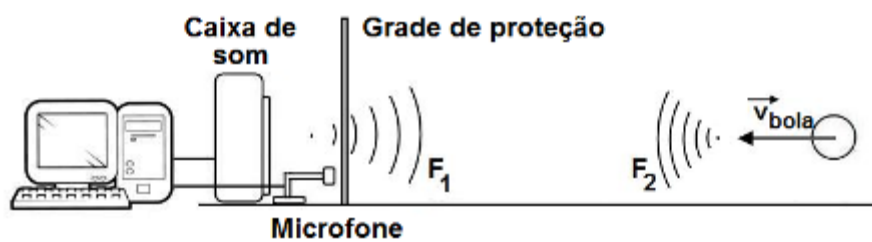
Neste capítulo mostramos como medir a velocidade de uma bola de futebol através do efeito Doppler. O contexto lúdico do experimento contribui para motivar os alunos (são eles que chutam a bola).

#### 6.1 O efeito Doppler numa bola de futebol

Os microfones comuns e as placas de som de um computador podem registrar sons com fidelidade razoável dentro do espectro audível (entre 50 Hz e 20 KHz). Como vimos nos capítulos 4 e 5, os geradores e editores de áudio citados criam grandes oportunidades para a realização de experimentos

didáticos. Com seu auxílio podemos gerar um tom harmônico predeterminado e, simultaneamente, gravar o sinal refletido por um objeto em movimento. A diferença entre a frequência do som emitido pela caixa e aquele captado pelo microfone pode ser utilizada para medirmos sua velocidade.

A figura 6.1 mostra o arranjo experimental que possibilita a medida da velocidade de uma bola de futebol via efeito Doppler.



**Figura 6.1** Arranjo experimental.

Diversos editores de som podem ser usados para geração, gravação e análise do áudio. Assim como nos capítulos anteriores, optamos pelo *SweepGen* e pelo *Audacity*. Sugerimos que o som do computador passe por um amplificador. A pequena potência das caixas de som portáteis geralmente não é suficiente para o experimento, mas a de um aparelho de som doméstico deve bastar.

O cálculo do desvio Doppler é relativamente simples. As ondas sonoras de frequência  $F_1$ , geradas pelo computador e emitidas pelo alto-falante, são percebidas pela bola numa frequência aparente  $F_1'$ . Estas frequências estão relacionadas pela equação

$$F_1' = F_1 \frac{v_{\text{som}} + v_{\text{bola}}}{v_{\text{som}}}, \quad (6.1)$$

onde consideramos  $v_{\text{bola}} > 0$  quando a bola se aproxima do microfone.

Em seguida, a bola passa a funcionar como uma fonte sonora secundária porque reflete o som que a atinge. Este, por sua vez, é captado pelo microfone colocado diante do alto-falante (figura 6.1) numa frequência aparente  $F_2$ . Ou seja, dois desvios Doppler acontecem sucessivamente. A relação entre  $F_2$  e  $F_1'$  é dada por

$$F_2 = F_1' \frac{v_{\text{som}}}{v_{\text{som}} - v_{\text{bola}}} . \quad (6.2)$$

Podemos relacionar as equações (6.1) e (6.2) para calcular o módulo da velocidade da bola  $v_{\text{bola}}$  a partir da frequência inicial  $F_1$ , fixada com o computador, e da frequência final  $F_2$ , captada pelo microfone.

$$v_{\text{bola}} = v_{\text{som}} \frac{F_2 - F_1}{F_2 + F_1} \quad (6.3)$$

Devemos destacar que na equação (6.3),  $F_2 > F_1$  quando a bola se aproxima do microfone ( $v_{\text{bola}} > 0$ ) e  $F_2 < F_1$  quando ela se afasta ( $v_{\text{bola}} < 0$ ).

Usamos o programa *SweepGen* para fixar o tom senoidal  $F_1=10.000$  Hz emitido pelo alto-falante. Assim como no capítulo 5, podemos utilizar o programa *Audacity* para gravar e realizar a análise espectral do som reemitido pela bola durante o voo, isto é, entre o momento do chute e da colisão com o microfone.

Conforme a figura 6.1, posicionamos a caixa de som, o microfone e a bola de futebol na mesma direção. O microfone e a bola ficaram de 2,0 m a 5,0 m de distância entre si, e uma grade de aço serviu de proteção aos aparelhos (figura 6.2).

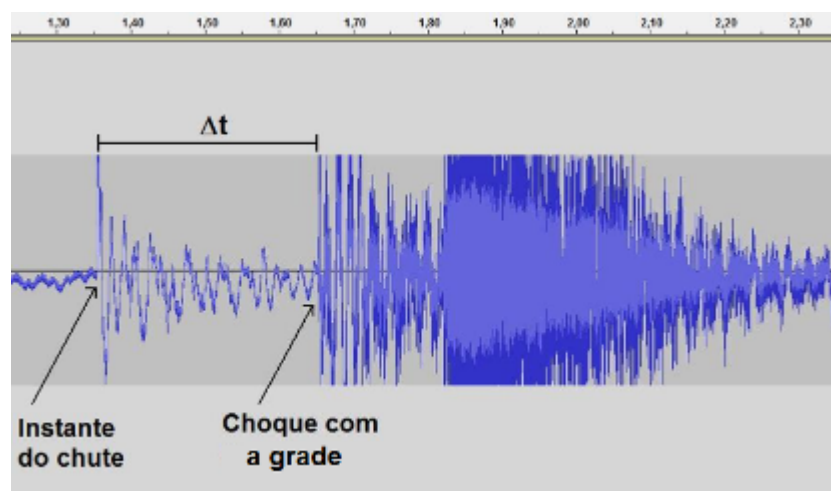


**Figura 6.2** Aluno ajusta a grade que protegeu o amplificador e o microfone do choque com a bola.

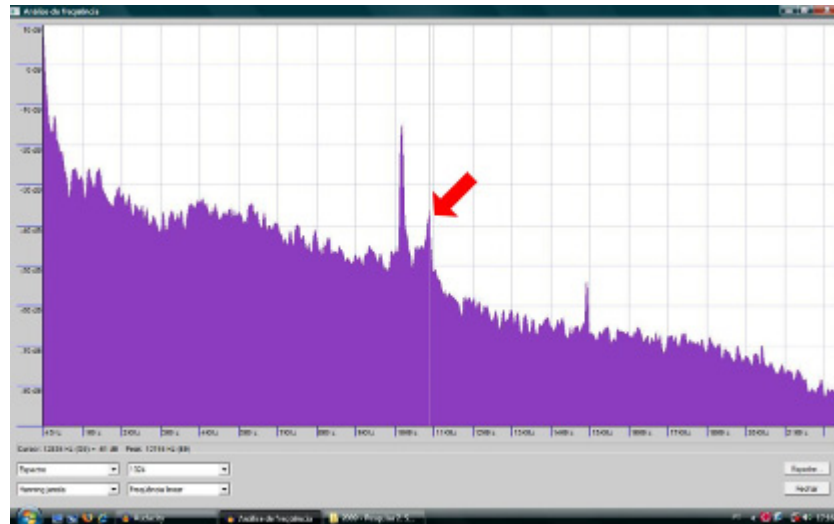


**Figura 6.3** Estudantes chutam a bola de futebol para realizar as medidas.

Na figura 6.4 observamos a gravação do som de uma bola colocada a 4,0 m de distância e chutada contra a grade. Em seguida, a figura 6.5 nos mostra a análise espectral deste som. O pico de menor intensidade, indicado pela seta vermelha, tem frequência  $F_2 = 10.745$  Hz, e corresponde ao sinal reemitido pela bola em trânsito.



**Figura 6.4** Som de uma bola chutada contra o microfone.



**Figura 6.5** Análise espectral do som da figura 6.2.

Com base nesses resultados e na equação (6.3) obtemos que a velocidade da bola é  $v_{bola} = 12,2$  m/s.

Para verificar o valor obtido, medimos diretamente o tempo entre o momento do chute e a colisão da bola com a grade, através da linha de tempo do *Audacity* (Courtney, 2007; Aguiar e Pereira, 2011). Para o chute da figura 6.4, temos  $x = 4,0$  m,  $\Delta t = 0,303$  s, o que corresponde a uma velocidade  $v_{bola} = x / \Delta t = 13,2$  m/s. A semelhança entre os valores mostra que a medida Doppler apresenta bons resultados, com precisão da ordem de 10%.

A figura 6.6 mostra a gravação do som de uma bola próxima da caixa de som e chutada contra um anteparo rígido colocado a 3,6m de distância da posição inicial. A figura 6.7 apresenta a análise espectral deste som. A seta vermelha indica o sinal secundário associado ao som refletido:  $F_2 = 9.574$  Hz, mais grave que o principal,  $F_1 = 10.000$  Hz, já que a bola se afastou do microfone.

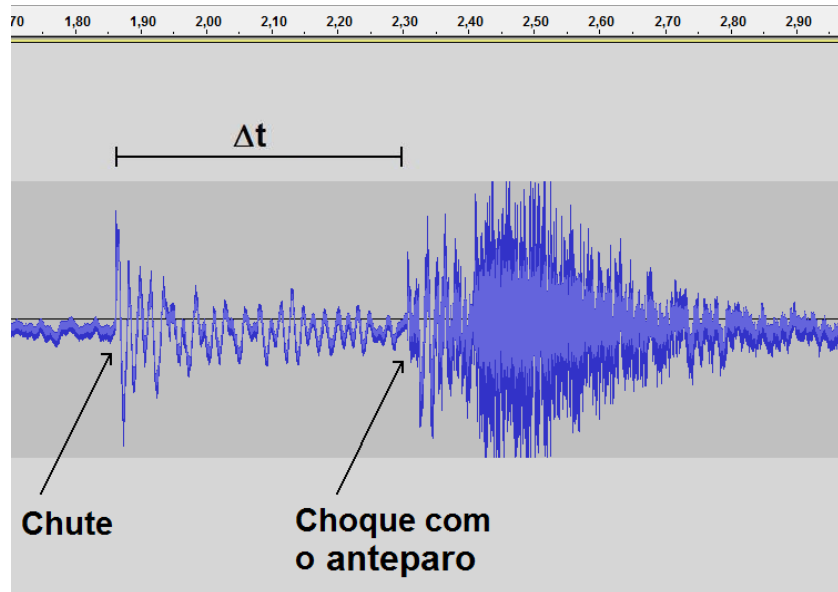


Figura 6.6 Som de uma bola que se afastou do microfone.

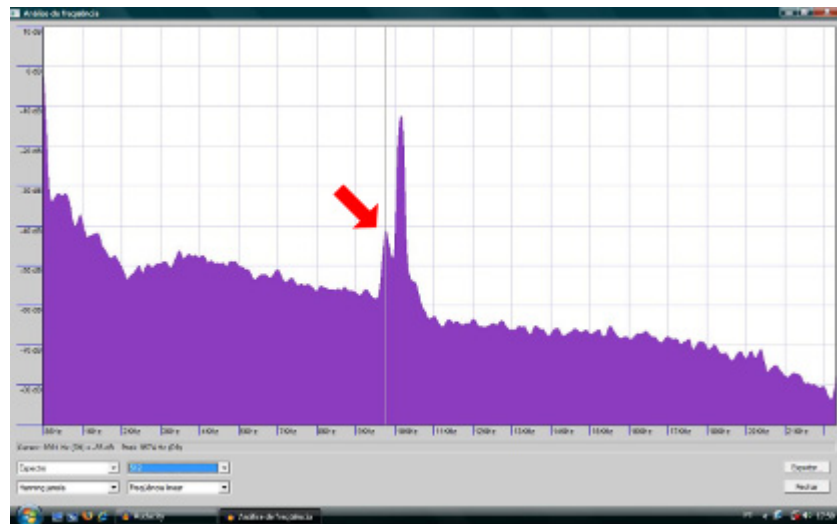


Figura 6.7 Análise espectral do som da figura 6.6.

Com base nesses dados e na equação (6.3) obtemos  $v_{bola} = 7,4 \text{ m/s}$ . Medindo o deslocamento da bola e o tempo de voo, temos  $x = 3,6 \text{ m}$  e  $\Delta t = 0,451 \text{ s}$ , o que corresponde a uma velocidade  $v_{bola} = x / \Delta t = 8,0 \text{ m/s}$ . Novamente os dois métodos dão resultados coerentes, com precisão da ordem de 10%



## 6.2 Comentários

Os dados experimentais apresentados neste capítulo são uma amostra dos resultados obtidos por estudantes da 2ª e 3ª séries do ensino médio do Colégio Pedro II nos anos de 2008 e 2009 (figura 6.3).

Verificamos que a medida da velocidade da bola através do efeito Doppler serviu de forte estímulo para que os estudantes tentassem compreendê-lo. A princípio, eles imaginaram que qualquer aplicação do efeito Doppler (como, por exemplo, o monitoramento de cardumes na pesca industrial, a medida do fluxo sanguíneo em artérias e veias) seria muito complexa e não acreditavam que pudessem utilizá-lo para estimar a velocidade de um objeto em movimento com precisão.

A atividade estimulou o trabalho colaborativo entre os alunos porque uns precisaram dos outros para montar os equipamentos, medir as distâncias, sincronizar a gravação do som com o chute da bola, coletar os dados, acertar a direção do chute etc. Como o número de variáveis envolvidas é grande, o processo experimental naturalmente exige que eles se ajudem mutuamente. Só assim puderam relacionar as medidas envolvidas, definir o intervalo adequado para caracterizar o tempo de voo da bola (figuras 6.4 e 6.6), fazer os cálculos etc.

O experimento apresentou melhores resultados quando a frequência de referência foi de 10kHz, mas isto não é uma regra. Os microfones dos computadores nem sempre têm desempenho uniforme em todo o espectro audível. Assim, alguns testes preliminares devem ser necessários antes que bons resultados se tornem evidentes. Como medida de precaução é recomendável o uso de protetores auriculares durante a gravação, já que frequências muito altas e intensas podem danificar o aparelho auditivo.

No apêndice E deste trabalho apresentamos um pequeno guia para os procedimentos experimentais desta atividade.

# Capítulo 7

## Física com o Google Earth

### 7.1 Ondas na água

Ondas na água são encontradas com frequência em situações cotidianas, mas estão pouco presentes nos currículos de física. Essas ondas costumam despertar grande interesse nos estudantes e, ainda que sua análise quantitativa exija um desenvolvimento matemático relativamente avançado, alguns aspectos conceituais podem ser discutidos com proveito em sala de aula.

As ondas na superfície da água estão entre os poucos exemplos de fenômenos ondulatórios que são facilmente observados. Não é demais lembrar que não “vemos” ondas sonoras, e que a luz não manifesta sua natureza ondulatória com facilidade. Além disso, as ondas na água têm outro aspecto interessante: elas apresentam dispersão. Isto é, sua velocidade de propagação depende do comprimento de onda. Em cursos introdutórios de física, a dispersão só costuma aparecer em discussões sobre o índice de refração da luz, e mesmo assim no contexto da óptica geométrica, onde a maior parte dos efeitos ondulatórios da dispersão não se manifesta. As ondas na água podem ilustrar esse importante fenômeno ondulatório num contexto mais corriqueiro, ajudando a esclarecer seu significado e implicações.

As revistas especializadas em ensino de física têm registrado o desenvolvimento de materiais didáticos dedicados às ondas na água, e vários exemplos podem ser encontrados na literatura nacional. Santos (2005) fez uma interessante discussão conceitual sobre a velocidade de propagação e a intensidade do tsunami ocorrido na Indonésia em 2004. Silveira e Varriale (2005) e Meirelles e Violante-Carvalho (2007) analisaram a refração, difração, dispersão e “empinamento” das ondas oceânicas. Em 2008, Santos e Souza Barros voltaram ao assunto discutindo conceitualmente a propagação das ondas no mar e o movimento das partículas na água devido à ação das forças

restauradoras. Recentemente, o comportamento das ondas em águas rasas e profundas foi apresentado com maior rigor matemático por Fernandes e Alves (2009).

Neste capítulo descrevemos uma aplicação prática da física das ondas na água. Medimos a velocidade de um barco a partir de fotografias onde a esteira de ondas que ele produz é visível. A medida é muito simples e depende apenas de conhecimentos básicos de cinemática e de física ondulatória. O método de medida revelou-se bastante atraente aos estudantes porque envolve um instrumento que muitos já utilizavam para sua diversão, o popular programa *Google Earth*<sup>7</sup>.

O material deste capítulo está organizado do seguinte modo. Na seção 7.2 discutimos brevemente o *Google Earth* e mostramos que a resolução das fotografias é suficiente para revelar inúmeras imagens de barcos em movimento e os detalhes de suas esteiras. Na seção 7.3 faremos a descrição do padrão ondulatório definido por essas esteiras. Na seção 7.4 discutimos como as imagens do *Google Earth* e a física das ondas na água podem ser usadas para determinar a velocidade de barcos que navegam pelos mais diversos lugares do mundo. A seção 7.5 contém alguns comentários e conclusões.

## 7.2 O Google Earth

O *Google Earth* é uma espécie de “navegador” geográfico, lançado pelo Google em 2005. O programa dá acesso online a um enorme banco de dados com fotografias aéreas e de satélites, que cobrem quase toda a superfície terrestre. A resolução das imagens depende da importância do local que se deseja explorar, podendo ir de 10 cm em alguns centros urbanos até 15 m em muitas áreas rurais. Imagens tridimensionais também estão disponíveis em vários locais, e sua resolução vertical pode variar de 10 m a 90 m.

---

<sup>7</sup> <http://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/index.html>

Dada a riqueza de informação disponível aos usuários do *Google Earth*, podemos tentar buscar aplicações do programa em contextos educacionais. A Geografia e demais Ciências da Terra são candidatas óbvias, mas existem outras possibilidades. Na Física, uma oportunidade interessante é oferecida pela notável resolução de algumas imagens, que nos permitem localizar barcos em movimento e observar detalhes das ondas produzidas em sua esteira. Um exemplo está na figura 7.1, que mostra um barco na baía de Sydney, na Austrália. Como veremos, a partir das informações da fotografia e com um pouco de conhecimento sobre ondas na água, podemos facilmente calcular a velocidade do barco.



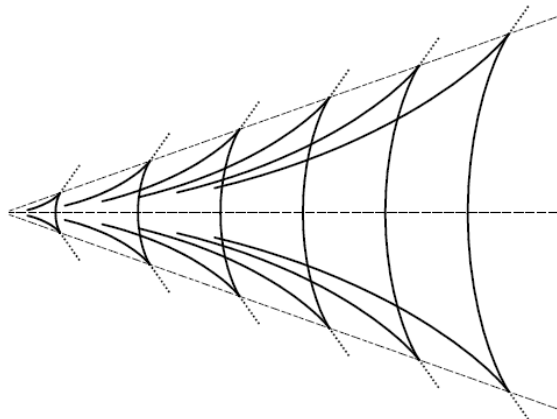
**Figura 7.1** Barco na baía de Sydney, Austrália. Coordenadas:  $33^{\circ} 51.007'S$   $151^{\circ} 15.106'L$ . Data aproximada: 20/01/2007.

### 7.3 A esteira de Kelvin.

Perto da embarcação, a onda produzida por um barco em movimento apresenta uma estrutura complexa, que depende do formato do casco, da velocidade da embarcação e de muitos outros fatores. A distâncias maiores a situação torna-se mais simples e a onda ganha uma forma universal chamada esteira de Kelvin (Thomson, 2001).

As ondas de Kelvin seguem o barco sem mudar de forma, isto é, permanecem estacionárias no sistema de referência do próprio barco. A figura 7.2 mostra as frentes de ondas da esteira de Kelvin produzida por um barco em águas profundas. A esteira fica restrita a uma região em forma de cunha, delimitada por linhas que fazem um ângulo de cerca de  $\pm 19,5^\circ$  com a direção do movimento do barco. Apenas ondas evanescentes estendem-se além do domínio da “cunha de Kelvin”.

Duas espécies de ondas podem ser notadas dentro da cunha: ondas divergentes, com frentes de onda em formato de “V” que se afastam da trajetória do barco, e ondas transversais, em forma de “U”, cujas frentes de onda tendem a seguir o movimento da embarcação.



**Figura 7.2** A esteira de Kelvin em águas profundas. As linhas tracejadas indicam o caminho do barco e a fronteira da cunha de Kelvin. Ondas evanescentes fora da cunha são mostradas como linhas pontilhadas.

As ondas divergentes e transversais se encontram na fronteira da cunha de Kelvin. Além desse limite a amplitude das ondas decai exponencialmente. Um cálculo das frentes de onda de Kelvin baseado em argumentos geométricos pode ser encontrado em Lighthill (2001).

A amplitude ao longo de uma frente de onda não é constante; ela geralmente aumenta perto dos limites da cunha de Kelvin. Ondas divergentes e transversais também podem ter amplitudes muito diferentes. Barcos pequenos e rápidos tendem a produzir ondas divergentes fortes e praticamente nenhuma onda transversal, como podemos observar nas figuras 7.1 e 7.3. Por outro lado,

barcos grandes e lentos têm seus padrões de Kelvin dominados por ondas transversais, como vemos na figura 7.4.



**Figura 7.3** Ondas divergentes produzidas por barcos pequenos e rápidos na Ilha Grande, RJ, Brasil. Coordenadas:  $23^{\circ} 4.497'S$   $44^{\circ} 13.763'O$ . Data aproximada: 27/12/2007.



**Figura 7.4** Ondas transversais num barco em Santarém, PA, Brasil. Coordenadas:  $2^{\circ} 25.463'S$   $54^{\circ} 41.137'O$ . Data aproximada: 26/09/2006.

É importante ressaltar que, ao contrário do que sugerem diversos livros de física básica (Tipler, 2000; Alonso e Finn, 1972; Nussenzveig, 1990), a cunha de Kelvin não tem a mesma origem do cone de Mach produzido por um avião ultrassônico, por exemplo. O ângulo de abertura da cunha de Kelvin é sempre

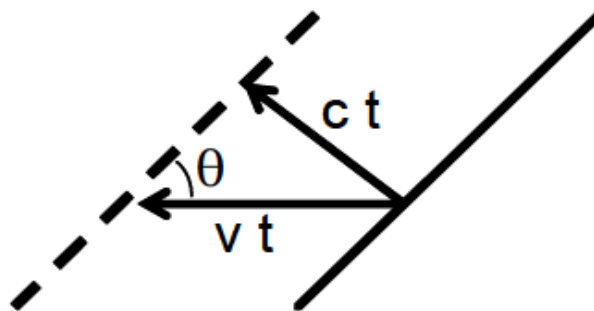
$\pm 19,5^\circ$ , qualquer que seja a velocidade do barco. Já o cone de Mach tem uma abertura que depende da velocidade da fonte sonora. A diferença de comportamentos é causada, basicamente, pela dispersão das ondas na água.

## 7.4 Medindo a velocidade de barcos com o Google Earth

Para nossos propósitos, a característica mais importante do padrão de ondas de Kelvin é que ele se movimenta junto com o barco. Por causa disso, existe uma relação simples entre a velocidade  $v$  do barco, a velocidade de fase  $c$  das ondas na água e o ângulo  $\theta$  que as frentes de onda fazem com a direção de movimento do barco:

$$c = v \operatorname{sen} \theta. \quad (7.1)$$

A equação (7.1) é facilmente obtida da cinemática das frentes de onda. Isto pode ser visto na figura 7.5, que mostra parte de uma frente de onda em dois instantes separados pelo intervalo de tempo  $t$ . Durante este tempo o barco e o padrão de onda percorrem uma distância  $vt$ , da direita para a esquerda. Por outro lado, o deslocamento da onda na direção perpendicular à frente de onda é  $ct$ . Aplicando um pouco de trigonometria, obtemos a equação (7.1).



**Figura 7.5** Seção de uma frente de onda produzida pelo barco, em dois momentos distintos separados pelo intervalo  $t$ . O barco move-se da direita para a esquerda com velocidade  $v$ , e a velocidade de fase da onda é  $c$ .

Em águas profundas, ondas de comprimento de onda  $\lambda$  têm velocidade de fase dada por

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}, \quad (7.2)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade. Uma demonstração simples desse resultado pode ser encontrada no apêndice F.

O fato da velocidade de fase  $c$  depender do comprimento de onda  $\lambda$  indica que a propagação de ondas em águas profundas sofre dispersão. Em águas rasas isso não acontece, como também está demonstrado no apêndice F. Análises detalhadas do comportamento da velocidade em função da profundidade da lâmina d'água podem ser encontradas em Crawford (1968), Feynman, Leighton e Sands. (1963), Silveira e Varriale (2005) e Fernandes e Alves (2009).

Ao substituirmos a equação (7.2) em (7.1), obtemos

$$v = \frac{1}{\sin\theta} \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}. \quad (7.3)$$

O interessante na equação (7.3) é que ela nos permite calcular a velocidade do barco a partir de  $\lambda$  e  $\theta$ , duas quantidades que podem ser medidas diretamente a partir das imagens do *Google Earth*.

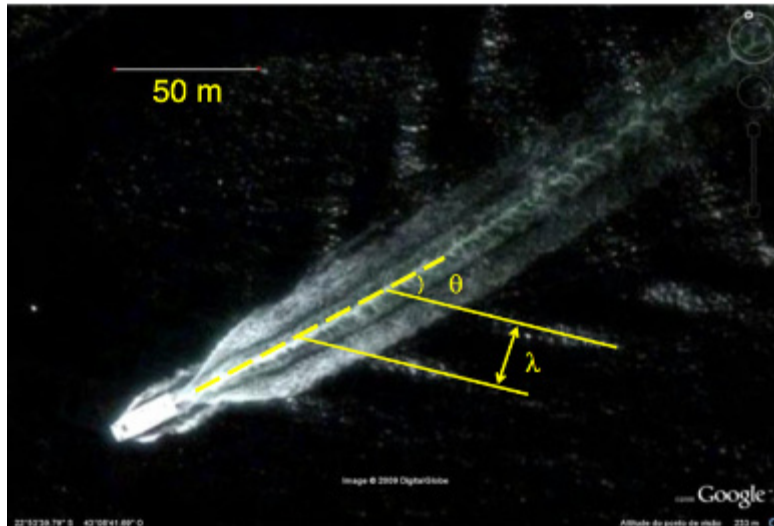
Um exemplo de como isso é feito está na figura 7.6, que mostra uma embarcação na baía de Guanabara, RJ. A escala de distância foi fixada pelo próprio *Google Earth*. Utilizando um programa de análise de imagens (usamos o *ImageJ*<sup>8</sup>), medimos o comprimento de onda e o ângulo indicados na figura, obtendo  $\lambda = 22$  m e  $\theta = 43^\circ$ . A partir destes dados e considerando  $g = 9,8$  m/s<sup>2</sup>, aplicamos a equação (7.3) para calcular a velocidade do barco. O resultado é  $v = 31$  km/h. Esta fotografia, em particular, permitiu que a embarcação fosse identificada como o catamarã Pégasus, que à época da foto realizava serviços de transporte público entre as cidades do Rio de Janeiro e Niterói. A velocidade

---

<sup>8</sup> ImageJ, disponível em 05/10/2010 no site: <http://rsbweb.nih.gov/ij/>

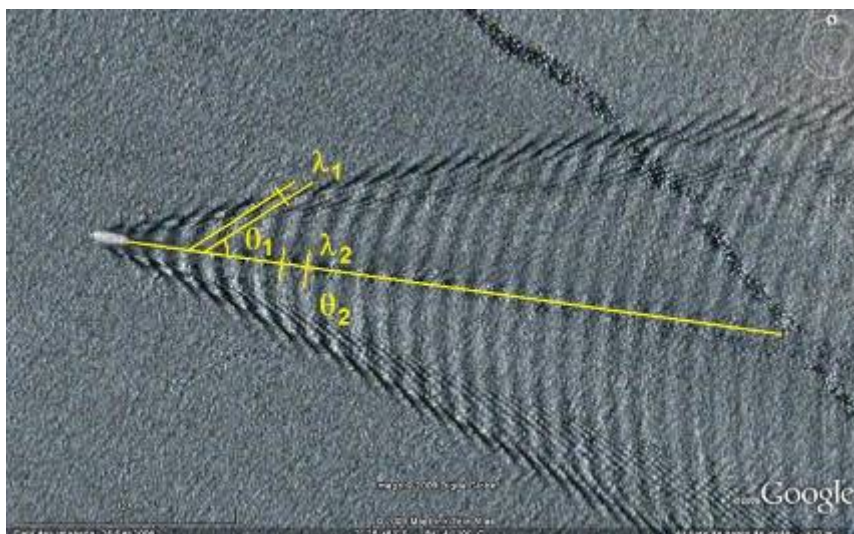


de cruzeiro deste catamarã era de 33km/h (informação obtida na Barcas SA, proprietária do barco), em bom acordo com o resultado que calculamos.



**Figura 7.6** Foto do *Google Earth* mostrando uma embarcação na Baía da Guanabara. Medidas feitas sobre a imagem mostram que  $\lambda = 22$  m e  $\theta = 43^\circ$ . O fator de escala de 50 m é dado pelo *Google Earth*. A velocidade calculada do barco é 31 km/h. Coordenadas:  $22^\circ 53' 40.31''$ S  $43^\circ 08' 43.80''$ O. Data aproximada: 30/09/2005.

Na figura 7.7 vemos duas medidas independentes da velocidade do barco já mostrado na figura 7.4. A primeira medida foi realizada próxima do limite da cunha de Kelvin e resultou em  $\lambda_1 = 6,0$  m e  $\theta_1 = 41,4^\circ$ , o que leva a uma velocidade de 4,6 m/s. A segunda foi feita ao longo da linha de movimento do barco e resultou em  $\lambda_2 = 14,1$  m e  $\theta_2 = 90^\circ$ , dando uma velocidade de 4,5 m/s. A semelhança desses dois resultados mostra que o método é bastante confiável, isto é, o valor obtido para a velocidade não depende do ponto da esteira utilizado na medida desde que o barco não freie ou acelere acentuadamente no espaço fotografado.



**Figura 7.7** Medidas de  $\lambda$  e  $\theta$  em pontos diferentes da esteira do barco mostrado na figura 7.4. Os cálculos indicam que a velocidade do barco é cerca de 4,5 m/s.

## 7.5. Comentários e conclusões

Os exemplos acima mostram que a velocidade dos barcos pode ser medida facilmente e com boa acurácia através das imagens do *Google Earth*. O método de medida é muito simples e ilustra propriedades básicas das ondas na água.

No apêndice G descrevemos os detalhes técnicos do procedimento experimental deste capítulo. Ele serve como um guia para professores que desejem realizá-lo com seus alunos.

Atividades práticas envolvendo cerca de 60 estudantes das três séries do ensino médio do Colégio Pedro II, em Niterói (RJ), foram realizadas com sucesso. O município fica à margem da baía de Guanabara e boa parte dos estudantes havia usado um catamarã semelhante ao da figura 7.6. Além disso, todos eles estão bastante familiarizados com este tipo de transporte.

Durante a atividade, um dos pontos que mais chamou a atenção dos alunos foi a possibilidade de realizar uma tarefa que eles julgavam impossível: medir a velocidade de um objeto a partir de uma foto estática. A simplicidade dos conceitos envolvidos na medida da velocidade e a precisão dos resultados deram aos estudantes uma boa ideia de como a Física pode ser usada para a

análise e compreensão de fenômenos naturais e dos objetos tecnológicos que estão à nossa volta.

A aplicação simultânea de conceitos de cinemática e de física ondulatória durante a análise também foi instrutiva, pois mostrou aos alunos como diferentes áreas da física se complementam quando utilizadas em problemas práticos. Essa é uma característica das ciências em geral, que a excessiva compartimentalização dos currículos escolares nem sempre deixa visível.

Embora as atividades que realizamos tenham utilizado computadores, isso não é estritamente necessário. Se as imagens do *Google Earth* forem impressas em folhas de papel, a mesma análise pode ser realizada com régua e transferidor. Entretanto, deve ser ressaltado que o uso direto do programa torna o processo muito mais atraente aos alunos, que têm a oportunidade de utilizar na sala de aula algo que normalmente associam às atividades de lazer.

Também vale a pena notar que, quando possível, os alunos devem buscar fotos de embarcações utilizadas no transporte público de suas próprias cidades. Os estudantes podem viajar nas embarcações e entrevistar o capitão sobre a velocidade de cruzeiro; com isso eles podem comparar seus cálculos com as velocidades reais obtidas num trabalho de campo.

Um aspecto importante da atividade proposta neste capítulo é que ela introduz naturalmente conceitos pouco discutidos no ensino médio, como a dispersão de ondas. A equação (7.2), que descreve a velocidade das ondas na água em função de seu comprimento de onda, é um exemplo particularmente claro do fenômeno de dispersão. Relações analíticas tão simples entre a velocidade de propagação e o comprimento de onda são raras na física ondulatória, o que torna o estudo das ondas na água um ótimo meio para se introduzir a dispersão e discutir suas importantes conseqüências. Em especial, no ensino superior, estes mesmos aspectos poderiam ser discutidos nos cursos básicos antes das complexas abordagens sobre ondas eletromagnéticas em cursos mais avançados. A demonstração no apêndice F é uma sugestão para viabilizar esta abordagem.

## Capítulo 8

### Conclusão

Fenômenos ondulatórios permeiam todas as áreas da física. De todas as manifestações ondulatórias, talvez as mais familiares sejam as ondas mecânicas – principalmente o som e as ondas na água. É claro que a luz também faz parte de nossa experiência cotidiana, mas seu caráter ondulatório não é revelado com tanta facilidade quanto no caso do som ou das ondas na água. Essas ondas mecânicas são, portanto, um laboratório privilegiado para o ensino de física ondulatória, embora tal fato nem sempre seja reconhecido. Ao contrário, a física do som é quase sempre tratada como um apêndice ao estudo mais geral de ondas, e as ondas na água raramente são mencionadas em cursos introdutórios.

Neste trabalho procuramos mostrar que as ondas sonoras e marítimas têm um potencial pedagógico muito rico, que poderia ser mais explorado. Ao mesmo tempo, vimos que a aprendizagem de ondas mecânicas não é simples. Por exemplo, antes da instrução os estudantes tendem a imaginar o som como um tipo de substância material em movimento pelo ar. Noções semelhantes são utilizadas para descrever outras ondas mecânicas, como os pulsos em uma corda.

Algumas investigações mostraram que a instrução em física ondulatória não melhora muito esta situação. Aparentemente, seu resultado mais frequente é fazer com que parte dos estudantes adote modelos híbridos, que combinam o modelo ondulatório à concepção original de que a onda é um objeto em movimento.

Experimentos podem desempenhar um papel importante na superação das dificuldades conceituais dos alunos mas, como vimos, a eficiência com que fazem isso depende crucialmente deles serem dirigidos aos interesses e crenças que os estudantes têm em relação ao mundo natural. Os típicos laboratórios didáticos, com suas atividades altamente estruturadas e guiadas, não parecem ser bem sucedidos nessa tarefa.

Neste trabalho apresentamos alguns experimentos didáticos sobre ondas mecânicas. Esses experimentos procuraram explorar temas de interesse dos estudantes, e utilizam apenas material que podem ser encontrados com facilidade em escolas e até em ambientes domésticos. Isso facilita a realização dos experimentos diretamente nas salas de aula, sem necessidade dos laboratórios convencionais que praticamente inexistem, e permite ainda que os estudantes os executem e estendam em suas casas.

O experimento dos tubos sonoros partiu de uma questão importante à qual, surpreendentemente, pouca atenção é dada: qual a relação entre o que estudamos na física do som e aquilo que escutamos. A resposta é sutil, como discutimos, pois envolve as múltiplas representações que uma onda sonora possui e as diferenças de fase entre elas. Mostramos que os alunos têm grandes dificuldades para perceber essa característica das ondas sonoras, inclusive porque os livros-texto de ensino médio normalmente ignoram o problema, quando não o apresentam erroneamente. Os questionários que aplicamos tornaram evidente que os alunos sempre encaram um nó (seja de uma onda de pressão ou deslocamento) como um ponto onde a intensidade do som audível é nula; quando apresentados a um ventre (seja de uma onda de pressão ou deslocamento), tendem a dizer que a intensidade audível é máxima. O fato das ondas de pressão e deslocamento terem seus nós e ventres em posições trocadas não parece jamais ser levado em consideração por eles. O experimento que propusemos pode dar uma contribuição significativa para a superação dessa dificuldade. O mapeamento da intensidade sonora no interior do tubo ressonante mostra claramente que a audição está ligada às variações da pressão e não ao deslocamento médio das moléculas do ar. Esse experimento também permite uma visualização particularmente nítida dos modos normais no interior do tubo, um fato que pode ser explorado independentemente da discussão da relação entre a onda e o sentido da audição.

Entre as possíveis extensões desse experimento está a sua aplicação no contexto de uma sequência de ensino-aprendizagem do tipo POE (White e

Gunstone, 1992; Treagust et al., 2001). Uma proposta nesse sentido está descrita no apêndice A e pretendemos testá-la em futuro próximo.

O experimento da análise espectral mostrou que é possível introduzir nos currículos de ensino médio um dos conceitos mais importantes da física ondulatória: uma onda qualquer pode ser decomposta em uma superposição de ondas harmônicas. Esse conceito, de enorme importância científica e tecnológica, é costumeiramente omitido em função de sua dificuldade matemática. Como vimos, esse quadro mudou com a disponibilidade de programas de computador capazes de realizar a análise espectral de sons com grande facilidade. Esses programas tornaram possível apresentar os aspectos fundamentais da análise espectral no ensino médio, permitindo a discussão da natureza do som produzido por uma corda vibrante, um tubo sonoro ou um instrumento musical.

O experimento sobre o efeito Doppler foi proposto por um grupo de estudantes a partir de outro experimento, que media a velocidade de um carro de fórmula 1 (Dias, 2009). Como nem eles nem seu professor conheciam relatos a respeito de uma experiência semelhante, não se sabia previamente se a velocidade da bola poderia ser medida com precisão aceitável. Por exemplo, havia a possibilidade de que a análise espectral não mostrasse uma separação nítida entre os picos, ou que o eco na bola não fosse suficientemente intenso. De fato, bastante trabalho foi necessário até que boas medidas fossem alcançadas. Apesar disso, a atividade se mostrou muito atraente para os estudantes.

Com relação ao experimento para a medida da velocidade dos barcos nas fotos do *Google Earth*, alunos do ensino médio entrevistados após a realização da atividade revelaram sua surpresa por conseguirem medir a velocidade dos barcos a partir de fotografias estáticas. A atividade exemplifica como conhecimentos científicos têm uma enorme capacidade de aplicação e generalização, podendo ser utilizados em situações imprevistas. O experimento também foi uma boa oportunidade para o estudo da dispersão das ondas na água, especialmente no ensino superior. Muitos estudantes só têm contato com o tema quando estudam a dispersão de ondas eletromagnéticas, em estágios

mais avançados dos cursos de Física ou Engenharia. A relação de dispersão das ondas na água é bem mais simples que a encontrada no eletromagnetismo, e poderia servir como introdução ao tema. A demonstração do apêndice F procura ilustrar isto. O estudo também desmistifica a ideia de que a esteira produzida por barcos é equivalente ao cone de Mach, como sugerem vários livros-textos de Física.

Esperamos que este trabalho dê uma contribuição ao ensino das ondas mecânicas. As seguintes palavras de Feynman nos encorajam:

*“Acredito, entretanto, que não há qualquer solução para esse problema da educação que não seja perceber que o melhor ensino só pode ser feito quando (...) há uma situação na qual os estudantes discutem ideias, pensam sobre coisas e falam sobre coisas. É impossível aprender muito sobre algo simplesmente comparecendo às aulas, ou mesmo simplesmente resolvendo problemas determinados.” (Feynman, 1963, p. 5, tradução livre).*

# Apêndice A

## Uma sequência de ensino-aprendizagem sobre ondas sonoras.

Apresentamos a seguir uma sequência de ensino-aprendizagem sobre tubos sonoros. Com ela pretendemos que os estudantes compreendam que:

- o som pode ser interpretado como a oscilação de diferentes grandezas físicas: a pressão do ar e deslocamento médio de suas moléculas, por exemplo;
- embora a pressão do ar e o deslocamento das moléculas representem o mesmo fenômeno, essas grandezas apresentam diferença de fase  $90^\circ$  de entre si;
- a intensidade do som audível está associada à variação da pressão do ar, e não ao deslocamento de suas moléculas.

## Abordagem

1. A abordagem do professor tem início com a apresentação dos tubos sonoros abertos e fechados (figura A.1).

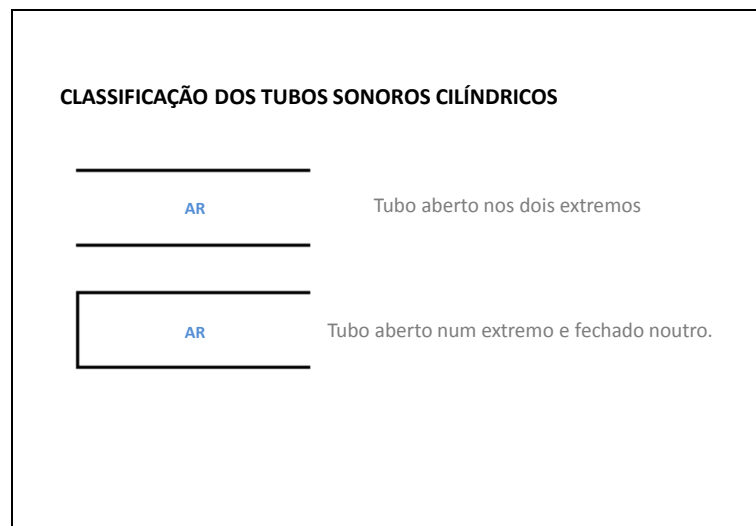
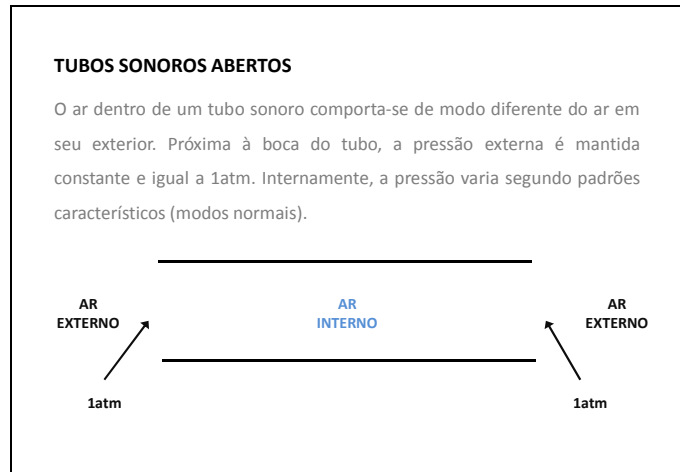


Figura A.1 Apresentação do tubo cilíndrico aberto e fechado.

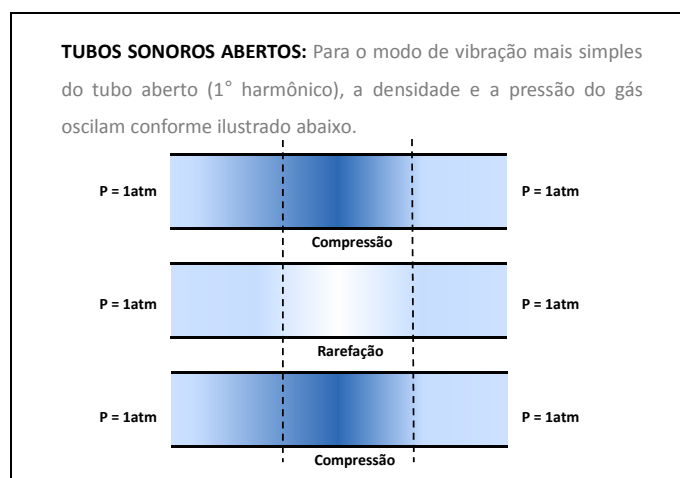


2. A figura A.2 permite que o professor inicie as discussões a respeito das condições de contorno do tubo sonoro aberto. O ar no interior do tubo está sujeito às variações de pressão impostas pela passagem da onda sonora. No entanto, próximo à boca do tubo, o ar externo apresenta a pressão constante de aproximadamente 1atm.



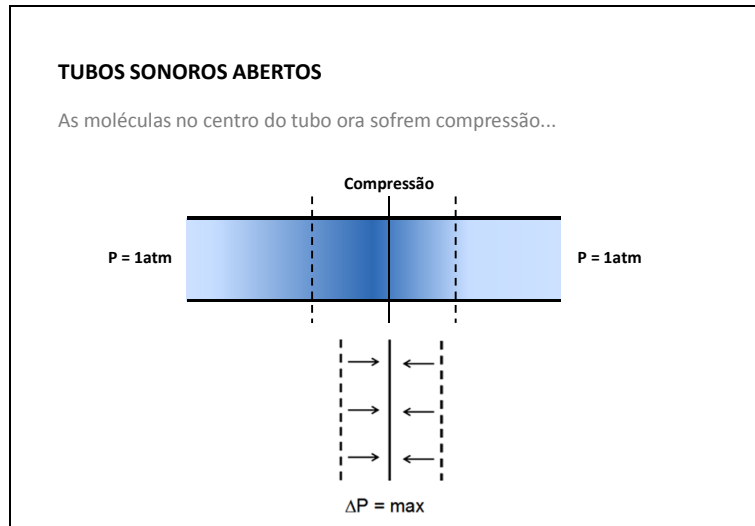
**Figura A.2** Condição de contorno associada à pressão do ar ao longo de um tubo sonoro aberto.

3. É conveniente iniciar a discussão a partir do primeiro modo normal de vibração. Começaremos a abordagem com o tubo sonoro aberto. O professor deve associar as condições de contorno da figura A.2 com a figura A.3. O aumento da intensidade da cor nesta figura representa o aumento da pressão e da densidade do ar no tubo.

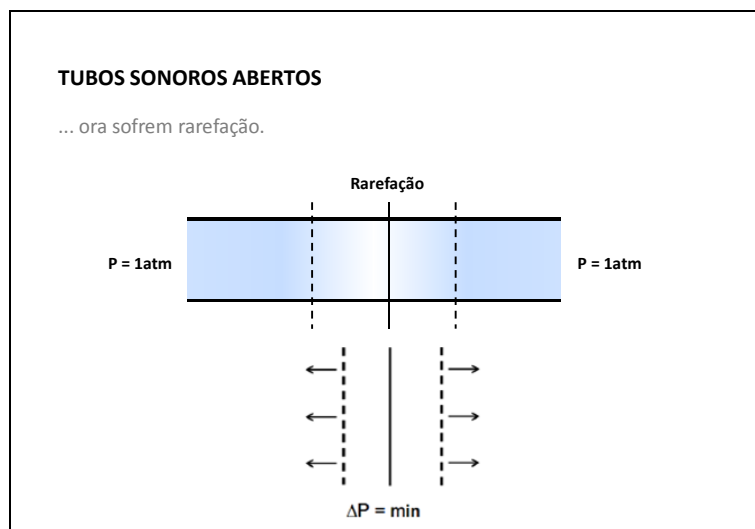


**Figura A.3** 1° harmônico no tubo aberto: a intensidade da cor está associada com a pressão e a densidade do ar no tubo.

4. O professor deve discutir especialmente a variação de pressão do gás no centro do tubo. O comportamento das camadas de ar adjacentes a ela é destacado nas figuras A.4 e A.5. Elas apresentam, respectivamente, a compressão e a rarefação do ar nesta região.



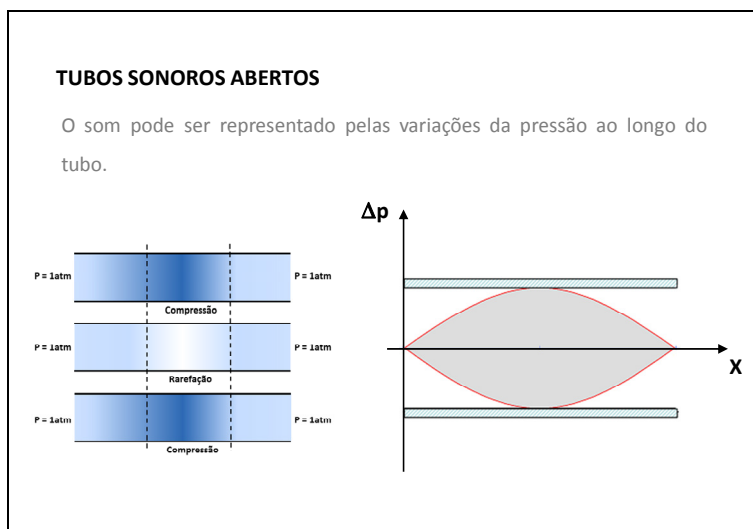
**Figura A.4** 1° harmônico do tubo aberto: compressão do ar no centro do tubo.



**Figura A.5** 1° harmônico do tubo aberto: rarefação do ar no centro do tubo.

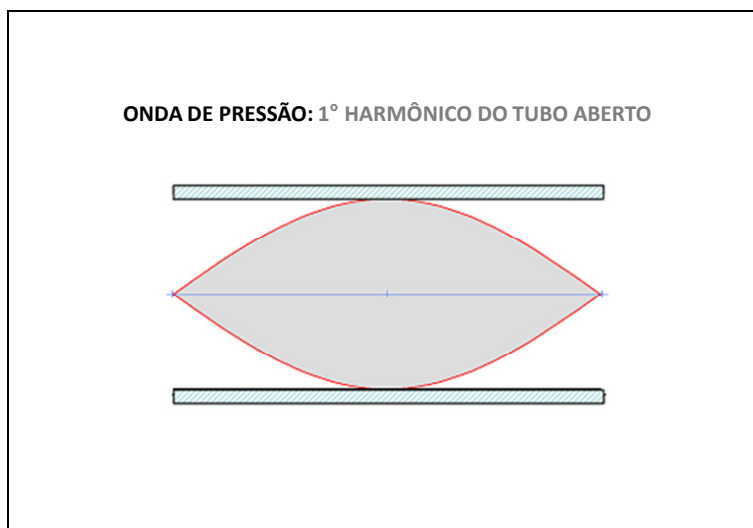
5. A seguir, o professor deve associar a intensidade da cor no diagrama da figura A.3 com o gráfico da pressão em função da posição da figura A.6. Isto é particularmente importante porque a visualização das oscilações longitudinais está sendo representada como uma amplitude de vibração na direção

transversal. Como aponta a literatura, os estudantes têm dificuldade para compreender esta transposição. De fato, uma leitura frequentemente equivocada deste gráfico leva-os a interpretar o som como uma onda transversal.



**Figura A.6** 1º harmônico do tubo aberto: relação entre as variações de pressão e o gráfico da pressão em função da posição ao longo do tubo.

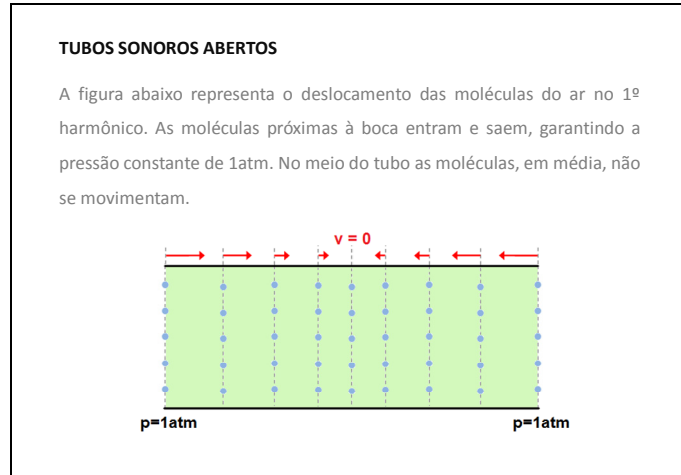
6. A onda de pressão deve ser destacada como uma possível representação do som, como na figura A.7.



**Figura A.7** 1º harmônico do tubo aberto: onda de pressão.

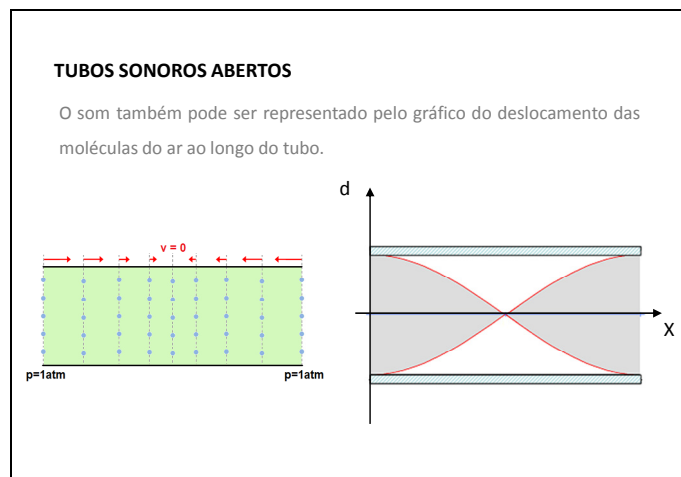
7. Após abordar o som como uma onda de pressão, o professor deve destacar que há outro modo de representá-lo. Ele deve então discutir o

deslocamento das moléculas ao longo do tubo. A figura A.8 caracteriza a velocidade das moléculas em seu interior. As moléculas do centro ficam, em média, paradas. Na boca do tubo, as moléculas oscilam com amplitude máxima.



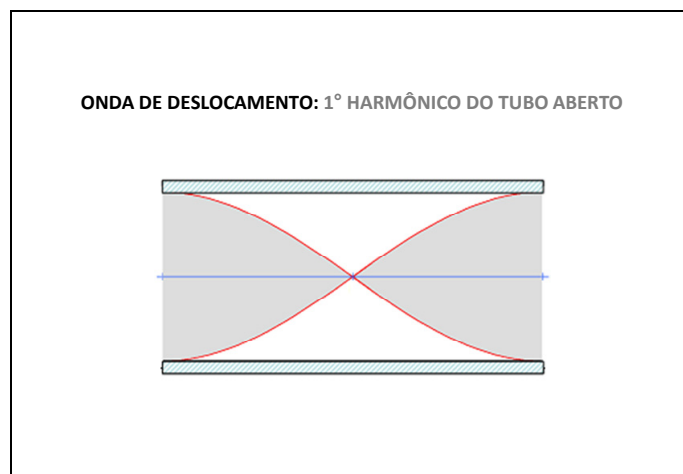
**Figura A.8** Representação do deslocamento das moléculas no interior do tubo sonoro aberto.

8. A figura A.9 possibilita a comparação entre a figura A.8 e o gráfico do deslocamento das moléculas em função da posição no tubo. Novamente as oscilações longitudinais do som são representadas como amplitudes de oscilação transversais.



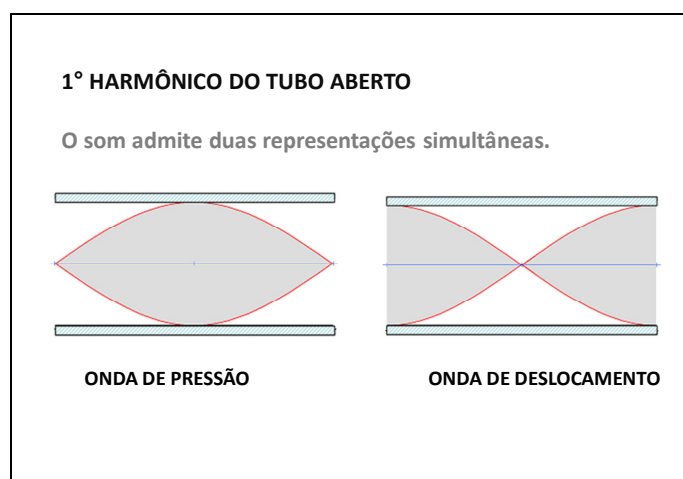
**Figura A.9** 1º harmônico do tubo aberto: relação entre o deslocamento longitudinal das moléculas e o gráfico do deslocamento em função da posição ao longo do tubo.

9. A figura A.10 destaca o gráfico do deslocamento em função da posição.



**Figura A.10** 1° harmônico do tubo aberto: onda de deslocamento.

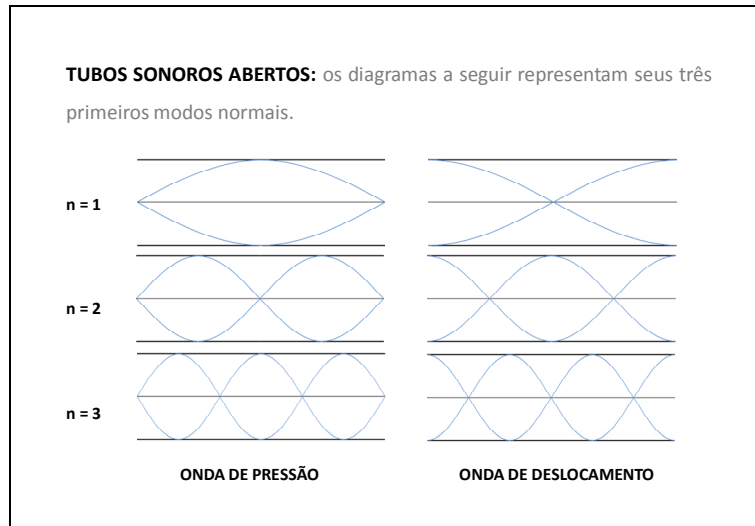
10. As duas representações do som devem ser comparadas explicitamente, como na figura A.11. Também está disponível no site do Mestrado Profissional em Ensino de Física ([http://www.if.ufrj.br/~pef/producao\\_academica/material\\_didatico.html](http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/material_didatico.html)), do IF-UFRJ, e no portal de compartilhamento de vídeos YouTube (<http://www.youtube.com/watch?v=xz3slGyRAj8>), um pequeno vídeo que ilustra as vibrações das moléculas no 1° harmônico. Ele pretende facilitar a sequência de discussões apresentadas acima com um material de maior apelo visual.



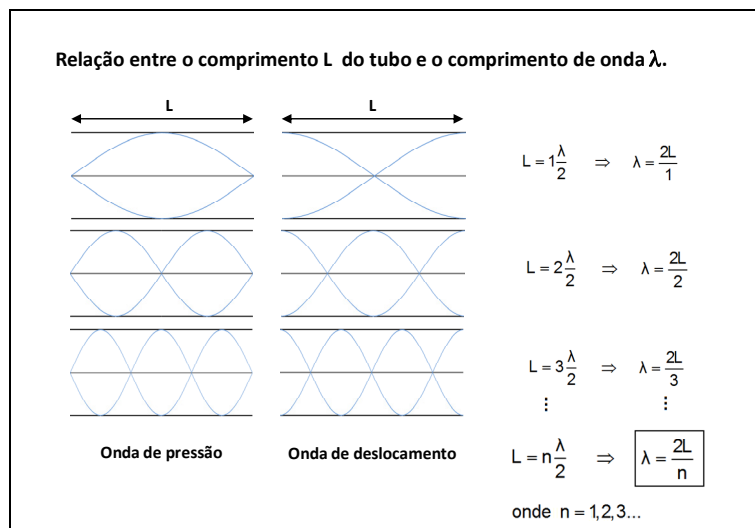
**Figura A.11** 1° harmônico do tubo aberto: comparação entre a representação do som como onda de pressão e de deslocamento.

11. Neste momento o professor pode realizar a análise matemática dos modos normais nos tubos sonoros. A figura A.12 mostra os três primeiros

modos de vibração do tubo aberto. A figura A.13 mostra a relação entre o comprimento de onda  $\lambda$  de cada modo normal e o comprimento  $L$  do tubo. Nestas duas figuras, as ondas de pressão e de deslocamento são evidenciadas.

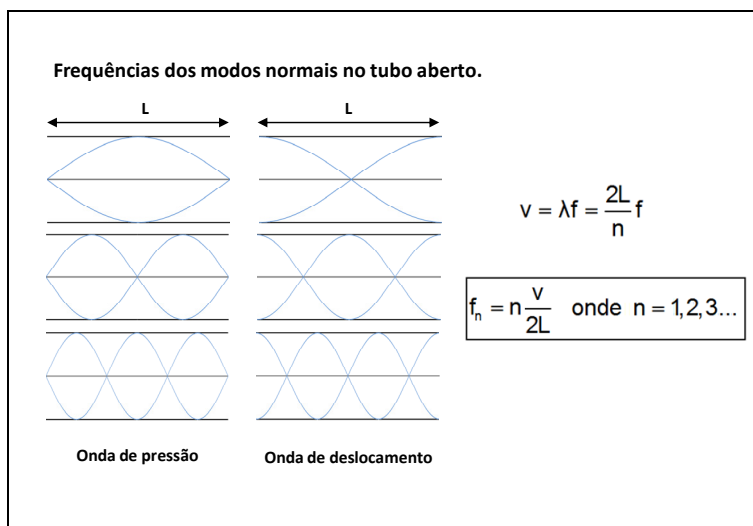


**Figura A.12** Acima, ondas de pressão e deslocamento correspondentes aos três primeiros modos normais do tubo aberto.



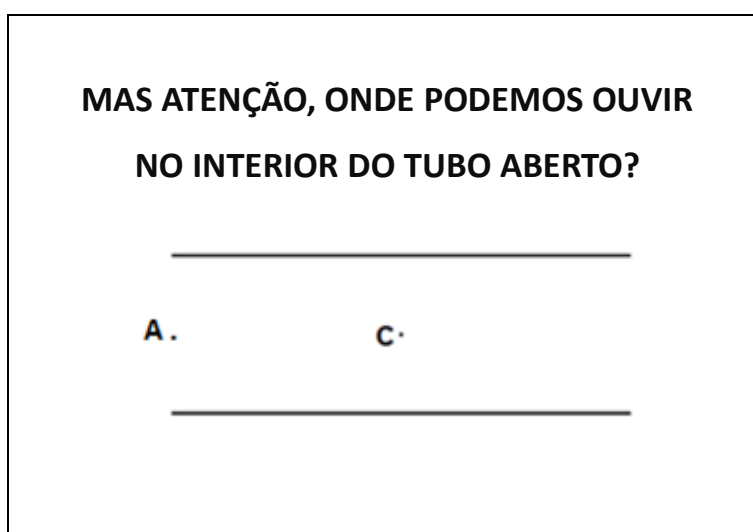
**Figura A.13** Acima, relação entre o comprimento de onda  $\lambda$  e o comprimento  $L$  do tubo aberto.

12. A equação das frequências de ressonância do tubo aberto deve então ser demonstrada, como na figura A.14.



**Figura A.14** Equação para o cálculo das frequências dos modos normais do tubo aberto.

13. Todas as discussões anteriores devem culminar na pergunta chave: **onde é possível ouvir som no interior de um tubo sonoro?** Em outras, palavras, qual é a relação entre a representação do som como onda de pressão, como onda de deslocamento e o sentido da audição (figura A.15)?



**Figura A.15** O professor deve explorar em que pontos há som audível.

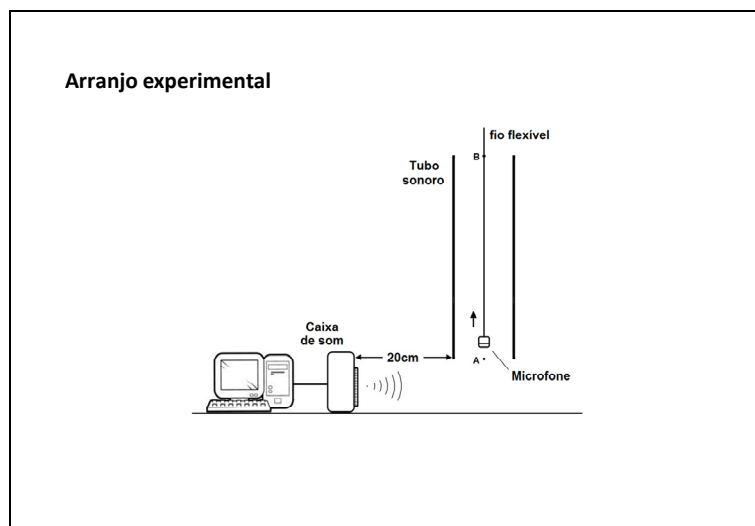
14. O professor deve chamar a atenção para o fato de que as duas representações da figura A.16 são aparentemente conflitantes: onde uma onda é máxima/mínima a outra é nula. Nesta etapa, o professor deve explorar todas as hipóteses que os alunos puderem levantar, talvez relacionando-as no quadro ou pedindo que descrevam suas ideias em folha separada.



**Figura A.16** Após a discussão sobre a dualidade na representação das ondas sonoras, o professor deve explorar as hipóteses dos alunos sobre os locais onde existe som audível. Há um aparente paradoxo aparente: os diagramas sugerem respostas contraditórias.

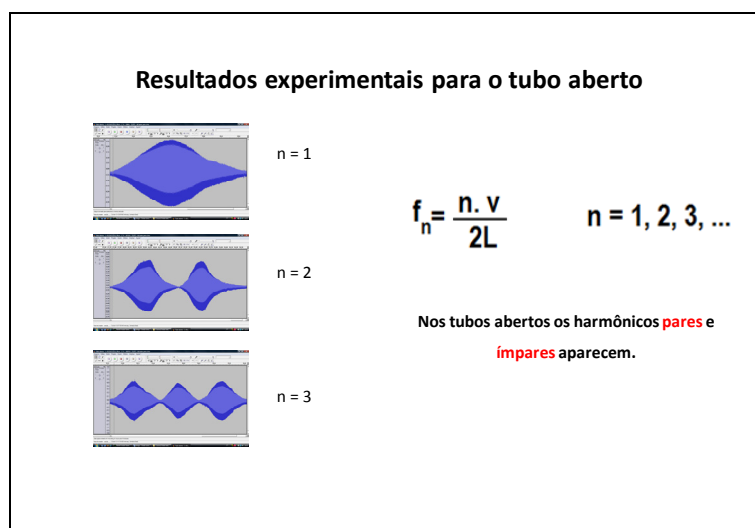
15. Após ter explorado as concepções dos alunos, o professor pode provocá-los a imaginar um modo de resolver a dúvida sobre o local onde há som audível. Em termos mais gerais, a questão é: ouvimos a variação da pressão ou o deslocamento do ar? Talvez alguns deles sugiram a realização de um experimento, caso contrário o próprio professor deve fazê-lo. Neste momento, o aparato experimental pode ser introduzido e o papel do microfone como um aparelho análogo ao ouvido humano deve ser destacado. O apêndice B (Mapeando ondas sonoras num tubo) faz uma descrição sucinta dos materiais e procedimentos experimentais da atividade (figura A.17).





**Figura A.17** Montagem experimental.

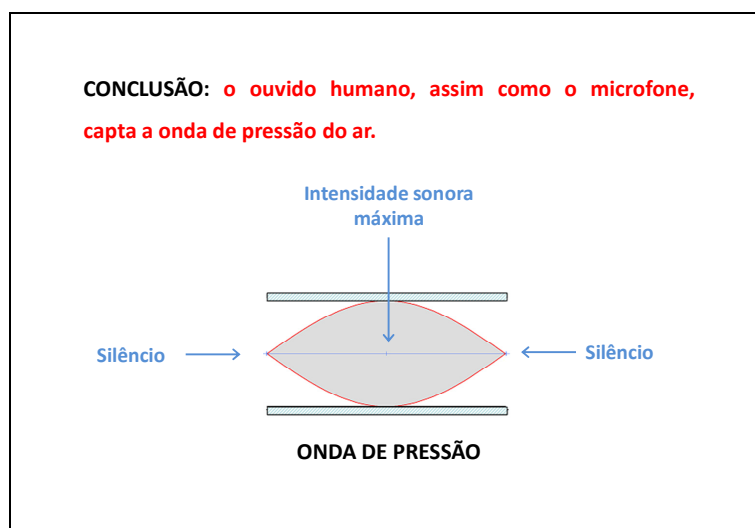
16. É importante que o experimento seja discutido como o critério mais adequado para a elucidação da questão apresentada. Deste modo, os estudantes poderão resolver um problema real a partir de suas próprias atividades práticas. Os resultados experimentais típicos para os três primeiros harmônicos de um tubo aberto são mostrados na figura A.18.



**Figura A.18** Tubo sonoro aberto: resultados da medida da intensidade sonora para os três primeiros modos normais.

17. Por último, após a realização do experimento, mais uma vez o professor deve provocar os alunos para que relacionem os diagramas de pressão e de deslocamento estudados com os resultados empíricos obtidos

(figura A.19). Além de haver uma semelhança notável entre as ondas de pressão e estes resultados, é muito importante que o professor e os alunos ouçam o som registrado pelo microfone. A variação da intensidade sonora é muito pronunciada e provavelmente chamará a atenção de todos.



**Figura A.19** Relação entre o diagrama de pressão e a intensidade do som audível.

### Comentários

A comparação entre as previsões dos estudantes e os dados experimentais é fundamental para o entendimento das múltiplas representações do som e para que consigam estabelecer a relação correta entre a teoria ondulatória e a intensidade do som audível.

Em cada uma das figuras acima indicamos as discussões que julgamos pertinentes para a abordagem do som nos tubos sonoros. De fato, as figuras deste apêndice formam um conjunto de slides que o professor pode utilizar em sala de aula, se desejar. Os slides, juntamente com este roteiro, estão disponíveis na página do Mestrado Profissional em Ensino de Física do IF-UFRJ ([http://www.if.ufrj.br/~pef/producao\\_academica/material\\_didatico.html](http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/material_didatico.html)).

Nos slides o professor também encontra a discussão dos tubos sonoros fechados. Sua abordagem pode ser feita de modo análogo a que foi apresentada neste roteiro para o tubo aberto: exposição conceitual das ondas de pressão e deslocamento; comparação entre estas duas representações; análise matemática dos modos normais; questionamento da relação entre as

ondas de pressão, deslocamento e o sentido da audição; atividade experimental; análise dos resultados e comparação com os argumentos prévios dos estudantes.

# Apêndice B

## Mapeando ondas sonoras num tubo.

A seguir, descrevemos sucintamente o procedimento experimental para o estudo dos modos normais das ondas sonoras no interior de tubos cilíndricos abertos e fechados.

### Materiais

1. Computador.
2. Microfone de PC. É preciso que seja pequeno e tenha um fio flexível.
3. Caixa de som portátil.
4. Tubo de papelão, plástico etc. Seu diâmetro deve ser largo o suficiente para permitir a passagem do microfone com folga. Seu tamanho deve ser menor que o comprimento do fio do microfone que irá atravessá-lo de uma extremidade a outra.
5. Programas para geração e análise de áudio. Há muitos disponíveis na Internet. Indicamos o *SweepGen* (<http://www.satsignal.eu/software/audio.html>) e o *Audacity* (<http://audacity.sourceforge.net/?lang=pt>) porque são inteiramente gratuitos e têm todas as funções necessárias ao experimento.

### Objetivo

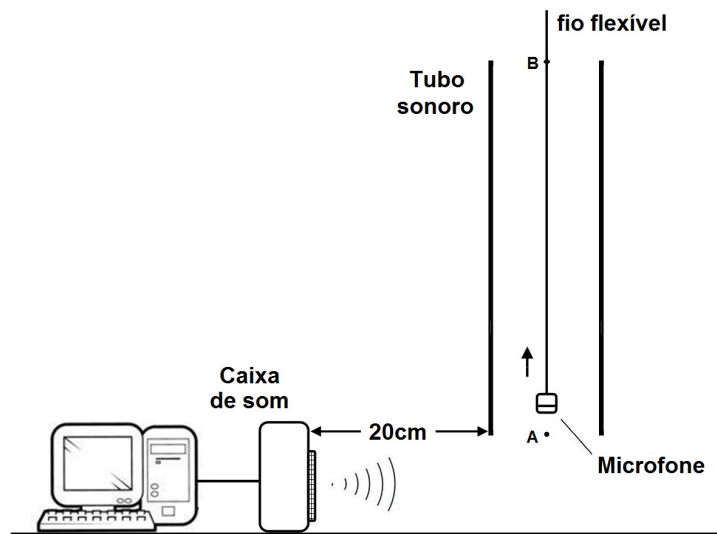
Mapear a intensidade do som audível no interior de tubos sonoros cilíndricos abertos e fechados.

### Procedimentos experimentais

#### a) Tubo sonoro aberto

A figura B.1 ilustra o procedimento experimental. Um tubo sonoro é fixado na direção vertical e uma caixa de som é posicionada próxima à sua boca. A caixa

de som não deve encostar nessa extremidade. Uma distância que se revelou apropriada é cerca de 20 cm do tubo.



**Figura B.1** Montagem do experimento.

Após medir o comprimento  $L$  do tubo, calcule suas frequências de ressonância de acordo com a equação

$$f_n = n \frac{v_{\text{som}}}{2L}, \text{ onde } n = 1, 2, 3... \quad (\text{B.1})$$

As variações da velocidade do som com a temperatura devem ser irrelevantes neste experimento, e o valor  $v_{\text{som}} = 340\text{m/s}$  pode ser adotado.

Com o programa *SweepGen* produza uma onda senoidal da frequência de seu 1° modo normal de vibração. Simultaneamente, acione a gravação do som através do programa *Audacity* e desloque o microfone de uma extremidade a outra do tubo. A gravação é encerrada com a saída do microfone na extremidade oposta do tubo.

É importante que o microfone não seja largo a ponto de prejudicar a passagem do som pelo tubo, modificando acentuadamente sua geometria (figura B.1). Se o seu fio for bem flexível, será mais fácil movimentá-lo colocando-o inicialmente próximo da extremidade inferior e, com o transcorrer da gravação, ir erguendo-o até a extremidade superior.

O microfone do computador, assim como o ouvido humano, é um sensor de pressão e, portanto, será capaz de transformar variações da pressão do ar em variações de intensidade sonora.

Comece o procedimento acima com a frequência do modo fundamental, depois repita-o para os modos superiores de vibração.

### b) Tubo sonoro fechado

O procedimento experimental desta etapa é muito semelhante ao da anterior, exceto pelo fato das frequências de ressonâncias do tubo serem calculadas pela equação (B.2).

$$f_n = n \frac{v_{\text{som}}}{4L}, \text{ onde } n = 1, 3, 5... \quad (\text{B.2})$$

O tubo aberto pode ser transformado num tubo fechado simplesmente vedando sua extremidade inferior com uma tampa. Esta, por sua vez, pode ser improvisada com um pedaço de papel e fita adesiva, por exemplo.

Não é necessário mexer na posição da caixa de som. A mesma distância de aproximadamente 20 cm funciona bem para os tubos fechados (figura B.2).

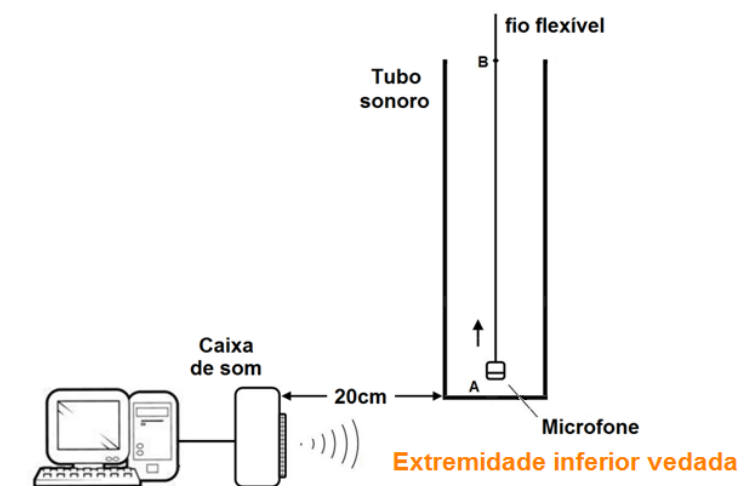


Figura B.2 Arranjo experimental para o tubo fechado.

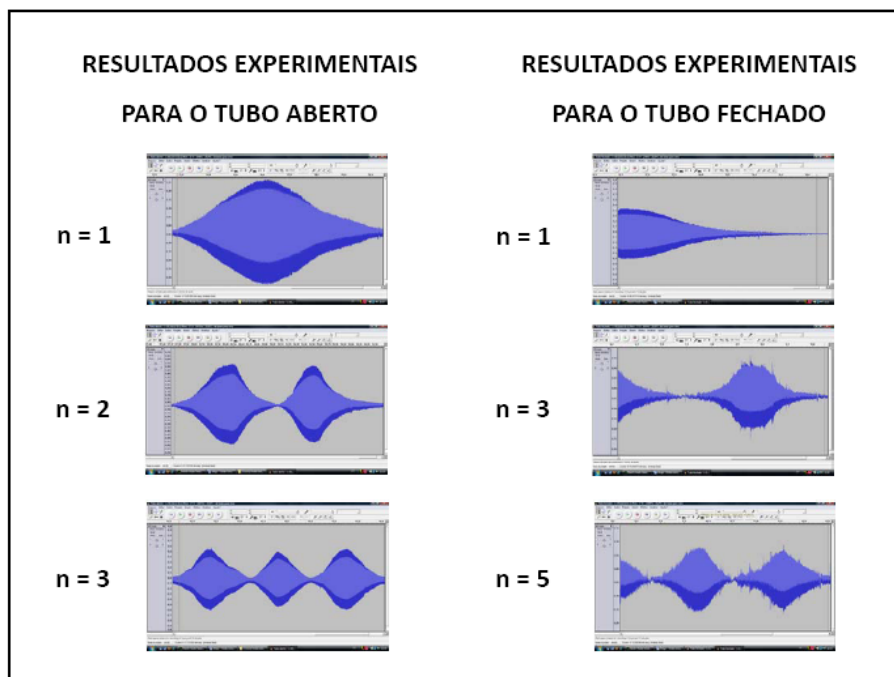
A gravação também pode ser feita do mesmo modo que na primeira etapa. Posicione inicialmente o microfone na extremidade inferior, agora fechada pela

tampa. Acione o tom harmônico calculado e inicie a gravação com o *Audacity*. Erga o microfone até a extremidade superior, quando a gravação poderá ser interrompida.

Comece o procedimento acima com a frequência do modo fundamental, depois repita-o para os modos superiores de vibração.

## Resultados experimentais e comentários

Com duas ou três tentativas, é possível aprender a deslocar o microfone de modo aproximadamente uniforme. Desse modo, figuras simétricas devem aparecer na tela do computador como indicam os resultados experimentais da figura B.3.



**Figura B.3** Resultados experimentais da medida da intensidade sonora para os três primeiros modos normais de tubo sonoro aberto e outro fechado.

As equações (B.1) e (B.2) não preveem com exatidão as frequências de ressonância dos tubos sonoros. Como o diâmetro do tubo não é muito menor que seu comprimento, uma correção pode ser feita nestas expressões. As equações (B.3), para o tubo aberto, e (B.4), para o tubo fechado, introduzem o efeito do diâmetro  $D$  nas frequências de ressonância:

$$f_n = n \frac{V_{\text{som}}}{2(L + 0,6D)} \quad , \quad (\text{B.3})$$

$$f_n = n \frac{V_{\text{som}}}{4(L + 0,3D)} \quad . \quad (\text{B.4})$$

As correções acima geram modificações quase imperceptíveis nos formatos das ondas gravadas com o Audacity. Como este detalhe é irrelevante para a obtenção dos resultados acima, sugerimos que ele não seja mencionado para alunos do ensino médio. Isto só introduziria uma dificuldade adicional sem qualquer ganho em termos conceituais.



# Apêndice C

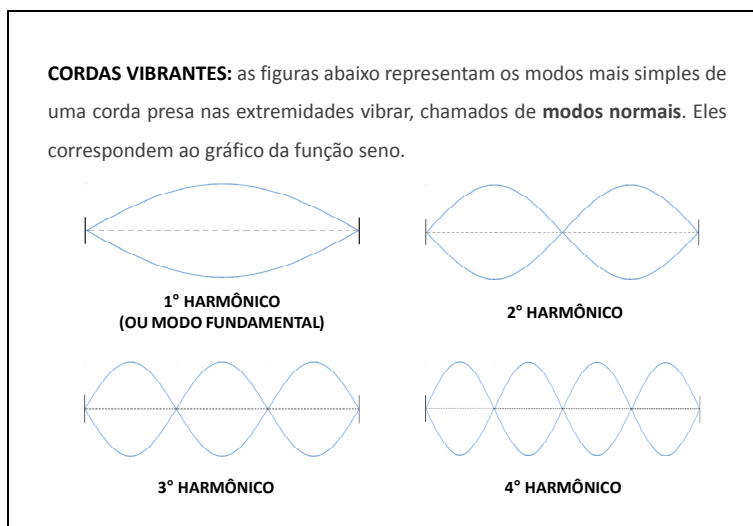
## **Uma sequência de ensino-aprendizagem para o estudo dos modos normais das cordas vibrantes.**

Apresentamos a seguir uma sequência de ensino-aprendizagem a respeito dos modos normais de vibração de cordas e tubos sonoros. A atividade pretende que os estudantes compreendam:

- que é possível medir as frequências harmônicas que compõem um determinado som através de um procedimento denominado análise espectral;
- que cordas vibrantes, ainda que percutidas uma única vez, emitem uma combinação de sons harmônicos cujas frequências correspondem às suas frequências naturais de ressonância;
- que, tal qual as cordas vibrantes, os tubos sonoros emitem sons harmônicos cujas frequências também correspondem às suas frequências de ressonância;
- que o timbre de um instrumento musical ou sistema acústico deve-se à distribuição particular das intensidades dos tons harmônicos que compõem o som que eles emitem;

### **Abordagem**

1. Inicialmente o professor deve fazer a abordagem usual sobre os modos normais de uma corda presa nas extremidades, como mostrado na figura C.1



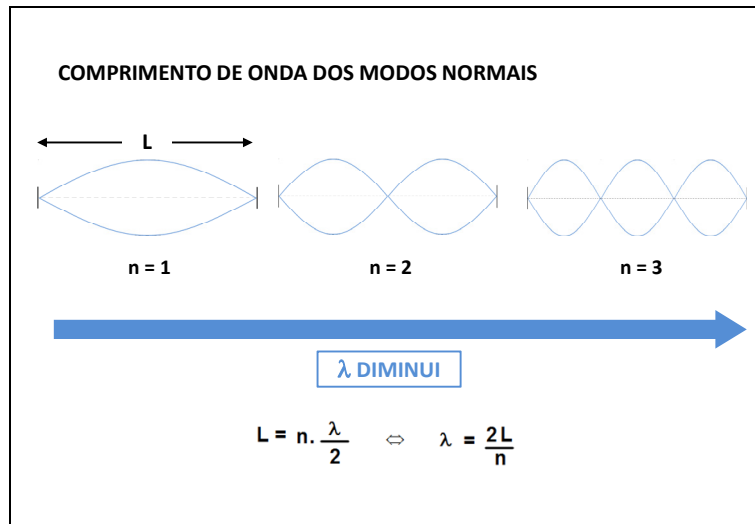
**Figura C.1** Modos normais de vibração de uma corda presa nas extremidades.

2. É importante que o professor caracterize que os padrões adquiridos pela corda na figura C.1 seriam obtidos através de um agente externo que a levasse a oscilar, tal como a mão da figura C.2. Contudo, para que isto ocorra, é necessário que a mão oscile harmonicamente em frequências específicas.

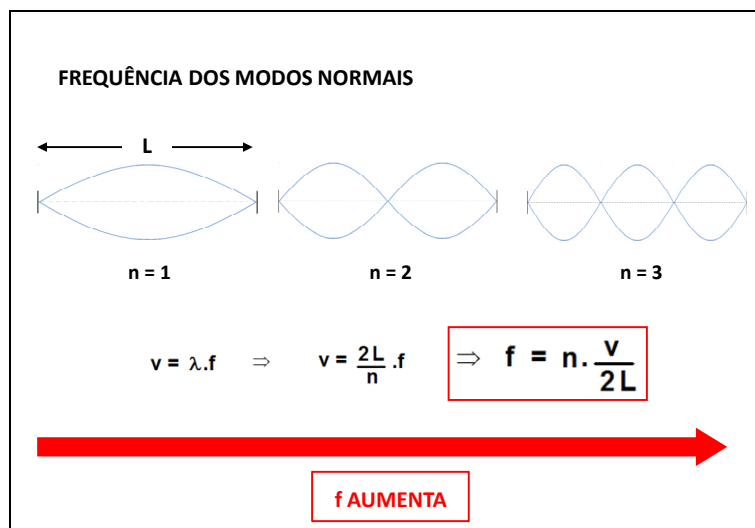


**Figura C.2** Acima, a mão de uma pessoa oscila verticalmente com mesma frequência do modo fundamental da corda.

3. O professor deve então apresentar os comprimentos de onda (figura C.3) dos modos normais da corda, suas frequências (figura C.4) características, assim como a relação matemática entre ambos.



**Figura C.3** Comprimento de onda dos modos normais da corda vibrante.



**Figura C.4** Frequências dos modos normais da corda vibrante.

4. Talvez seja interessante que o professor resolva um ou dois exemplos numéricos exercitando a aplicação da equação da corda vibrante. Ele deve também ressaltar que as frequências de ressonância da corda são múltiplas inteiras da fundamental (figura C.5).

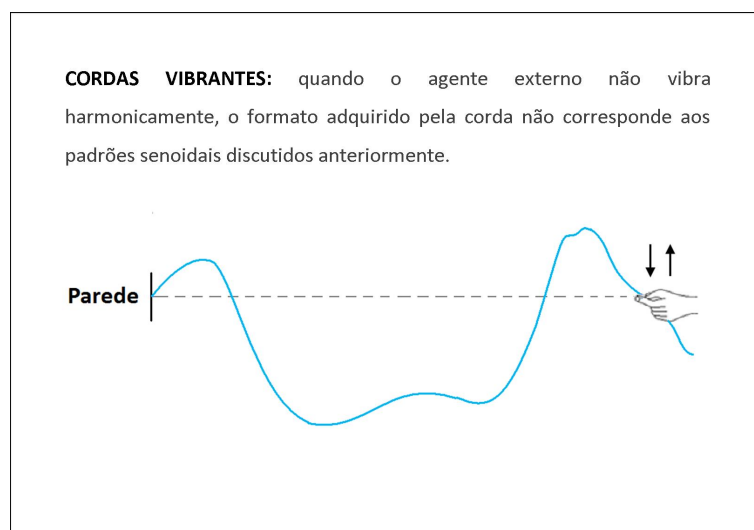
**MODOS NORMAIS DA CORDA VIBRANTE**

$$f = n \cdot \frac{v}{2L} \quad \text{com} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- Frequência do 1º harmônico (modo fundamental):  $f_1 = v/2L$
- Todos os modos normais têm frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental:  $f_n = n \cdot f_1$

**Figura C.5** As frequências de ressonância são múltiplas inteiras da fundamental.

5. O professor deve discutir que, caso a mão da figura C.2 não execute um movimento harmônico, o formato adquirido pela corda não corresponderá àqueles discutidos na figura C.1, mas a um padrão irregular como na figura C.6.




**Figura C.6** Formato irregular adquirido pela corda quando o agente externo (a mão) não executa um movimento harmônico.

6. Neste momento, os estudantes têm os subsídios necessários para explorar qual o som uma corda vibrante gera ao ser tocada. O professor deve então perguntar: **qual a frequência do som emitido por uma corda presa em ambas as extremidade, como num violão ou num piano, quando é**

percutida? A corda vibra exclusivamente no primeiro harmônico, no segundo etc? Por que ela escolheria um deles em particular? Será que quando não é obrigada a oscilar continuamente numa determinada frequência, como na figura C.2, ela não oscila em qualquer um dos modos normais apresentados?

### INVERTENDO O PROBLEMA

Dissemos que uma corda de violão pode vibrar no 1° harmônico, no 2° harmônico e assim por diante. Contudo, ao tocamos uma corda presa nos extremos, qual a frequência do som produzido?



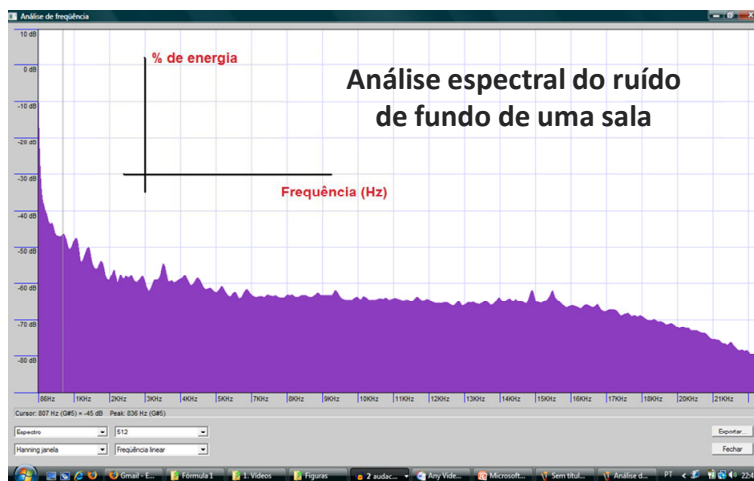
**Figura C.7** O professor deve questionar os aluno sobre o som que uma corda produz quando tocada.

7. Essas e outras perguntas podem surgir a partir da discussão acima. Recomendamos que o professor registre no quadro as respostas mais frequentes dadas pelos estudantes. Só então ele deve questioná-los sobre a possibilidade de medir a(s) frequência(s) do som emitido por uma corda vibrante.

8. O professor deve apresentar os procedimentos e materiais necessários para a realização da análise espectral do som de uma corda de violão. O apêndice D (Análise espectral de cordas de violão e tubos sonoros) descreve este experimento.

9. É muito importante que o experimento seja visto como o procedimento adequado para dirimir as dúvidas levantadas pelo professor. Este, por sua vez, deve dar as instruções mínimas para que os próprios estudantes realizem a análise espectral do som da corda. Sugerimos que o professor a descreva

sucintamente como um método através do qual podemos identificar as intensidades das frequências harmônicas que compõem um som. O gráfico da figura C.8 pode servir de exemplo desta ideia.



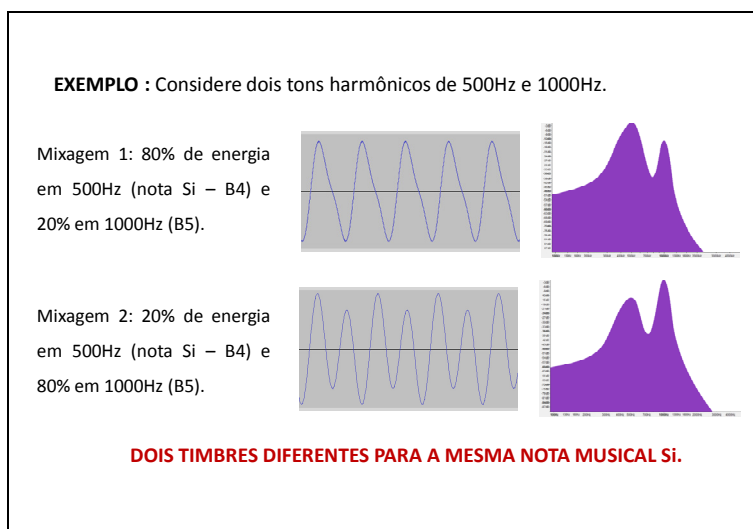
**Figura C.8** Análise espectral do ruído de fundo de uma sala.

10. Assim como sugerido no apêndice D, após a realização da análise espectral propriamente dita, é importante que os estudantes tracem o gráfico da frequência dos picos em função da ordem N dos harmônicos. A linearidade entre estas grandezas é uma evidência da relação teórica que haviam estudado anteriormente.

11. É fundamental que o professor retome a pergunta inicial comparando as hipóteses levantadas pelos estudantes com suas interpretações após a realização do experimento.

12. Por último, o conceito de timbre deve ser definido como uma superposição particular de tons harmônicos em diferentes proporções. A figura C.9 apresenta duas combinações diferentes de tons senoidais de 500Hz e 1000Hz. O professor pode pedir que os alunos usem o Audacity para realizar a geração destes sons, sua mixagem e, em seguida, sua própria análise espectral. Os comandos do programa podem ser localizados sem grandes

dificuldades e esta é uma boa oportunidade para que os estudantes criem novas possibilidades para explorar os conceitos aprendidos.



**Figura C.9** Superposição de tons harmônicos em diferentes proporções produzem timbres diferentes.

As figuras desta atividade formam um conjunto de slides que o professor pode utilizar em sala de aula, se desejar. Os slides, juntamente com este roteiro, estão disponíveis na página do Mestrado Profissional em Ensino de Física do IF-UFRJ ([http://www.if.ufrj.br/~pef/producao\\_academica/material\\_didatico.html](http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/material_didatico.html)).

# Apêndice D

## Análise espectral de cordas de violão e tubos sonoros.

Apresentamos abaixo um experimento que permite realizar a análise espectral do som de cordas de violão e de tubos sonoros através de um computador e de um microfone de PC. Relacionamos os materiais utilizados, descrevemos a metodologia e comentamos os resultados obtidos.

### Materiais

1. Computador.
2. Microfone de PC.
3. Violão ou outro instrumento de corda.
4. Tubos sonoros cilíndricos.
5. Programas para análise de áudio. Recomendamos a utilização do Audacity (<http://audacity.sourceforge.net/?lang=pt>).

### Objetivo

Medir as frequências harmônicas do som das cordas de um violão e de um tubo sonoro.

### Procedimentos experimentais

#### a) Cordas de violão

Abra o Audacity e inicie a gravação do ruído de fundo do local onde está. Em seguida, encerre a gravação e acione, na barra de tarefas, os comandos *Analisar > Espectro de frequência*. Uma nova tela será mostrada com o gráfico da intensidade sonora em função da frequência da onda harmônica. Se seu ambiente for razoavelmente silencioso, a figura será semelhante a D.1 abaixo.

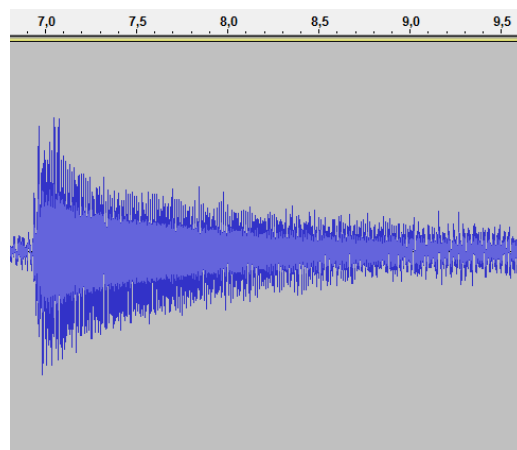




**Figura D.1** Análise espectral do ruído de fundo de uma sala.

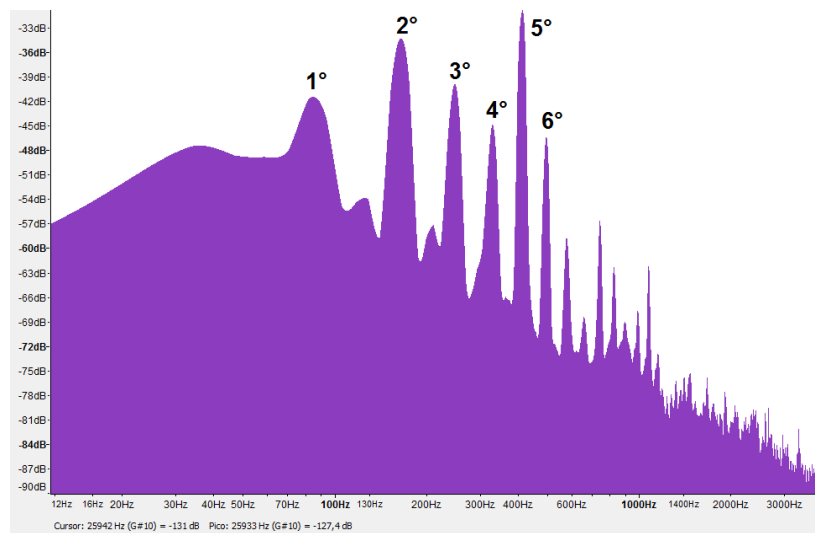
Logo abaixo do gráfico, existem controles que permitem a mudança da escala horizontal de linear para logarítmica, o aumento do grau de discretização da análise espectral, revelando mais detalhes da distribuição de frequências do som escolhido, entre algumas outras funções.

Após se familiarizar com os comandos principais, aproxime o microfone da boca de um violão e bata numa de suas cordas. Por exemplo, de baixo para cima, bata na sexta corda solta (nota mi). A figura D.2 mostra a tela típica do Audacity com a gravação deste som.



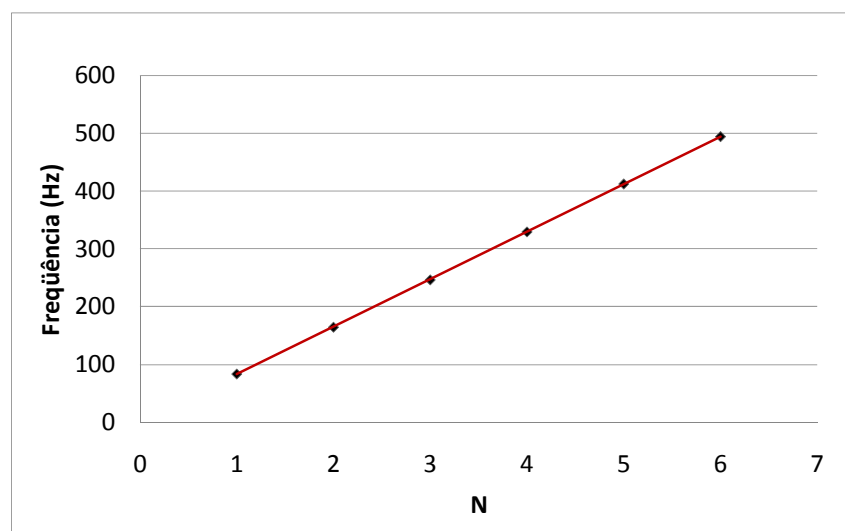
**Figura D.2** Gravação do som emitido pela 6ª corda do violão.

Em seguida, aplique a análise espectral a este som. O resultado será semelhante à figura D.3.



**Figura D.3** Análise espectral do som da 6ª corda de um violão.

As frequências dos picos da análise espectral (84, 165, 247, 330, 413, 495 Hz...) podem representadas num gráfico em função dos números naturais que indicam a ordem do harmônico (figura D.4).

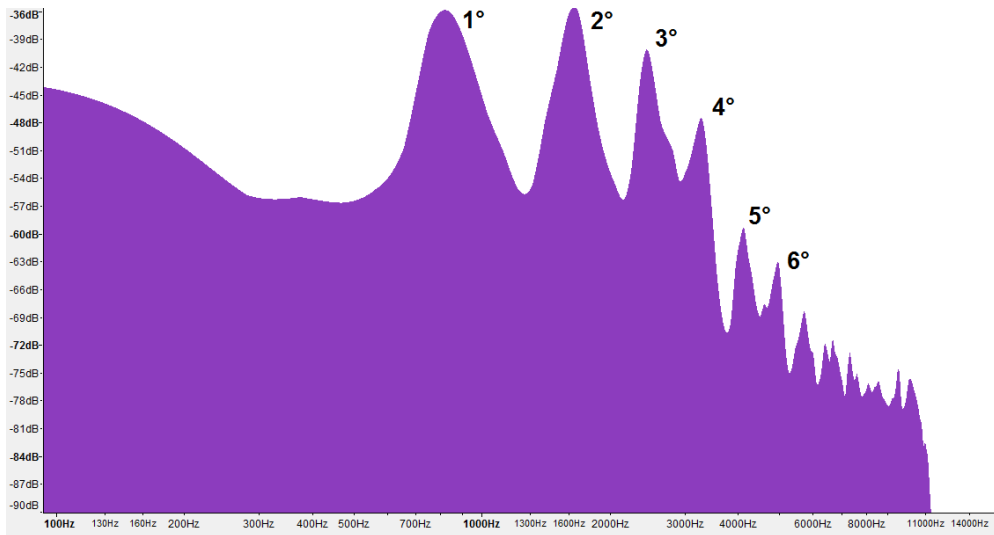


**Figura D.4** Corda vibrante: relação entre as frequências da análise espectral da figura 5.2 e os números naturais.

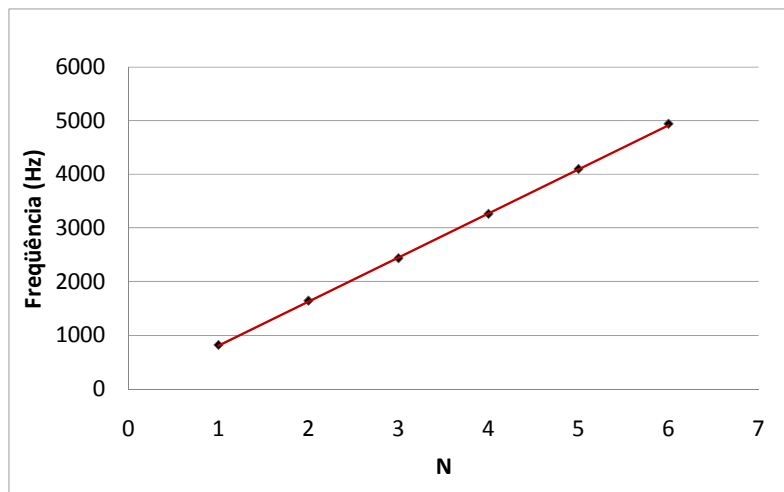
### **b) Tubos sonoros**

Procedimento análogo ao anterior pode ser feito para um tubo sonoro.

Aproxime o microfone de um pequeno tubo sonoro aberto em ambos os extremos. Numa destas extremidades, sopre suavemente na direção transversal. Grave o ruído produzido e, novamente, aplique a função do Audacity que faz a análise espectral. O resultado será semelhante ao da figura D.5.



**Figura D.5** Análise espectral do som produzido por um tubo sonoro.



**Figura D.6** Tubo sonoro: relação entre as frequências presentes na análise espectral da figura 5.5 e os números naturais.

O tubo sonoro utilizado possuía cerca 20 cm de comprimento e 1,7 cm de diâmetro interno. Assim, sua frequência fundamental deveria ser de, aproximadamente, 834Hz. Os valores obtidos no gráfico da figura D.5 foram:

817, 1.641, 2.432, 3.259, 4.096, 4.937Hz... Isto evidencia uma boa concordância entre a previsão teórica e os dados empíricos.

# Apêndice E

## Medida Doppler da velocidade de uma bola de futebol.

Apresentamos abaixo um experimento que permite a medida da velocidade de uma bola de futebol através do efeito Doppler. Relacionamos os materiais utilizados, descrevemos a metodologia e comentamos os resultados obtidos. Os materiais são de fácil acesso para qualquer escola e a atividade é apropriada especialmente para estudantes do ensino médio.

### Materiais

1. Computador.
2. Microfone.
3. Bola de futebol.
4. Aparelho de som (tipo micro system) ou amplificador.
5. Grade de metal.
6. Programas para geração e análise de áudio. Indicamos o *SweepGen* (<http://www.satsignal.eu/software/audio.html>) e o *Audacity* (<http://audacity.sourceforge.net/?lang=pt>) porque são gratuitos e têm todas as funções necessárias ao experimento.

### Objetivo

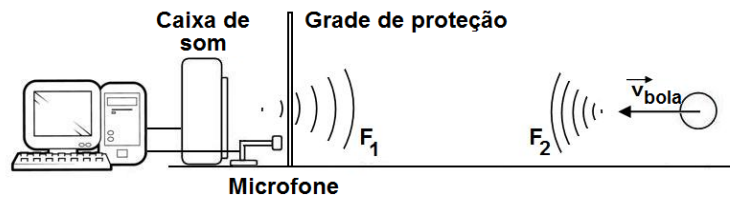
Medir a velocidade de uma bola de futebol através do efeito Doppler.

### Procedimentos experimentais

Após serem ligadas ao computador, o microfone e a caixa de som devem ser posicionados diante de uma bola de futebol (figura E.1). Uma grade de proteção metálica deve ser colocada entre o microfone e a bola para que os aparelhos não sejam danificados.

É necessário que o som do computador seja amplificado. As pequenas caixas de som portáteis têm potência muito baixa para a realização deste

experimento. Aparelhos de som domésticos, com pelo menos 50W ou 100W, devem ser suficientes.



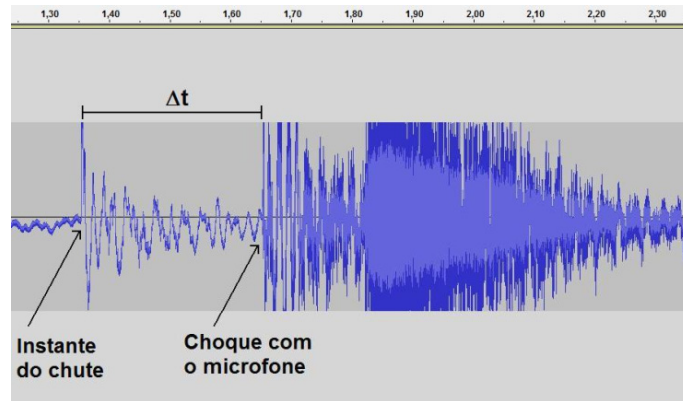
**Figura E.1** Arranjo experimental.

Com o programa *SweepGen* determina-se a emissão de um tom harmônico na caixa de som; por exemplo,  $F_1=10$  kHz. Simultaneamente, com o programa *Audacity*, deve-se iniciar a gravação do som ambiente. Quando os dois programas estiverem acionados, a bola pode ser chutada na direção da caixa.

Se desejar chutar a bola no sentido do alto-falante, tenha o cuidado de anotar a distância entre sua posição inicial e a grade de proteção. Do mesmo modo, se chutar a bola para longe da caixa, lembre-se de medir a distância entre sua posição inicial e o anteparo com o qual ela colidirá. Lembre-se também de que durante todo o voo, a bola, o microfone e a caixa de som devem ser sempre colineares.

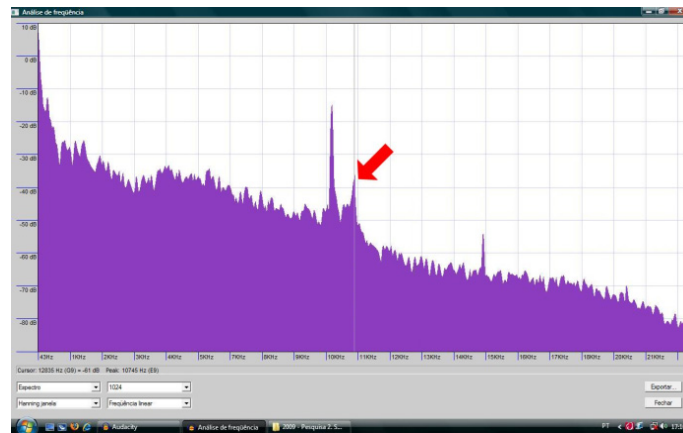
Após a colisão da bola, encerre a gravação e procure selecionar no *Audacity* o trecho do som que vai do chute na bola até sua colisão final. Ouça-o mais de uma vez, isto facilita a identificação do intervalo apropriado.

É importante observar que quanto menos ruído houver no ambiente, e mais rígidas forem a bola, a grade de proteção ou o anteparo, mais fácil será a delimitação do tempo de voo da bola. A figura E.2 ilustra um destes casos, onde a bola foi chutada contra a grade.



**Figura E.2** Som de uma bola chutada contra a grade de proteção.

Após selecionar o intervalo de tempo, faça a análise espectral do trecho escolhido (com o Audacity: Analisar > Espectro de frequência). Imediatamente devem aparecer dois picos de intensidade na tela, um correspondente à frequência inicial imposta como SweepGen, outra correspondente à frequência refletida pela bola, sobre a qual incide o desvio Doppler, tal como mostra a figura E.3.



**Figura E.3** Análise espectral do som da figura E.2.

Algumas gravações serão necessárias até que a distância e a velocidade da bola sejam as ideais para que haja uma separação nítida entre os picos da análise espectral.

Com os valores das frequências dominantes na análise espectral, pode-se aplicar a equação abaixo para estimar a velocidade da bola.

$$v_{\text{bola}} = v_{\text{som}} \frac{F_2 - F_1}{F_2 + F_1} \quad (\text{E.1})$$

Neste experimento, as distâncias típicas entre a bola e o anteparo variaram de 2,0 m a 5,0 m. Como o chute deve ser razoavelmente violento, uma boa estimativa de sua rapidez pode ser feita através do cálculo imediato de sua velocidade média, tal como em Aguiar (2009).

$$v_{\text{bola}} = \frac{x}{\Delta t} \quad (\text{E.2})$$

Através da comparação entre os resultados dos dois métodos, podemos verificar se a medida da velocidade através do efeito Doppler apresenta bons resultados.

## Resultados e comentários

A análise espectral da figura E.3 mostrou que, além da frequência  $F_1 = 10.000$  kHz, houve um pico de frequência  $F_2 = 10.745$  kHz. Com isto, a primeira estimativa da velocidade da bola foi:  $v_{\text{bola}} = 12,2$  m/s.

Para este chute, a estimativa cinemática da velocidade foi:  $v_{\text{bola}} = x/\Delta t = 4,0$  m / 0,303 s = 13,2 m/s. Isto confirma que a medida realizada através do efeito Doppler é confiável.

A figura E.4 mostra o tempo de voo para uma bola que se distancia do microfone e colide com um anteparo rígido. Como a bola se afasta, a frequência refletida pela bola deve ter um tom mais baixo que a frequência original. De fato, isto é mostrado na análise espectral deste som na figura E.5 onde  $F_2 = 9.574$  Hz.

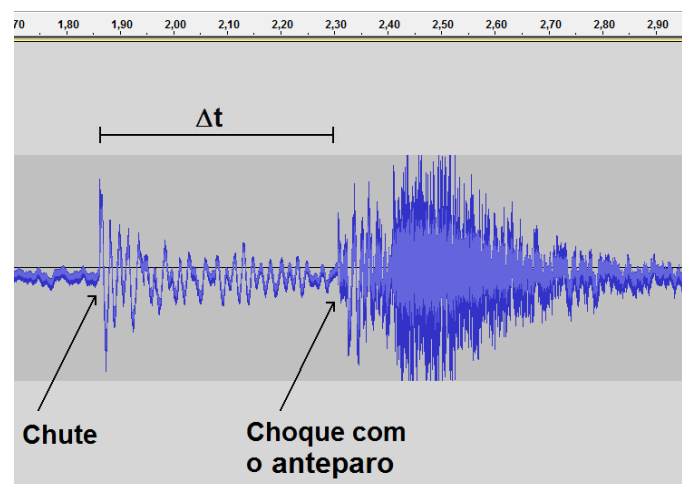
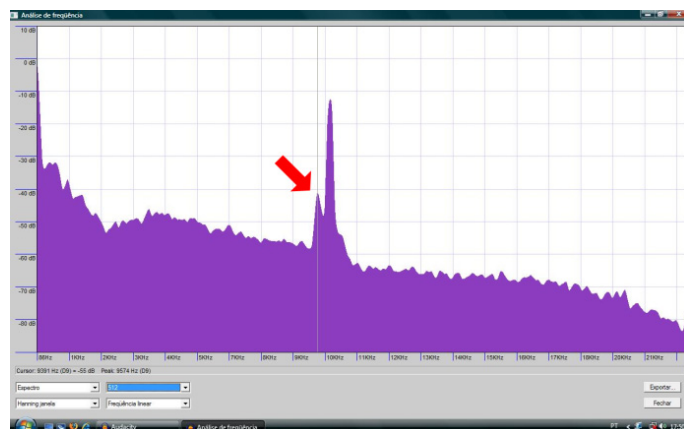


Figura E.4 Som de uma bola que se afastou do microfone.





**Figura E.5** Análise espectral do som da figura E.4.

Para o som das figuras E.4 e E.5, a estimativa da velocidade da bola foi  $v_{bola} = 7,4$  m/s. A medida cinemática da velocidade da bola neste último caso foi  $v_{bola} = 3,6$  m / 0,451 s = 8,0 m/s. Mais uma vez isso demonstra que o experimento apresenta bons resultados.

É importante salientar que, teoricamente, a diferença  $|F_2 - F_1|$  é proporcional ao valor inicial  $F_1$ , portanto, poderíamos imaginar que a separação entre os picos da análise espectral seria mais evidente com a escolha de frequências iniciais muito altas.

Na prática isto não acontece por dois motivos: em primeiro lugar porque é muito desconfortável trabalhar com frequências agudas durante muito tempo; em segundo lugar, os microfones de computador não costumam apresentar sensibilidade uniforme em todo o espectro sonoro. Assim, alguns testes são necessários até que a separação entre os picos seja otimizada.

Em nossos experimentos alguns estudantes apresentaram ligeira dor de cabeça durante a atividade, por isto recomendamos o uso de protetores auriculares.

Evite o uso de frequências acima de 12kHz. Isto realmente é importante porque, como a sensibilidade auditiva se reduz com o aumento da frequência, os estudantes tendem a aumentar a potência (“volume”) do amplificador quando escolhem frequências muito altas, para as quais praticamente já não

ouvem. Entretanto, embora quase não sejam mais escutadas, potências altas a essas frequências podem prejudicar o aparelho auditivo. Se os cuidados adequados forem tomados, o experimento não apresenta riscos.

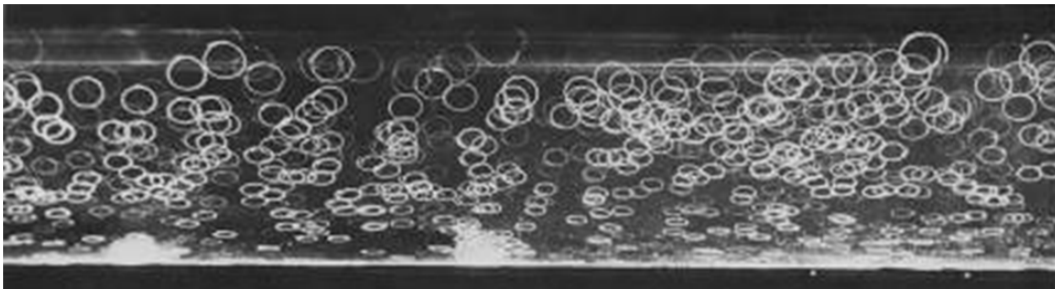
# Apêndice F

## Velocidade de fase das ondas na superfície de águas profundas e rasas.

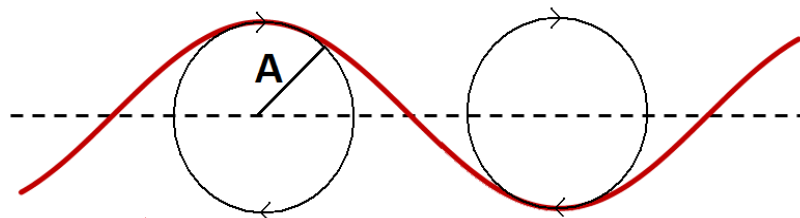
Apresentamos a seguir o cálculo da velocidade de fase de ondas na superfície da água. Consideraremos dois casos: águas profundas e rasas.

### Propagação das ondas em águas profundas

Em águas profundas as partículas próximas à superfície executam um movimento aproximadamente circular, como indicado na fotografia da figura F.1 e no diagrama da figura F.2.

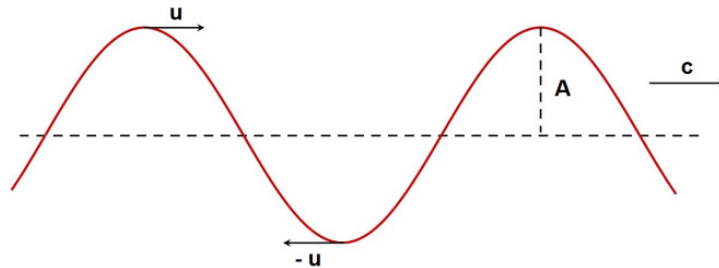


**Figura F.1** Partículas próximas à superfície da água executam movimento aproximadamente circular. Conforme a profundidade aumenta, o movimento torna-se uma elipse com excentricidade cada vez maior (Dyke, 1982).



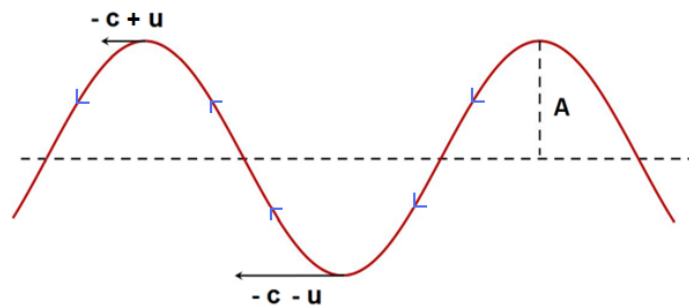
**Figura F.2** Partículas próximas à superfície da água executam movimento aproximadamente circular.

Considere uma onda que se desloca para a direita com velocidade  $c$  em relação a um referencial fixo na água (figura F.3). Neste referencial, as partículas que passam pelos vales e cristas da onda deslocam-se, respectivamente, com velocidades  $-u$  e  $u$ .



**Figura F.3** Uma onda deslocando-se com velocidade de fase  $c$ ;  $u$  e  $-u$  são as velocidades das partículas que estão na crista e no vale desta onda, respectivamente.

Em um referencial que se movimenta junto com a onda (figura F.4), as velocidades das partículas no vale e na crista da onda tornam-se, respectivamente,  $-u-c$  e  $u-c$ .



**Figura F.4** Velocidade das partículas de água na crista e no vale em um referencial que acompanha a onda.

A figura F.4 exibe o fluxo estacionário da corrente de água no referencial da onda. Aplicando a relação de Bernoulli a essa corrente,

$$p + \frac{1}{2}\rho(u - c)^2 + \rho gA = p + \frac{1}{2}\rho(-u - c)^2 - \rho gA \quad (\text{F.1})$$

obtemos uma relação entre as velocidades  $c$  e  $u$ ,

$$uc = gA \quad (F.2)$$

onde  $g$  é a aceleração de gravidade e  $A$  é a amplitude da onda.

No regime de águas profundas, as partículas executam um movimento aproximadamente circular cujo raio corresponde à amplitude  $A$  da onda, como mostra a figura F.2. Desse modo, os módulos das velocidades das partículas no vale e na crista são dados por

$$u = \omega A \quad (F.3)$$

Reunindo as equações (F.2) e (F.3), obtemos

$$\omega c = g \quad (F.4)$$

Lembrando que

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi c}{\lambda}, \quad (F.5)$$

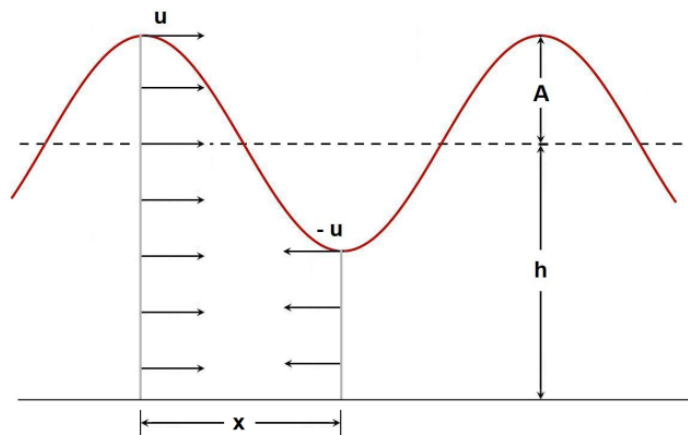
e substituindo este resultado em (F.4), obtemos a velocidade (de fase) das ondas em águas profundas,

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (F.6)$$

A equação (F.6) mostra que a velocidade de fase  $c$  depende do comprimento de onda  $\lambda$ . Esse fenômeno é denominado **dispersão**.

## Propagação das ondas em águas rasas

No regime de águas rasas, um fato experimental nos permite simplificar a análise: as partículas situadas numa mesma linha vertical têm todas, aproximadamente, a mesma velocidade.

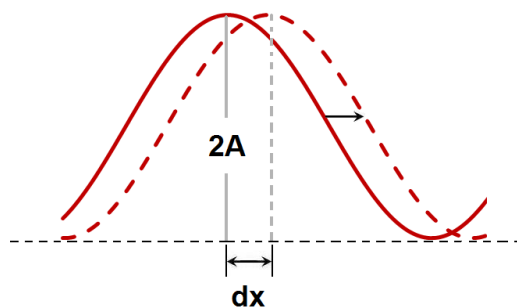


**Figura F.5** Volume delimitado pela região de largura  $x$ . Em águas rasas, as partículas situadas numa mesma linha vertical apresentam velocidades aproximadamente iguais.

Analisando o fluxo da massa de água no volume de comprimento  $x$  e largura  $L$  entre uma crista a um vale adjacentes (figura F.5), obtemos

$$\frac{dM}{dt} = \rho Lu(h + A) + \rho Lu(h - A) = 2\rho Luh . \quad (\text{F.7})$$

Por outro lado, num intervalo de tempo infinitesimal, a onda sofre um deslocamento  $dx = c dt$ , como ilustrado pela figura F.6.



**Figura F.6** Deslocamento da onda num intervalo infinitesimal  $dt$ .

No intervalo  $dt$ , a variação da massa de água é dada pela equação

$$dM = (\rho L 2A)dx = (2\rho L A c)dt , \quad (F.8)$$

ou seja, o fluxo de massa é dado por:

$$\frac{dM}{dt} = 2\rho L A c . \quad (F.9)$$

Comparando as equações (F.7) e (F.9), temos

$$u = c \frac{A}{h} . \quad (F.10)$$

Substituindo a equação (F.10) na relação de Bernoulli (F.2), segue que a velocidade de fase  $c$  da onda em águas rasas é

$$c = \sqrt{gh} . \quad (F.11)$$

Neste caso, todas as ondas viajam com a mesma velocidade, ou seja, não há dispersão.

# Apêndice G

## Medida da velocidade de embarcações com o *Google Earth*.

Descrevemos a seguir o procedimento para o cálculo da velocidade de embarcações a partir das fotografias aéreas do programa *Google Earth*. Através da dispersão das ondas geradas pelas embarcações na superfície da água, é possível estimar a rapidez com que estas se locomovem.

### Materiais

1. Computador
2. Programa *Google Earth*: recomendamos a instalação da última versão.
3. Programa para desenho. Por exemplo, *Paint*, incluído no Windows.
4. Programa para edição de imagens. É necessário o uso de algum que tenha ferramentas para medir distâncias e ângulos. Neste trabalho optamos pelo *ImageJ*, disponível em <http://rsbweb.nih.gov/ij/>.

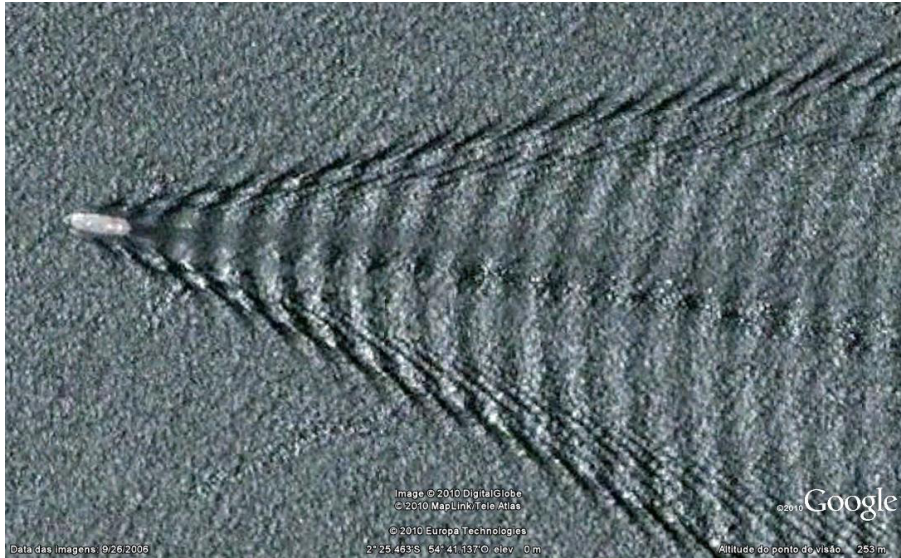
### Objetivos

Medir a velocidade de embarcações nas fotos aéreas do *Google Earth*.

### Procedimentos experimentais

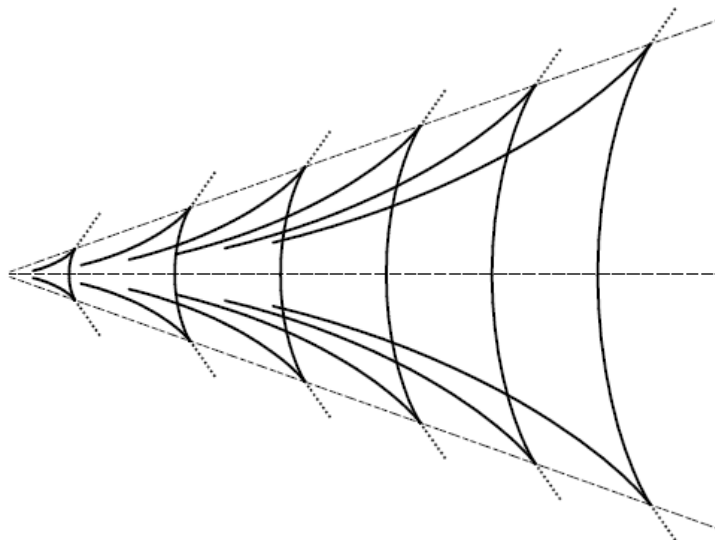
Através do *Google Earth*, é necessário localizar embarcações cujas esteiras de ondas de água sejam nítidas e bem definidas, tal qual o barco da figura G.1.





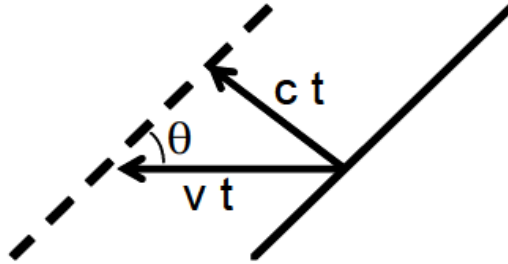
**Figura G.1** Barco em Santarém, PA, Brasil. Coordenadas:  $2^{\circ} 25.463'S$   $54^{\circ} 41.137'O$ .  
Data aproximada: 26/09/2006.

Em águas profundas, conforme se distanciam de um barco, as ondas geradas formam um padrão denominado esteira de Kelvin (figura G.2).



**Figura G.2** Esteira de Kelvin em águas profundas. Ondas em V e em U geradas pelo barco se encontram determinando pontos de máxima amplitude. As linhas tracejadas indicam o caminho do barco e a fronteira da esteira, chamada de cunha de Kelvin. Além dela a intensidade diminui rapidamente (linha pontilhada).

A esteira de Kelvin é estacionária em relação ao barco. Por isto, se conhecemos a velocidade das ondas que a compõe, podemos obter a velocidade da embarcação. A figura G.3 mostra uma frente de onda da esteira em dois momentos diferentes, separados por um intervalo  $t$ .



**Figura G.3** Seção de uma frente de onda produzida pelo barco, em dois momentos distintos separados pelo intervalo  $t$ . O barco move-se da direita para a esquerda com velocidade  $v$ , e a velocidade de fase da onda é  $c$ .

A frente de onda mostrada na figura acompanha o barco, que se move com velocidade  $v$  da direita para a esquerda. Por outro lado, a velocidade de propagação da frente é  $c$ . O exame da figura G.3 mostra que a relação entre a velocidade de fase  $c$  e a velocidade da embarcação  $v$  é

$$v \sin \theta = c . \quad (G.1)$$

A velocidade de fase  $c$  é dada por

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} , \quad (G.2)$$

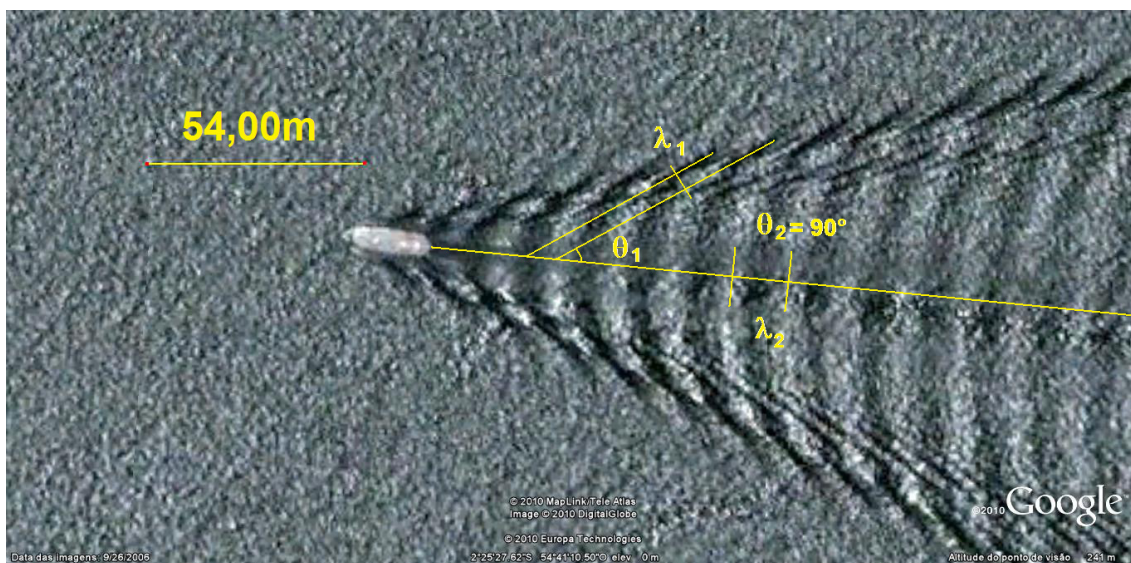
onde  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\lambda$  o comprimento de onda. Substituindo esse resultado na equação (G.1) encontramos

$$v = \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (G.3)$$

Como se nota, os únicos parâmetros necessários para a estimativa de  $v$  são o comprimento de onda  $\lambda$  e o ângulo  $\theta$  entre as ondas da esteira e a direção de movimento do barco. Estes dois parâmetros podem ser medidos a partir das fotos do *Google Earth*.

Em primeiro lugar, na barra de ferramentas do *Google Earth*, escolha a opção *Régua* e marque a opção *metros* como sua unidade de medida. Em seguida, faça uma linha de aproximadamente 50m próxima à embarcação que escolheu. Anote este tamanho porque ele será seu fator de escala quando for medir o comprimento de onda  $\lambda$  na próxima etapa. Após isto, pressione a tecla *PrintScreen* no teclado.

No Windows, abra o programa *Paint*. Cole a fotografia do *Google Earth* e construa segmentos de reta que marquem a direção do movimento do barco e pelo menos duas cristas de onda consecutivas, tal como na figura G.4.



**Figura G.4** No Paint é necessário construir segmentos de reta na direção de movimento da embarcação e na direção de frentes de onda consecutivas.

Copie a fotografia do Paint, abra o programa ImageJ e cole-a novamente. Use a ferramenta *Wand* (figura G.5) para criar um segmento de reta com o mesmo tamanho do fator de escala construído na fotografia do *Google Earth*. Em seguida, na barra de controle, vá até a opção *Analyze > Set Scale*. No

campo *Know Distance*, digite o comprimento da escala. A figura G.6 ilustra este procedimento.

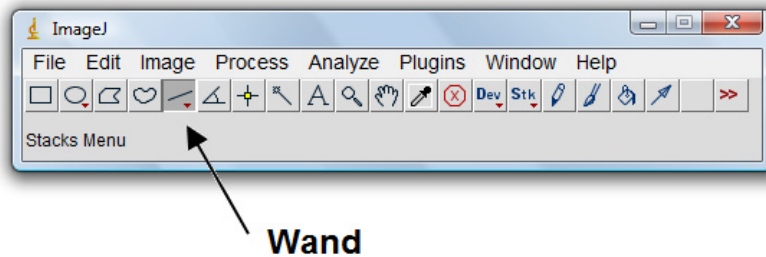


Figura G.5 Barra de funções do programa ImageJ.

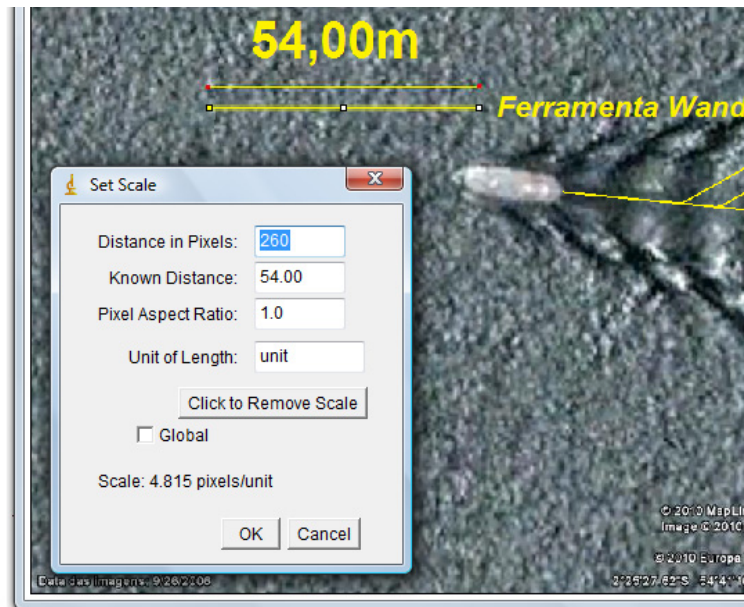
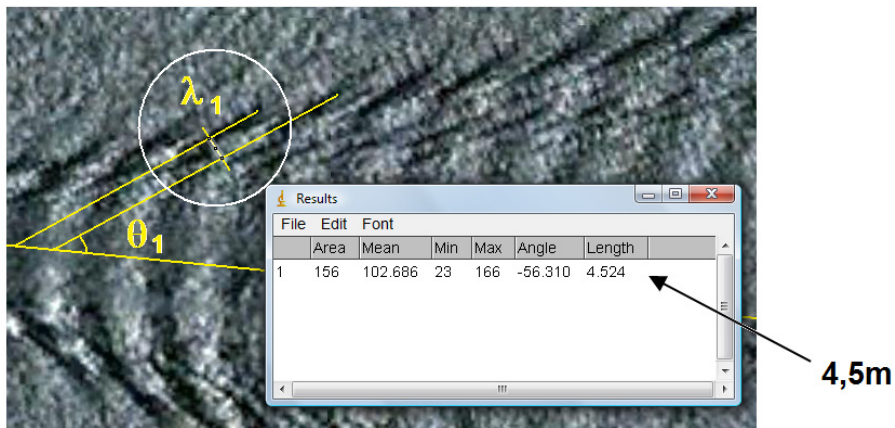


Figura G.6 Acima, a função *Analyze > Set Escala* do software ImageJ. Ela fixa um determinado fator de escala para as medidas de comprimento na imagem.

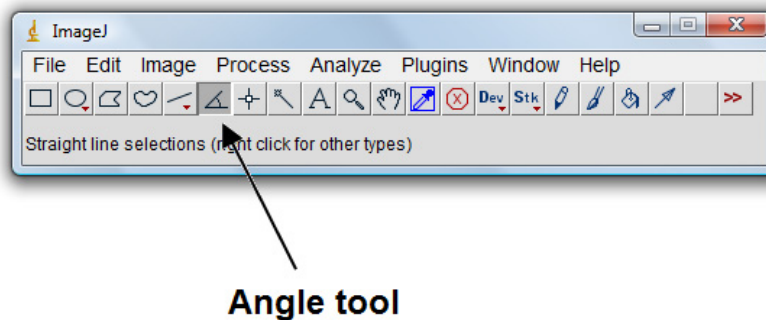
Após ter fixado a escala, use novamente a ferramenta *Wand* para criar um segmento de reta entre as cristas de onda consecutivas desenhadas com o Paint. Acionando o comando *Analyze > Measure*. Uma janela denominada *Results* se abrirá com a medida do comprimento de onda  $\lambda$  entre os pontos determinados (figura G.7).



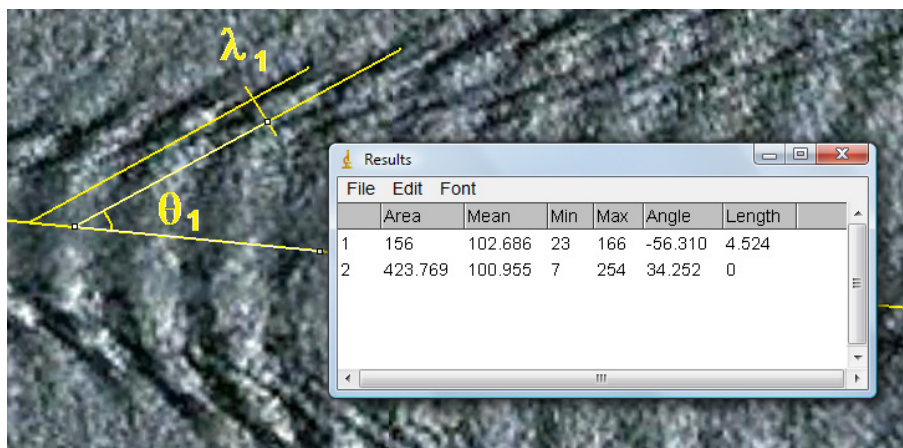


**Figura G.7** Detalhe da figura G.4. Medida do comprimento de onda próxima à cunha de Kelvin:  $\lambda_1 = 4,5\text{m}$ .

Por último, é necessário fazer a medida do ângulo  $\theta$  entre a frente de onda e a direção de movimento do barco. Para isto é preciso selecionar a ferramenta *Angle Tool* no painel do ImageJ (figura G.8). Selecione três pontos: um sobre a crista de onda escolhida, um sobre a reta onde se dá o movimento do barco e outro na intersecção destas retas. Se necessário, ajuste a posição dos pontos sobre as retas. Acione novamente a opção *Analyze > Measure* e anote a medida do ângulo  $\theta$  (figura G.9).



**Figura G.8** Ferramenta para a medida de ângulos no ImageJ.



**Figura G.9** Detalhe da figura G.4. Medida do ângulo este a direção de movimento do barco e as frentes de onda:  $\theta_1 = 34,3^\circ$ .

Recomendamos que a atividade seja realizada com, no máximo, 7 ou 8 duplas de estudantes. Como as dúvidas sobre a operação dos programas são inevitáveis, torna-se difícil para um professor orientar adequadamente um número maior de alunos.

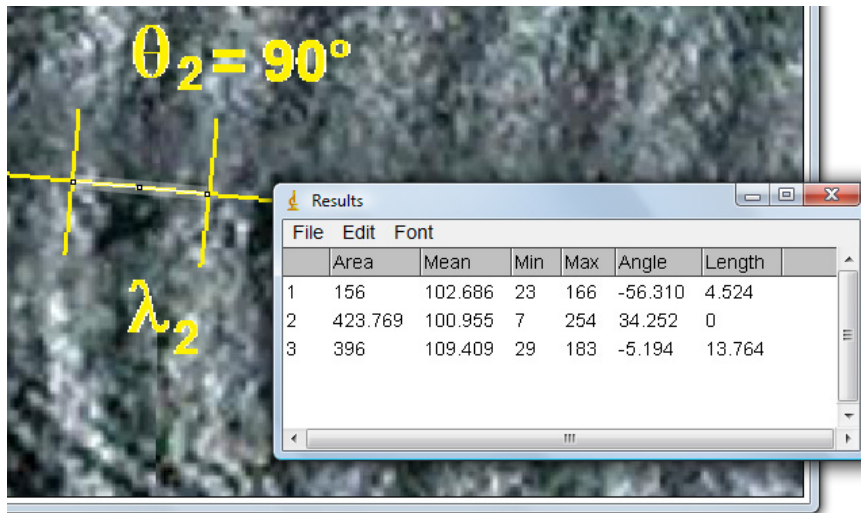
Se a velocidade de conexão com a Internet tornar o carregamento das fotos do *Google Earth* muito lento, recomendamos que o professor escolha previamente alguns barcos para a atividade, ao invés de deixar os alunos livres para pesquisar. Deste modo, o professor deve fixar a latitude e a longitude onde existem barcos apropriados para a atividade.

Essa escolha é particularmente interessante também porque, num mesmo barco, os alunos raramente escolherão os mesmos pontos da esteira de Kelvin para realizar a medida do comprimento de onda e do ângulo com a direção de movimento. Com isso, eles poderão comparar as velocidades obtidas e talvez se surpreendam com valores muito próximos uns dos outros.

## Resultados

No exemplo da figura G.9 temos  $\lambda_1 = 4,5$  m e  $\theta_1 = 34,3^\circ$ . Aplicando a equação (G.3) obtemos  $v_1 = 4,7$  m/s. A figura G.10 mostra a medida do comprimento de onda em um ponto diferente da esteira. Os resultados são  $\lambda_2 = 13,8$  m e  $\theta_2 = 0^\circ$ . Aplicando a equação (G.3) novamente, obtemos

$v_2 = 4,6$  m/s para a velocidade do barco. A concordância entre esses resultados mostra que a velocidade está sendo medida com precisão da ordem de 2%.



**Figura G.10** Detalhe da figura G.4. Medida do comprimento de onda realizado entre duas cristas consecutivas na direção de movimento do barco:  $\lambda_2 = 13,8$ m.

Outros programas de edição de imagem podem ser utilizados para as medidas da atividade, tal como, por exemplo, o *Gimp* (<http://www.gimp.org/>). Contudo, julgamos que a manipulação dos programas Paint e ImageJ é mais simples de ser explicada para os estudantes.

## Referências Bibliográficas

(Aguiar e Pereira, 2011) C. E. Aguiar and M. M. Pereira. Using the Sound Card as a Timer, *The Physics Teacher*, v. 49, n. 1, pp. 33 – 36, 2011.

(Aguiar e Souza, 2009) C. E. Aguiar e A. R. Souza. Google Earth Physics, *Physics Education*, v. 44, n. 4, p. 624 – 626, 2009.

(Alonso e Finn, 1972) M. Alonso e E. J. Finn, Física – Curso Universitário, v. 2. São Paulo: Edgard Blücher, 1972.

(Araújo e Abib, 2003) M. S. T. Araújo e M. L. V. S. Abib. Atividades Experimentais no Ensino de Física: Diferentes Enfoques, Diferentes Finalidades, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 25, n. 2, pp. 176 – 194, 2003.

(Baratto, 1998) A. C. Baratto. Ondas estacionárias longitudinais no tubo de chamas, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 20, n. 1, pp. 6 – 10, 1998.

(Barroso, 2005) M. F. Barroso. Geração de ondas sonoras (applet em Flash), 2005. Disponível em: <http://www.if.ufrj.br/~marta/aplicativos/diapasao.html>, 01/01/2010.

(Bensky e Frey, 2001) T. J. Bensky e S. E. Frey. Computer sound card assisted measurements of the acoustic Doppler effect for accelerated and unaccelerated sound sources, *American Journal of Physics*, v. 69, n. 12, pp. 1231 – 1236, 2001.

(Borges, 2002) A. T. Borges. Novos rumos para o laboratório escolar de ciências, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 19, n. 3, pp. 291 – 313, 2002.



(Borges e Leboeuf, 2002) T. Borges e H. A. Leboeuf. Cai por causa do ar: a gravidade como ação à distância. In: Anais do VIII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física (EPEF), Águas de Lindóia, SP, 2002.

(Caleon e Subramaniam, 2010) I. S. Caleon and R. Subramaniam. Exploring student's conceptualization of propagation of periodic waves, *The Physics Teacher*, v. 48, n. 1, pp. 55 – 59, 2010.

(Cavalcante, 2004) M. A. Cavalcante, C. R. C. Tavoraro, Ondulatória e acústica através de experimentos assistidos por computador. In: Anais do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física, Jaboticatubas, MG, 2004.

(Costa e Mocellin, 2007) I. F. Costa and A. Mocellin. Noise Doppler-Shift measurement of Airplane Speed, *The Physics Teacher*, v. 45, n. 6, pp. 356 – 358, 2007.

(Courtney, 2006) M. Courtney. Teaching Fourier Analysis and Wave Physics with the Bass, [arXiv:physics/0605154v1](https://arxiv.org/abs/physics/0605154v1)

(Courtney, 2008) M. Courtney. Acoustic methods for measuring bullet velocity, *Applied Acoustics*, v. 69, n. 10, pp. 925 – 928, 2008.

(Crawford, 1968) F. S. Crawford, Waves – Berkeley Physics Course, v. 3, sec. 7.3. New York: McGraw-Hill, 1968.

(De Jong, 2003) M. De Jong, Using Computer-Generated Animations as an Aid in Teaching Wave Motion and Sound, *The Physics Teacher*, v. 41, n. 9, pp. 524 – 529, 2003.

(Dias, 2009) M. A. Dias. Medindo a velocidade de um fórmula 1 com o efeito doppler. In: Anais do XVIII Simpósio Nacional de Ensino de Física, Vitória, ES, 2009.

(diSessa, 1993) A. diSessa. Toward an Epistemology of Physics, *Cognition and Instruction*, v. 10, n. 2/3, pp. 105 – 225, 1993.

(Dyke, 1982) M. Van Dyke, An Album of Fluid Motion, 10<sup>a</sup> ed., Parabolic Press, 1982.

(Fazio, 2008) C.Fazio, I. Guastella, R. M. Sperandeo-Mlneo and G. Tarantino. Modelling mechanical wave propagation: Guidelines and experimentation of a teaching–learning sequence, *International Journal of Science Education*, v. 30, n. 11, pp. 1491 – 1530, 2008.

(Fernandes e Alves, 2009) A. S. Fernandes e G. M. Alves. Ondas superficiais de gravidade, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 31, n. 2, pp. 2306-5 – 2306-6, 2009.

(Feynman, 1963) R. Feynman, R. Leighton e M. Sands. The Feynman Lectures on Physics, v. 1, California: Addison-Wesley, 1963.

(Gil Pérez et al., 1999) D. Gil Pérez, C. Furió Más, P. V. Castro. Tiene sentido seguir distinguiendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lápiz y papel y realización de prácticas de laboratorio?, *Enseñanza de las ciencias*, v. 17, n. 2, pp. 311 – 320. 1999.

(Hodson, 1994) D. Hodson. hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio, *Enseñanza de las Ciencias*, v. 12, n. 3, pp. 299 – 333, 1994.

(Hofstein e Lunetta, 1997) A. Hofstein e V. N. Lunetta. The laboratory in science education: the state of the art, *Chemistry Education Research and Practice*, v. 8, n. 2, pp. 105 – 107, 2007.

(Hofstein e Lunetta, 2004) A. Hofstein e V. N. Lunetta. The Laboratory in Science Education: Foundations for the Twenty-First Century, *Science Education*, v. 88, n. 1, pp.28 – 54, 2004.

(Hrepic et al., 2002) Z. Hrepic, D. A. Zollman and N. S. Rebello. Identifying students models of sound propagation. *Proceedings of the 2002 Physics Education Research Conference*, USA: Boise.

(Hrepic et al., 2010) Z. Hrepic, D. A. Zollman and N. S. Rebello. Identifying students' mental models of sound propagation: The role of conceptual blending in understanding conceptual change, *Physics Education Research*, v. 6, n. 2, 020114 (1 – 18), 2010.

(Lighthill, 2001) J. Lighthill, *Waves in Fluids*, pp. 269-279 United Kingdom: Cambridge University Press, 2001.

(Linder, 1992) C. J. Linder, Understanding sound: so what is the problem? *Physics Education*, v. 27, pp. 258 – 264, 1992.

(LoPresto, 2006) M. LoPresto Experimenting with Guitar Strings, *The Physics Teacher*, v. 44, n. 8, pp. 509 – 511, 2006.

(LoPresto, 2007) M. LoPresto. Experimenting with woodwind instruments, *Physics Education*, v. 42, n. 3, pp. 296 – 303, 2007.

(LoPresto, 2008a) M. LoPresto. Experimenting with Fourier synthesis, *Physics Education*, v. 43, n. 1, pp. 30 – 36, 2008.

(LoPresto, 2008b) M. LoPresto. Piano demonstrates physics of music, *Physics Education*, v. 43, n. 5, pp. 472 – 473, 2008.

(Maltese et al., 2010) A. V. Maltese, R. H. Tai and P. M. Sadler. The effect of high school Physics laboratories on performance in introductory college Physics, *The Physics Teacher*, v. 48, n. 5, pp. 333 – 337, 2010.

(Maurines, 1992) L. Maurines. Spontaneous reasoning on the propagation of visible mechanical signals, *International Journal of Science Education*, v. 14, n. 3, p. 279 – 293, 1992.

(Meirelles e Violante-Carvalho, 2007) S. Meirelles e N. Violante-Carvalho. Modelagem computacional da propagação de ondas superficiais no oceano: um subsídio para a compreensão dos fenômenos ópticos, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 4, p. 555 – 563, 2007.

(Millar, 2004) R. Millar. The role of practical work in the teaching and learning of science. In paper prepared for the meeting: High School Science Laboratories: Role and Vision, National Academy of Sciences, Washington, DC, 2004.

(Moran, 2007) T. Moran. Applications of Sound Spectrum Analysis, *The The Physics Teacher*, v. 45, p. 93 – 95, 2007.

(Moreira e Ostermann, 1993) M. A. Moreira e F. Ostermann. Sobre o ensino do método científico, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 10, n. 2, pp.108 – 117, 1993.

(Nussenzveig, 1997) H. M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica*, v. 2, 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.

(OCEM, 2008) Orientações curriculares para o Ensino Médio, Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, 2008.

(Piubelli, 2010) S. L. Piubelli, H. A. Errobidart, S. T. Gobara e N. C. G. Errobidart. Simulador de propagação de ondas mecânicas em meios sólidos para o ensino da Física, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 32, n. 1, art. 1501, 2010.

(Saab, 2005) S. C. Saab, F. A. M. Cássaro, A. M. Brinatti. Laboratório caseiro: tubo de ensaio adaptado como tubo de Kundt para medir a velocidade do som no ar, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 22, n. 1, pp. 112 – 120, 2005.

(Saba e Rosa, 2001) M. M. F. Saba and R. A. S. Rosa. A Quantitative Demonstration of the Doppler Effect, *The Physics Teacher*, v. 39, n. 7, pp. 431 – 433, 2001.

(Saba e Rosa, 2003) M. M. F. Saba and R. A. S. Rosa. The Doppler Effect of a Sound Source Moving in a Circle, *The Physics Teacher*, v. 41, n. 2, pp. 89 – 91, 2003.

(Santiago, 1991) A. J. Santiago, C. A. de Azevedo. Teor didático de um tubo de Kundt: análise qualitativa de um experimento, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 13, n.1, pp. 77 – 85, 1991.

(Santos, 2005) M. L. Santos. Tsunami: que onda é essa? *Física na Escola*, v. 6, n. 2, pp. 8 – 11, 2005.

(Santos e Souza Barros, 2008) A. G. Santos e F. Souza Barros. Ondas de água: uma revisão ao nível médio, *Física na Escola*, v. 9, n. 2, pp. 14 – 16, 2008.

(Saraiva-Neves et al., 2006) M. Saraiva-Neves, C. Caballero, M. A. Moreira. Repensando o papel do trabalho experimental, na aprendizagem da física, em sala de aula – um estudo exploratório, *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 11, n. 3, pp. 383 – 401, 2006.

(Silveira e Varriale, 2008) F. L. da Silveira e M. C. Varriale. Propagação das ondas marítimas e dos tsunamis, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 22, n. 2, pp. 190 – 208, 2005.

(Sinick e Lynch, 2010) S. J. Sinick and J. J. Lynch. Surface gravity waves: resonance in fish tank, *The Physics Teacher*, v. 48, pp. 330 – 332, 2010.

(Souza e Aguiar, 2010a) Souza, A. R. e Aguiar, C. E. Observando ondas sonoras. In: Anais do XII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física (EPEF), Águas de Lindóia, SP, 2010.

(Souza e Aguiar, 2010b) Souza, A. R. e Aguiar, C. E. Ondas, barcos e Google Earth. In: Anais do XII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física (EPEF), Águas de Lindóia, SP, 2010.

(Taber, 2009) K. S. Taber. Having faith in sound knowledge, *Physics Education*, v. 44, pp. 450 – 453, 2009.

(Thomson, 2001) W. Thomson, (Lord Kelvin). Mathematical and Physical Papers, v. 4. United Kingdom: Adamant Media Corp., pp. 303-306 , pp. 368-418, 2001.

(Tipler, 2000) P. A. Tipler, Física – Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica, v. 1, 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

(Torres e González-Espada, 2006) S. M. Torres and W. J. González-Espada. Calculating g from Acoustic Doppler Data, *The Physics Teacher*, v. 44, n. 8, pp. 536 – 539, 2006.

(Treagust et al., 2001) M. Kearney, D. F. Treagust, S. Yeo and M. G. Zadnik. Student and Teacher Perceptions of the Use of Multimedia Supported Predict –

Observe – Explain Tasks to Probe Understanding, *Research in Science Education*, v. 31, n. 4, pp. 589 – 615, 2001.

(Veit, 2005) E. A. Veit, R. Haag e I. S. Araujo. Por que e como introduzir a aquisição automática de dados no laboratório didático de Física? *Física na Escola*, v. 6, n. 1, pp. 69 – 74, 2005.

(Viennot, 2001) L. Viennot. Reasoning in Physics: The Part of Common Sense, Kluwer, Dordrecht, 2001.

(Warrens, 1997) M. J. Warrens. A comment on Zysno's "The Modification of the Phi-coefficient reducing its Dependence on the Marginal Distributions". In: *Methods of Psychological Research (online)*, v. 2, n. 1, 1997.

(Welti, 2005) R. Welti. Obstáculos conceptuales en el aprendizaje de la energia de las ondas, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 3, p. 487 – 490, 2005.

(Wittmann et al., 1999) M. C. Wittmann, R. N. Steinberg, E. F. Redish. Making sense of how students make sense of mechanical waves, *The Physics Teacher*, v. 37, p. 15 – 21, 1999.

(Wittmann, 2002) M. C. Wittmann. The object coordination class applied to wavepulses: analysing student reasoning in wave physics, *International Journal of Science Education*, v. 24, n. 1, p. 97 – 118, 2002.

(Wittmann et al., 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, pp. 991 – 1013, 2003.

(Yule, 1912) G. Udny Yule. On the Methods of Measuring Association Between Two Attributes, *Journal of the Royal Statistical Society*, v. 75, n. 6, pp. 579 – 652, 1912.