



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

Experimentos de Física com *Tablets* e *Smartphones*

Leonardo Pereira Vieira

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

Orientador: Carlos Eduardo Aguiar

Rio de Janeiro
Outubro de 2013

Experimentos de Física com *Tablets* e *Smartphones*

Leonardo Pereira Vieira

Orientador: Carlos Eduardo Aguiar

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

Aprovada por:

Prof. Carlos Eduardo Aguiar (Presidente)

Prof. Nathan Bessa Viana

Prof. Jorge Simões de Sá Martins

Rio de Janeiro
Outubro de 2013

FICHA CATALOGRÁFICA

V657e Vieira, Leonardo Pereira
Experimentos de Física com *Tablets* e *Smartphones* / Leonardo Pereira Vieira. – Rio de Janeiro: UFRJ/IF, 2013.
ix, 107 f. : il. ; 30 cm.
Orientador: Carlos Eduardo Aguiar.
Dissertação (mestrado) – UFRJ / Instituto de Física / Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2013.
Referências Bibliográficas: f. 104-107.
1. Ensino de Física. 2. Laboratório baseado em computadores. 3. Tablet. I. Aguiar, Carlos Eduardo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. III. Experimentos de Física com *Tablets* e *Smartphones*.

Dedico esta dissertação aos alunos, que de maneira direta ou indireta participaram das atividades, recebendo-as de peito aberto e engajando-se em sua realização.

Agradecimentos

Ao Centro Educacional de Niterói, pelo espaço de trabalho aberto a novas perspectivas de ensino além de apoio financeiro para a confecção de alguns experimentos didáticos.

Aos meus pais, Leila Márcia e Antônio Fernando pelo grande esforço em manter-me no ensino superior superando quaisquer dificuldades, mostrando do que são capazes pelos outros.

À minha esposa Ana Caroline Sapienza pelo afeto e incentivo direto à conclusão desse trabalho.

Ao grande amigo Vitor Lara pela colaboração durante a confecção desse trabalho.

Ao professor Carlos E. Aguiar, pela dedicação e preocupação que esteve para além da física ou de seu ensino, firmando padrão a ser seguido de profissionalismo e ser humano.

RESUMO

Experimentos de Física com *Tablets* e *Smartphones*

Leonardo Pereira Vieira

Orientador: Carlos Eduardo Aguiar

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

Neste trabalho descrevemos experimentos didáticos em que *tablets* e *smartphones* são utilizados como instrumentos de detecção, coleta, armazenamento e apresentação de dados. A montagem e execução dos experimentos explora características desses aparelhos que os tornam particularmente atraentes em atividades práticas escolares: sensores variados e de fácil acesso, alta portabilidade, difusão entre os jovens. Os experimentos foram realizados durante aulas de física no ensino médio e fundamental, e abordaram temas como cinemática, dinâmica, eletromagnetismo, óptica e ondas sonoras. As atividades incluíram discussões sobre conceitos e princípios físicos relacionados ao fenômeno estudado, que se tornaram possíveis no curto intervalo de uma aula graças à facilidade com que os experimentos eram montados e executados. A reação dos alunos a essas atividades é relatada.

Palavras chave: Ensino de Física, Laboratório baseado em computadores, Tablet.

Rio de Janeiro
Outubro de 2013

ABSTRACT

Physics Experiments with *Tablets* and *Smartphones*

Leonardo Pereira Vieira

Supervisor: Carlos Eduardo Aguiar

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

We describe didactic experiments in which tablets and smartphones are used as instruments for detection, acquisition, storage and display of data. The setup and execution of the experiments explore characteristic of these devices that make them particularly attractive for practical work at schools: multiple and easily accessible sensors, high portability, diffusion among youngsters. The experiments were carried out in physics classes at secondary schools and took on topics like kinematics, dynamics, electromagnetism, optics and sound waves. Activities included discussion of physical concepts related to the phenomenon being investigated. The discussions became viable during the short period of one class only because of the simple and efficient way in which the experiments could be set up and executed. The students' reaction to these activities is also reported.

Keywords: Physics education, Computer based laboratory, Tablet.

Rio de Janeiro
Outubro de 2013

Sumário

1	Introdução	1
2	O Laboratório Didático no Ensino de Física	5
2.1	O laboratório “tradicional”	5
2.2	O computador no laboratório de física	7
2.3	<i>Smartphones</i> e <i>tablets</i> no laboratório	9
3	Mecânica com o Acelerômetro	13
3.1	O acelerômetro e sua leitura	14
3.2	Queda livre	17
3.3	O paraquedas	20
3.4	O <i>iCar</i>	25
3.5	$F = ma$	28
3.6	O <i>iCar</i> no plano inclinado	31
3.7	A máquina de Atwood	35
3.8	A tração é igual ao peso?	37
3.9	O <i>smartphone</i> na gaveta	39
4	O Magnetômetro	42
4.1	Buscando o norte	43
4.2	Campo magnético e corrente elétrica	44
4.3	O campo magnético em função da distância	46
4.3.1	Campo de um ímã	46
4.3.2	Campo de uma bobina	49
5	Macrofotografia com uma Gota de Água	50
5.1	O microscópio de gota d’água	50
5.2	Aplicações ao ensino de física	52
5.3	Aplicações ao ensino de ciências	53
5.4	Medidas com macrofotografias	55

6	Física do Som com o <i>Smartphone</i>	56
6.1	Frequência e timbre	56
6.2	A velocidade do som	58
6.3	Mudança de fase na reflexão	60
6.4	Ondas estacionárias em tubos sonoros	62
7	Conclusões	65
A	Experimentos com o Acelerômetro de <i>Tablets</i> e <i>Smartphones</i>	69
A.1	O acelerômetro e sua leitura	69
A.2	Queda livre	72
A.3	O paraquedas	74
A.4	O <i>tablet</i> num carrinho	77
A.5	A segunda lei de Newton	80
A.6	O plano inclinado	82
A.7	A máquina de Atwood	85
A.8	A tração é igual ao peso?	87
B	Experimentos com o Magnetômetro de <i>Tablets</i> e <i>Smartphones</i>	89
B.1	O magnetômetro e sua leitura	89
B.2	Campo magnético e corrente elétrica	91
B.3	O campo magnético em função da distância	92
B.3.1	Campo de um ímã	92
B.3.2	Campo de uma bobina	94
C	Experimentos com o Microfone de <i>Tablets</i> e <i>Smartphones</i>	95
C.1	Frequência e timbre	95
C.2	A velocidade do som	97
C.3	Mudança de fase na reflexão	99
C.4	Ondas estacionárias em tubos sonoros	100
	Referências bibliográficas	104

Capítulo 1

Introdução

A Física é uma ciência experimental, com a qual buscamos compreender como se processam os fenômenos naturais. A observação, controle e interpretação de eventos bem definidos são características fundamentais dessa ciência. Por mais abstratos e matemáticos que sejam, os modelos e leis da Física têm por objetivo descrever o comportamento de sistemas reais e prever o que ocorrerá em situações determinadas. Sob essa perspectiva o ensino da física não pode estar dissociado de experimentos e atividades práticas que relacionem aquilo que os alunos estudam ao mundo em que eles vivem.

Não é só por sua importância à Física que experimentos e observações empíricas devem fazer parte do ensino dessa disciplina. Atividades de laboratório apropriadamente planejadas podem ajudar o estudante a dominar conceitos físicos difíceis e pouco familiares, que muitas vezes entram em conflito com as noções intuitivas e arraigadas derivadas do senso comum. Para atingir esse objetivo os trabalhos práticos devem ter um desenvolvimento relativamente livre, permitindo ao aluno discutir e compreender o propósito da atividade, formular hipóteses e previsões sobre o que deve acontecer, montar e realizar o experimento, analisar os resultados obtidos e interpretá-los à luz de seus conceitos e expectativas.

Há uma grande diferença entre essa visão de atividade prática e o que normalmente é realizado nos laboratórios didáticos. Nesses, quase todo o tempo disponível é ocupado pela montagem do experimento, a coleta de

dados e a organização dos resultados. Tudo é feito seguindo passo a passo as instruções de um roteiro preestabelecido que não costuma dar muito espaço à discussão do que se pode aprender com a atividade. O principal motivo para a adoção desse procedimento, e a razão pela qual é tão difícil escapar dele, é que a montagem do aparato experimental e a tomada e sistematização dos dados são geralmente processos demorados, que inevitavelmente tomam muito tempo e com isso impedem atividades de igual (ou maior) importância do ponto de vista da aprendizagem, mesmo quando se deseja realizá-las.

Um passo importante para a solução desse problema foi dado com a introdução de computadores nos laboratórios didáticos. Nos “laboratórios baseados em computador” (LBC) a tomada e apresentação dos dados tornaram-se muito rápidas, economizando tempo e dando oportunidade para atividades mais comprometidas com a aprendizagem e o desenvolvimento cognitivo do aluno.

Apesar de sua reconhecida utilidade no laboratório didático, o computador ainda apresenta limitações de ordem prática. Para ser usado em atividades experimentais ele necessita de sensores e interfaces que geralmente custam caro e são inacessíveis às escolas brasileiras. É uma máquina grande e pesada, o que limita seu deslocamento, além de normalmente estarem alocados em salas de informática cuja estrutura não favorece a montagem de experimentos. Os *laptops* são uma boa alternativa aos *desktops* no que diz respeito à mobilidade, mas continuam necessitando de sensores e interfaces comerciais caros.

Os *tablets* e *smartphones* resolvem tanto o problema da mobilidade quanto o dos sensores. A alta portabilidade é característica essencial desses aparelhos, mas igualmente importante é o fato deles possuírem sensores capazes de medir inúmeras grandezas físicas de interesse. Quase todos os *tablets* e *smartphones* são equipados com acelerômetro, magnetômetro, câmera, microfone, giroscópio, luxímetro e outros sensores que, como veremos, podem ser facilmente usados em atividades experimentais nas salas de aula. Os aparelhos são amplamente difundidos entre os jovens em idade escolar, tanto alunos do ensino público quanto do particular. Essas características eliminam, em muitos casos, a necessidade de um espaço próprio para realização

de atividades experimentais, tornando a sala de aula muito mais versátil e atraente para o aluno.

A utilidade dos *tablets* e *smartphones* para o ensino de física vem sendo gradativamente reconhecida e há um número crescente de relatos descrevendo atividades práticas bem sucedidas com esses aparelhos. Mas ainda há muito a ser feito e investigado, e o objetivo desta dissertação é dar uma contribuição nesse sentido.

No presente trabalho apresentaremos um conjunto de experimentos baseados em *tablets* e *smartphones*. A maior parte deles foi aplicada em sala de aula, em turmas de ensino médio e fundamental¹; nesses casos descreveremos também a recepção da atividade pelos alunos e sua atuação durante o processo.

A dissertação está organizada da seguinte maneira. No capítulo 2 discutiremos a importância das atividades práticas no ensino da física e as dificuldades enfrentadas pelos modelos tradicionais de laboratório didático. Veremos como a introdução dos computadores torna possível superar boa parte dessas dificuldades, mas ainda encontra obstáculos. Em seguida examinaremos as características dos *tablets* e *smartphones* que os tornam atraentes para o ensino experimental da física. No capítulo 3 discutimos o acelerômetro encontrado nesses aparelhos e apresentamos diversos experimentos de mecânica realizados com esse sensor. No capítulo 4 usamos o magnetômetro para estudar o campo magnético de ímãs e bobinas. No capítulo 5, mostraremos como uma simples gota d'água pode transformar câmeras de celular em microscópios funcionais com alta qualidade de imagem, permitindo observar formas diminutas que são de interesse no ensino de ciências. O som e suas características são explorados no capítulo 6, onde apresentamos atividades que podem ser facilmente executadas com o microfone de um *tablet* ou *smartphone*. Por fim, no capítulo 7 apresentamos alguns comentários e conclusões sobre o trabalho realizado.

O texto principal é acompanhado por três apêndices, que contêm uma descrição mais sucinta e direta das atividades propostas na dissertação. O

¹Centro Educacional de Niterói (ensino médio e fundamental) e Colégio Estadual Joaquim Távora (educação de jovens e adultos)

objetivo é oferecer um guia que facilite a implantação desses experimentos por educadores interessados em utilizar *tablets* e *smartphones* em suas aulas práticas.

O trabalho envolvido na preparação desta dissertação deu origem aos seguintes artigos:

- Leonardo P. Vieira, Vitor O. M. Lara, *Macrofotografia com um tablet: aplicações ao ensino de ciências*, Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 35, n. 3, art. 3503, 2013.
- Leonardo P. Vieira, Vitor O. M. Lara, *Física em tablets: a segunda lei de Newton*, Anais do XX Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2013, São Paulo.
- Leonardo P. Vieira, Vitor O. M. Lara, *Física em tablets: obtendo fotografias macro com a técnica da gota d'água*, Anais do XX Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2013, São Paulo.
- Alexandre C. Azevedo, Leonardo P. Vieira, Carlos E. Aguiar, Antonio Carlos F. Santos, *Experimentos de ótica com laser para alunos com deficiência visual*, Anais do XX Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2013, São Paulo.

Outros artigos estão submetidos a publicação ou encontram-se em fase de redação.

Capítulo 2

O Laboratório Didático no Ensino de Física

2.1 O laboratório “tradicional”

O laboratório didático faz parte das estratégias de ensino de física há mais de um século, e ao longo desse período tem desempenhado papel central na educação científica em vários países [1, 2]. A importância atribuída ao laboratório didático pelos meios acadêmicos e científicos pode ser avaliada por declarações como “o trabalho em laboratório é essencial no estudo da física” (American Association of Physics Teachers [3]), ou “é difícil imaginar que se possa aprender a fazer ciência, ou aprender sobre a ciência, sem realizar trabalhos de laboratório e de campo” (National Research Council, EUA [4]). Professores de ciências apoiam de forma quase universal a realização de atividades de laboratório, embora as razões individuais para essa aprovação possam ser muito diversas, e algumas sejam até discutíveis [5, 6]. No Brasil, os professores de ciências na educação básica em geral acreditam que a melhoria do ensino passa pela introdução de aulas práticas no currículo, embora poucos encontrem nas escolas condições materiais e de trabalho que lhes permitam fazer isso [6].

Há bons motivos para a utilização de práticas de laboratório nos cursos de física. A Física é uma ciência experimental, que lida com o mundo material.

É natural, portanto, que seu ensino e aprendizagem envolvam a observação e manipulação de objetos reais. O trabalho prático é também reconhecido como essencial à aprendizagem de conceitos básicos da Física. Por exemplo, Arons considera que um bom conjunto de observações vivenciadas e analisadas criticamente é indispensável na internalização de modelos físicos [7]. Millar, seguindo a linha de Piaget, argumenta que a experiência prática de observar e intervir no mundo é essencial à construção do conhecimento: “é agindo sobre o mundo que nossas ideias sobre ele se desenvolvem” [8]. Além disso, num laboratório o aluno pode familiarizar-se com instrumentos e métodos essenciais à vivência e trabalho em uma sociedade tecnológica.

O amplo consenso sobre a importância das atividades práticas no ensino de física contrasta com as críticas fortes e generalizadas à maneira como essas atividades são normalmente implementadas nos laboratórios didáticos [5–9]. As primeiras reações vêm dos próprios alunos, que frequentemente descrevem os laboratórios didáticos tradicionais como “uma perda de tempo” [4]. Isso se deve, em boa parte, ao formato típico dessas atividades, geralmente guiadas por um roteiro rigidamente estruturado que tenta conduzir o aluno a um objetivo que, muitas vezes, ele sequer percebe qual é. Nas palavras de Hofstein e Lunetta, os guias de laboratório são “receitas de bolo que os estudantes seguem ritualisticamente” [2]. Ao seguir esses roteiros, alunos e professores ocupam-se essencialmente dos detalhes operacionais da montagem do experimento e da tomada de dados, com pouco ou nenhum tempo reservado à compreensão e interpretação dos resultados obtidos. O resultado, segundo Hart *et al.* é que “a preocupação fundamental dos estudantes no laboratório é completar as tarefas” [9].

A abordagem tradicional tende a ignorar o fato de que muito da aprendizagem associada à realização de um experimento só se concretiza se as medidas e observações feitas pelos alunos forem relacionadas às ideias que eles têm (ou estão desenvolvendo) sobre o fenômeno estudado [8]. Uma atividade prática eficaz do ponto de vista didático deve incluir um período de discussão e interpretação dos resultados encontrados, o que raramente ocorre nos laboratórios de ensino tradicionais. Discussões prévias à realização dos experimentos também são necessárias. O trabalho de laboratório deve dar

resposta a questões sobre as quais o aluno já está pensando; sem isso ele não compreenderá o propósito do que está fazendo e dificilmente se interessará pelo resultado [8,9]. Mais ainda, sem uma reflexão prévia adequada, o aluno poderá não perceber o que há de importante a ser observado e frequentemente chegará a ver o oposto do que se deseja, “negando com veemência as evidências obtidas” [5].

Não é fácil resolver os problemas descritos acima. Mesmo em experimentos simples, a coleta de dados e organização dos resultados (em gráficos, tabelas, etc.) são normalmente processos demorados – além de repetitivos e tediosos – que não costumam deixar muito espaço para outras atividades. O pouco tempo que sobra é usado na montagem e calibração do equipamento (pelo menos essas são atividades mais instrutivas que a simples tomada de dados). Ainda que o instrutor deseje discutir o que se pode aprender com o experimento, ou interpretar os resultados em termos de conceitos e princípios da física, ele provavelmente não terá oportunidade para isso. As restrições de tempo terminarão por levá-lo a adotar os roteiros do tipo “receita de bolo”, pois se o aluno não for guiado passo a passo ele poderá perder-se e não terminar a atividade.

2.2 O computador no laboratório de física

Durante a década de 1980 surgiram as primeiras propostas para integrar microcomputadores aos laboratórios didáticos. Sensores de diversos tipos (termômetros, sonares, *photogates*, etc.) e sistemas de aquisição de dados simples foram ligados a computadores e utilizados em uma grande variedade de experimentos. Com isso tornou-se possível coletar rapidamente grandes quantidades de dados e apresentar os resultados imediatamente em forma de gráficos. Também ficou muito mais fácil realizar análises estatísticas, usando programas (como as planilhas eletrônicas) instalados no próprio computador que registra as medidas.

A rapidez com que dados são coletados, apresentados e analisados faz do laboratório baseado em computadores (LBC) um instrumento didático muito mais poderoso que o laboratório tradicional. Ao tornar eficiente o processo

de aquisição e visualização dos dados, o computador dá aos estudantes tempo para atividades mais proveitosas como compreender e planejar o que farão durante o experimento, avaliar os resultados obtidos e refletir sobre suas implicações conceituais [2, 6].

A apresentação gráfica imediata dos resultados das medidas traz vantagens que vão além da economia de tempo e esforço. Com a visualização em tempo real fica muito mais fácil compreender o que está sendo obtido no experimento. Isso pode, por exemplo, mostrar que novas tomadas de dados devem ser realizadas ou que ajustes são necessários para melhorar a qualidade dos resultados. Ainda mais importante, ao ganhar acesso imediato a gráficos e análises estatísticas os estudantes podem avaliar melhor o significado e implicações dos resultados experimentais, comparando-os com suas expectativas ou previsões. Dúvidas e questões levantadas durante esse processo podem, inclusive, levar à realização de novos experimentos que estendam a investigação original. Num laboratório tradicional a possibilidade de se realizar atividades desse tipo, mais “abertas”, é severamente limitada pela falta de tempo e pela dificuldade em visualizar e analisar imediatamente os resultados experimentais.

Os computadores foram logo reconhecidos como instrumentos que poderiam modificar radicalmente a maneira como atividades experimentais são realizadas nas escolas, contornando muitas das críticas dirigidas aos procedimentos tradicionais [2, 6, 10]. É claro que, por si só, uma simples troca de equipamento não resolveria os problemas apontados pelos críticos. A utilização do computador para fazer “mais do mesmo” nos laboratórios possivelmente até agravaria a situação. Mas é inegável que o LBC facilita a implementação de mudanças que melhorem a aprendizagem da física em atividades práticas, algo muito mais difícil de alcançar apenas com os recursos dos laboratórios tradicionais. E, de fato, vários estudos mostram que o uso do LBC em atividades apropriadamente organizadas aumenta significativamente a compreensão conceitual dos alunos a respeito dos temas estudados (ver Thornton e Sokoloff [10], por exemplo).

Apesar das muitas vantagens sobre os laboratórios didáticos convencionais, os LBC ainda apresentam problemas. Computadores de mesa (*desk-*

tops) são pesados e pouco portáteis, e normalmente estão instalados em salas de computação, não em laboratórios, dificultando a montagem de experimentos que exijam flexibilidade no arranjo dos equipamentos. Ainda que os computadores estejam em um laboratório preparado para recebê-los (o que raramente se vê no Brasil), um outro problema tem que ser enfrentado: os sensores e interfaces de aquisição de dados. Em geral esses componentes são vendidos por empresas especializadas (Pasco, Vernier, etc.), por preços proibitivos à maioria das escolas brasileiras. Existem propostas para realizar a aquisição de dados usando as interfaces normalmente encontradas nos computadores domésticos (ver [11–14], por exemplo), mas essas iniciativas são limitadas pelos poucos sensores que podem ser utilizados dessa maneira.

Os computadores portáteis (*laptops*, *netbooks*) reduzem o problema da montagem dos experimentos, mas poucas escolas possuem esse tipo de equipamento. De qualquer forma, ainda que computadores portáteis estejam à disposição dos alunos de uma escola, a questão das interfaces e sensores permanece.

Na próxima seção discutiremos uma forma de superar esses problemas, utilizando os *smartphones* e *tablets* que a maioria dos jovens em idade escolar carrega consigo.

2.3 *Smartphones* e *tablets* no laboratório

Os *smartphones* são telefones celulares com alta capacidade de computação e comunicação. Os primeiros modelos surgiram na década de 1990, mas foi só a partir dos lançamentos do Blackberry (2002) e iPhone (2007) que eles começaram a ser utilizados em larga escala. Modelos recentes de *smartphones* têm processadores com frequências superiores a 1 GHz, memórias RAM que ultrapassam 1 GB e capacidade para armazenar internamente dezenas de GB. Hoje em dia a maioria dos celulares vendidos no mundo são *smartphones*.

Os *tablets*, por sua vez, são computadores extremamente portáteis, normalmente controlados a partir de uma tela de toque (*touchscreen*) que substitui o *mouse* e teclado. Eles possuem telas maiores que os *smartphones*, facilitando a leitura de textos e o uso de aplicativos, mas os dois tipos de

aparelho não diferem muito quando se trata da capacidade de processamento e memória. *Tablets* são mais baratos que os computadores convencionais, e a combinação de preço e portabilidade fez deles os computadores pessoais mais populares no mundo, com vendas superiores às dos *laptops* e *desktops*.

Smartphones e *tablets* são bastante difundidos entre os jovens na idade escolar, inclusive no Brasil. São muito utilizados em sala de aula, geralmente de forma imprópria e clandestina (troca de mensagens, redes sociais, etc.), gerando frequentes problemas disciplinares e levando algumas escolas a proibir seu uso.

Do ponto de vista do ensino de física, o que interessa é que os *smartphones* e *tablets* já trazem de fábrica uma variedade de sensores, capazes de medir diretamente grandezas físicas importantes. Atualmente, boa parte desses aparelhos tem os seguintes sensores:

- acelerômetro,
- giroscópio,
- magnetômetro,
- microfone,
- câmera fotográfica e de vídeo,
- luxímetro,
- GPS,
- sensor de proximidade.

A figura 2.1 mostra a localização de alguns sensores em dois modelos de *smartphone* e *tablet*. As faixas de valores que podem ser medidos também estão indicadas. Todos esses sensores têm programas que leem as medidas efetuadas, mostram o resultado em forma gráfica e armazenam os dados em arquivos. Se necessário, os arquivos podem ser enviados por *email* (ou forma equivalente) a um computador maior para posterior análise. Muitos desses programas são gratuitos e podem ser obtidos facilmente via internet.

A diversidade de sensores encontrados nos *smartphones* e *tablets* torna possível realizar um grande número de experimentos e observações sem a utilização de sistemas externos de aquisição de dados. Mais ainda, a extrema portabilidade dos aparelhos facilita a montagem de experimentos em salas de aula regulares, dispensando em muitos casos o deslocamento dos alunos

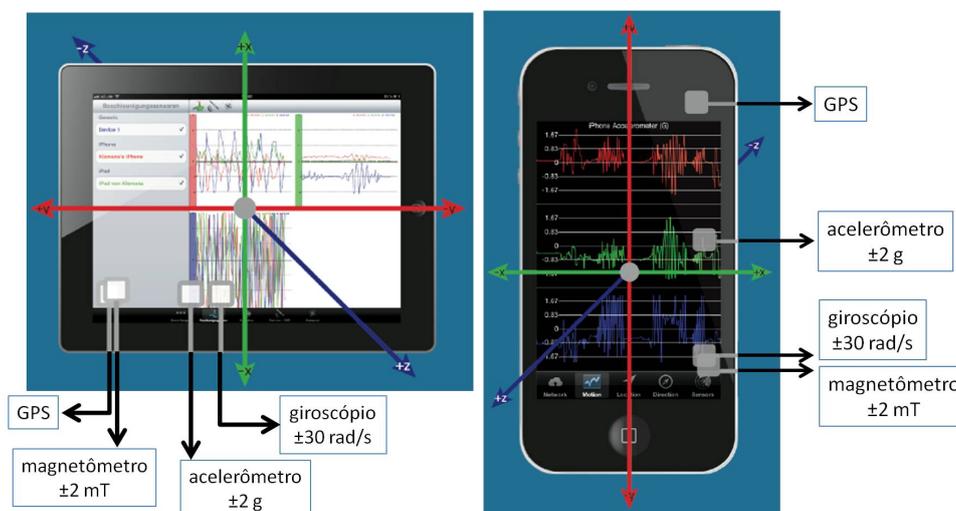


Figura 2.1: Alguns sensores e sua localização num *tablet* (iPad, à esquerda) e num *smartphone* (iPhone, à direita). As faixas de valores medidos pelos sensores estão indicadas.

a um laboratório (que pode nem existir na escola). Se bem exploradas, essas características dos *smartphones* e *tablets* podem ajudar a resolver os problemas dos laboratórios baseados em computador apontados na seção anterior.

As vantagens de se utilizar *tablets* e *smartphones* em experimentos didáticos estão sendo gradativamente percebidas pelos professores de física, e um número crescente de atividades envolvendo esses aparelhos têm sido descritas na literatura. Por exemplo, a revista *The Physics Teacher*, da American Association of Physics Teachers, abriu recentemente uma seção (iPhysicsLabs) inteiramente dedicada a experimentos com *tablets* e *smartphones*. Os artigos publicados até o momento (agosto de 2013) nessa seção estão nas refs. [15–26] e dão uma boa ideia do que é possível fazer com esses equipamentos. Mais artigos sobre o uso de *tablets* e *smartphones* em experimentos de física estão nas refs. [27–30].

Em um estudo sobre como estudantes respondem à introdução em sala de aula de um conjunto de *tablets*, Van Dusen e Otero observaram que “ao facilitar a coleta de dados, análise e colaboração, os iPads permitiram que os estudantes tirassem suas próprias conclusões baseados em evidências, ao

invés de depender do livro ou professor para chegar a soluções” e que “ao contrário de anos anteriores, os alunos começaram a ir regularmente à sala de aula fora do horário de classe para trabalhar em projetos de física” [31].

Tablets e *smartphones* são atraentes como instrumentos de laboratório por motivos que vão além de sua capacidade como ferramenta de medida. Eles fazem parte da vida e cultura dos estudantes, que estão acostumados a utilizá-los e encaram com interesse novas possibilidades de aplicação. Como já vimos, uma atividade experimental bem sucedida do ponto de vista da aprendizagem exige a participação ativa do aluno, não apenas a execução passiva das instruções de um guia de laboratório. O uso de um aparelho que faz parte do cotidiano fornece aos alunos uma referência familiar, capaz de mediar sua interação com o laboratório didático. Essa mediação facilita não apenas a realização das atividades propostas pelo professor; ela também favorece o desenvolvimento de novas ações investigativas por parte dos alunos, como a proposta de experimentos que estendam a atividade prática original. Nada impede que essas ações sejam, inclusive, realizadas fora da sala de aula ou da escola. Como boa parte dos estudantes carrega um *smartphone* em seu bolso, eles podem utilizar os recursos do aparelho para analisar fenômenos do seu dia-a-dia, estabelecendo a relação essencial entre a física estudada na sala de aula e a experiência cotidiana.

Nos capítulos seguintes descreveremos alguns dos sensores encontrados em *tablets* e *smartphones* e apresentaremos atividades práticas envolvendo seu uso. Cada capítulo é dedicado a um sensor diferente, e mais de uma atividade é apresentada para cada sensor. Grande parte das atividades foi aplicada em salas de aula da educação básica, tanto da rede pública quanto particular. Descreveremos em detalhe a elaboração e aplicação dessas atividades e, quando for o caso, a reação dos alunos à sua realização.

Capítulo 3

Mecânica com o Acelerômetro

A maioria dos *tablets* e *smartphones* tem um acelerômetro. A primeira utilização desse sensor em computadores deu-se em 2003, em *notebooks* fabricados pela IBM/Lenovo. Ao detectar uma possível queda do aparelho o acelerômetro acionava o travamento do disco rígido, antes que o impacto colocasse em risco a integridade dos dados. Posteriormente os acelerômetros foram utilizados em *tablets* e *smartphones* para organizar os conteúdos mostrados nas telas desses dispositivos, mantendo textos e figuras orientados ao longo da direção de leitura mais confortável ao usuário.

O típico acelerômetro de um *tablet* ou *smartphone* é capaz de medir acelerações no intervalo $\pm 2g$ (g é a aceleração da gravidade), em relação a um referencial inercial. A resolução pode chegar a $0,002g$, mas na prática é limitada pela facilidade com que o sensor capta vibrações mecânicas do aparelho.

Neste capítulo descreveremos atividades experimentais que utilizam o acelerômetro de *tablets* e *smartphones* para explorar temas de mecânica. Iniciaremos com uma rápida apresentação do acelerômetro e de alguns programas para sua leitura. Em seguida discutiremos a montagem e realização em sala de aula de diversos experimentos sobre cinemática e dinâmica.

3.1 O acelerômetro e sua leitura

O acelerômetro encontrado em *tablets* e *smartphones* é um sistema eletromecânico extremamente pequeno, como se pode ver na figura 3.1. Ele é baseado em pequenos capacitores cujas placas têm uma certa elasticidade, o que faz com que a distância entre elas varie quando o dispositivo sofre uma aceleração. Isso altera as capacitâncias, que uma vez medidas permitem a inferência da aceleração. Diferentes conjuntos de capacitores são dispostos de maneira a determinar a aceleração em três eixos distintos (X, Y e Z), como mostrado na figura 3.2. No iPad e iPhone os eixos estão dispostos como na figura 3.3.

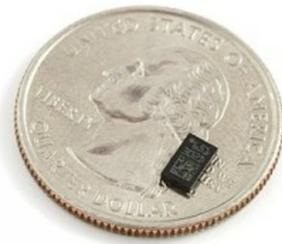


Figura 3.1: Tamanho de um acelerômetro utilizado em *tablets* e *smartphones*.

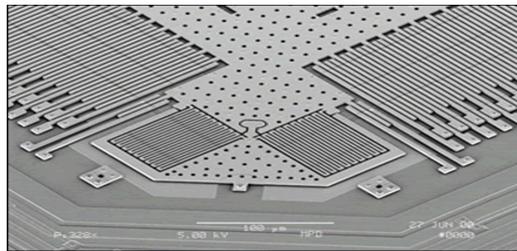


Figura 3.2: Estrutura eletromecânica de um acelerômetro. Podemos ver os capacitores cuja separação é alterada pela aceleração; suas dimensões são da ordem de 0,1 mm.

Na verdade, o acelerômetro não mede propriamente a aceleração \vec{a} , mas a grandeza

$$\vec{a}' = \vec{g} - \vec{a}, \quad (3.1)$$

onde \vec{g} é a aceleração da gravidade. Por exemplo, o acelerômetro de um

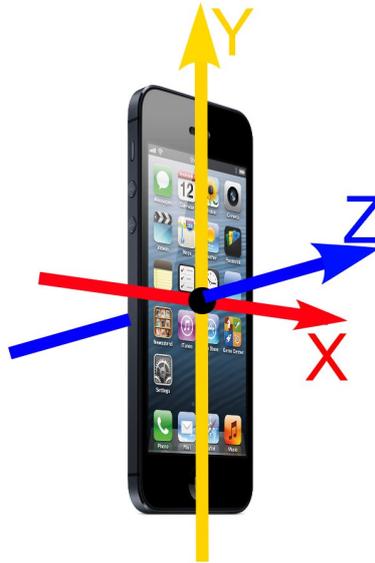


Figura 3.3: Orientação dos eixos que definem as componentes da aceleração de um iPad ou iPhone

smartphone colocado sobre uma mesa com a tela para cima indicará

$$a'_x = a'_y = 0, \quad a'_z = -9,8 \text{ m/s}^2 .$$

Em queda livre (sem rotação) ele registrará $a'_x = a'_y = a'_z = 0$.

Existem vários programas que leem as medidas do acelerômetro. Dois exemplos para sistemas da Apple são o *Acceleration* (Indiana University) e o *Sparkvue* (Pasco), ambos desenvolvidos para fins educacionais. Os dois programas estão disponíveis gratuitamente na “loja virtual” da Apple, são fáceis de usar, fazem gráficos da aceleração em tempo real e permitem enviar os dados gravados por *email*. Além de mostrar as medidas do acelerômetro, o *Acceleration* também calcula (por integração) a velocidade e posição do aparelho, possibilitando inúmeras aplicações didáticas. A tela inicial do *Acceleration* está mostrada na figura 3.4: o botão “Start” começa a gravação dos dados, a barra de deslizamento “Samples/second” é usada para determinar quantos dados por segundo serão gravados, as barras X, Y e Z indicam a

aceleração em cada um dos eixos (em unidades de g), a barra “Time” permite exibir as medidas de instantes anteriores, o botão *email* envia os dados para o endereço eletrônico desejado, e o botão “Calibrate” zera a aceleração nos três eixos ao ser pressionado, eliminando o efeito da aceleração da gravidade. Os botões X, Y, Z levam a outras janelas, que mostram o gráfico da aceleração em função do tempo para cada um dos eixos. Nessas janelas existem mais três botões, que permitem escolher gráficos da aceleração, velocidade e posição (figura 3.5).



Figura 3.4: Tela inicial do programa *Acceleration*.



Figura 3.5: Tela de gráficos do *Acceleration*, mostrando a aceleração, velocidade e posição em uma queda livre.

O significado da calibração deve ser discutido com cuidado. Ao se pressionar o botão “Calibrate”, o programa registra a aceleração em cada eixo nesse

instante e passa a subtraí-la dos resultados subsequentes (por isso dizemos que o acelerômetro é “zerado”). Normalmente o *smartphone* ou *tablet* não estará acelerado no momento da calibração, de modo que apenas a aceleração da gravidade é subtraída. Isso significa que daí em diante o programa apresentará a grandeza

$$\vec{a}'' = \vec{a}' - \vec{g} = (\vec{g} - \vec{a}) - \vec{g} = -\vec{a}. \quad (3.2)$$

A menos do sinal, essa é a aceleração do aparelho (o sinal pode ser ignorado imaginando-se que os eixos da figura 3.3 são invertidos).

É importante notar que a equação $\vec{a}'' = -\vec{a}$ só vale se o aparelho não estiver em rotação. Se a orientação dos eixos mudar com o tempo, o que ficará registrado será, componente a componente,

$$\begin{aligned} a''_x &= g_x - a_x - g_x^0, \\ a''_y &= g_y - a_y - g_y^0, \\ a''_z &= g_z - a_z - g_z^0, \end{aligned} \quad (3.3)$$

onde $g_{x,y,z}^0$ são as componentes do vetor aceleração nas direções em que os eixos do aparelho apontavam no instante da calibração. Como essas direções estão mudando, $g_{x,y,z}^0 \neq g_{x,y,z}$ e não há cancelamento entre esses valores. Assim, quando o movimento do acelerômetro envolve rotações, a “calibração” pode mais atrapalhar que ajudar.

3.2 Queda livre

O experimento mais simples que pode ser feito com o acelerômetro é, provavelmente, a “queda livre”. Para realizá-lo em sala de aula basta subir em uma cadeira (ou na mesa do professor), iniciar a gravação dos dados do acelerômetro e deixar o *tablet/smartphone* cair, não sem antes pedir que um par de alunos estique um pano (uma camisa serve) para aparar o dispositivo sem danificá-lo. A figura 3.6 mostra a aceleração medida em um desses experimentos. Note que o programa utilizado foi o *Acceleration* e que a aceleração

é dada em unidades de g . Pode-se ver que a aceleração do *tablet/smartphone* manteve-se constante e igual a g durante a queda. A “calibração” disponível no programa foi usada; sem ela, como já mencionamos, encontraríamos aceleração zero durante a queda livre.

O experimento põe a teste, de maneira particularmente simples, uma das ideias mais discutidas no ensino médio, a de que corpos em queda livre têm aceleração constante. Apesar da importância desse tema e do tempo dedicado a ele nos cursos introdutórios de física, poucos experimentos sobre a queda livre costumam ser realizados em sala de aula. Como vimos, os *tablets* e *smartphones* podem ajudar a preencher essa lacuna.

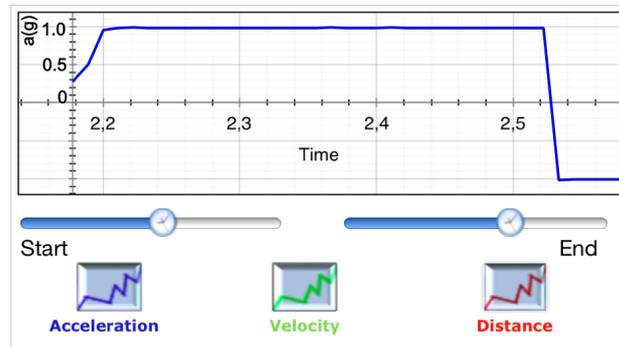


Figura 3.6: Aceleração em função do tempo no experimento de queda livre.

As figuras 3.7 e 3.8 mostram a velocidade e posição do dispositivo durante o experimento, conforme calculada pelo *Acceleration*. É interessante notar que a comparação entre os diferentes gráficos torna possível discutir as variações (linear e quadrática) da velocidade e posição com o tempo quando a aceleração é constante, um tópico importante no ensino médio.

O experimento foi realizado pelos alunos de uma turma do segundo ano do ensino médio, que no momento estudavam cinemática. Os gráficos mostrados nas figuras 3.6, 3.7 e 3.8 foram registrados por um dos grupos que fizeram o experimento. Após fazer as medidas os alunos responderam, a partir da análise dos gráficos que encontraram, a questões como:

- (i) Quanto tempo o *tablet/smartphone* ficou no ar?
- (ii) Faça uma estimativa da altura da queda.
- (iii) Quanto vale a aceleração do dispositivo?

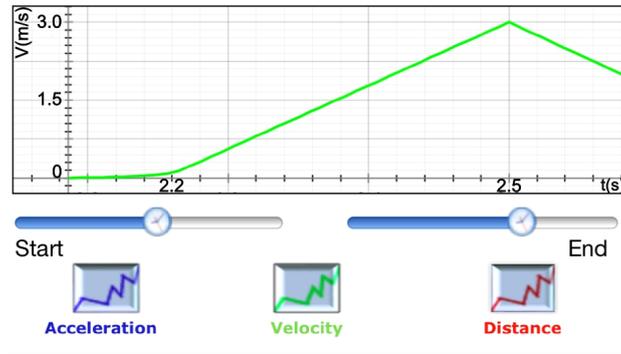


Figura 3.7: Velocidade (calculada) em função do tempo no experimento de queda livre.

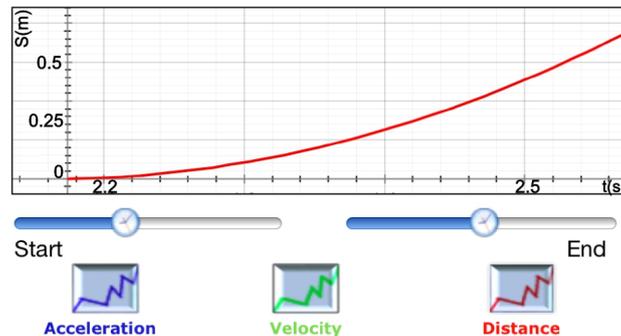


Figura 3.8: Posição (calculada) em função do tempo no experimento de queda livre.

(iv) A aceleração do dispositivo permaneceu constante durante todo o movimento?

(v) Se deixarmos cair um *tablet* e um *smartphone*, qual registrará maior valor para a aceleração?

A última pergunta é uma releitura da questão clássica conhecida por todos os professores de Física, e o resultado encontrado após o experimento não foi muito diferente do esperado. Dos 38 alunos da turma, 29 responderam que o *tablet* teria que registrar maior aceleração. A justificativa dada pelos alunos para essa resposta foi que o *tablet* é mais pesado que o *smartphone*. Com um experimento realizado logo em seguida foi possível observar em sala de aula que dois corpos de massas bem distintas – o *tablet* com 600g e o *smartphone* com 100g – caem com igual aceleração. Resultados experimentais

como esse são importantes como estratégia de convencimento dos alunos, que muitas vezes interpretam impressões puramente visuais de acordo com suas concepções prévias, afirmando notar que o corpo mais pesado alcança o solo antes do mais leve mesmo quando isso não ocorre. Mas deve ser salientado que nem mesmo a confirmação experimental conseguiu convencer alguns alunos, mostrando que a desconstrução de um conceito arraigado leva tempo e exige múltiplas intervenções.

3.3 O paraquedas

Um desenvolvimento natural do experimento de queda livre é o estudo dos efeitos de resistência do ar. Para fazer isso, repetimos o experimento anterior, dessa vez colocando o *smartphone* sobre uma placa de isopor (ver a figura 3.9) de modo a aumentar significativamente a resistência que o ar oferece à queda. As dimensões da placa eram $30,0 \times 50,0 \times 1,5$ cm.



Figura 3.9: O *smartphone* apoiado na placa de isopor.

Como no experimento de queda livre, zeramos o acelerômetro, iniciamos a gravação dos dados e deixamos o isopor cair (com o *smartphone* em cima). Se o *smartphone* estiver aproximadamente no centro da placa a queda será estável, ou seja, o isopor não vai virar derrubando o aparelho (fizemos inúmeras repetições desse experimento e nenhum acidente foi registrado). O resultado de uma medida realizada dessa maneira está mostrado na figura 3.10. O programa utilizado para ler o acelerômetro nesse experimento foi o *Sparkvue*. Podemos notar que a aceleração no início da queda é aproximadamente igual à da gravidade ($\approx 0,8g$), e seu valor diminui gradativamente à medida que o tempo passa, tendendo a zero. A diferença entre a aceleração da gravidade e a aceleração medida deve-se à resistência do ar sobre a placa de isopor. Vê-se

da figura 3.10 que essa resistência aumenta com o tempo, até praticamente igualar-se à ação da gravidade no final da queda, quando a aceleração medida tende a zero.

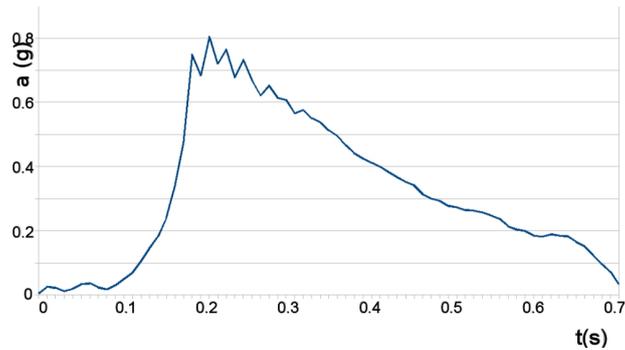


Figura 3.10: Aceleração durante a queda do *smartphone* colocado sobre a placa de isopor.

O cálculo da velocidade a partir da aceleração permite analisar como a resistência do ar depende dessa velocidade. O resultado de uma análise desse tipo está mostrado no gráfico da figura 3.11, no qual podemos ver que a aceleração devida à resistência do ar aumenta com a velocidade.

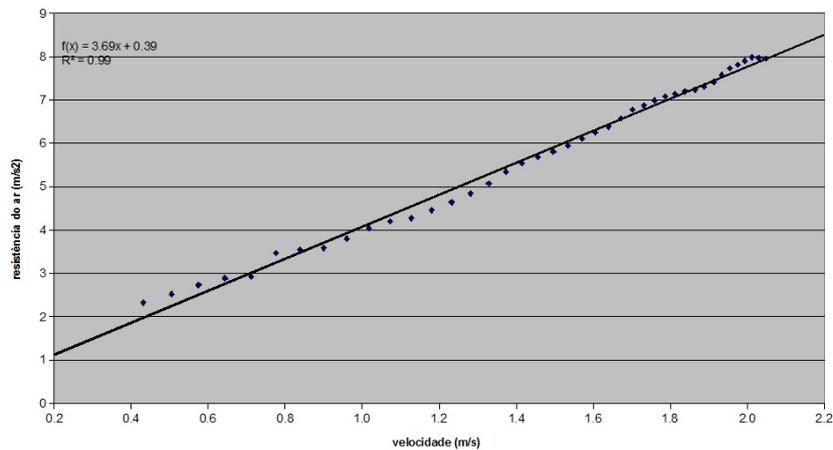


Figura 3.11: Aceleração devida à resistência do ar ($g - a$ em m/s^2) durante a queda do *smartphone* apoiado em uma plataforma de isopor, como função da velocidade.

O experimento foi realizado como demonstração para a mesma turma que fizera a atividade de queda livre (a esta altura os alunos já haviam

estudado as leis de Newton). O gráfico apresentado na figura 3.10 foi obtido na demonstração e mostrado aos alunos através de um *datashow*, e o resultado foi discutido e interpretado em sala de aula.

O conceito de velocidade limite também pode ser explorado com esse experimento. Como mencionamos ao analisar a figura 3.10, em algum momento próximo ao término de nossa medição a resistência do ar praticamente cancela a ação da gravidade. Portanto, daí em diante a velocidade deveria ficar constante, pois uma situação de equilíbrio foi alcançada.

Um debate sobre esse tema foi proposto em sala de aula. Os alunos formaram grupos e expuseram à turma suas opiniões a respeito de questões como: (i) Durante o movimento, existe um limite para o aumento da resistência do ar? (ii) Se a resposta for sim, quanto vale esse limite? Os participantes de cada grupo defenderam sua interpretação dos dados. De maneira geral, não foi necessária muita interferência do professor para que uma conclusão plausível fosse apresentada. Um dos grupos defendeu que existia um limite mas não tinha certeza de seu valor. Foi proposto aos alunos desse grupo que fizessem um diagrama de forças e chegassem ao valor da aceleração resultante para o caso em que a resistência do ar fosse igual ao peso. Isso foi o bastante para que o grupo se convencesse e eles mesmos se encarregaram de expor e explicar aos outros colegas a sua conclusão, o que fizeram reproduzindo o experimento teatralmente (o que funcionou razoavelmente bem para grande parte dos outros grupos).

Pedimos em seguida que os alunos descrevessem em um texto como seria a aceleração sentida por um paraquedista desde o salto do avião até a estabilização da velocidade com o paraquedas aberto. Dos 38 alunos da turma, 34 fizeram o trabalho e todos, sem exceção, disseram que o paraquedista sentiria $9,8 \text{ m/s}^2$ até abrir o paraquedas e dos 34, 19 disseram que após essa ação a aceleração diminuiria até se estabilizar. Alguns alunos, animados com a ideia de gerar gráficos, introduziram um esboço de aceleração em função do tempo; um exemplo está mostrado na figura 3.12.

Para por a teste a perspectiva apresentada pelos alunos, prendemos um pequeno paraquedas ao *smartphone* (figura 3.13), fomos até a uma janela do 2º andar da escola e deixamos o *smartphone* cair. O paraquedas estava

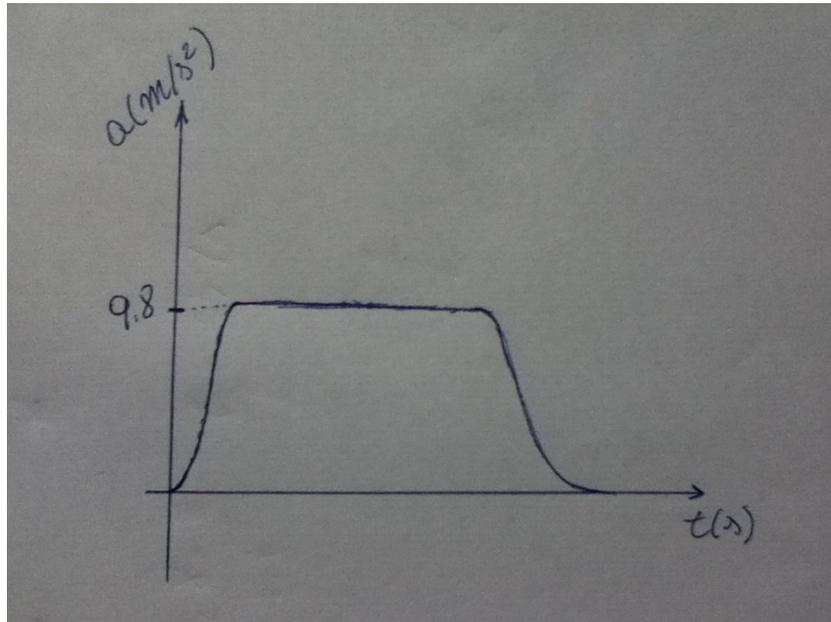


Figura 3.12: Esboço de um aluno do segundo ano do ensino médio, sobre como deveria ser a aceleração de um paraquedista desde o salto até depois da abertura do paraquedas.

inicialmente fechado e se abriu inflado pela passagem do ar. A aceleração medida pelo acelerômetro está mostrada na figura 3.14.

As regiões *a*, *b* e *c* no gráfico da figura 3.14 representam, respectivamente, o aparato antes de ser solto (seguro pelo professor à janela), o período em que o paraquedas está se abrindo e, finalmente, o paraquedas totalmente aberto. Note que nessa ultima região temos uma aceleração negativa, o que indica que a força resultante está para cima, freando o conjunto. Isso mostra que quando o paraquedas se abre o *smartphone* está a uma velocidade maior que a limite, e portanto a resistência do ar será maior que a força peso, diminuindo a velocidade do conjunto até que ambas as forças se igualem gerando uma situação de equilíbrio. A grande aceleração para cima (negativa) que surge quando o paraquedas se abre completamente é bem conhecida dos paraquedistas, que a chamam de *tranco*. O *plateau* em $-1g$ visto na região *c* do gráfico da figura 3.14 reflete a limitação do acelerômetro ao intervalo $\pm 2g$. Ao “zerarmos” o sensor somamos g à aceleração medida, o que produz um intervalo de leitura de $-g$ a $3g$.



Figura 3.13: O *smartphone* acoplado a um paraquedas caseiro.

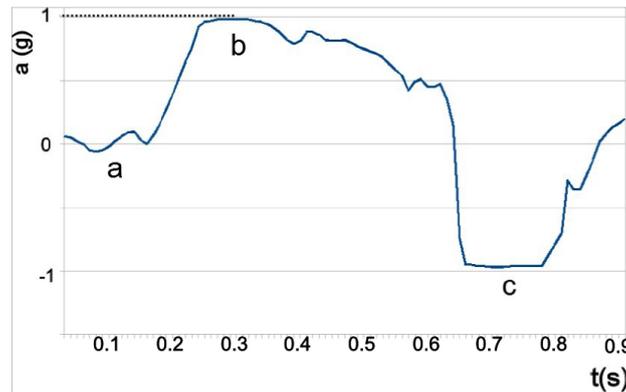


Figura 3.14: A aceleração em função do tempo do *smartphone* em queda com paraquedas.

É importante ressaltar como o resultado do experimento confronta a ideia original da maioria dos alunos de que numa queda a aceleração aponta sempre para baixo (ver a figura 3.12, por exemplo). Bem explorado, esse tipo de “conflito cognitivo” pode ser de grande valia na construção do conhecimento, fazendo com que o aluno busque uma explicação ou formule um modelo que dê conta do fenômeno em questão.

Outro aspecto importante do experimento é que ele foge ao escopo tradicional do ensino médio, onde apenas situações envolvendo aceleração constante costumam ser tratadas. A complicação adicional pode dificultar o entendimento do conteúdo que se pretende explorar, mas ao lidar com situações reais e interessantes os educandos compensam esse aumento de complexidade com

um comprometimento maior, refletido em mais atenção e dedicação. Os alunos, de maneira geral, relataram que gostaram muito dessa atividade, pois compreenderam melhor algo que despertara seu interesse, utilizando para isso o apenas o telefone que muitos carregavam no bolso. Falas como “eu nem imaginava que poderia fazer tanta coisa com meu celular...” foram ouvidas.

No que tange ao desenvolvimento dos alunos no contexto mais geral da disciplina, foi possível perceber que o esboço de gráficos e a análise mais cuidadosa de um diagrama de forças passou a fazer parte das estratégias adotadas por muitos deles. Um olhar mais crítico e realista foi estimulado em todo o processo, enfatizando a necessidade de se comparar ideias físicas com fatos experimentais.

3.4 O *iCar*

Muitos experimentos interessantes podem ser realizados colocando-se o *tablet/smartphone* sobre um carrinho. Construímos esse carrinho prendendo quatro rodas de *skate* sob uma plataforma desenhada para receber e proteger um *tablet*¹. O resultado da montagem foi chamado de *iCar* pelos alunos e está mostrado na figura 3.15.



Figura 3.15: O *iCar*: o carrinho de brinquedo que transporta um *tablet*.

Como primeira aplicação do *iCar* estudamos um simples empurrão sobre

¹Agradeço ao professor de artes Luíz Carlos Borges e aos meus alunos do nono ano do ensino fundamental pela ajuda na montagem do carrinho.

o carrinho, em uma turma do segundo ano do ensino médio. O *tablet* estava conectado por *wifi* a um computador de mesa, que por sua vez estava ligado a um *datashow*. Com isso a tela do *tablet* era projetada no quadro, de modo que os alunos podiam ver e analisar o gráfico da aceleração do *iCar*. O resultado de uma dessas medidas está na figura 3.16, que mostra a aceleração durante o empurrão que pôs o carrinho em movimento (região *a* do gráfico) e o deslocamento posterior (região *b*). Após um tempo o *iCar* foi freado (pelo pé de um aluno); essa desaceleração corresponde à região *c*.

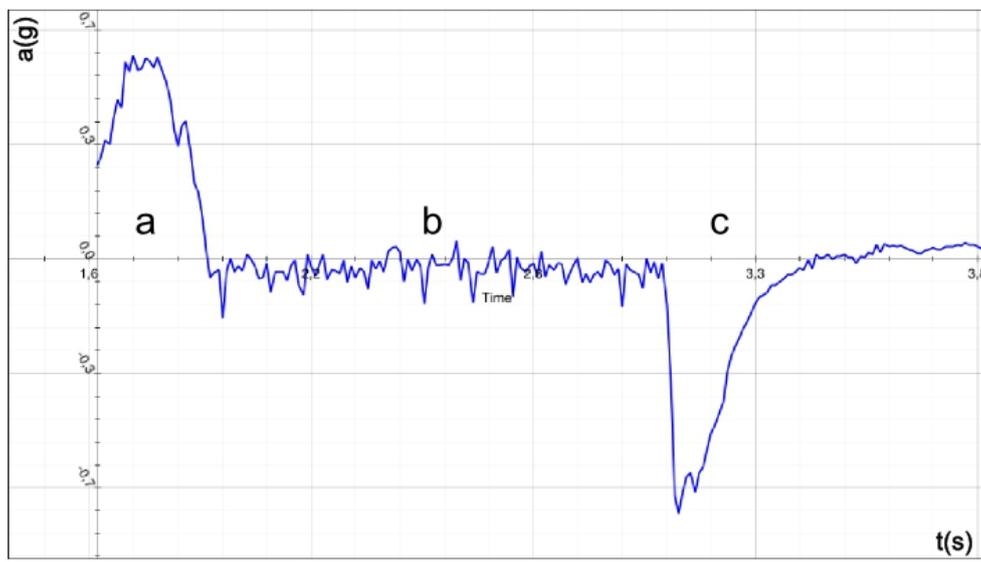


Figura 3.16: Aceleração durante o empurrão (*a*), deslocamento (*b*) e frenagem (*c*) do *iCar*.

Foi discutido com os alunos que essa é uma situação comum no dia a dia. Por exemplo, ocorre quando um carro arranca, é colocado em “ponto morto” e depois freado; ou quando um jogador de futebol dá um passe rasteiro para outro. Chamamos a atenção para o fato do empurrão acelerar rapidamente o *iCar* (cerca de 0,2 s), e que a força entre mão e carrinho varia com o tempo. No intervalo entre o impulso inicial e a frenagem final (a região *b* da figura 3.16) é possível notar que o carro sofre uma pequena desaceleração, provavelmente em consequência de forças dissipativas. Isso é facilmente observado no gráfico de velocidade em função do tempo mostrado

na figura 3.17. É interessante comparar as duas possibilidades de fazer o carro parar: o pé do aluno, que gera uma forte desaceleração, ou o atrito, que embora pequeno mais cedo ou mais tarde deixaria o carro com velocidade zero. As duas situações têm durações e efeitos distintos: a primeira pode gerar danos ao carro ou sua carga (a analogia com um acidente automobilístico é instrutiva), enquanto uma frenagem mais suave não abala a estrutura do móvel. Esses aspectos foram discutidos em sala de aula de maneira conceitual e intuitiva, pois podíamos recorrer ao gráfico sempre que um questionamento mais desafiador surgia.

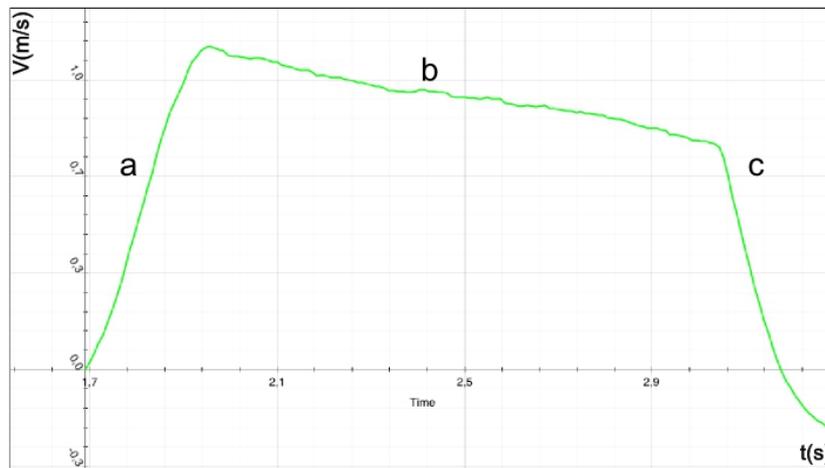


Figura 3.17: A velocidade (calculada) do *iCar* durante o empurrão, movimento e frenagem.

É possível propor aos alunos muitas atividades que exploram esse experimento. Por exemplo:

- (i) A partir do gráfico da aceleração do móvel (figura 3.16), faça um diagrama de forças para o *iCar* nas regiões *a*, *b* e *c*.
- (ii) Analisando o gráfico da velocidade em função do tempo, estime a velocidade do *iCar* quando a mão do professor perde o contato com ele.
- (iii) Você seria capaz de estimar essa velocidade sem o auxílio do gráfico de velocidade?
- (iv) A partir do gráfico de aceleração estime o valor da força de atrito na região *b*.

(v) Faça uma estimativa da distância entre o professor (que empurrou o *iCar*) e o aluno (que parou o carro).

O objetivo dessas propostas não é criar um roteiro de tarefas para acompanhar o experimento. Já vimos que atividades que seguem guias muito “amarrados” não costumam despertar o interesse dos alunos e tendem a impedi-los de formular questões e estratégias próprias. O propósito é sugerir temas que podem ser desenvolvidos de maneira proveitosa, como a união de conceitos da cinemática com a segunda lei de Newton. Não realizamos essas atividades com alunos por falta de tempo; por isso, no momento não temos como avaliar sua eficácia.

Para fazer uma experiência como essa o leitor não precisa montar um carrinho “sofisticado” como o *iCar*. A mesma ideia pode ser implementada com o *skate* de um aluno, por exemplo. Pudemos observar resultados semelhantes prendendo o *tablet* (protegido com uma capa comercial) ao *skate* com uma fita adesiva.

3.5 $F = ma$

Qualitativamente, a segunda lei de Newton diz que forças causam acelerações (e não velocidades, como pensava Aristóteles). Isso foi observado no experimento da seção anterior, em que o *iCar* era acelerado por “empurrões”. Mas como mostrar que a relação quantitativa entre força e aceleração é linear? Fizemos isso com auxílio de um dinamômetro de mola, com o qual estudamos a aceleração impelida ao *iCar* por uma força dada. O experimento é muito simples e está esquematizado na figura 3.18: afixamos uma das extremidades do dinamômetro na mesa do professor e a outra no *iCar*, distendemos o dinamômetro até atingir determinado valor da força e em seguida soltamos o carro, registrando a aceleração com o acelerômetro.

Repetindo esse procedimento para vários valores distintos da força, obtivemos gráficos da aceleração em função do tempo como os mostrados na figura 3.19. Como era de se esperar, em cada caso temos uma aceleração que varia com o tempo, pois a força exercida pelo dinamômetro diminui à medida que sua mola volta à posição de equilíbrio. A aceleração inicial do carrinho,

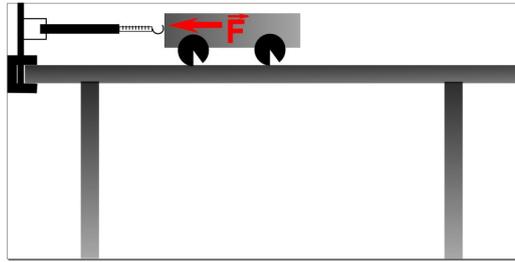


Figura 3.18: O *iCar* preso a um dinamômetro.

relacionada à força registrada pelo dinamômetro, pode ser estimada a partir do valor máximo da aceleração em cada curva. Um gráfico dessas medidas – força *versus* aceleração máxima – está mostrado na figura 3.20. Os pontos são os resultados das medidas e a linha representa o ajuste de uma reta a esses dados. O ajuste mostra que a força é linearmente proporcional à aceleração. Mais ainda, o coeficiente angular da reta ajustada é 1,63 kg, muito semelhante à massa do conjunto *iCar+smartphone*, que era de 1,54 kg (uma diferença de 5,8%).

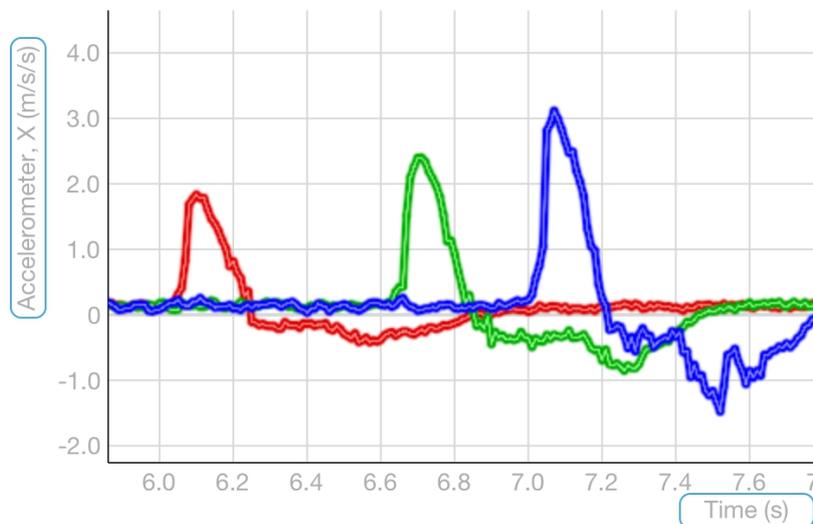


Figura 3.19: Acelerações impelidas ao *iCar* por diferentes forças.

Esse experimento foi realizado com uma turma do segundo ano do ensino médio. Os alunos já tinham estudado forças de contato, mas apenas em situações de equilíbrio. Dessa forma, para situar o assunto fizemos a seguinte

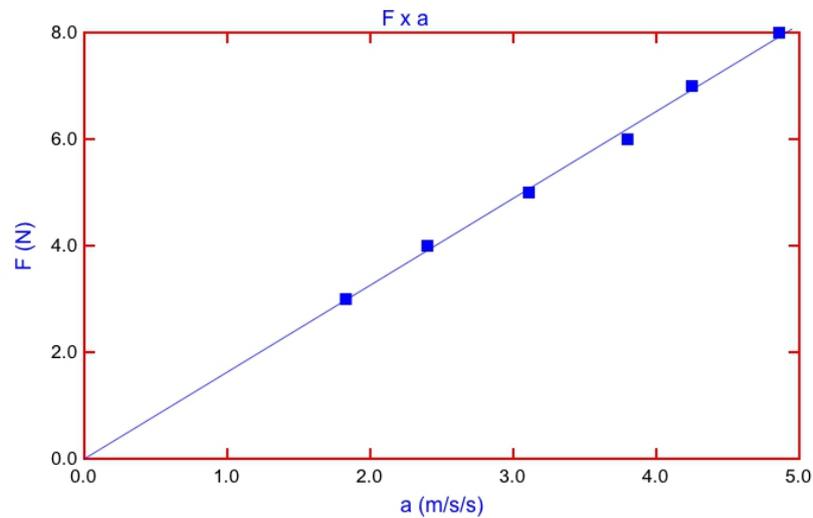


Figura 3.20: Gráfico da força registrada no dinamômetro em função da aceleração máxima do carrinho. Os pontos são as medidas efetuadas e a linha é um ajuste linear aos dados.

pergunta: se a resultante das forças aplicadas sobre o carrinho for diferente de zero, o que ocorre? Unanimemente, ouvimos que o carrinho entraria em movimento. Então perguntamos se o movimento era acelerado ou não. Obtivemos 61% de acerto nas respostas. Em seguida realizamos o experimento descrito acima, chegando à relação linear entre força e aceleração. Então pedimos que os alunos respondessem em um pequeno texto à seguinte pergunta: o que ocorreria se repetíssemos o experimento, mas agora em vez de alterarmos a força mudássemos a massa do conjunto, acelerando-o sempre com a mesma força inicial? A maioria dos alunos afirmou que a aceleração deveria diminuir com o aumento da massa. Alguns estudantes fizeram esboços de gráficos para auxiliá-los na resposta; um desses pode ser visto na figura 3.21. Em particular, o autor do gráfico argumentou que o experimento seria melhor realizado se também alterássemos a massa. Quase todos os gráficos apresentados, entretanto, expunham uma relação linear entre a aceleração e a massa.

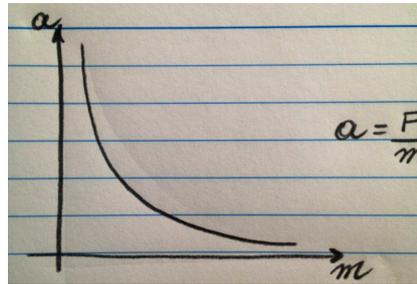


Figura 3.21: Gráfico de aceleração por massa, esboçado por um aluno do segundo ano do ensino médio.

3.6 O *iCar* no plano inclinado

O plano inclinado é um dos temas prediletos no ensino de mecânica. Geralmente ele é abordado de maneira puramente teórica (e chata, segundo muitos alunos), sem apoio de experimentos quantitativos. Com o *iCar* – ou qualquer carrinho capaz de carregar um *tablet/smartphone* – é possível realizar experimentos sobre o movimento em planos inclinados, colocando os resultados teóricos a teste. O experimento foi realizado em sala de aula com uma turma de segundo ano do ensino médio. O plano inclinado foi construído apoiando a mesa do professor sobre uma cadeira, como esquematizado na figura 3.22.

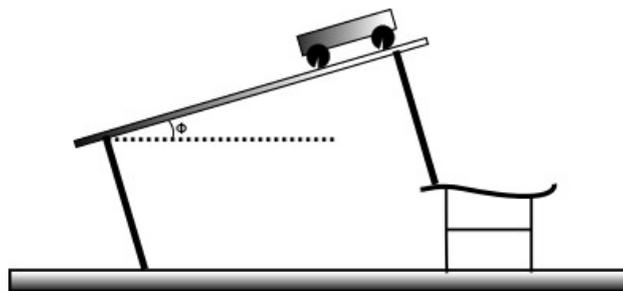


Figura 3.22: O plano inclinado com o *iCar*.

O ângulo de inclinação ϕ foi determinado com o próprio acelerômetro, uma vez que vários programas de leitura desse sensor são capazes de indicar a inclinação do aparelho em relação à direção vertical. Escolhemos o *Accelerometer*, que pode ser obtido gratuitamente na loja virtual da Apple e tem entre suas funções a medida de “nível”.

Após inclinar a mesa (com ajuda dos alunos), o *iCar* foi colocado sobre ela e seguro por um obstáculo. A tela do *tablet* foi projetada por um *datashow*, via *wifi* e um segundo computador. A inclinação foi medida com o *Accelmeter*, com o resultado $\phi = 14,5^\circ$ (figura 3.23).



Figura 3.23: Medida do ângulo com o *Accelmeter* colocado sobre a mesa inclinada.

Foi então pedido aos alunos que calculassem a aceleração com que o carrinho desceria esse plano inclinado, fazendo um diagrama de forças e aplicando a segunda lei de Newton. Muitos alunos disseram que não seriam capazes de realizar a tarefa por não saberem o valor da força de atrito (o que, *a priori*, está correto). Pedimos a eles que desconsiderassem a força de atrito, pois “suspeitávamos que ela seria muito pequena”. Na lousa da sala de aula estavam escritos o ângulo medido, a massa do conjunto *iCar* + *tablet*, a aceleração da gravidade e o comprimento do tampo da mesa. Passada essa etapa, recolhemos os cálculos feitos pelos alunos e pedimos que eles anotassem em um papel separado o valor encontrado para a aceleração.

Boa parte dos alunos chegou ao resultado esperado, ou seja, que desprezando o atrito a aceleração do carrinho seria

$$a = g \sin(14.5^\circ) = 2,4 \text{ m/s}^2 . \quad (3.4)$$

O passo seguinte foi realizar o experimento: retiramos o obstáculo que segurava o carro e medimos a aceleração do movimento. O resultado encontrado está na figura 3.24. Do gráfico vemos que aceleração do *iCar* foi de aproximadamente $2,3 \text{ m/s}^2$. O valor calculado ($2,4 \text{ m/s}^2$) está muito próximo do medido: a discrepância é da ordem de 4% e provavelmente deve-se a efeitos desprezados no cálculo (dissipação, momento de inércia das rodas, etc.)

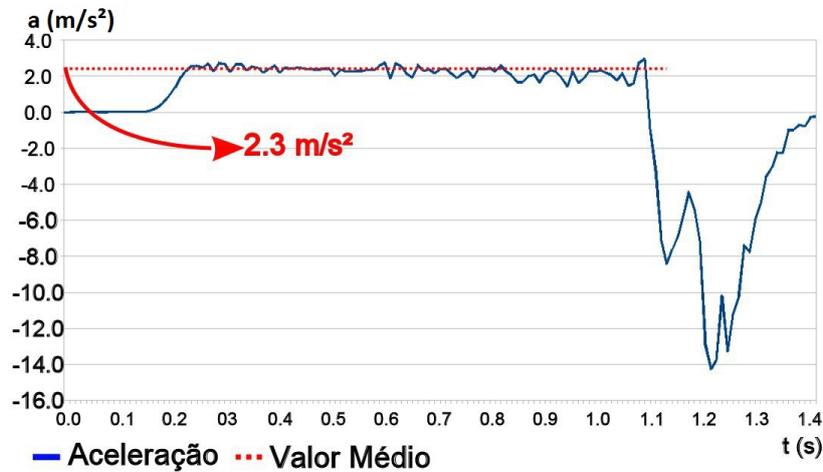


Figura 3.24: Gráfico da aceleração do dispositivo deslizando sobre a mesa inclinada.

É interessante notar que a grande maioria dos alunos utilizou o valor da massa do carrinho em seus cálculos da aceleração, sem perceber que isso era desnecessário. Até os que erraram o cálculo (em geral por não dominarem decomposição de vetores) incluíram o valor da massa em suas considerações. Isso já era esperado e por esse motivo o valor da massa, $2,1 \text{ kg}$, estava escrito na lousa. Então, após o término da experimentação feita por eles propusemos um desafio: “Se aumentarmos a massa do *iCar* de 200 g e o deixarmos descer o plano inclinado, o que ocorrerá com a aceleração?”. As alternativas eram:

- (i) A aceleração diminui.
- (ii) A aceleração mantém-se a mesma.
- (iii) A aceleração aumenta.

Dos 32 alunos participantes, apenas 9 escolheram a alternativa correta (ii). A alternativa (iii), que reflete a noção usual de que “o mais pesado desce

mais rápido”, foi a escolhida por 18 alunos, mais da metade do total. A opção (i) foi escolhida por 7 alunos. Assim, constatamos que apesar de terem discutido a queda livre corpos de massas diferentes em um experimento anterior, os alunos não foram capazes de fazer a conexão entre um experimento e outro. Muito disso se deve, acreditamos, ao fato de que na ocasião do experimento de queda livre os alunos ainda não haviam estudado a segunda lei de Newton e analisaram o fenômeno apenas sob o ponto de vista cinemático. Dos 9 alunos que responderam corretamente, 4 o fizeram por que decidiram fazer as contas com a massa diferente e perceberam que ela não era necessária; os demais não deram uma justificativa plausível para suas escolhas. É importante ressaltar que essa foi a primeira vez que os alunos da turma encontraram o problema do plano inclinado.

Ainda em sala de aula, realizamos uma variação simples e instrutiva do experimento: empurramos o *iCar* ladeira acima e o aparamos de volta (ver a figura 3.25).

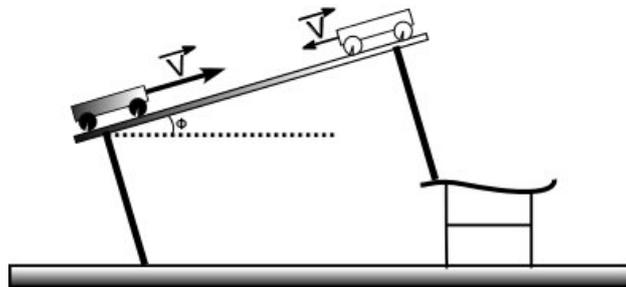


Figura 3.25: Subida e descida do *iCar* em uma mesa inclinada.

Essa versão do experimento permite a releitura de uma questão clássica, que revela quão grandes são as dificuldades enfrentadas pelos alunos na aprendizagem de mecânica. A questão é: quando jogamos uma bolinha para cima, o que acontece com a sua aceleração no ponto mais alto da trajetória? É bem sabido pelos professores de cursos introdutórios de física (e confirmado pela literatura, ver [7,32] por exemplo) que grande parte dos alunos diz que a aceleração do corpo é zero no alto da trajetória. Concepções intuitivas e um mau entendimento de conceitos de cinemática e da segunda lei de Newton levam esses alunos a não admitir que um corpo com velocidade zero possa

ter aceleração não nula.

Após realizar o experimento como esquematizado na figura 3.25 pedimos que os alunos se dividissem em grupos e discutissem o movimento a partir do gráfico da aceleração gerado na tela do *tablet*, visível a todos via o *datashow* (ver figura 3.26). Apenas uma pergunta foi feita: o que acontece com a aceleração do *iCar* quando ele está no ponto máximo de sua trajetória? Sem exceção, todos os grupos responderam que a aceleração caía a zero! Isso tendo à sua frente um gráfico que dizia outra coisa! Em seguida os alunos foram solicitados a apontar no gráfico (que continuava projetado à vista de todos) o instante de tempo em que o valor a aceleração assumia o valor zero. Os alunos responderam que não havia esse instante. Perguntados sobre por que, então, haviam afirmado que a aceleração era zero quando o carrinho chegava no ponto mais alto, os alunos disseram, em grande maioria, que isso era óbvio e que não precisavam do gráfico para responder à questão.

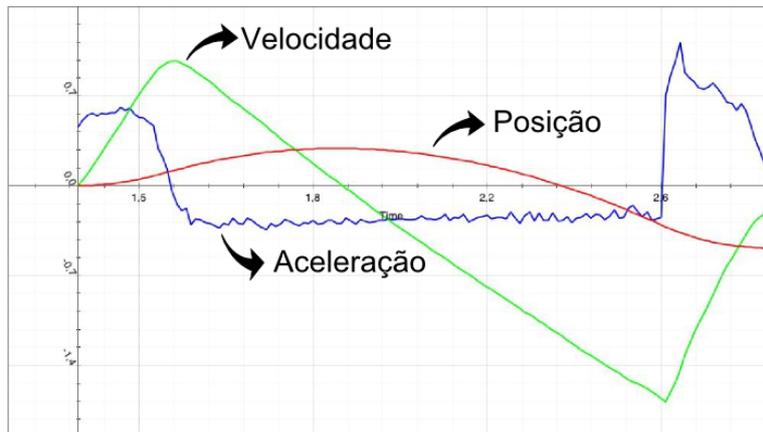


Figura 3.26: Aceleração, velocidade e posição do *iCar* durante a subida e descida em uma mesa inclinada.

3.7 A máquina de Atwood

Outro tópico popular nos cursos de física básica é a máquina de Atwood. Esse é um sistema com muitas aplicações práticas, e seu estudo envolve temas

importantes como a terceira lei de Newton e as forças transmitidas por fios e cabos.

Em sala de aula, iniciamos o estudo da máquina de Atwood com um experimento, antes de qualquer diagrama ou explanação sobre o assunto. A montagem experimental pode ser vista na figura 3.27 e é muito simples. Usamos pratos de balança (dessas de peixeiro) e uma roldinha de *skate* serviu como roldana, presa à lousa da sala de aula por uma haste de metal. Em um dos pratos colocamos um *smartphone* e no outro um conjunto de pesos.



Figura 3.27: Montagem da máquina de Atwood feita em sala de aula.

O resultado da medida da aceleração pode ser visto na figura 3.28. A aceleração do *smartphone* foi de aproximadamente $1,12 \text{ m/s}^2$ (para cima).

Como os alunos já estavam familiarizados com a modelagem da força de tração, foi pedido a eles que estimassem a aceleração dos dois corpos. O cálculo teórico, desprezando atritos e a inércia da roldana, leva a

$$a = \frac{M - m}{M + m} g \quad (3.5)$$

onde m é a massa do *smartphone*, M é a massa do corpo do lado oposto e g a aceleração da gravidade. Utilizando os valores das massas (fornecidos previamente), o resultado obtido foi $1,25 \text{ m/s}^2$. Esse valor é bastante próximo ao medido, $1,12 \text{ m/s}^2$, uma diferença de 10% que provavelmente deve-se ao atrito e o momento de inércia da roldana.

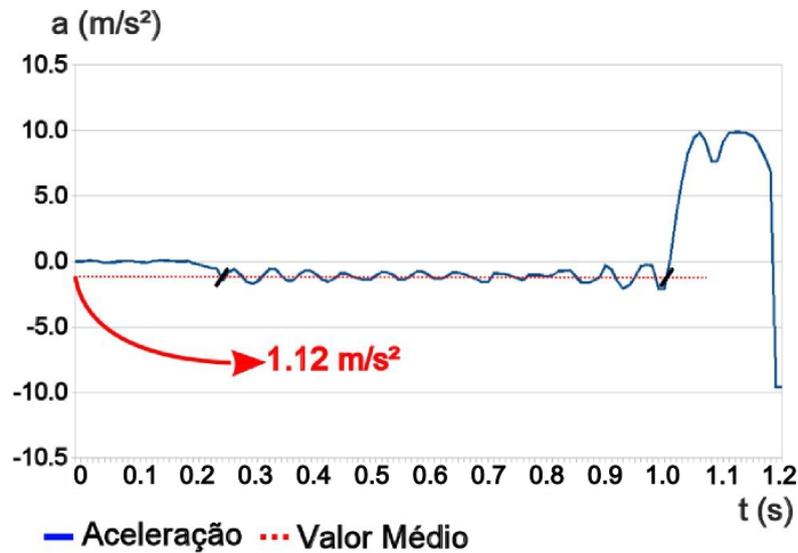


Figura 3.28: Gráfico da aceleração em função do tempo na máquina de Atwood.

3.8 A tração é igual ao peso?

Essa montagem é uma variação da máquina de Atwood e consta como exercício em incontáveis livros didáticos, revelando algumas dificuldades comuns no estudo da mecânica (ver [7], p. 114). Temos uma plataforma (a mesa do professor), uma roldana presa ao tampo da mesa por uma haste metálica e uma linha ligando uma massa ao *iCar* (ver figura 3.29). Um esquema do experimento está na figura 3.30.



Figura 3.29: O *iCar* preso a uma massa com auxílio de uma roldana.

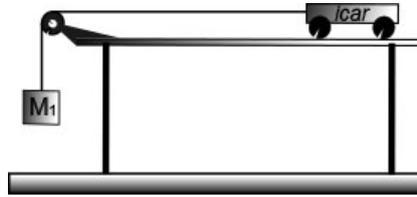


Figura 3.30: Esquema da montagem experimental.

Pedimos aos alunos que fizessem o diagrama de forças para o carrinho e, logo em seguida, medimos a aceleração do mesmo. A figura 3.31 mostra o gráfico gerado durante o movimento, e podemos ver que a aceleração do *iCar* foi de aproximadamente $1,3 \text{ m/s}^2$.

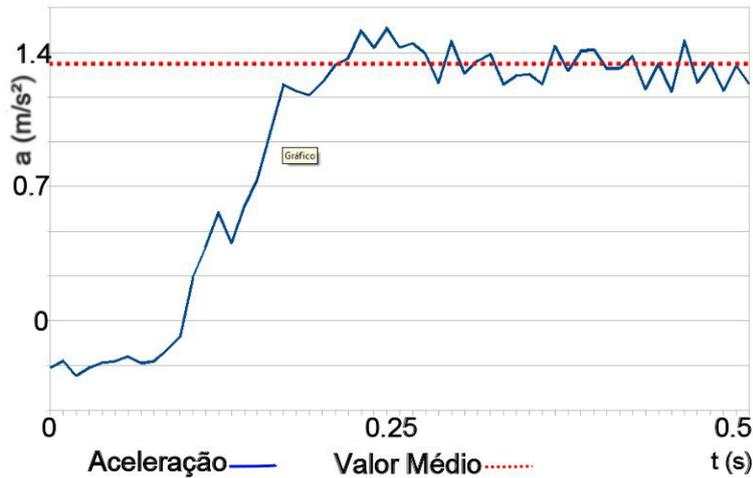


Figura 3.31: Aceleração do *iCar* puxado por um peso.

Aplicando a segunda lei de Newton ao sistema carrinho-massa, a aceleração do *iCar* deve ser (desprezando os atritos e inércias de rotação)

$$a = \frac{M_1}{M_1 + M}g \quad (3.6)$$

onde M_1 é a massa que traciona o fio, M é a massa do *iCar* e *tablet* juntos, e g é a aceleração da gravidade. No experimento realizado tinha-se $M_1 \approx M/6$, o que leva à previsão de que $a \approx 1,4 \text{ m/s}^2$, em bom acordo com o experimento.

Um erro muito comum cometido pelos alunos é tomar a tensão na corda como sendo igual ao peso de M_1 . No caso estudado isso leva à previsão de

que a aceleração do carrinho seria $a = (M_1/M)g \approx 1,6 \text{ m/s}^2$, um resultado bastante diverso do encontrado experimentalmente.

3.9 O *smartphone* na gaveta

Esse experimento foi apresentado como um desafio aos alunos (segundo ano do ensino médio). Trata-se de um *smartphone* dentro de uma gaveta que sofre uma “pancada” em uma de suas paredes laterais. Dependendo de como o *smartphone* está colocado dentro da gaveta (ver figura 3.32, partes 1 e 2), a pancada causará movimentos distintos. Na situação 1, quando o aparelho está encostado à parede que recebe o impacto, o movimento inicial do aparelho acompanha o da gaveta, mas logo a parede e o *smartphone* se separam, pois o atrito mesa-gaveta é maior que o gaveta-*smartphone*. Na situação 2, em que a parede não empurra diretamente o *smartphone*, este inicialmente se deslocará para o meio da gaveta durante o movimento. Posteriormente, o *smartphone* volta a aproximar-se da parede da frente. As medidas da aceleração do *smartphone* nos dois casos estão mostradas na figura 3.33.

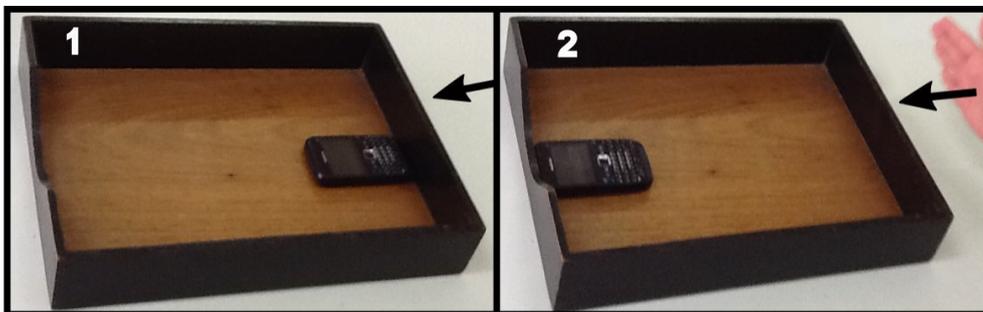


Figura 3.32: Imagens do experimento nas duas configurações iniciais. A seta indica a direção do impacto.

Na situação 1 a aceleração inicial chega a aproximadamente 20 m/s^2 e deve-se à força de contato entre a parede e o *smartphone*. A duração desse impulso é cerca de $0,05 \text{ s}$. Daí em diante a aceleração torna-se negativa, da ordem de -2 m/s^2 , refletindo o atrito entre a gaveta e o *smartphone* que desliza para a frente sobre ela. No caso 2, a aceleração inicial do *smartphone* fica em torno de $+2 \text{ m/s}^2$, e só pode ter origem na força de atrito, pois

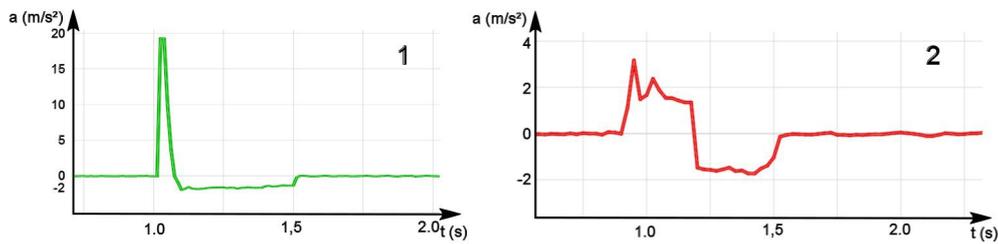


Figura 3.33: A aceleração do *smartphone* nas duas situações.

não há contato com as paredes. A aceleração mantém-se positiva por cerca de 0,3 s, e em seguida torna-se negativa, com valor da ordem de -2 m/s^2 . Novamente, como não há contato com as paredes da gaveta, o atrito é o único responsável por esta aceleração negativa. O movimento completo dura cerca de 0,6s. Podemos notar também, no gráfico 2, que há um curto pico na aceleração inicial do *smartphone*, que atinge aproximadamente 3 m/s^2 . Esse pico provavelmente está relacionado à transição do atrito estático para cinético entre o aparelho e a gaveta.

A análise e interpretação desses resultados é um problema complexo para alunos do ensino médio, principalmente na situação 2 em que a força de atrito toma duas direções distintas. Para compreender corretamente o que ocorre nesse caso, o aluno tem que levar em consideração que o sentido da força de atrito é contrário ao da velocidade relativa entre o *smartphone* e o fundo da gaveta. Logo após receber a pancada a gaveta move-se mais rapidamente que o aparelho (figura 3.34, esquerda) e a força de atrito é positiva. Mais à frente, como o atrito entre a mesa e a gaveta é muito maior que o atrito entre esta e o *smartphone*, a velocidade da gaveta torna-se menor que a do aparelho (fig.3.34, direita) e a força de atrito fica negativa.



Figura 3.34: As duas possibilidades para a velocidade relativa entre a gaveta e o *smartphone*. Esquerda: a gaveta é mais rápida que o *smartphone* e a força de atrito aponta para a frente. Direita: a gaveta é mais lenta que o *smartphone* e a força de atrito aponta para trás.

Em sala de aula, o que fizemos foi montar o aparato, gerar os gráficos e pedir que os alunos explicassem as diferenças entre as acelerações nos dois casos. As respostas deveriam vir na forma de textos confeccionados individualmente. Pudemos constatar que pouquíssimos alunos foram capazes de modelar satisfatoriamente esse fenômeno, apesar de aplicarem o diagrama de forças. O grande problema foi perceber que a velocidade relativa entre a gaveta e o *smartphone* mudava de sentido, o que alterava o sinal força de atrito. Após o diagnóstico das dificuldades dos alunos no trabalho, fizemos em sala de aula um vídeo do experimento e o reproduzimos em câmera lenta em um *datashow*. Assim, pudemos mostrar a inversão do sentido da velocidade relativa e da força de atrito. Essa intervenção melhorou o entendimento do problema pelos alunos.

Capítulo 4

O Magnetômetro

Muitos *smartphones* e *tablets* vêm equipados com um magnetômetro capaz de medir as componentes de um campo magnético em três eixos perpendiculares (X, Y, Z). Em cada direção podem ser medidos campos de até ± 2 mT e os resultados são normalmente dados em μT , o que indica que a resolução do sensor é, provavelmente, melhor que $1 \mu\text{T}$. Para se ter uma ideia do que é possível medir com esse magnetômetro, o campo magnético na superfície da Terra varia de 20 a $70 \mu\text{T}$, dependendo do local (no Brasil ele vai de 23 a $28 \mu\text{T}$) e imãs de porta de geladeira produzem campos da ordem de 1 mT. Os magnetos de terras raras podem gerar mais de 1 T e não devem ser aproximados do dispositivo pois podem danificá-lo.



Figura 4.1: Tela do aplicativo *MagnetMeter*. A direção do campo magnético é dada pela seta em 3D que é vista sob o ponteiro da bússola. O número na parte de baixo da janela é a intensidade do campo magnético em μT .

Há aplicativos que leem os dados do magnetômetro e apresentam os resultados de diferentes maneiras, desde uma simples “bússola” até as componentes B_x , B_y e B_z em formato numérico ou gráfico. Um exemplo é o *MagnetMeter* para iPhone/iPad, mostrado na figura 4.1.

4.1 Buscando o norte

Para introduzir o magnetômetro em atividades de sala de aula (numa turma do terceiro ano do ensino médio) desenvolvemos um experimento bem simples. Os alunos foram divididos em grupos e pedimos aos possuidores de *smartphones* com magnetômetros que baixassem o *MagnetMeter* ou aplicativo equivalente. A atividade consistia em encontrar a direção do norte magnético da Terra e indicá-la num mapa da escola que cada grupo recebera.

Embora simples, o experimento revelou alguns cuidados que devem ser tomados no uso dos magnetômetros de *smartphones*. Por exemplo, a capa de celulares e tablets frequentemente possui fechos magnéticos que interferem significativamente na medida de campos magnéticos fracos como o da Terra. Outros materiais ferromagnéticos nas vizinhanças do dispositivo também podem influenciar os resultados. Tudo isso foi observado nas primeiras tentativas dos alunos, que apresentaram orientações muito diferentes em seus mapas.

Para convencer os alunos de que a incongruência dos resultados dos diferentes grupos era causada pela presença de materiais magnéticos nas proximidades, argumentamos que o campo magnético da Terra é muito pequeno ($\approx 24\mu\text{T}$ no Rio de Janeiro) e por isso “qualquer pedaço de ferro” próximo ao *smartphone* poderia atrapalhar o experimento. Isso foi demonstrado tomando uma tesoura de metal e colocando-a perto do magnetômetro de um *tablet*; como vemos na figura 4.2 o campo magnético medido pelo sensor é da ordem de $400\mu\text{T}$, muito maior que o campo geomagnético (os alunos acompanharam esse teste via um *datashow*).

Os alunos então retiraram as capas dos celulares e fizeram a medição com o aparelho nas mãos, longe de “ferros”. O resultado foi muito melhor; as

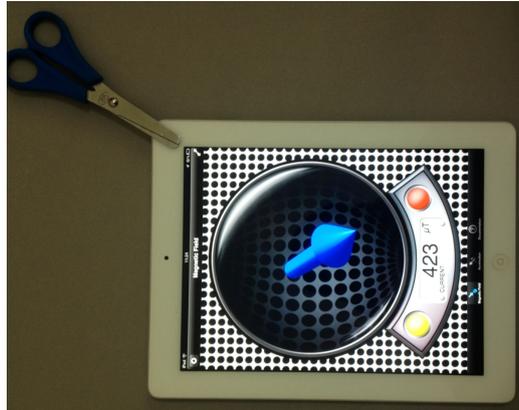


Figura 4.2: Tesoura sobre o magnetômetro de um *tablet*. Podemos ver que a intensidade do campo está por volta de $400\mu\text{T}$, muito maior que o campo magnético da Terra.

direções encontradas pelos diferentes grupos diferiam por graus ou segundos de grau.

4.2 Campo magnético e corrente elétrica

O magnetômetro pode ser utilizado no estudo do campo magnético produzido por uma corrente elétrica. Para isso, montamos em sala de aula um aparato simples. Uma bobina foi ligada em série a uma fonte de tensão, um potenciômetro e um amperímetro (multímetro). A corrente elétrica na bobina era medida pelo amperímetro e podia ser variada alterando-se a resistência do potenciômetro (um resistor de segurança impedia o curto-circuito). A bobina tinha cerca de 80 voltas de fio de cobre esmaltado. A fonte era de corrente contínua, com capacidade para 1A e 5V. O resistor de segurança tinha 10 ohms (10 W) e o potenciômetro suportava 10 W. O magnetômetro pertencia a um *tablet* conectado a um *datashow*. A montagem está mostrada na figura 4.2.

Pedimos a dois alunos que auxiliassem no experimento da seguinte maneira: um deles tomaria conta do potenciômetro e o outro leria a corrente medida pelo multímetro. Ambos decidiram variar a corrente em intervalos iguais de 0,05 A. Todos os alunos podiam acompanhar as medidas do mag-

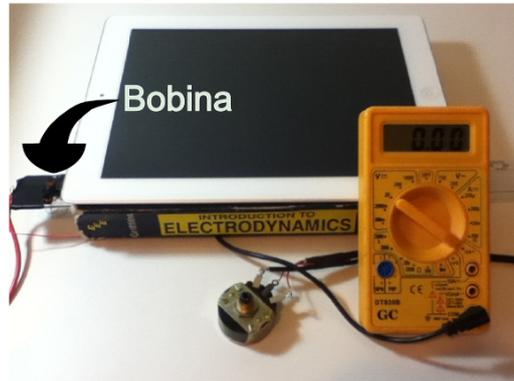


Figura 4.3: Montagem para medida do campo magnético de uma bobina em função da corrente.

netômetro através do *datashow*. Já no quarto ponto medido alguns alunos perceberam a dependência linear entre o campo e a corrente.

Após 10 pontos serem medidos, foi perguntado aos alunos quem anotara os valores indicados pelo magnetômetro. Ninguém havia feito isso. O professor, que previra a ocorrência e anotara os dados, advertiu os alunos (em tom de brincadeira) para a gravidade da falta e colocou no *datashow* um gráfico do campo magnético em função da corrente construído no decorrer do experimento (figura 4.4). O resultado demonstra claramente que o campo magnético aumenta linearmente com a corrente elétrica na bobina.

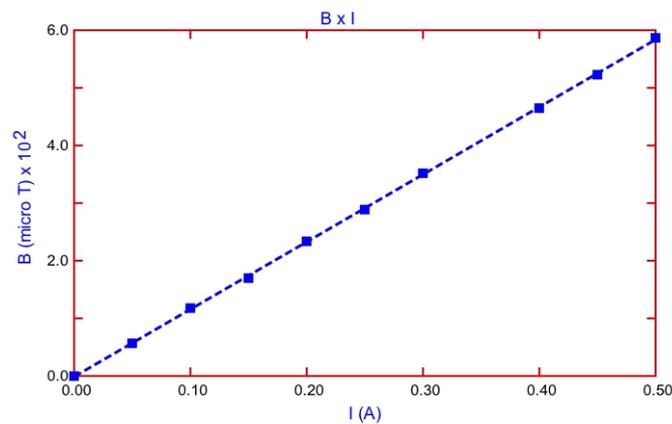


Figura 4.4: Campo magnético B em função da corrente elétrica I na bobina.

Uma extensão interessante do experimento consiste em variar o número de voltas da bobina, mantendo fixa a corrente. Por falta de tempo não foi possível explorar essa ideia em sala de aula.

4.3 O campo magnético em função da distância

4.3.1 Campo de um ímã

Qualquer pessoa que manipule um par de ímãs percebe que a interação entre os magnetos diminui rapidamente quando a separação entre eles aumenta. Isso significa que campo magnético diminui à medida que nos afastamos de um ímã. Não é trivial, entretanto, encontrar a expressão matemática que descreve essa redução. Como veremos a seguir, usando o magnetômetro de um *tablet* ou *smartphone* fica fácil estudar quantitativamente como o campo magnético varia com a distância ao ímã.

Para medir a distância entre o ímã e o magnetômetro, precisamos conhecer a posição desse sensor dentro do *tablet/smartphone*. Uma forma simples de localizar o magnetômetro é passar um pequeno objeto magnetizado sobre o aparelho, procurando o ponto onde o programa de medição do campo magnético registra o maior valor. O magnetômetro deve estar logo abaixo desse ponto. A figura 4.5 mostra onde foi encontrado o magnetômetro do iPad (utilizando uma tesoura magnetizada), a cerca de 1,8 cm de uma das bordas do aparelho.

O experimento que montamos para medir o campo magnético em função da distância utilizou um *tablet*, uma régua, um ímã e um livro. O ímã foi fixado com fita adesiva em uma das extremidades da régua, e a outra extremidade foi colocada entre as páginas do livro. O *tablet* foi posto sobre o livro, de modo que a distância entre o ímã e o magnetômetro podia ser variada deslizando a régua. Essa distância era medida somando-se à leitura da régua o intervalo de 1,8 cm (ver figura 4.5) entre o magnetômetro e a borda do iPad. A figura 4.6 mostra o resultado da montagem.

Antes do experimento nós “calibramos” o magnetômetro, para compensar o campo magnético terrestre e a influência de objetos magnéticos próximos.

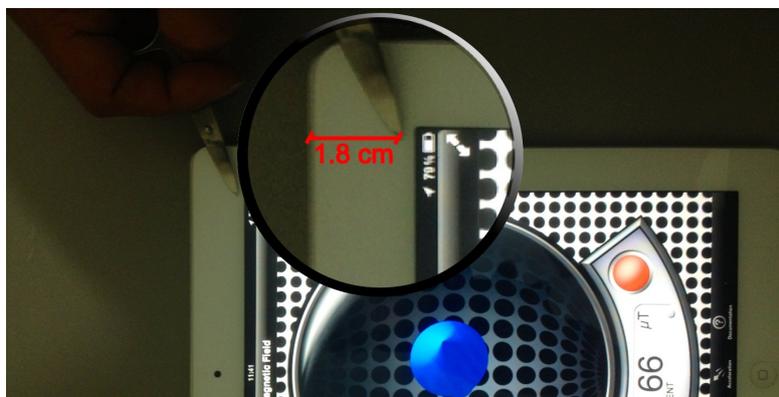


Figura 4.5: Uma tesoura magnetizada aponta o local onde se encontra o magnetômetro do iPad. Fazendo a tesoura “passear” pela superfície do aparelho, a localização do magnetômetro é dada pelo ponto de leitura máxima no dispositivo. No destaque vemos a distância entre uma das bordas do iPad e a posição do sensor.

Isso foi feito afastando ao máximo o ímã do magnetômetro e “zerando” as medições efetuadas pelo *tablet*. O *MagnetMeter* tem um botão com essa função: ao ativá-lo, o campo no ponto onde está o magnetômetro é subtraído das medidas posteriores.

O resultado de um conjunto de medidas do campo magnético B em função da distância x entre o ímã e o magnetômetro está mostrado na figura 4.7. A variação acentuada do campo com a distância pode ser vista claramente na figura. Os dados são muito bem descritos por uma lei de potência $B \propto x^{-n}$



Figura 4.6: Montagem do experimento. Na extremidade da régua podemos observar o ímã e na tela o valor da intensidade do campo B em μT .

com $n \approx 3$ (encontrado com um programa de ajuste por mínimos quadrados). Esse é o resultado esperado para o campo de um dipolo magnético, desde que o afastamento não altere o ângulo entre a posição do magnetômetro e o momento de dipolo.

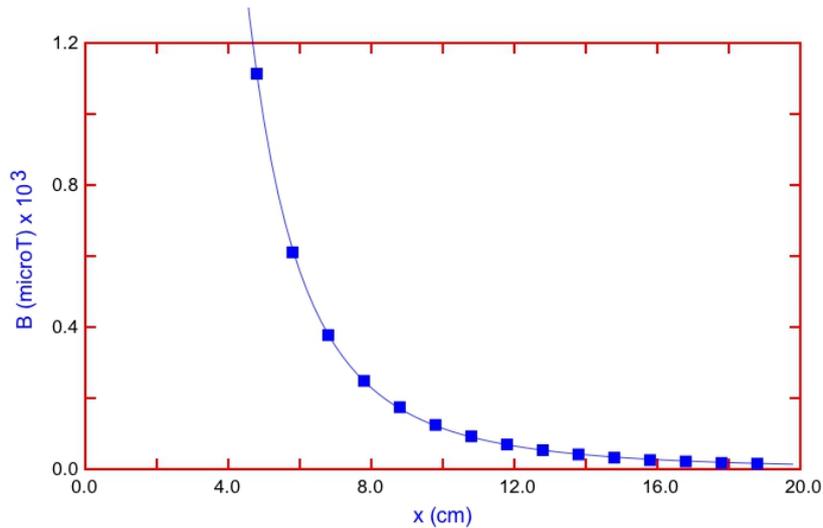


Figura 4.7: Intensidade do campo magnético de um ímã a diferentes distâncias. A linha representa o ajuste da lei de potência $B \propto x^{-n}$ aos dados. O melhor ajuste foi obtido com $n \approx 3$.

O experimento foi apresentado à turma como um desafio experimental, a ser feito em casa. A classe foi dividida em grupos, que deveriam medir as distâncias e intensidades de campo, fazer um gráfico desses dados e ajustar uma lei de potência aos resultados (um programa grátis para iPhone/iPad, o *DataAnalysis*, faz o ajuste facilmente). Os expoentes encontrados pelos alunos variaram de $n = -2$ a $n = -3$.

É interessante chamar a atenção dos alunos para o fato de que as medidas mostram que o campo magnético de um ímã não diminui com o inverso do quadrado da distância (r^{-2}), em contraste com o campo elétrico de uma carga pontual ou o campo gravitacional de uma partícula. A impossibilidade de se obter monopolos magnéticos (cargas magnéticas) dividindo um ímã ao meio também é um discussão que pode derivar desses resultados.

Uma extensão simples do experimento, que não realizamos por falta de

tempo, consiste em investigar a variação do campo magnético com a orientação do ímã, a uma distância fixa.

4.3.2 Campo de uma bobina

O campo magnético produzido por uma bobina é muito parecido com o de um ímã. Isso pode ser comprovado com um experimento semelhante ao anterior, em que trocamos o ímã por uma bobina pela qual passa uma corrente contínua. Um gráfico do campo magnético em função da distância à bobina está mostrado na figura 4.5. A curva é o resultado do ajuste de $B \propto x^{-n}$ aos dados, e novamente $n \approx 3$ foi encontrado.

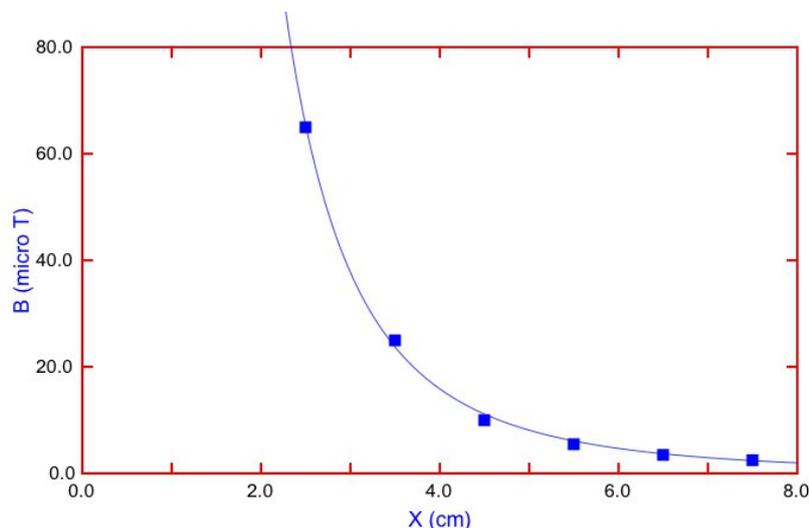


Figura 4.8: O campo magnético a diferentes distâncias de uma bobina. A linha representa o ajuste da lei de potência $B \propto x^{-n}$ aos dados. O melhor ajuste foi obtido com $n \approx 3$.

Em sala de aula, antes de realizar o experimento, discutimos com os alunos a semelhança entre um ímã e uma bobina. Argumentamos que uma forma de comprovar essa equivalência seria montar uma bobina com o menor raio possível e proceder como no experimento com o ímã. Para avaliar a aceitação desse tipo de abordagem, pedimos que os alunos votassem se a execução do experimento seria relevante ou não. O resultado foi quase unânime, dos 38 participantes, 36 foram favoráveis à realização do experimento.

Capítulo 5

Macrofotografia com uma Gota de Água

Neste capítulo apresentaremos uma maneira simples de obter macrofotografias (fotografias muito ampliadas) utilizando a câmera encontrada na maioria dos *smartphones* e *tablets*. A lente dessas câmeras tem diâmetro da ordem de 2-3 milímetros, e é pequena o suficiente para ser coberta por uma gota d'água. Como veremos, essa gota d'água transforma a câmera num microscópio portátil com até 150× de aumento, com o qual podemos tirar macrofotografias de interesse para o ensino de física, biologia e ciências na educação básica.

5.1 O microscópio de gota d'água

Para transformar a câmera de um *tablet* ou celular em um microscópio funcional (e com isso obter macrofotografias), basta acomodar uma gota de água sobre a lâmina de vidro que protege a lente da câmera. Com isso, efetivamente acoplamos uma segunda lente convergente cuja dioptria vai de 300 a 1000 m⁻¹ ($f \sim 1 - 3$ mm; obtivemos esses números incidindo um feixe laser sobre gotas acomodadas em uma lamínula de microscópio e medindo as distâncias focais com um paquímetro). Devido à grande ampliação, o campo visual da câmera diminui consideravelmente, o que exige maior proximidade do objeto a ser fotografado para que se possa obter uma imagem nítida.

A figura 5.1 é um exemplo do que pode ser feito com essa técnica. Ela mostra a tela de um *tablet* onde se vê, com grande ampliação, a ponta de uma caneta. Também podem ser observadas, na parte lateral do aparelho, a lente coberta pela gota d'água e a caneta que está sendo macrofotografada (note a proximidade da caneta à gota, cerca de 3 mm).



Figura 5.1: Macrofotografia da ponta de uma caneta na tela um *tablet*. A caneta e a lente da câmera, coberta pela gota d'água, podem ser vistas no canto superior direito da figura.

Para aplicar a gota sobre o dispositivo, basta molhar um dedo e movê-lo cuidadosamente (para que a gota não caia) até a lâmina protetora da lente. Ao encostar a porção d'água que está em seu dedo na lâmina, as forças de adesão e coesão darão conta de acomodá-la (ver figura 5.2).



Figura 5.2: Fotografia de uma gota sendo acomodada à lâmina protetora da câmera de um *tablet* .

A câmera de *tablets* e celulares geralmente está na parte de trás do aparelho, oposta à tela. Em muitos modelos é comum encontrar uma segunda

câmera localizada na parte da frente do dispositivo (essa é a câmera usada na figura 5.1). A gota pode ser acoplada a qualquer uma das duas lentes, mas vale a pena consultar o manual do aparelho, pois as câmeras frontais normalmente têm resolução menor. Devido à diminuição do campo visual da câmera, frequentemente a luminosidade ambiente não é suficiente para que se obtenha boas fotos. Nesse caso uma lanterna pode ser usada para iluminar o objeto de estudo.

5.2 Aplicações ao ensino de física

A técnica descrita acima foi utilizada em aulas de física de turmas do primeiro ano do ensino médio. Dois temas foram explorados: lentes e birrefringência.

Na primeira aplicação, a técnica da gota foi apresentada aos educandos como motivação para o estudo de lentes. Pedimos que os alunos usassem o método para obter macrofotografias de 3 objetos cuja observação ampliada eles julgassem interessante. Recebemos imagens de diversas espécies de animais, vegetais e objetos de uso cotidiano; alguns exemplos estão mostrados na figura 5.3.

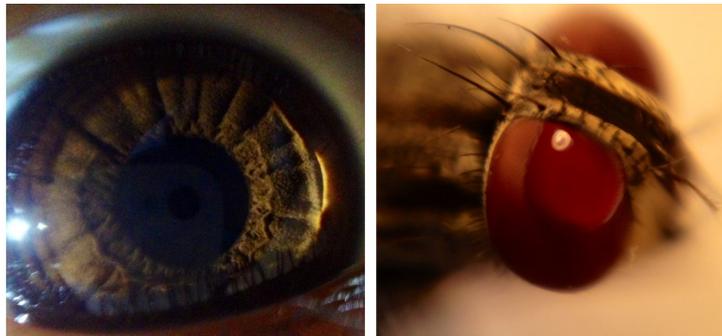


Figura 5.3: À esquerda, fotografia de um olho humano; à direita, o olho de uma mosca doméstica.

A segunda aplicação abordava a formação de cores. Nosso objetivo foi estudar as cores em uma tela (LCD) de um *tablet* pertencente a um dos estudantes do nono ano do ensino fundamental. Na figura 5.4 temos a foto da tela inteira do *tablet*, que mostrava um padrão de cores. Em volta desta,

podemos observar as imagens ampliadas de cada uma das regiões indicadas. Vemos que a imagem na tela é composta por pequenos elementos (os “pixels”) formados por 3 células distintas que deixam passar, respectivamente, vermelho, verde e azul, as chamadas cores primárias. Controlando a intensidade da luz de cada uma dessas células o LCD forma um ponto que é percebido com uma cor que não coincide necessariamente com uma das primárias. Como cada pixel tem por volta de 0,096 mm, não somos capazes de distingui-los a olho nu, o que nos dá a impressão de uma imagem contínua. Na imagem da figura 5.4 podemos ver que o amarelo se forma quando os pixels deixam passar o verde e o vermelho, bloqueando a passagem do azul. Todas as outras cores são formadas por este mecanismo: basta ajustar a intensidade de cada uma das cores primárias.

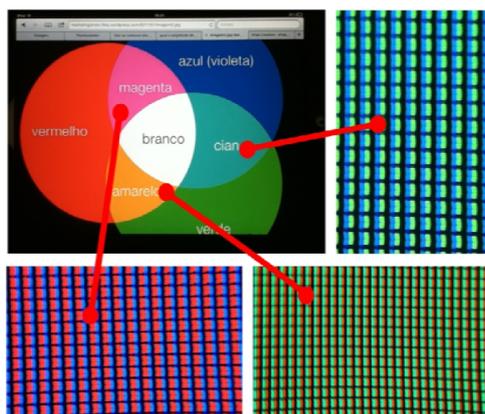


Figura 5.4: Padrão de cores na tela de um *tablet*. As imagens ampliadas mostram como essas cores são formadas em cada pixel.

É importante notar que só podemos perceber essas características com uma boa ampliação da imagem. Os grãos têm em média um diâmetro de 0,1 mm e não somos capazes de observar a luz que os atravessa a olho nu.

5.3 Aplicações ao ensino de ciências

No ensino fundamental, com alunos do 6º ao 9º ano, aplicamos a macrofotografia ao estudo de solos e de partes do corpo humano. Temas de botânica

e entomologia também foram abordados. No estudo dos solos, utilizamos a técnica para que os alunos do 7º ano pudessem perceber as diferentes características que minerais podem apresentar. Por exemplo, foram feitas comparações entre pedras magmáticas e calcárias como forma de motivar a discussão da origem de cada uma delas. Já com o corpo humano, partes da língua foram fotografadas a fim de se estudar as formas das papilas gustativas. Minúsculas ranhuras e imperfeições de unhas e dedos também foram analisadas, revelando inclusive a existência de pelos entre as papilas digitais. Além disso, pôde-se discutir a necessidade da manutenção da higiene pessoal, uma vez que diversas partículas de poeira foram observadas.

No estudo de botânica e entomologia, discutimos com alguns estudantes diversas características morfológicas de vegetais e insetos¹. Na figura 5.5, podemos ver uma fotografia ampliada de uma folha. Nesta imagem, o ponto destacado é uma estrutura celular macroscópica conhecida como estômato. Também na figura 5.5 temos a fotografia de um percevejo fêmea, com destaque de parte dos aparelhos respiratório e reprodutivo da espécie.



Figura 5.5: À esquerda, temos a imagem de uma folha de uma planta do gênero *Malvaviscus*, família *Malvaceae*, a mesma do algodoeiro, onde destacamos um dos estômatos, aberturas destinadas às trocas gasosas da fotossíntese-respiração-transpiração. Já o inseto à direita é um percevejo fêmea, da Ordem Hemiptera, família Pentatomidae. Nos destaques da foto podemos ver os espiráculos, aberturas respiratórias em cada segmento do abdome, e no final do abdome estão as valvas do ovipositor, parte do aparelho reprodutivo externo.

¹Agradecemos ao professor de biologia Leonardo Rocha (IFRJ, campus São Gonçalo) na coleta dos espécimens e discussão de suas características.

5.4 Medidas com macrofotografias

Aplicamos a macrofotografia também ao estudo de ordens de grandeza. Medimos, por exemplo, a espessura de um fio de cabelo. O procedimento foi o seguinte: prendemos o fio de cabelo sobre o nônio de um paquímetro, utilizando fita adesiva, e em seguida tiramos uma macrofotografia da montagem, conforme pode-se ver na figura 5.6. Depois, com o auxílio de um programa de edição de imagens, medimos o comprimento da escala dada pelo nônio (um milímetro) e o diâmetro do fio de cabelo, contando os *pixels*. Com isso obtivemos que a espessura do fio de cabelo era de 0,09 mm.

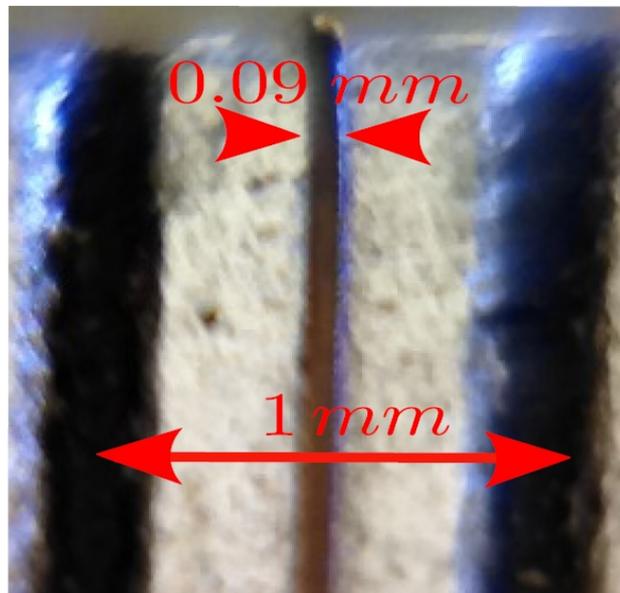


Figura 5.6: Imagem ampliada de um fio de cabelo preso ao nônio de um paquímetro.

Capítulo 6

Física do Som com o *Smartphone*

A ideia de usar o sistema de som de computadores para estudar a física das ondas sonoras não é nova, e muitos experimentos com esse objetivo foram desenvolvidos para *desktops* e *laptops* (ver [33–37] por exemplo). *Smartphones* e *tablets* têm sistemas para processamento de áudio quase tão poderosos quanto as placas de som dos computadores maiores, com a vantagem que a portabilidade desses dispositivos torna muito mais simples implementar experimentos didáticos. Além disso, assim como nos computadores tradicionais, *tablets* e *smartphones* também têm programas que fazem gravações de áudio, mostram o perfil das ondas sonoras e realizam análises de Fourier. Um desses programas, o *Oscilloscope*, permite gravar até 2 s de dados de som e mostra a forma de onda com resolução de 0,1 ms. Outro programa útil é o *Audio Kit*, que pode gravar a onda sonora e calcular seu espectro em tempo real.

Os experimentos que apresentaremos foram realizados em turmas do terceiro ano do ensino médio e da EJA (Educação de Jovens e Adultos) da rede estadual do Rio de Janeiro.

6.1 Frequência e timbre

A primeira experiência feita em sala de aula foi a gravação de um assovio. Um pequeno trecho da forma de onda registrada está mostrado na figura 6.1

(à direita), e percebe-se que é muito semelhante a uma senoide. O período T da onda pode ser medido notando-se que cada divisão horizontal da tela corresponde a $310 \mu\text{s}$. O resultado é $T \approx 1,44 \text{ ms}$, o que corresponde a uma frequência $f = 1/T \approx 690 \text{ Hz}$. Uma forma mais direta de medir a frequência é pelo espectro de Fourier do sinal, calculado pelo mesmo programa (*Audio Kit*) que fez a gravação e exibiu a forma de onda. A figura 6.1 (à direita) mostra o espectro de frequências, que tem um pico acentuado em 666 Hz , próximo ao valor estimado a partir do período.

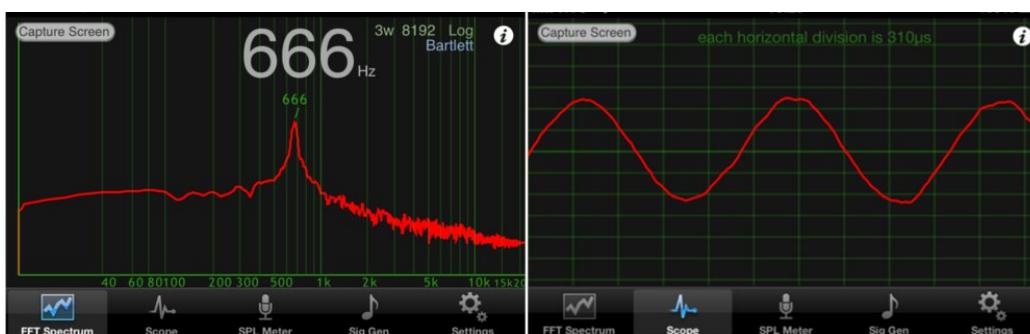


Figura 6.1: O som de um assovio. À direita está a forma da onda sonora em função do tempo, durante um intervalo de cerca de $3,5 \text{ ms}$. À esquerda está o espectro das frequências presentes no assovio.

Também levamos uma guitarra elétrica para a sala de aula. A mesma nota musical do assovio, quando tocada na guitarra, apresenta uma forma de onda com características bem distintas, como se vê na figura 6.2 (direita). Embora o sinal se repita aproximadamente a cada $1,5 \text{ ms}$, como no caso do assovio, a onda não se assemelha a uma senoide e apresenta outras oscilações de períodos menores. As frequências correspondentes a essas oscilações podem ser identificadas como picos no espectro sonoro mostrado na figura 6.2 (esquerda).

Argumentamos em sala de aula que os dois sons gravados (do assovio e da guitarra) têm a mesma frequência básica, ou frequência “fundamental”, o que significa que são a mesma nota musical. Entretanto eles apresentam formas de onda muito distintas, e é por isso que somos capazes de reconhecer a diferença entre o som de um assovio e de uma guitarra, mesmo quando notas idênticas são emitidas. Apresentamos assim o conceito de timbre. Ao



Figura 6.2: O som de uma guitarra elétrica. À direita está a forma da onda sonora em função do tempo, durante um intervalo de cerca de 3,5 ms. À esquerda está o espectro de frequências do sinal gravado.

final da aula os alunos gravaram e compararam suas vozes.

Como teste fizemos a seguinte pergunta: Imagine que duas pessoas conhecidas por você, sentadas no fundo da sala de aula e próximas uma da outra, assovia uma canção, uma após a outra. Você seria capaz de identificá-las sem olhar para trás? Dos 42 alunos, 21 disseram que não, justificando que não há diferença de timbre entre dois assovios, 13 também responderam que não, mas sem uma justificativa adequada, e 8 responderam que sim, mas não apresentaram uma explicação coerente.

6.2 A velocidade do som

A velocidade do som pode ser medida com boa precisão num experimento que utiliza apenas um *smartphone* e um tubo. O experimento é extremamente simples: tomamos um tubo longo, de pelo pelo menos 1 m de comprimento e aberto nas extremidades, e batemos com a mão numa de suas pontas. O *smartphone* é colocado próximo à extremidade do tubo que recebe a batida (ou à outra, tanto faz), gravando o som que sai por ali. O pulso sonoro gerado pela batida percorre o tubo e, ao chegar ao outro lado, é parcialmente transmitido para fora do tubo e parcialmente refletido. O pulso refletido – um “eco” – atravessa de volta o tubo e, por sua vez, também sofre transmissão e reflexão ao final do caminho. O processo se repete até que toda a energia sonora escape pelas extremidades. A figura 6.3 mostra a gravação do som

numa das pontas do tubo, feita com um *smartphone* rodando o *Oscilloscope*. Os pulsos que se sucedem após o primeiro são as ondas transmitidas para fora do tubo depois de múltiplas reflexões internas.



Figura 6.3: O som da batida com a mão na extremidade de um tubo, gravado por um *smartphone*. Os pulsos sucessivos ao primeiro são “ecos” que saem do tubo após múltiplas reflexões nas extremidades abertas.

No experimento realizado na escola usamos um tubo de aço de 3,26 m de comprimento. Até ser promovido a material didático, este era apenas parte do bicicletário do colégio, como se vê na figura 6.4.



Figura 6.4: Tubo usado na medida da velocidade do som: o bicicletário da escola.

A figura 6.5 mostra dois ecos sucessivos de uma batida nesse tubo, gravados pelo *smartphone*. O intervalo entre os dois sinais é o tempo necessário para o som ir e voltar pelo tubo. Com a escala de tempo mostrada pelo programa *Oscilloscope* podemos medir esse tempo; o resultado, indicado na figura 6.5, é $t = 19,2$ s. A distância percorrida pelo som durante esse intervalo é duas vezes o comprimento do tubo, $d = 2 \times 3,26$ m = 6,52 m, já que o pulso sonoro vai e volta. Com isso, a velocidade do som é dada por

$$v_{som} = d/t = 340 \text{ m/s.}$$



Figura 6.5: Dois sinais sucessivos gravados numa extremidade do tubo e o tempo entre eles.

É importante ressaltar a simplicidade conceitual desse método de medida da velocidade do som [36, 37], que usa apenas a relação cinemática $v_{som} = \text{distância}/\text{tempo}$. Em contraste, os experimentos usuais de medida da velocidade do som são baseados na relação $v_{som} = \lambda f$, que exige do aluno uma compreensão mais avançada dos fenômenos acústicos em termos de física ondulatória.

6.3 Mudança de fase na reflexão

Podemos notar que os dois sinais na figura 6.5 têm praticamente a mesma forma, apenas suas intensidades são diferentes. À primeira vista, isso parece

contradizer o fato da reflexão na extremidade de um tubo aberto inverter a fase da onda sonora (mais exatamente, da onda de pressão, ver [34,35]). Por essa regra, o segundo sinal deveria estar invertido em relação ao primeiro. Entretanto, o pulso sonoro sofre duas reflexões em seu caminho de ida e volta pelo tubo – a primeira reflexão dá início à ida e a segunda, à volta. As duas trocas de fase se cancelam e o resultado é que o segundo pulso não aparece invertido em relação ao primeiro.

Discutimos com os alunos a troca de fase das ondas na reflexão e em seguida perguntamos: o que acontece com a fase se uma extremidade do tubo for obstruída? A resposta quase unânime foi “não sei, vamos experimentar”. Para encontrar a resposta, a extremidade do tubo oposta ao *smartphone* foi tapada e o experimento anterior foi repetido. O resultado pode ser observado na figura 6.6: os pulsos que saem pela extremidade aberta sofrem inversões sucessivas. Agora a troca de fase ocorre apenas na primeira reflexão, na ponta aberta; a reflexão seguinte, na extremidade fechada, não inverte o sinal sonoro. O resultado é que cada ida e volta pelo tubo inverte a onda que sai pela extremidade aberta.



Figura 6.6: Ecos sucessivos no tubo com uma extremidade fechada.

6.4 Ondas estacionárias em tubos sonoros

Ondas estacionárias são um tema central da física ondulatória. No caso do som, ondas em “tubos sonoros” têm especial importância e são geralmente abordadas em cursos introdutórios de física. Como veremos, com um *tablet* ou *smartphone* e um microfone é possível mapear as ondas estacionárias em um tubo, obtendo uma representação visual muito instrutiva do comportamento dessas vibrações sonoras [34, 35]. O material usado no experimento está mostrado na figura 6.7: um *tablet*, um conjunto fone de ouvido/microfone e um copo cilíndrico (o tubo sonoro).



Figura 6.7: Material usado no mapeamento das ondas estacionárias num tubo sonoro: um *tablet* conectado a um fone de ouvido/microfone e um copo (o tubo sonoro).

Para realizar o experimento, utilizamos o programa *Audio Kit* no modo de análise de Fourier e colocamos o microfone dentro do copo. Os ruídos externos são filtrados pelo tubo sonoro, que ressoa apenas próximo às frequências das ondas estacionárias. Supondo que a onda estacionária de menor frequência (o “modo fundamental”) é a mais intensa dentro do tubo, encontramos que a frequência desse modo é $f_0 = 710$ Hz, como se vê na figura- 6.8.

Em seguida usamos o mesmo aplicativo (*Audio Kit*) em um *smartphone* para gerar um sinal sonoro com 710 Hz e pedimos aos alunos que fizessem o microfone percorrer o interior do tubo (com velocidade a mais uniforme



Figura 6.8: Imagem de uma tela do aplicativo em funcionamento, mostrando o pico de frequência.

possível), gravando o perfil da onda estacionária produzida lá dentro. O resultado está na figura 6.9. Pode-se observar que a intensidade do som é máxima no fundo do copo, o ponto de partida do microfone, e tende a zero na borda.

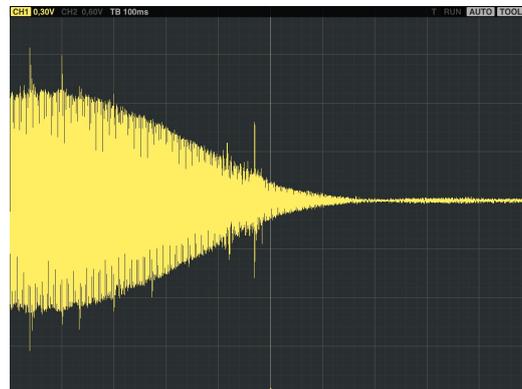


Figura 6.9: Perfil de onda do modo fundamental no interior do copo. A amplitude da onda de pressão é máxima no fundo do copo (à esquerda, no gráfico). Na borda do copo a amplitude da onda vai a zero.

Esse resultado mostra que apenas $1/4$ do comprimento de onda do modo fundamental está dentro do tubo. Como a parte interna do copo tem comprimento $L = 0,12$ m, o comprimento de onda do modo fundamental é $\lambda_0 = 4L = 0,48$ m. Com esse valor podemos calcular a velocidade do som, $v_{som} = \lambda_0 f_0 = 341$ m/s.

Em seguida discutimos as condições de contorno nas extremidades aberta e fechada do tubo, e como deveriam ser as ondas estacionárias para frequências maiores que a fundamental. Argumentamos que no interior tubo devemos ter apenas ondas cujos comprimentos de onda obedeçam à relação

$$n\lambda/2 + \lambda/4 = L, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

ou

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

As frequências dessas ondas são dadas por

$$f = v_{som}/\lambda = (2n + 1)v_{som}/(4L) = (2n + 1)f_0, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

ou seja, são múltiplos ímpares da frequência fundamental f_0 .

Ajustando a frequência do sinal sonoro para algum desses valores podemos mapear a forma das ondas estacionárias correspondentes. A figura 6.10 mostra o resultado para os dois modos seguintes ao fundamental: $n = 1$, com $f = 3f_0 = 2130$ Hz, e $n = 2$, com $f = 5f_0 = 3550$ Hz .

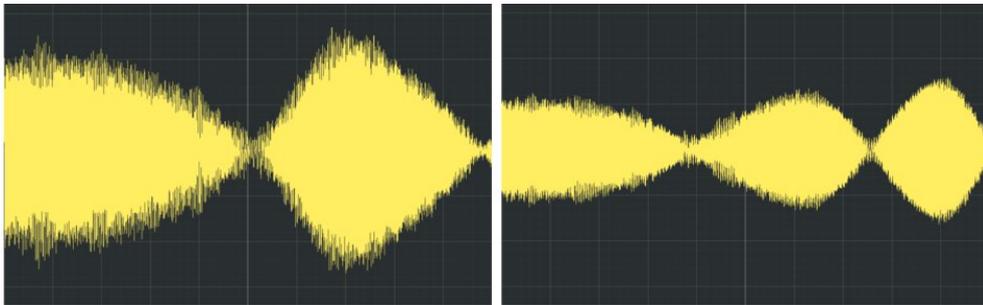


Figura 6.10: Ondas estacionárias no copo, com $f = 3f_0$ (esquerda) e $f = 5f_0$ (direita).

Capítulo 7

Conclusões

A experimentação tem papel fundamental no processo de ensino e aprendizagem da Física. Sua importância vai muito além do sugerido por um empirismo ingênuo, mas muito difundido, segundo o qual a fonte de todo conhecimento científico seria a observação da natureza [6]. Na aprendizagem da Física o experimento atua como mediador essencial entre o mundo real e as ideias e conceitos que os alunos tentam construir (ou substituir) em seus estudos.

A dificuldade em montar e realizar muitos dos experimentos considerados importantes para o ensino da Física faz com que as atividades nos laboratórios didáticos frequentemente assumam a forma de processos rigidamente organizados, centrados na coleta de dados e com pouco ou nenhum tempo dedicado à discussão dos conceitos e princípios físicos envolvidos. Isso não apenas diminui a eficácia pedagógica desses laboratórios; o tempo excessivo gasto em ações repetitivas e pouco inspiradoras como a coleta e sistematização dos dados contribui para que boa parte dos alunos percam o interesse pelas atividades práticas, terminando por considerá-las uma perda de tempo [1].

Neste trabalho vimos que *tablets* e *smartphones* podem ajudar a reverter esse quadro, viabilizando o desenvolvimento de experimentos didáticos em que a coleta e apresentação dos dados é realizada com extrema rapidez e simplicidade, eliminando a repetição maçante de medidas individuais e abrindo

espaço para a discussão e interpretação dos resultados encontrados. Os laboratórios baseados em computador já implementaram essa perspectiva com sucesso, mas, como ficou claro ao longo deste trabalho, *tablets* e *smartphones* são ainda mais atraentes que os computadores convencionais, devido à sua alta mobilidade, grande quantidade de sensores facilmente acessíveis e difusão entre os jovens.

Nós desenvolvemos e aplicamos em sala de aula vários experimentos de física que tinham como peça central um *tablet* ou *smartphone*. A versatilidade desses aparelhos permitiu que diversas áreas da física fossem abordadas, da mecânica e eletromagnetismo até a física ondulatória. As atividades tiveram resultados muito interessantes, não apenas do ponto de vista da qualidade dos dados experimentais, mas principalmente no que diz respeito à resposta positiva dada pelo alunado às práticas realizadas e às discussões que acompanharam muitas delas. A possibilidade do aluno utilizar seu próprio aparelho celular em experimentos de física abriu muitas possibilidades de atuação, inclusive fora da escola, aproximando as atividades cotidianas dos estudantes do conteúdo tratado em sala de aula.

A eficiência e facilidade de uso dos *tablets* e *smartphones* em experimentos didáticos ficou evidente nos exemplos discutidos no trabalho. A aceleração de sistemas mecânicos foi estudada em uma variedade de situações de interesse para o ensino médio, através de atividades montadas e realizadas em poucos minutos. É interessante notar que, embora seja uma grandeza fundamental para o estudo da mecânica, a aceleração raramente é medida diretamente em laboratórios didáticos convencionais (ou mesmo nos baseados em computador), pois acelerômetros costumavam ser sensores caros e difíceis de operar. Mais ainda, com simples gravações feitas com o microfone de um celular pudemos explorar os conceitos de frequência e timbre de uma nota musical, medimos a velocidade do som, e chegamos a mapear as ondas estacionárias dentro de tubos. Na óptica, vimos como uma gota d'água, que é aplicada em segundos sobre a câmera de um *tablet* ou *smartphone*, pode gerar imagens lindas e surpreendentes de objetos e organismos minúsculos, além de motivar o estudo de refração e lentes. Mesmo experimentos que demandam mais preparação foram realizados muito rapidamente. Por exemplo, a relação en-

tre a corrente elétrica e a intensidade do campo magnético foi explorada em uma atividade cuja duração não ultrapassou 10 minutos (entre montagem, coleta de dados e visualização dos resultados), deixando bastante tempo para análises e discussões.

É claro que os experimentos descritos nesta dissertação não esgotam o que pode ser realizado com os *tablets* e *smartphones*. Aliás, sequer esgotaram o que fizemos com esses aparelhos! Não mencionamos, por exemplo, experimentos com o giroscópio, pois nem todos os *tablets* e *smartphones* (principalmente os mais antigos) possuem esse sensor. O giroscópio mede a velocidade angular (em rad/s) ao longo de três eixos perpendiculares e, nas atividades que realizamos com ele, mostrou ser muito útil para aplicações à mecânica. Um dos experimentos revisitou a conhecida demonstração da cadeira giratória, na qual senta um aluno que segura um par de alavancas – ao abrir e fechar os braços o aluno modifica a velocidade de rotação da cadeira. Com um *tablet* colocado sobre o colo do aluno pudemos medir as velocidades angulares, transformando uma demonstração qualitativa num experimento passível de análise quantitativa.



Figura 7.1: Modelo da ponte de Tacoma. No centro podemos ver a caixa do *tablet*, no canto inferior esquerdo está o ventilador.

Em outro projeto utilizando o giroscópio investigamos o famoso colapso da ponte de Tacoma, erroneamente apontado em muitos livros e aulas de física como um exemplo de ressonância. Nesse experimento construímos nossa “ponte de Tacoma” prendendo a caixa de um *tablet*, com o aparelho dentro, a quatro molas afixadas em carteiras escolares. Em seguida ligamos um ven-

tilador apontado para a montagem, como mostrado na figura 7.1. Em pouco tempo a caixa começa a oscilar, com uma amplitude que aumenta rapidamente até atingir um valor tão grande que, numa estrutura real, causaria o colapso. A figura 7.2 mostra o gráfico da velocidade angular da ponte em função do tempo, registrado pelo giroscópio. O aumento drástico da oscilação ocorre apesar do vento produzido pelo ventilador não possuir nenhuma frequência característica semelhante à frequência do movimento (torsional) da ponte, ou seja, não se trata de um fenômeno de ressonância.

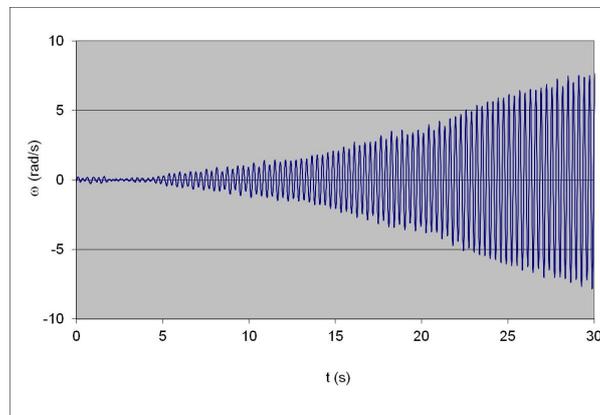


Figura 7.2: Velocidade angular do modelo da ponte de Tacoma. Apesar da semelhança com uma ressonância, o vento produzido pelo ventilador não têm frequências parecidas com a frequência da oscilação.

Ainda há muito a ser explorado sobre o uso de *tablets* e *smartphones* no ensino de física, mas o que já foi feito parece mostrar que esses aparelhos mudarão profundamente a maneira como atividades práticas são realizadas nas escolas. Esperamos que esta dissertação tenha dado uma contribuição significativa nesse sentido.

*Não mais querer, não mais apreciar e não mais criar:
 Oh que este grande cansaço permaneça longe de mim!
 Também no conhecimento sinto apenas o prazer do gerar
 e do devir da minha vontade;
 e se há inocência no meu conhecimento,
 isso acontece porque nele existe a vontade de gerar.*
 (Friedrich Nietzsche, Ecce Homo, tradução de Artur Mourão)

Apêndice A

Experimentos com o Acelerômetro de *Tablets* e *Smartphones*

A.1 O acelerômetro e sua leitura

O típico acelerômetro de um *tablet* ou *smartphone* é capaz de medir acelerações no intervalo $\pm 2g$ (g é a aceleração da gravidade), em relação a um referencial inercial. A resolução pode chegar a $0,002g$, mas na prática é limitada pelo ruído associado a vibrações mecânicas do aparelho. O sensor mede as componentes da aceleração em três eixos perpendiculares X, Y e Z; no iPad e iPhone esses eixos estão dispostos como na figura A.1.

O acelerômetro não mede propriamente a aceleração \vec{a} , mas a grandeza

$$\vec{a}' = \vec{g} - \vec{a}, \quad (\text{A.1})$$

onde \vec{g} é a aceleração da gravidade. Por exemplo, o acelerômetro de um *smartphone* colocado sobre uma mesa com a tela para cima indicará

$$a'_x = a'_y = 0, \quad a'_z = -9,8 \text{ m/s}^2.$$

Em queda livre (sem rotação) ele registrará $a'_x = a'_y = a'_z = 0$.

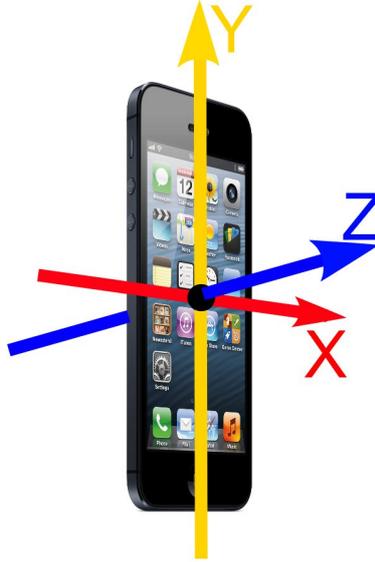


Figura A.1: Orientação dos eixos que definem as componentes da aceleração de um iPad ou iPhone

Existem vários programas leem as medidas do acelerômetro. Dois exemplos para sistemas da Apple são o *Acceleration* (Indiana University) e o *Sparkvue* (Pasco), ambos desenvolvidos para fins educacionais. Os dois programas estão disponíveis gratuitamente na “loja virtual” da Apple, são fáceis de usar, fazem gráficos da aceleração em tempo real e permitem enviar os dados gravados por *email*. Além de mostrar as medidas do acelerômetro, o *Acceleration* também calcula (por integração) a velocidade e posição do aparelho, possibilitando inúmeras aplicações didáticas. A tela inicial do *Acceleration* está mostrada na figura A.2. O botão “Start” começa a gravação dos dados, a barra de deslizamento “Samples/second” é usada para determinar quantos dados por segundo serão gravados, as barras X, Y e Z indicam a aceleração em cada um dos eixos (em unidades de g), a barra “Time” permite exibir as medidas de instantes anteriores, o botão *email* envia os dados para o endereço eletrônico desejado, e o botão “Calibrate” zera a aceleração nos três eixos ao ser pressionado, eliminando o efeito da aceleração da gravidade. Os botões X, Y, Z levam a outras janelas, que mostram o gráfico da acelera-

ção em função do tempo para cada um dos eixos. Nessas janelas existem mais três botões, que permitem escolher gráficos da aceleração, velocidade e posição (figura A.3).



Figura A.2: Tela inicial do programa *Acceleration*.



Figura A.3: Tela de gráficos do *Acceleration*, mostrando a aceleração, velocidade e posição em uma queda livre.

O significado da calibração deve ser discutido com cuidado. Ao se pressionar o botão “Calibrate”, o programa registra a aceleração em cada eixo nesse instante e passa a subtraí-la dos resultados subsequentes (por isso dizemos que o acelerômetro é “zerado”). Normalmente o *smartphone* ou *tablet* não estará acelerado no momento da calibração, de modo que apenas a aceleração da gravidade é subtraída. Isso significa que daí em diante o programa

apresentará a grandeza

$$\vec{a}'' = \vec{a}' - \vec{g} = (\vec{g} - \vec{a}) - \vec{g} = -\vec{a}. \quad (\text{A.2})$$

A menos do sinal, essa é a aceleração do aparelho (o sinal pode ser ignorado imaginando-se que os eixos da figura A.1 são invertidos).

É importante notar que a equação $\vec{a}'' = -\vec{a}$ só vale se o aparelho não estiver em rotação. Se a orientação dos eixos mudar com o tempo, o que ficará registrado será, componente a componente,

$$\begin{aligned} a_x'' &= g_x - a_x - g_x^0, \\ a_y'' &= g_y - a_y - g_y^0, \\ a_z'' &= g_z - a_z - g_z^0, \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

onde $g_{x,y,z}^0$ são as componentes da aceleração da gravidade nas direções em que os eixos do aparelho apontavam no instante da calibração. Como essas direções estão mudando, $g_{x,y,z}^0 \neq g_{x,y,z}$ e não há cancelamento entre esses valores. Assim, quando o movimento do acelerômetro envolve rotações, a “calibração” pode mais atrapalhar que ajudar.

A.2 Queda livre

O experimento mais simples que pode ser feito com o acelerômetro é, provavelmente, a “queda livre”. Para realizá-lo em sala de aula basta subir em uma cadeira (ou na mesa do professor), iniciar a gravação dos dados do acelerômetro e deixar o *tablet/smartphone* cair, não sem antes pedir que um par de alunos estique um pano (uma camisa serve) para aparar o dispositivo sem danificá-lo. A figura A.4 mostra a aceleração medida em um desses experimentos. Note que o programa utilizado foi o *Acceleration* e que a aceleração é dada em unidades de g . Pode-se ver que a aceleração do *tablet/smartphone* manteve-se constante e igual a g durante a queda. A “calibração” disponível no programa foi usada; sem ela, como já mencionamos, encontraríamos aceleração zero durante a queda livre.

O experimento põe a teste de maneira particularmente simples uma das ideias mais discutidas no ensino médio, a de que corpos em queda livre têm aceleração constante. Apesar da importância desse tema e do tempo dedicado a ele nos cursos introdutórios de física, poucos experimentos sobre a queda livre costumam ser realizados em sala de aula. Como vimos, *tablets* e *smartphones* podem ajudar a preencher essa lacuna.

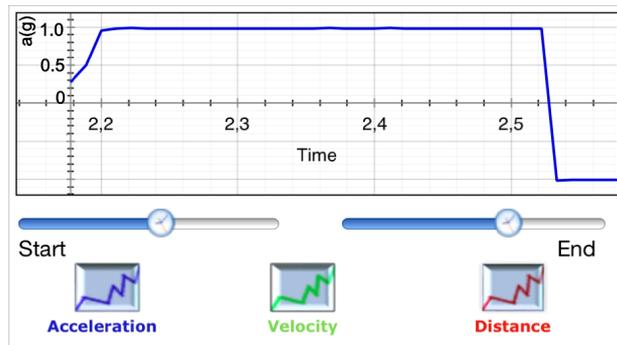


Figura A.4: Aceleração em função do tempo no experimento de queda livre.

As figuras A.5 e A.6 mostram a velocidade e posição do dispositivo durante o experimento, conforme calculada pelo *Acceleration*. É interessante notar que a comparação entre os diferentes gráficos torna possível discutir as variações (linear e quadrática) da velocidade e posição com o tempo quando a aceleração é constante, um tópico importante no ensino médio.

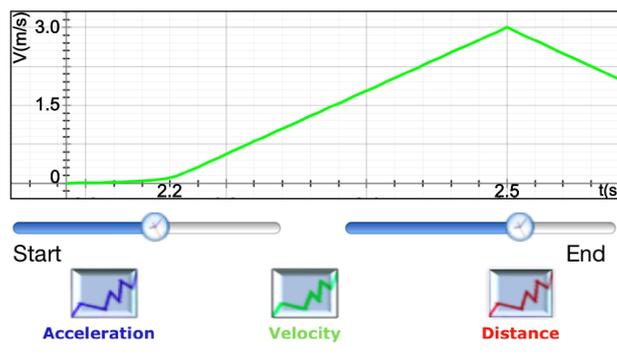


Figura A.5: Velocidade (calculada) em função do tempo no experimento de queda livre.



Figura A.6: Posição (calculada) em função do tempo no experimento de queda livre.

A análise de gráficos como os mostrados acima permite discutir com os alunos questões como:

- (i) Quanto tempo o *tablet/smartphone* ficou no ar?
- (ii) Qual a altura da queda?
- (iii) A aceleração do dispositivo permaneceu constante durante todo o movimento?
- (iv) Se deixarmos cair um *tablet* e um *smartphone*, qual terá maior aceleração?

A.3 O paraquedas

Um desenvolvimento natural do experimento de queda livre é o estudo dos efeitos de resistência do ar. Para fazer isso, podemos retomar o experimento anterior, dessa vez colocando o *smartphone* sobre uma placa de isopor (ver a figura A.7) de modo a aumentar a resistência que o ar oferece à queda. As dimensões da placa que usamos no experimento descrito a seguir eram $30,0 \times 50,0 \times 1,5$ cm.

Como no experimento de queda livre, zeramos o acelerômetro, iniciamos a gravação dos dados e deixamos o isopor cair (com o *smartphone* em cima). Se o *smartphone* estiver aproximadamente no centro da placa a queda será estável, ou seja, o isopor não vira, derrubando o aparelho (fizemos inúmeras repetições desse experimento e nenhum acidente foi registrado). O resultado



Figura A.7: O *smartphone* apoiado na placa de isopor.

de uma medida realizada dessa maneira está mostrado na figura A.8. O programa utilizado para ler o acelerômetro nesse experimento foi o *Sparkvue*. Podemos notar que a aceleração no início da queda é aproximadamente igual à da gravidade ($\approx 0,8g$), e seu valor diminui gradativamente à medida que o tempo passa, tendendo a zero. A diferença entre a aceleração da gravidade e a aceleração medida deve-se à resistência do ar sobre a placa de isopor. Vê-se da figura A.8 que essa resistência aumenta com o tempo, até praticamente igualar-se à ação da gravidade no final da queda, quando a aceleração medida tende a zero.

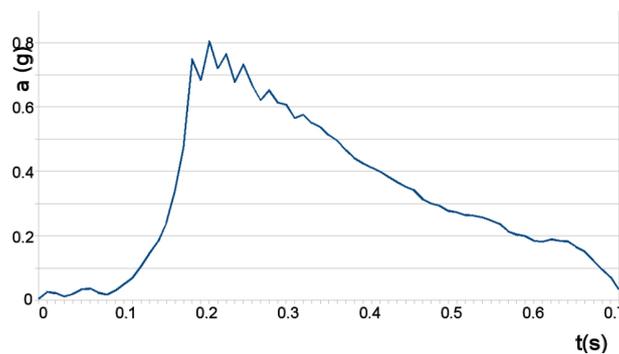


Figura A.8: Aceleração durante a queda do *smartphone* colocado sobre a placa de isopor.

O cálculo da velocidade a partir da aceleração permite analisar como a resistência do ar depende dessa velocidade. O resultado de uma análise desse tipo está mostrado no gráfico da figura A.9, no qual podemos ver que a resistência do ar aumenta com a velocidade.

O conceito de velocidade limite também pode ser explorado com esse experimento. Como mencionamos ao analisar a figura A.8, em algum momento próximo ao término de nossa medição a resistência do ar praticamente can-

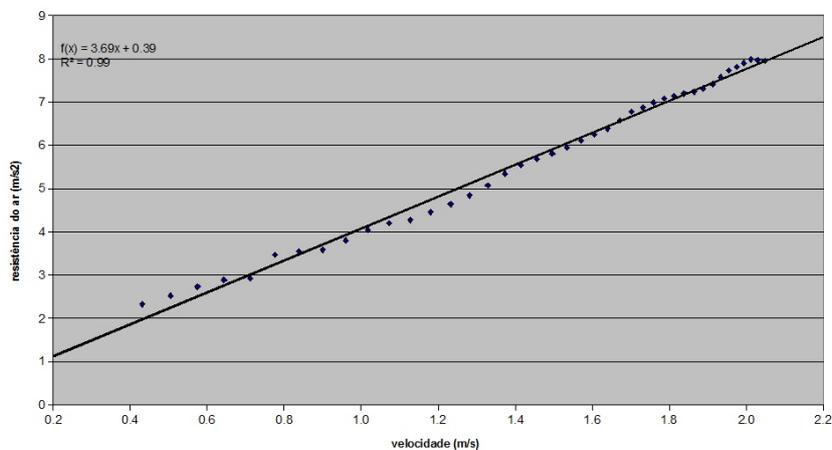


Figura A.9: Aceleração devida à resistência do ar ($g - a$ em m/s^2) durante a queda do *smartphone* apoiado em uma plataforma de isopor, como função da velocidade.

cela a ação da gravidade. Portanto, daí em diante a velocidade deveria ficar constante, pois chegamos a uma situação de equilíbrio.

Uma extensão do experimento consiste em prender um pequeno paraquedas ao *smartphone* (figura A.10) e deixar o *smartphone* cair de um lugar alto (por exemplo o 2º andar da escola, sem esquecer de apará-lo com um pano estendido). A aceleração registrada pelo acelerômetro num experimento desse tipo está mostrada na figura A.11.



Figura A.10: O *smartphone* acoplado a um paraquedas caseiro.

As regiões a , b e c no gráfico da figura A.11 representam, respectivamente,

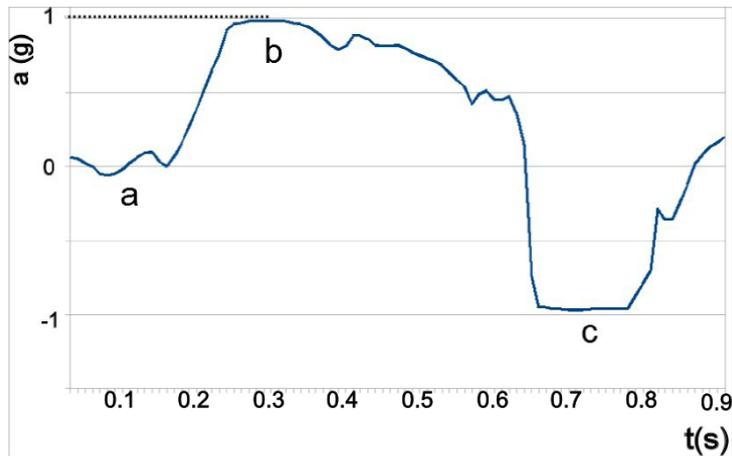


Figura A.11: A aceleração em função do tempo do *smartphone* em queda com paraquedas.

o aparato antes de ser solto, o período em que o paraquedas está se abrindo e, finalmente, o paraquedas totalmente aberto. Note que nessa última região temos uma aceleração negativa, o que indica que a força resultante está para cima, freando o conjunto. Isso mostra que quando o paraquedas se abre o *smartphone* está a uma velocidade maior que a limite, e portanto a resistência do ar será maior que a força peso, diminuindo a velocidade do conjunto até que ambas as forças se igualem gerando uma situação de equilíbrio. A grande aceleração para cima (negativa) que surge quando o paraquedas se abre completamente é bem conhecida dos paraquedistas, que a chamam de *tranco*. O *plateau* em $-1g$ visto na região *c* do gráfico da figura A.11 reflete a limitação do acelerômetro ao intervalo $\pm 2g$. Ao “zerarmos” o sensor somamos g à aceleração medida, o que produz um intervalo de leitura de $-g$ a $3g$.

É importante ressaltar como o resultado do experimento confronta a ideia da maioria dos alunos de que a aceleração é sempre para baixo.

A.4 O *tablet* num carrinho

Muitos experimentos interessantes podem ser realizados colocando-se o *tablet/smartphone* sobre um carrinho. Construímos esse carrinho prendendo quatro rodas de *skate* sob uma plataforma desenhada para receber e proteger

um *tablet*. O resultado da montagem foi chamado de *iCar* pelos alunos e está mostrado na figura A.12.



Figura A.12: O *iCar*: o carrinho de brinquedo que transporta um *tablet*.

Como primeira aplicação do *iCar* estudamos um simples empurrão sobre o carrinho. O resultado de uma medida pode ser visto na figura A.13, que mostra a aceleração durante o empurrão que pôs o carrinho em movimento (região *a* do gráfico) e o deslocamento posterior (região *b*). Após um tempo o *iCar* foi freado; essa desaceleração corresponde à região *c*.

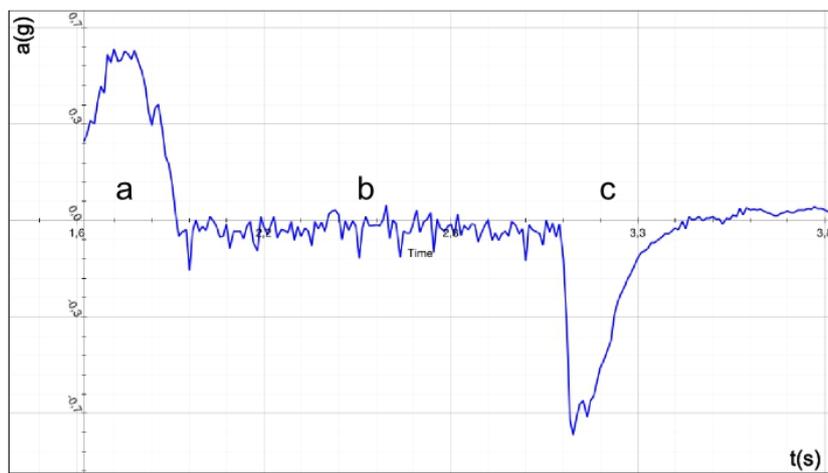


Figura A.13: Aceleração durante o empurrão (*a*), deslocamento (*b*) e frenagem (*c*) do *iCar*.

Pode-se notar o fato do empurrão acelerar rapidamente o *iCar* (cerca de

0,2 s). No intervalo entre o impulso inicial e a frenagem final (a região *b* da figura A.13) é possível notar que o carro sofre uma pequena desaceleração, provavelmente em consequência de forças dissipativas. Isso é facilmente observado no gráfico da velocidade em função do tempo mostrado na figura A.14. É interessante comparar as duas possibilidades de fazer o carro parar: uma frenagem como a que ocorreu no final do movimento, que gera uma forte desaceleração, ou o atrito que, embora pequeno, mais cedo ou mais tarde deixaria o carro com velocidade zero.

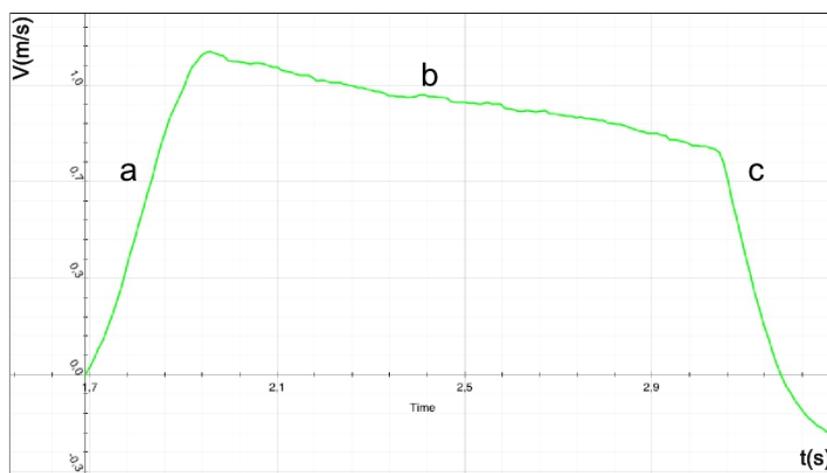


Figura A.14: A velocidade (calculada) do *iCar* durante o empurrão, movimento e frenagem.

É possível propor aos alunos muitas atividades que explorem esse experimento. Por exemplo:

- (i) A partir do gráfico da aceleração do móvel (figura A.13), faça um diagrama de forças para o *iCar* nas regiões *a*, *b* e *c*.
- (ii) Analisando o gráfico da velocidade em função do tempo, estime a velocidade do *iCar* quando a mão do professor perde o contato com ele.
- (iii) Você seria capaz de estimar essa velocidade sem o auxílio do gráfico de velocidade?
- (iv) A partir do gráfico de aceleração estime o valor da força de atrito na região *b*.
- (v) Faça uma estimativa da distância entre o professor (que empurrou o

iCar) e o aluno (que parou o carro).

O objetivo dessas propostas não é criar um roteiro de tarefas para acompanhar o experimento. O propósito é sugerir temas que podem ser desenvolvidos de maneira proveitosa, como a união de conceitos da cinemática com a segunda lei de Newton.

Para fazer uma experiência como essa não é necessário montar um carrinho “sofisticado” como o *iCar*. A mesma ideia pode ser implementada com o *skate* de um aluno, por exemplo. Pudemos observar resultados semelhantes prendendo o *tablet* (protegido com uma capa comercial) ao *skate* com uma fita adesiva.

A.5 A segunda lei de Newton

Qualitativamente, a segunda lei de Newton diz que forças causam acelerações (e não velocidades, como pensava Aristóteles). Isso foi observado no experimento da seção anterior, em que o *iCar* era acelerado por “empurrões”. Mas como mostrar que a relação quantitativa entre força e aceleração é linear? Podemos fazer isso com auxílio de um dinamômetro de mola, com o qual estudamos a aceleração impelida ao *iCar* por uma força dada. O experimento é muito simples e está esquematizado na figura A.15: afixamos uma das extremidades do dinamômetro na mesa do professor e a outra no *iCar*, distendemos o dinamômetro até atingir determinado valor da força e em seguida soltamos o carro, registrando a aceleração com o acelerômetro.

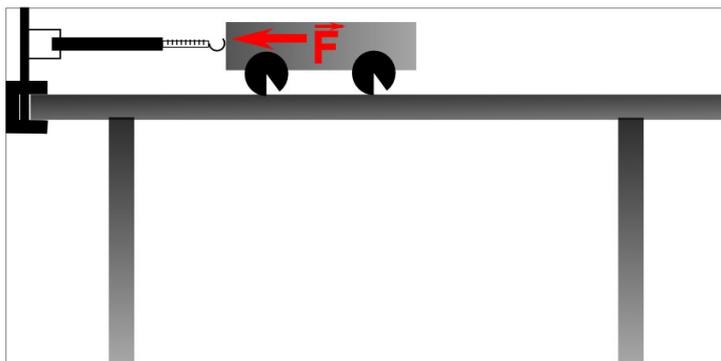


Figura A.15: O *iCar* preso a um dinamômetro.

Repetindo esse procedimento para vários valores distintos da força, obtemos gráficos da aceleração em função do tempo como os mostrados na figura A.16. Como era de se esperar, em cada caso temos uma aceleração que varia com o tempo, pois a força exercida pelo dinamômetro diminui à medida que sua mola volta à posição de equilíbrio. A aceleração inicial do carrinho, relacionada à força registrada pelo dinamômetro, pode ser estimada a partir do valor máximo da aceleração em cada curva. Um gráfico dessas medidas – força *versus* aceleração máxima – está mostrado na figura A.17. Os pontos são os resultados das medidas e a linha representa o ajuste de uma reta a esses dados. O ajuste confirma que a força é linearmente proporcional à aceleração. Mais ainda, o coeficiente angular da reta ajustada é 1,63 kg, muito semelhante à massa do conjunto *iCar + smartphone*, que era de 1,54 kg (uma diferença de 5,8%).

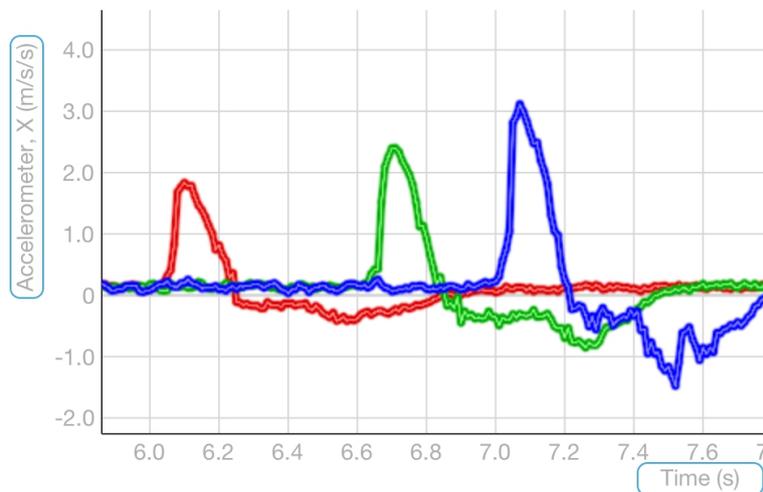


Figura A.16: Acelerações impelidas ao *iCar* por diferentes forças.

Uma extensão interessante do experimento pode ser realizada alterando-se a massa, mantendo-se fixa a força.

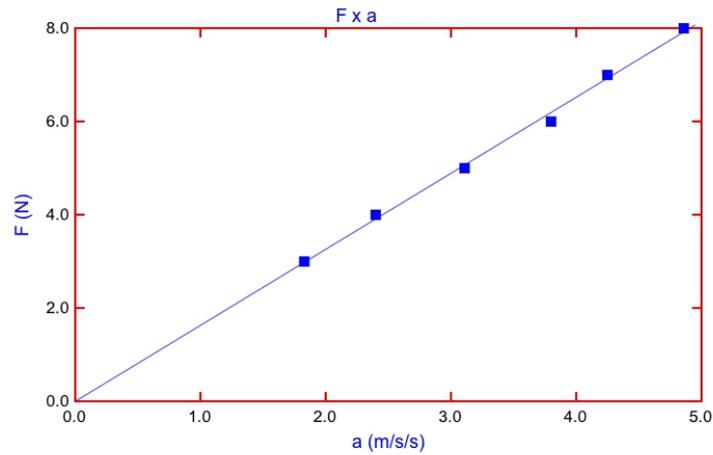


Figura A.17: Gráfico da força registrada no dinamômetro em função da aceleração máxima do carrinho. Os pontos são as medidas efetuadas e a linha é um ajuste linear aos dados.

A.6 O plano inclinado

O plano inclinado é um dos temas prediletos no ensino de mecânica. Geralmente ele é abordado de maneira puramente teórica (e chata, segundo muitos alunos), sem apoio de experimentos quantitativos. Com o *iCar* – ou qualquer carrinho capaz de carregar um *tablet/smartphone* – é possível realizar experimentos sobre o movimento em planos inclinados, colocando os resultados teóricos a teste. Para isso, um plano inclinado pode ser construído, por exemplo, apoiando a mesa do professor sobre uma cadeira, como esquematizado na figura A.18.

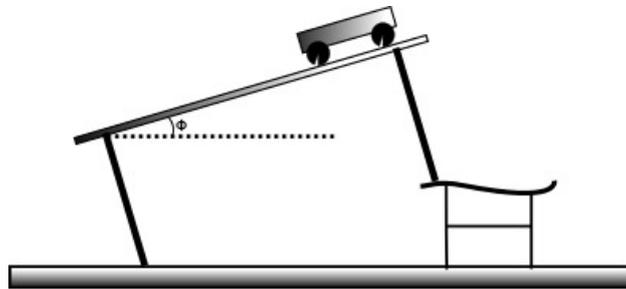


Figura A.18: O plano inclinado com o *iCar*.

O ângulo de inclinação ϕ do plano pode ser determinada com o próprio acelerômetro, uma vez que vários programas de leitura desse sensor são capazes de indicar a inclinação do aparelho em relação à direção vertical. Escolhemos o *Accelmeter*, que pode ser obtido gratuitamente na loja virtual da Apple e tem entre suas funções a medida de “nível”. Em um experimento, após inclinar a mesa, o *iCar* foi colocado sobre ela e seguro por um obstáculo. A inclinação foi medida com o *Accelmeter*, com o resultado $\phi = 14,5^\circ$ (figura A.19). O passo seguinte foi retirar o obstáculo que segurava o carro e medir a aceleração do movimento. O resultado encontrado está na figura A.20. Do gráfico vemos que aceleração do *iCar* foi de aproximadamente $2,3 \text{ m/s}^2$.



Figura A.19: Medida do ângulo com o *Accelmeter* colocado sobre a mesa inclinada.

Desprezando atritos e a inércia de rotação das rodas a aceleração do carrinho seria

$$a = g \sin(14.5^\circ) = 2,4 \text{ m/s}^2 . \quad (\text{A.4})$$

Esse valor está muito próximo da aceleração medida: a discrepância é da ordem de 4% e provavelmente deve-se ao efeitos desprezados no cálculo (dis-

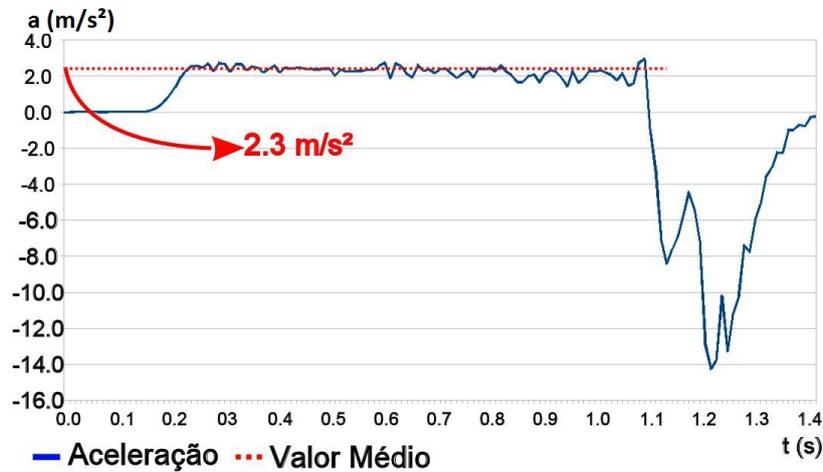


Figura A.20: Gráfico da aceleração do dispositivo deslizando sobre a mesa inclinada.

sipação e momento de inércia das rodas).

Uma extensão do experimento pode ser motivada pela pergunta: “se aumentarmos a massa do *iCar* e o deixarmos descer o plano inclinado, o que ocorrerá com a aceleração?”. O acréscimo de algum objeto pesado ao *iCar* permitirá responder essa questão experimentalmente.

Outra variação simples e instrutiva do experimento consiste em empurrar o *iCar* ladeira acima e o aparar de volta (ver a figura A.21).

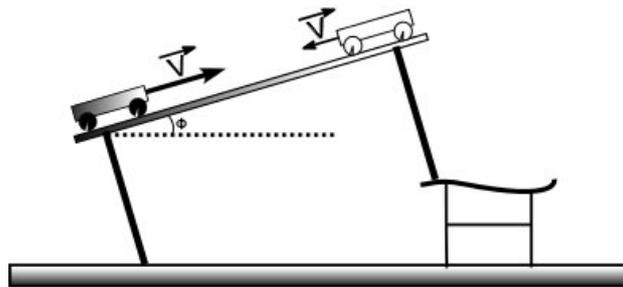


Figura A.21: Subida e descida do *iCar* em uma mesa inclinada.

Essa versão do experimento permite a releitura de uma questão clássica, que revela quão grandes são as dificuldades enfrentadas pelos alunos na aprendizagem de mecânica. A questão é: quando jogamos uma bolinha para cima, o que acontece com a sua aceleração no ponto mais alto da trajetória?

É bem sabido pelos professores de cursos introdutórios de física que grande parte dos alunos diz que a aceleração do corpo é zero no alto da trajetória. Concepções intuitivas e um mau entendimento de conceitos de cinemática e da segunda lei de Newton levam esses alunos a não admitir que um corpo com velocidade zero possa ter aceleração não nula.

O resultado do experimento pode ser visto figura A.22). É interessante pedir aos alunos que indiquem o instante em que o valor a aceleração assume o valor zero.

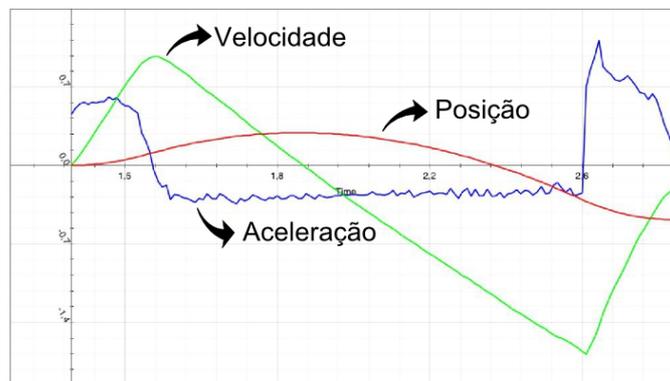


Figura A.22: Aceleração, velocidade e posição do *iCar* durante a subida e descida em uma mesa inclinada.

A.7 A máquina de Atwood

Outro tópico popular nos cursos de física básica é a máquina de Atwood. Esse é um sistema com muitas aplicações práticas, e seu estudo envolve temas importantes como a terceira lei de Newton e as forças transmitidas por fios e cabos. A montagem experimental de uma máquina de Atwood pode ser vista na figura A.23 e é muito simples. Usamos pratos de balança (dessas de peixeiro) e uma rodinha de *skate* serviu como roldana. Em um dos pratos colocamos um *smartphone* e no outro um conjunto de pesos.

O resultado da medida da aceleração pode ser visto na figura A.24. A aceleração do *smartphone* foi de aproximadamente $1,12 \text{ m/s}^2$ (para cima).



Figura A.23: Montagem da máquina de Atwood feita em sala de aula.

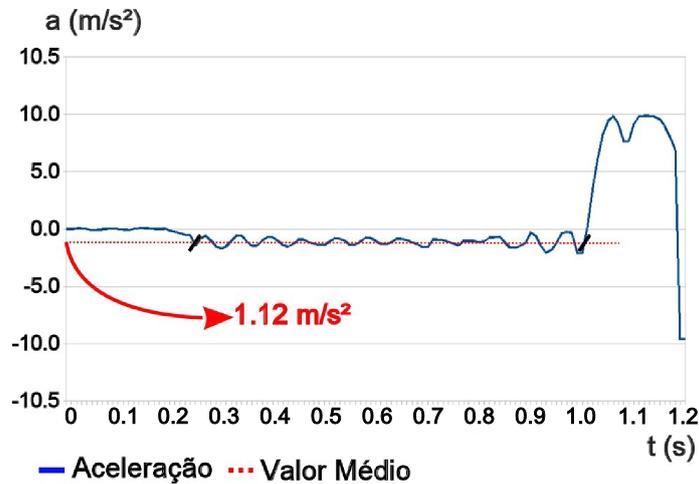


Figura A.24: Gráfico da aceleração em função do tempo na máquina de Atwood.

O cálculo teórico, desprezando atritos e a inércia da roldana, leva a

$$a = \frac{M - m}{M + m} g \quad (\text{A.5})$$

onde m é a massa do *smartphone*, M é a massa do corpo do lado oposto e g a aceleração da gravidade. Utilizando os valores das massas o resultado é $1,25 \text{ m/s}^2$. Esse valor é bastante próximo ao medido, $1,12 \text{ m/s}^2$, uma diferença de 10% que provavelmente deve-se ao atrito e o momento de inércia da roldana.

A.8 A tração é igual ao peso?

Essa montagem é uma variação da máquina de Atwood e consta como exercício em incontáveis livros didáticos, revelando algumas dificuldades comuns no estudo da mecânica. Temos uma plataforma (uma mesa), uma roldana presa ao tampo da mesa por uma haste metálica e uma linha ligando uma massa ao *iCar* (ver figura A.25). Um esquema do experimento está na figura A.26.



Figura A.25: O *iCar* preso a uma massa com auxílio de uma roldana.

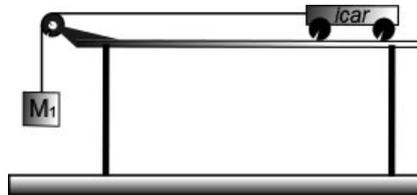


Figura A.26: Esquema da montagem experimental.

A figura A.27 mostra o gráfico gerado durante o movimento do carrinho, e podemos ver que a aceleração foi de aproximadamente $1,3 \text{ m/s}^2$.

Aplicando a segunda lei de Newton ao sistema carrinho-massa, a aceleração do *iCar* deve ser (desprezando os atritos e inércias de rotação)

$$a = \frac{M_1}{M_1 + M}g \quad (\text{A.6})$$

onde M_1 é a massa que traciona o fio, M é a massa do *iCar* e *tablet* juntos, e g é a aceleração da gravidade. No experimento realizado tinha-se $M_1 \approx$

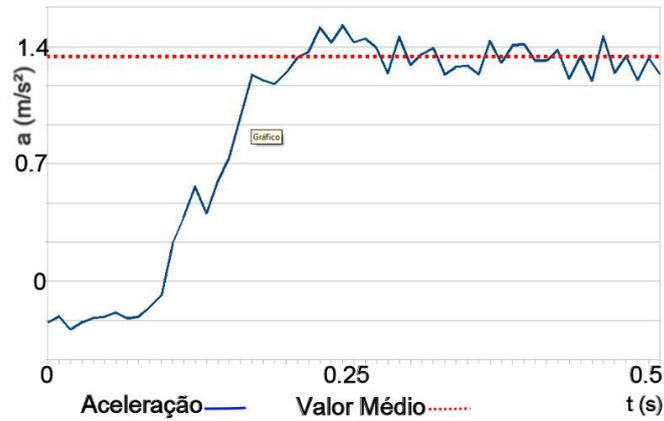


Figura A.27: Aceleração do *iCar* puxado por um peso.

$M/6$, o que leva à previsão de que $a \approx 1,4 \text{ m/s}^2$, em razoável acordo com o experimento.

Um erro muito comum cometido pelos alunos é tomar a tensão na corda como sendo igual ao peso de M_1 . No caso estudado isso leva à previsão de que a aceleração do carrinho seria $a = (M_1/M)g \approx 1,6 \text{ m/s}^2$, um resultado bastante diverso do encontrado experimentalmente.

Apêndice B

Experimentos com o Magnetômetro de *Tablets* e *Smartphones*

B.1 O magnetômetro e sua leitura

Muitos *smartphones* e *tablets* vêm equipados com um magnetômetro capaz de medir as componentes de um campo magnético em três eixos perpendiculares (X, Y, Z). Em cada direção podem ser medidos campos de até ± 2 mT e os resultados são normalmente dados em μT , o que indica que a resolução do sensor é, provavelmente, melhor que $1 \mu\text{T}$. Para se ter uma ideia do que é possível medir com esse magnetômetro, o campo magnético na superfície da Terra varia de 20 a 70 μT , dependendo do local (no Brasil ele vai de 23 a 28 μT) e imãs de porta de geladeira produzem campos da ordem de 1 mT. Os magnetos de terras raras podem gerar mais de 1 T e não devem ser aproximados do dispositivo.

Há aplicativos que leem os dados do magnetômetro e apresentam os resultados de diferentes maneiras, desde uma simples “bússola” até as componentes B_x , B_y e B_z em formato numérico ou gráfico. Um exemplo é o *MagnetMeter* para iPhone/iPad, mostrado na figura B.1.

Alguns cuidados que devem ser tomados no uso desses magnetômetros.



Figura B.1: Tela do aplicativo *MagnetMeter*. A direção do campo magnético é dada pela seta em 3D que é vista sob o ponteiro da bússola. O número na parte de baixo da janela é a intensidade do campo magnético em μT .

Por exemplo, a capa de celulares e tablets frequentemente possui fechos magnéticos que interferem significativamente na medida de campos magnéticos fracos, como o da Terra. Outros materiais ferromagnéticos nas vizinhanças do dispositivo também podem influenciar os resultados. Para demonstrar isso podemos tomar uma tesoura de metal e a colocá-la perto do magnetômetro; como vemos na figura B.2 o campo magnético medido pelo sensor do *tablet* é da ordem de $400\mu\text{T}$, muito maior que o campo geomagnético.

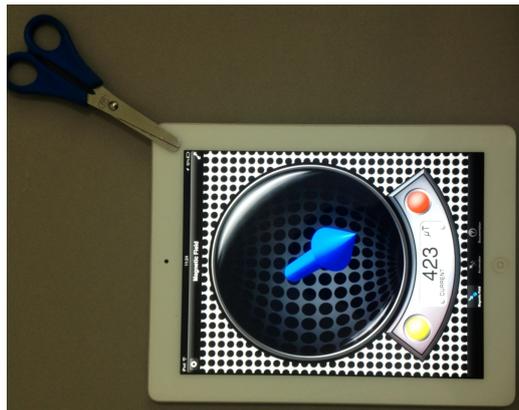


Figura B.2: Tesoura sobre o magnetômetro de um *tablet*. Podemos ver que a intensidade do campo está por volta de $400\mu\text{T}$, muito maior que o campo magnético da Terra.

B.2 Campo magnético e corrente elétrica

O magnetômetro pode ser utilizado no estudo do campo magnético produzido por uma corrente elétrica. Para isso basta um aparato simples. Uma bobina é ligada em série a uma fonte de tensão, um potenciômetro e um amperímetro (multímetro). A corrente elétrica na bobina é medida pelo amperímetro e pode ser variada alterando-se a resistência do potenciômetro (um resistor de segurança impede o curto-circuito). A montagem mostrada na figura B.2 utiliza uma bobina com cerca de 80 voltas de fio de cobre esmaltado e uma fonte de corrente contínua com capacidade para 1A e 5V. O resistor de segurança tem 10 ohms (10W) e o potenciômetro suporta 10 W. O magnetômetro pertence a um *tablet*.



Figura B.3: Montagem para medição do campo magnético de uma bobina em função da corrente.

O gráfico do campo magnético registrado pelo magnetômetro em função da corrente medida pelo amperímetro pode ser visto na figura B.4. O resultado demonstra claramente que o campo magnético aumenta linearmente com a corrente elétrica na bobina.

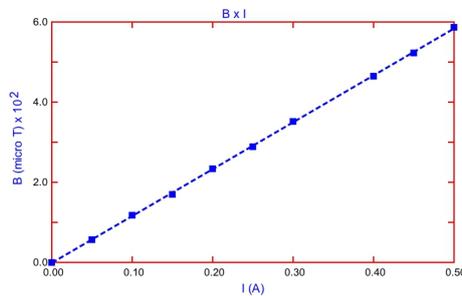


Figura B.4: Campo magnético B em função da corrente elétrica I na bobina.

B.3 O campo magnético em função da distância

B.3.1 Campo de um ímã

Com o magnetômetro de um *tablet* ou *smartphone* é fácil estudar quantitativamente como o campo magnético de um ímã varia com a distância. Antes de medir a distância entre o ímã e o magnetômetro, precisamos conhecer a posição desse sensor dentro do *tablet/smartphone*. Uma forma simples de localizar o magnetômetro é passar um pequeno objeto magnetizado sobre o aparelho, procurando o ponto onde o programa de medição do campo magnético registra o maior valor. O magnetômetro deve estar logo abaixo desse ponto. A figura B.5 mostra onde foi encontrado o magnetômetro do iPad (utilizando uma tesoura magnetizada), a cerca de 1,8 cm de uma das bordas do aparelho.

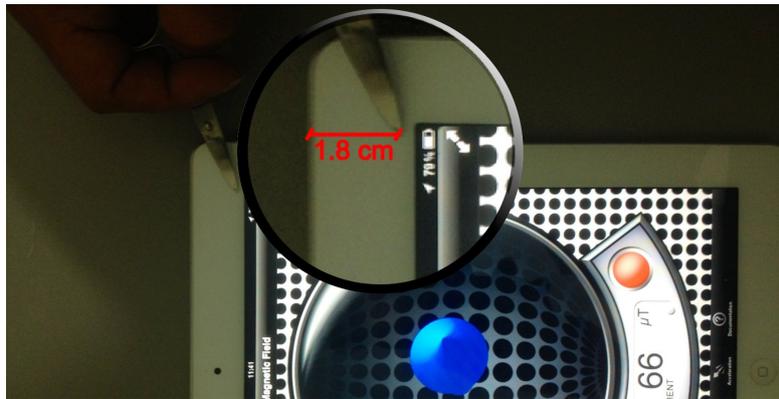


Figura B.5: Uma tesoura magnetizada aponta o local onde se encontra o magnetômetro do iPad. Fazendo a tesoura “passear” pela superfície do aparelho, a localização do magnetômetro é dada pelo ponto de leitura máxima no dispositivo. No destaque vemos a distância entre uma das bordas do iPad e a posição do sensor.

A figura B.6 mostra um exemplo de montagem do experimento para medir o campo magnético em função da distância. O material é um *tablet*, uma régua, um ímã e um livro. O ímã foi fixado com fita adesiva em uma das extremidades da régua, e a outra extremidade foi colocada entre as páginas

do livro. O *tablet* foi posto sobre o livro, de modo que a distância entre o ímã e o magnetômetro podia ser variada deslizando a régua. Essa distância era medida somando-se à leitura da régua o intervalo de 1,8 cm (ver figura B.5) entre o magnetômetro e a borda do iPad.

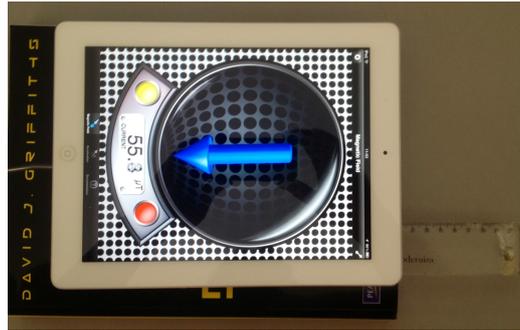


Figura B.6: Montagem do experimento. Na extremidade da régua podemos observar o ímã e na tela o valor da intensidade do campo B em μT .

Antes do experimento deve-se “calibrar” o magnetômetro, para compensar o campo magnético terrestre e a influência de objetos magnéticos próximos. Isso é feito afastando ao máximo o ímã do magnetômetro e “zerando” as medições efetuadas pelo *tablet*. O programa *MagnetMeter* tem um botão com essa função: ao ativá-lo, o campo no ponto onde está o magnetômetro é subtraído das medidas posteriores.

O resultado de um conjunto de medidas do campo magnético B em função da distância x entre o ímã e o magnetômetro e está mostrado na figura B.7. A variação acentuada do campo com a distância pode ser vista claramente na figura. Os dados são muito bem descritos por uma lei de potência $B \propto x^{-n}$ com $n \approx 3$ (encontrado com um programa de ajuste por mínimos quadrados). Esse é o resultado esperado para o campo de um dipolo magnético, desde que o afastamento não altere o ângulo entre a posição do magnetômetro e o momento de dipolo.

Uma extensão simples do experimento consiste em investigar a variação do campo magnético com a orientação do ímã, a uma distância fixa.

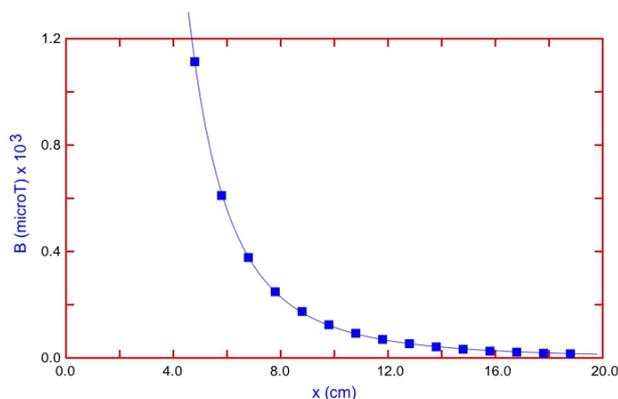


Figura B.7: Intensidade do campo magnético de um ímã a diferentes distâncias. A linha representa o ajuste da lei de potência $B \propto x^{-n}$ aos dados. O melhor ajuste foi obtido com $n \approx 3$.

B.3.2 Campo de uma bobina

O campo magnético produzido por uma bobina é muito parecido com o de um ímã. Isso pode ser comprovado com um experimento semelhante ao anterior, em que trocamos o ímã por uma bobina pela qual passa uma corrente contínua. Um gráfico do campo magnético em função da distância à bobina está mostrado na figura B.5. A curva é o resultado do ajuste de $B \propto x^{-n}$ aos dados, e novamente $n \approx 3$ foi encontrado.

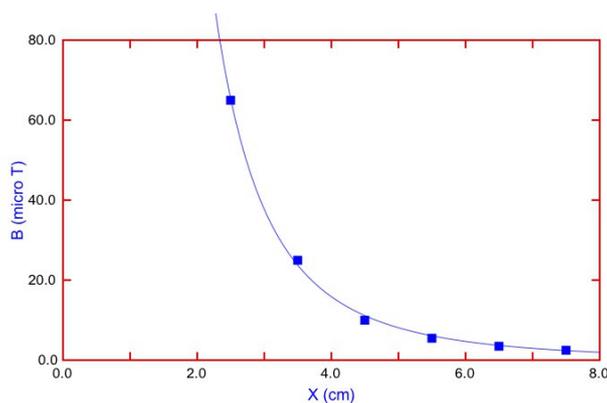


Figura B.8: O campo magnético a diferentes distâncias de uma bobina. A linha representa o ajuste da lei de potência $B \propto x^{-n}$ aos dados. O melhor ajuste foi obtido com $n \approx 3$.

Apêndice C

Experimentos com o Microfone de *Tablets e Smartphones*

Smartphones e *tablets* têm sistemas de áudio poderosos, e a extrema portabilidade desses dispositivos torna muito simples realizar experimentos didáticos sobre a física do som. Existem programas para *tablets* e *smartphones* que fazem gravações de áudio, mostram o perfil das ondas sonoras registradas e até realizam análises de Fourier. Um desses programas, o *Oscilloscope*, permite gravar até 2 s de dados de som e mostra a forma de onda com resolução de 0,1 ms. Outro programa útil é o *Audio Kit*, que pode gravar a onda sonora e calcular seu espectro de frequências em tempo real.

C.1 Frequência e timbre

A experiência mais simples que pode ser feita é, possivelmente, a gravação de um assovio. Um pequeno trecho da forma de onda registrada durante um assovio está mostrado na figura C.1 (à direita), e percebe-se que é muito semelhante a uma senoide. O período T da onda pode ser medido notando-se que cada divisão horizontal da tela corresponde a $310 \mu\text{s}$. O resultado é $T \approx 1,44 \text{ ms}$, o que corresponde a uma frequência $f = 1/T \approx 690 \text{ Hz}$. Uma forma mais direta de medir a frequência é pelo espectro de Fourier do sinal, calculado pelo mesmo programa (*Audio Kit*) que fez a gravação e exibiu a

forma de onda. A figura C.1 (à direita) mostra o espectro de frequências, que tem um pico acentuado em 666 Hz, próximo ao valor estimado a partir do período.

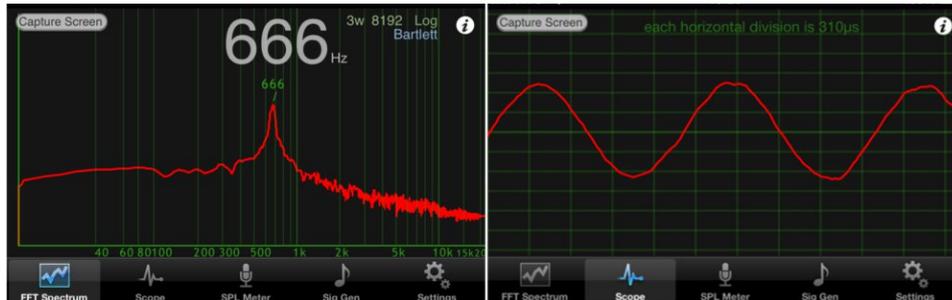


Figura C.1: O som de um assovio. À direita está a forma da onda sonora em função do tempo, durante um intervalo de cerca de 3,5 ms. À esquerda está o espectro das frequências presentes no assovio.

Instrumentos musicais também são facilmente analisados. A mesma nota musical do assovio, quando tocada numa guitarra elétrica, apresenta uma forma de onda com características bem distintas, como se vê na figura C.2 (direita). Embora o sinal se repita aproximadamente a cada 1,5 ms, como no caso do assovio, a onda não se assemelha a uma senoide e apresenta outras oscilações de períodos menores. As frequências correspondentes a essas oscilações podem ser identificadas como picos no espectro sonoro mostrado na figura C.2 (esquerda).



Figura C.2: O som de uma guitarra elétrica. À direita está a forma da onda sonora em função do tempo, durante um intervalo de cerca de 3,5 ms. À esquerda está o espectro de frequências do sinal gravado.

O resultado do experimento mostra que, embora os dois sons gravados (assovio e guitarra) tenham a mesma frequência básica, ou frequência “fundamental”, o que significa que são a mesma nota musical, eles apresentam formas de onda muito distintas. É por isso que somos capazes de reconhecer a diferença entre o som de um assovio e de uma guitarra, mesmo quando notas idênticas são emitidas; eles têm timbres diferentes.

C.2 A velocidade do som

A velocidade do som pode ser medida com boa precisão num experimento que utiliza apenas um *smartphone* e um tubo. O experimento é extremamente simples: tomamos um tubo longo, de pelo menos 1 m de comprimento e aberto nas extremidades, e batemos com a mão numa de suas pontas. O *smartphone* é colocado próximo à extremidade do tubo que recebe a batida (ou à outra, tanto faz), gravando o som que sai por ali. O pulso sonoro gerado pela batida percorre o tubo e, ao chegar ao outro lado, é parcialmente transmitido para fora do tubo e parcialmente refletido. O pulso refletido – um “eco” – atravessa de volta o tubo e, por sua vez, também sofre transmissão e reflexão ao final do caminho. O processo se repete até que toda a energia sonora escape pelas extremidades. A figura C.3 mostra a gravação do som numa das pontas do tubo, feita com um *smartphone* rodando o *Oscilloscope*. Os pulsos que se sucedem após o primeiro são as ondas transmitidas para fora do tubo depois de múltiplas reflexões internas.

Na gravação mostrada na figura C.3 utilizamos um tubo de aço de 3,26 m de comprimento. Antes de ser promovido a material didático o tubo era parte do bicicletário do colégio, como se vê na figura C.4.

A figura C.5 mostra dois ecos sucessivos de uma batida nesse tubo, gravados pelo *smartphone*. O intervalo entre os dois sinais é o tempo necessário para o som ir e voltar pelo tubo. Com a escala de tempo mostrada pelo programa *Oscilloscope* podemos medir esse tempo; o resultado, indicado na figura C.5, é $t = 19,2$ s. A distância percorrida pelo som durante esse intervalo é duas vezes o comprimento do tubo, $d = 2 \times 3,26 \text{ m} = 6,52 \text{ m}$, já que



Figura C.3: O som da batida com a mão na extremidade de um tubo, gravado por um *smartphone*. Os pulsos sucessivos ao primeiro são “ecos” que saem do tubo após múltiplas reflexões nas extremidades abertas.



Figura C.4: Tubo usado na medida da velocidade do som: o bicicletário da escola.

o pulso sonoro vai e volta. Com isso, a velocidade do som é dada por

$$v_{som} = d/t = 340 \text{ m/s.}$$

É importante ressaltar a simplicidade conceitual desse método de medida da velocidade do som¹, que usa apenas a relação cinemática $v_{som} =$

¹Ver Sérgio Tobias da Silva, “Propagação do Som: Conceitos e Experimentos”, dissertação de mestrado em Ensino de Física, UFRJ, 2011, disponível em http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2011_Sergio_Tobias/dissertacao_Sergio_Tobias.pdf.



Figura C.5: Dois sinais sucessivos gravados numa extremidade do tubo e o tempo entre eles.

distância/tempo. Em contraste, os experimentos usuais de medida da velocidade do som são baseados na relação $v_{som} = \lambda f$, que exige do aluno uma compreensão mais avançada dos fenômenos acústicos em termos de física ondulatória.

C.3 Mudança de fase na reflexão

Podemos notar que os dois sinais na figura C.5 têm praticamente a mesma forma, apenas suas intensidades são diferentes. À primeira vista, isso parece contradizer o fato da reflexão extremidade de um tubo aberto inverter a fase da onda sonora (mais exatamente, da onda de pressão). Por essa regra, o segundo sinal deveria estar invertido em relação ao primeiro. Entretanto, o pulso sonoro sofre duas reflexões em seu caminho de ida e volta pelo tubo – a primeira reflexão dá início à ida e a segunda, à volta. As duas trocas de fase se cancelam e o resultado é que o segundo pulso não aparece invertido em relação ao primeiro.

O que acontece com a fase se uma extremidade do tubo estiver obstruída? Para encontrar a resposta, a extremidade do tubo oposta ao *smartphone* foi tapada e o experimento anterior repetido. O resultado pode ser observado na figura C.6: os pulsos que saem pela extremidade aberta sofrem inversões sucessivas. Agora a troca de fase ocorre apenas na primeira reflexão, na

ponta aberta; a reflexão seguinte, na extremidade fechada, não inverte o sinal sonoro. O resultado é que cada ida e volta pelo tubo inverte a onda que sai pela extremidade aberta.

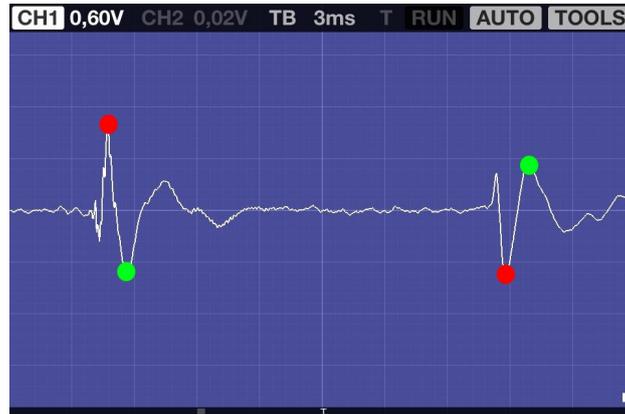


Figura C.6: Ecos sucessivos no tubo com uma extremidade fechada.

C.4 Ondas estacionárias em tubos sonoros

Ondas estacionárias são um tema central da física ondulatória. No caso do som, ondas em “tubos sonoros” têm especial importância e são geralmente abordadas em cursos introdutórios de física. Como veremos, com um *tablet* ou *smartphone* e um microfone é possível mapear as ondas estacionárias em um tubo, obtendo uma representação visual muito instrutiva do comportamento dessas vibrações sonoras². O material usado no experimento está mostrado na figura C.7: um *tablet*, um conjunto fone de ouvido/microfone e um copo cilíndrico (o tubo sonoro).

Para realizar o experimento, utilizamos o programa *Audio Kit* no modo de análise de Fourier e colocamos o microfone dentro do copo. Os ruídos externos são filtrados pelo tubo sonoro, que ressoa apenas próximo às frequências das ondas estacionárias. Supondo que a onda estacionária de menor frequência

²Ver Anderson Ribeiro de Souza, “Experimentos em Ondas Mecânicas”, dissertação de mestrado em Ensino de Física, UFRJ, 2011, disponível em http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2011_Anderson_Souza/dissertacao_Anderson_Souza.pdf.

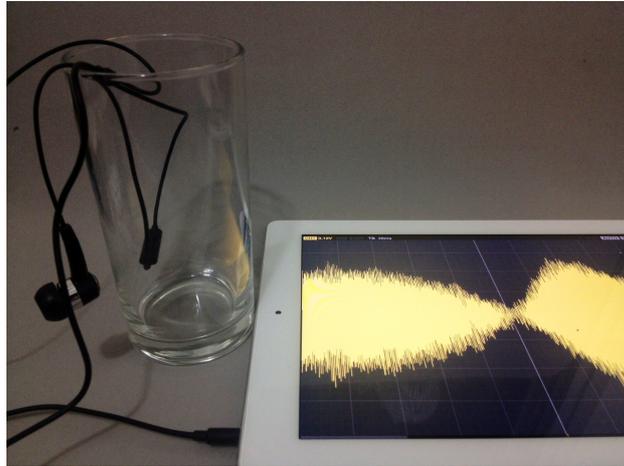


Figura C.7: Material usado no mapeamento das ondas estacionárias num tubo sonoro: um *tablet* conectado a um fone de ouvido/microfone e um copo (o tubo sonoro).

(o “modo fundamental”) é a mais intensa dentro do tubo, encontramos que a frequência desse modo é $f_0 = 710$ Hz, como se vê na figura- C.8.



Figura C.8: Imagem de uma tela do aplicativo em funcionamento, mostrando o pico de frequência.

Em seguida usamos o mesmo aplicativo (*Audio Kit*) em um *smartphone* para gerar um sinal sonoro com 710 Hz e fizemos o microfone percorrer o interior do tubo (com velocidade a mais uniforme possível), gravando o perfil da onda estacionária produzida lá dentro. O resultado está na figura C.9.

Pode-se observar que a intensidade do som é máxima no fundo do copo, o ponto de partida do microfone, e tende a zero na borda.

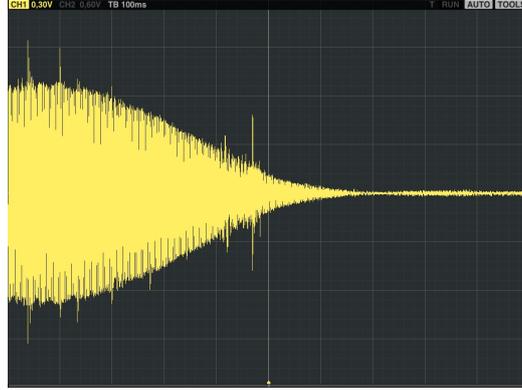


Figura C.9: Perfil de onda do modo fundamental no interior do copo. A amplitude da onda de pressão é máxima no fundo do copo (à esquerda, no gráfico). Na borda do copo a amplitude da onda vai a zero.

Esse resultado mostra que apenas $1/4$ do comprimento de onda do modo fundamental está dentro do tubo. Como a parte interna do copo tem comprimento $L = 0,12$ m, o comprimento de onda do modo fundamental é $\lambda_0 = 4L = 0,48$ m. Com esse valor podemos calcular a velocidade do som, $v_{som} = \lambda_0 f_0 = 341$ m/s.

As ondas estacionárias no interior do tubo devem ter comprimentos de onda tais que

$$n\lambda/2 + \lambda/4 = L, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

ou

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

As frequências dessas ondas são dadas por

$$f = v_{som}/\lambda = (2n + 1)v_{som}/(4L) = (2n + 1)f_0, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

ou seja, são múltiplos ímpares da frequência fundamental f_0 .

Ajustando a frequência do sinal sonoro para algum desses valores podemos mapear a forma das ondas estacionárias correspondentes. A figura C.10 mostra o resultado para os dois modos seguintes ao fundamental: $n = 1$,

com $f = 3f_0 = 2130$ Hz, e $n = 2$, com $f = 5f_0 = 3550$ Hz .

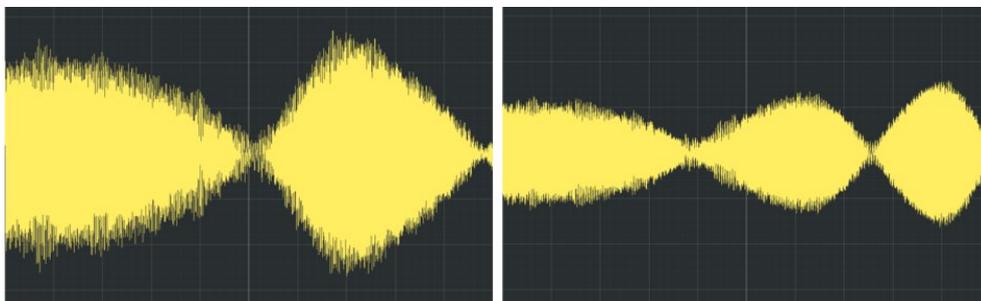


Figura C.10: Ondas estacionárias no copo, com $f = 3f_0$ (esquerda) e $f = 5f_0$ (direita).

Referências Bibliográficas

- [1] Susan R. Singer, Margaret L. Hilton, Heidi A. Schweingruber (eds.), *America's Lab Report: Investigations in High School Science*, National Academies Press, 2006.
- [2] A. Hofstein, V. N. Lunetta, *The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century*, Science Education, v. 88, n. 1, p. 28-54, 2004.
- [3] American Association of Physics Teachers, *Goals of the Introductory Physics Laboratory*, American Journal of Physics, v. 66, n. 6, p. 483-485, 1998.
- [4] Committee on Undergraduate Science Education, National Research Council, *Science Teaching Reconsidered: A Handbook*, National Academy Press, 1997.
- [5] D. Hodson, *Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio*, Enseñanza de las Ciencias, v. 12, n. 3, p. 299-313, 1994.
- [6] A. T. Borges, *Novos rumos para o laboratório escolar de ciências*, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 19, n. 3, p. 291-313, 2002.
- [7] A. B. Arons, *Teaching Introductory Physics*, Wiley, 1997.
- [8] R. Millar, *The role of practical work in the teaching and learning of science*, Committee on High School Science Laboratories: Role and Vision, National Academy of Sciences, Washington, 2004.
- [9] C. Hart, P. Mulhall, A. Berry, J. Loughran, R. Gunstone, *What is the Purpose of this Experiment? Or Can Students Learn Something from Doing Experiments?*, Journal of Research in Science Teaching, v. 37, n. 7, p. 655-675, 2000.

- [10] R. K. Thornton, D. R. Sokoloff, *Learning motion concepts using real-time microcomputer-based laboratory tools*, American Journal of Physics, v. 58, n. 9, p. 858-867, 1990.
- [11] C. E. Aguiar, F. Laudares, *Aquisição de dados usando Logo e a porta de jogos do PC*, Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 23, n. 4, p. 371-380, 2001.
- [12] C. E. Aguiar, F. Laudares, *Listening to the coefficient of restitution and the gravitational acceleration of a bouncing ball*, American Journal of Physics, v. 71, p. 499-451, 2003.
- [13] C. E. Aguiar, M. M. Pereira, *Using the sound card as a timer*, The Physics Teacher, v. 49, p. 33-35, 2011.
- [14] C. E. Aguiar, M. M. Pereira, *O computador como cronômetro*, Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, n. 3, art. 3303, 2012.
- [15] J. Kuhn and P. Vogt, *Diffraction experiments with infrared remote controls*, The Physics Teacher, v. 50, n. 2, p. 118-119, 2012.
- [16] P. Vogt, J. Kuhn, *Analyzing free fall with a smartphone acceleration sensor*, The Physics Teacher, v. 50, n. 3, p. 182-183, 2012.
- [17] K. Forinash, R. F. Wisman, *Smartphones as portable oscilloscopes for physics labs*, The Physics Teacher, v. 50, n. 4, p. 242-243, 2012.
- [18] P. Vogt, J. Kuhn, *Determining the speed of sound with stereo headphones*, The Physics Teacher, v. 50, n. 5, p. 308-309, 2012.
- [19] N. Silva, *Magnetic field sensor*, The Physics Teacher, v. 50, n. 6, p. 372, 2012.
- [20] P. Vogt, J. Kuhn, *Analyzing simple pendulum phenomena with a smartphone acceleration sensor*, The Physics Teacher, v. 50, n. 7, p. 439-440, 2012.
- [21] J. Kuhn, P. Vogt, *Analyzing spring pendulum phenomena with a smartphone acceleration sensor*, The Physics Teacher, v. 50, n. 8, p. 504-505, 2012.
- [22] K. Forinash, R. F. Wisman, *Smartphones – Experiments with an External Thermistor Circuit*, The Physics Teacher, v. 50, n. 9, p. 566-567, 2012

- [23] J. W. Streepey, *Using iPads to illustrate the impulse-momentum relationship*, The Physics Teacher, v. 51, n. 1, p. 54-55, 2013.
- [24] J. Kuhn, P. Vogt, *Analyzing acoustic phenomena with a smartphone microphone*, The Physics Teacher, v. 51, n. 2, p. 118-119, 2013.
- [25] P. Gabriel, U. Backhaus, *Kinematics with the assistance of smartphones: Measuring data via GPS - Visualizing data with Google Earth*, The Physics Teacher, v. 51, n.4, p. 246-247, 2013.
- [26] O. Schwarz, P. Vogt, J. Kuhn, *Acoustic measurements of bouncing balls and the determination of gravitational acceleration*, The Physics Teacher, v. 51, n. 5, p. 312, 2013.
- [27] E. G. Falcão Jr, R. A. Gomes, J. M. Pereira, L. F. S. Coelho, A. C. F. Santos, *Cellular phones helping to get a clearer picture of kinematics*, The Physics Teacher, v. 47, n. 3, p. 167-168, 2009.
- [28] A.-M. Pendrill, J. Rohlén, *Acceleration and rotation in a pendulum ride, measured using an iPhone 4*, Physics Education, v. 46, n. 6, p. 676-681, 2011.
- [29] T. Nadji, *iPad and weightlessness*, The Physics Teacher, v. 50, n. 5, p. 307, 2012.
- [30] J. Kuhn, P. Vogt, *Smartphones as Experimental Tools: Different Methods to Determine the Gravitational Acceleration in Classroom Physics by Using Everyday Devices*, European Journal of Physics Education, v. 4, n. 1, p. 16-27, 2013.
- [31] B. Van Dusen and V. Otero, *Influencing students' relationships with physics through culturally relevant tools*. In: P. V. Engelhardt, A. D. Churukian, N. S. Rebello (eds.), *2012 Physics Education Research Conference*, p. 410-413, AIP Publishing, 2013.
- [32] D. E. Trowbridge, L. C. McDermott, *Investigation of student understanding of the concept of acceleration in one dimension*, American Journal of Physics, v. 49, n. 3, p. 242-253, 1981.
- [33] M. A. Cavalcante, C. R. C. Tavoraro, *Ondulatória e acústica através de experimentos assistidos por computador*, Anais do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física, Jaboticatubas, MG, 2004.

- [34] A. R. Souza, *Experimentos em ondas mecânicas*, Dissertação de Mestrado em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [35] A. R. Souza, C. E. Aguiar, *Observando ondas sonoras*, Anais do XII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, Lindóia, 2010.
- [36] S. T. Silva, *Propagação do som: conceitos e experimentos*, Dissertação de Mestrado em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [37] S. T. Silva, C. E. Aguiar, *Propagação do som: conceitos e experimentos*, Anais do XIX Simpósio Nacional de Ensino de Física, Manaus, 2011.