

O computador como cronômetro

(Computers as timing devices)

C.E. Aguiar¹ e M.M. Pereira²

¹Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

²Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Recebido em 7/3/2012; Aceito em 10/3/2012; Publicado em 22/10/2012

Experimentos de mecânica frequentemente requerem medidas de intervalos de tempo da ordem de décimos ou centésimos de segundo, difíceis de realizar com cronômetros manuais. Neste trabalho nós apresentamos um método de efetuar tais medidas, utilizando um computador equipado com placa de som e microfone. A ideia básica é simples: como muitos sistemas mecânicos têm sua evolução temporal marcada pela emissão de sons, uma gravação de áudio pode fornecer medidas extremamente precisas dos intervalos de tempo de interesse, mesmo quando eles são muito pequenos. Descrevemos dois experimentos didáticos que utilizam gravações digitais para medir tempos. Em um deles determinamos a velocidade com que uma bola de futebol é chutada. No outro obtemos o tempo de queda livre de um corpo. Descrevemos também a implementação dos experimentos em escolas de ensino médio e apresentamos alguns resultados obtidos pelos estudantes.

Palavras-chave: ensino de física, cronômetro, placa de som.

Experiments in mechanics often require measurements of time intervals of the order of tenths or hundredths of a second, not easily performed with hand-held stopwatches. In this paper we present a method for carrying out such measurements, using a personal computer equipped with sound card and microphone. The basic idea is simple: the time evolution of many mechanical systems can be traced by the sounds they produce, and in these cases an audio recording may provide accurate measurements of the time intervals of interest, even if they are very small. We illustrate this method with two experiments: in one we measure the speed of a hard-kicked soccer ball, and in the other we time the free fall of an object. The experiments were successfully implemented in high-schools and we present some of the results obtained by the students.

Keywords: physics education, timer, sound card.

1. Introdução

Medidas de tempo são fundamentais para a investigação de muitos fenômenos físicos, sobretudo o estudo de movimentos. Nos laboratórios escolares, o instrumento de medida de tempo mais utilizado – e muitas vezes o único disponível – é o cronômetro manual. Isso impõe limitações ao que pode ser realizado nesses laboratórios, pois experimentos didáticos frequentemente requerem o registro de intervalos de tempo bem menores que um segundo, algo difícil de realizar com cronômetros comuns. Embora a precisão de cronômetros manuais chegue atualmente a milésimos de segundo, não é possível utilizá-los para medir acuradamente intervalos de tempo inferiores ao tempo de reação humano, que é da ordem de décimos de segundo. Esse problema geralmente é resolvido com auxílio de cronômetros eletrônicos acoplados a *photogates*. Entretanto, tais equipamentos são relativamente caros e estão fora do alcance da maioria das

escolas brasileiras.

Neste trabalho discutiremos uma técnica simples que permite medir com boa precisão intervalos de tempo muito menores que um décimo de segundo. A medida é realizada utilizando recursos de gravação e análise de som disponíveis em praticamente qualquer computador pessoal. Atualmente, a maior parte das escolas possui computadores para uso de professores e alunos. Como veremos a seguir, essas máquinas podem facilmente ser transformadas em cronômetros capazes de medir intervalos de tempo da ordem de milissegundos.

A possibilidade de se usar um computador como cronômetro está baseada em duas observações. A primeira é que o computador (ou melhor, sua placa de som) pode gravar sinais de áudio com frequência de vários quilohertz. Isso significa que podemos distinguir na gravação intervalos de tempo inferiores a um milissegundo, alcançando uma resolução temporal comparável

¹E-mail: carlos@if.ufrj.br.

à dos melhores photogates. A segunda observação é que muitos experimentos de mecânica podem ser cronometrados a partir do som que produzem. Nesses casos, o registro sonoro do experimento fornece com grande precisão os intervalos de tempo que desejamos medir.

Experimentos didáticos em que o tempo é medido dessa maneira já foram realizados anteriormente [1–5]. No presente trabalho nós descrevemos mais duas aplicações desta técnica. Na seção 2, mostramos como utilizá-la para medir a velocidade de uma bola de futebol chutada pelos alunos (uma versão preliminar do conteúdo dessa seção está publicada na Ref. [6]). Na seção 3 descrevemos a medida do tempo de queda livre de um corpo. Em ambos os casos, os experimentos foram realizados como atividade didática em turmas do ensino médio público do estado do Rio de Janeiro. Resultados obtidos por alunos dessas turmas são apresentados nas seções 2 e 3, juntamente com a discussão de aspectos da execução e análise dos experimentos em sala de aula.

2. Com que velocidade você chutou a bola?

A física dos esportes costuma despertar bastante interesse e curiosidade entre os estudantes. Em particular, medidas de desempenho esportivo individual sempre atraem muita atenção. Descreveremos nesta seção uma forma de medir a velocidade com que uma bola de futebol é chutada pelos alunos. Estamos interessados na velocidade da bola logo após o chute, não em sua velocidade média ao longo da trajetória. Esta última depende de muitos fatores – quiques no chão, altura atingida, resistência do ar – que tornam difícil comparar diferentes chutes. A velocidade média não dependerá tanto desses fatores se for medida num pequeno trajeto partindo do ponto de chute; nesse caso obteremos, em boa aproximação, a velocidade instantânea que a bola adquire ao ser chutada. No entanto, o trajeto curto cria um problema: é difícil medir o tempo que uma bola chutada com força leva para percorrer uma distância de poucos metros. Tempos típicos são da ordem de décimos de segundo, de modo que cronômetros manuais não podem ser utilizados com eficiência. Mesmo photogates não são muito úteis aqui, pois necessitariam de modificações para protegê-los dos efeitos potencialmente destrutivos de uma bolada.

Com um computador munido de placa de som e microfone podemos medir a velocidade da bola facilmente. A montagem do experimento está esquematizada na Fig. 1. A bola é colocada a uma distância conhecida, D , de uma parede. O microfone é conectado à placa de som do computador e colocado em um ponto (protegido de boladas acidentais) aproximadamente equidistante da bola e da parede. A medida consiste, basicamente, em fazer um aluno chutar a bola em direção à parede enquanto o computador registra os sons produzidos no

processo.

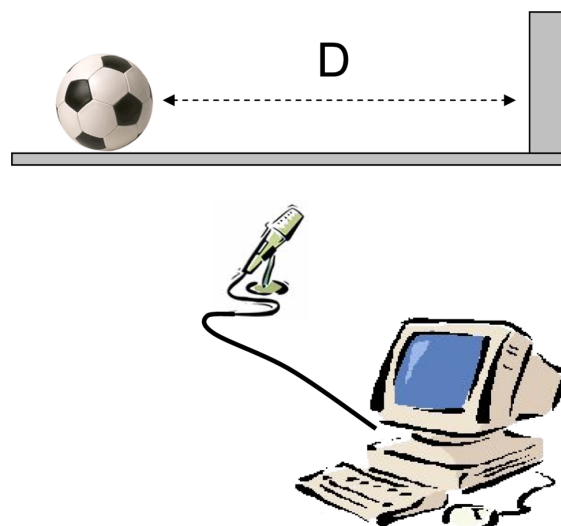


Figura 1 - Montagem do experimento de medida da velocidade da bola.

Existem muitos programas capazes de controlar a gravação e exibir graficamente a forma de onda obtida. Nós utilizamos o *Audacity*, um editor de áudio de alta qualidade disponível gratuitamente na internet [7]. A Fig. 2 mostra o resultado de uma gravação típica, exibida no editor de áudio. O registro da onda sonora apresenta dois pulsos distintos, que correspondem ao chute na bola e à colisão desta com a parede. O início de cada pulso pode ser determinado com precisão de milissegundo com o editor de áudio (todos os programas desse tipo possuem recursos de *zoom* que expandem a escala de tempo). O tempo de voo da bola, T , é a diferença entre esses dois instantes, como mostrado na Fig. 2. Dado o tempo T e a distância D , a velocidade da bola é $V = D/T$. Para o chute mostrado na Fig. 2, $D = 2,5$ m e $T = 0,214$ s, de modo que $V = 42$ km/h.

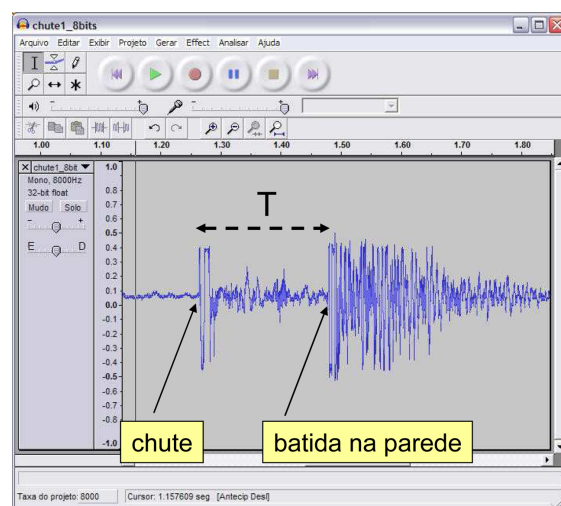


Figura 2 - Onda sonora registrada durante um chute na bola.

A medida do tempo de voo T é tão precisa que a principal fonte de erro no cálculo da velocidade é a in-

certeza no deslocamento da bola. Na maioria dos chutes a bola não percorre o caminho mais curto até a parede, de modo que o comprimento D é apenas um limite inferior para a distância percorrida. Uma forma de minimizar essa incerteza é desenhar uma ‘área-alvo’ na parede e aceitar apenas chutes que a atingem. Se essa área for suficientemente pequena é possível manter a incerteza na distância dentro de limites aceitáveis. Uma precaução que não deve ser esquecida é colocar o microfone numa posição equidistante da bola e da parede, pois isso cancela os atrasos associados à propagação do som.

O experimento descrito acima foi realizado como atividade didática regular em turmas do ensino médio de escolas públicas do estado do Rio de Janeiro. As medidas foram feitas com facilidade mesmo quando as turmas eram relativamente grandes. Utilizamos computadores portáteis (*netbooks*), que foram compartilhados por grupos de 3–4 alunos durante a aquisição e análise de dados. Se esses computadores não estiverem disponíveis, ou não forem em número suficiente, uma alternativa viável é utilizar gravadores de *mp3* (algo que os alunos frequentemente carregam consigo) e mais tarde transferir o arquivo de áudio para o computador onde será feita a análise.

A discussão dos resultados das medidas realizadas pelos alunos revelou-se uma ótima oportunidade para introduzir métodos estatísticos de análise de dados. A velocidade média dos chutes, a dispersão em torno dessa média, a correlação da velocidade com características físicas do autor do chute (altura, idade, etc.) são temas que interessam aos estudantes e podem ser explorados com proveito. A Fig. 3 mostra um exemplo disso. Ela descreve a distribuição das velocidades obtidas com 80 alunos de três turmas da mesma escola, cada um dando um único chute. A velocidade média das bolas foi 38 km/h, com um desvio padrão de 12 km/h. Quanto à influência das características pessoais na potência do chute, o gráfico da Fig. 4 mostra a velocidade da bola versus a altura do estudante que a chutou. Os pontos claros correspondem às alunas e os escuros aos alunos. Pode-se notar que, em média, os meninos chutam um pouco mais forte que as meninas. Curiosamente, dentro de um dado grupo (meninas ou meninos) não parece haver correlação entre a altura do estudante e a velocidade que ele imprime à bola.

A realização das medidas tornou possível abordar vários aspectos do conceito de velocidade numa situação concreta, pertencente ao ‘mundo real’ dos estudantes e capaz de atrair o interesse da maior parte deles. As medidas de velocidade da bola também são um bom ponto de partida para discussões sobre a física do futebol. É possível, por exemplo, investigar se a resistência do ar é importante quando a bola move-se com as velocidades típicas encontradas no experimento [8, 9]. Outra possibilidade interessante é usar leis de conservação para estimar quão rapidamente o pé deve mover-se para

imprimir essas velocidades à bola [10].

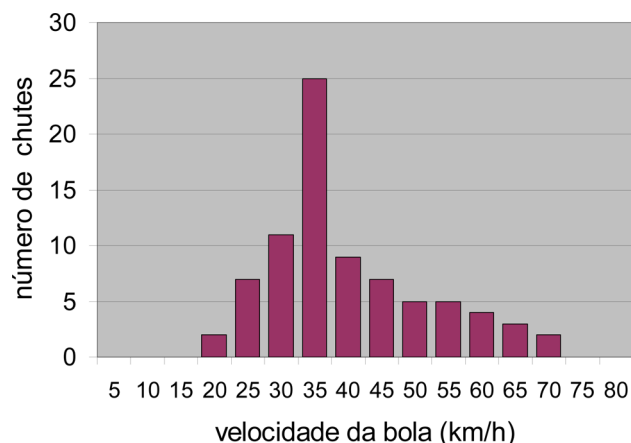


Figura 3 - Distribuição das velocidades das bolas chutadas pelos alunos.

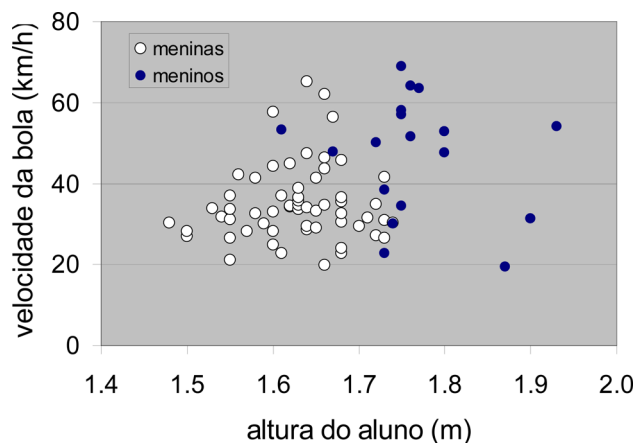


Figura 4 - Velocidade da bola *vs.* altura do estudante que a chutou.

3. Tempo de queda livre

A segunda aplicação que faremos da ‘cronometragem sonora’ é à medida do tempo de queda de um corpo. Para um objeto que cai de uma altura h , partindo do repouso, o tempo de queda é dado por

$$t = \sqrt{2h/g}, \quad (1)$$

onde g é a aceleração da gravidade. Este é um dos resultados mais conhecidos pelos estudantes de cursos introdutórios de mecânica. Apesar disso, é difícil encontrar experimentos didáticos simples, realizáveis com régua e cronômetro, que verifiquem sua validade. É fácil entender o motivo da dificuldade. Para alturas da ordem de um metro, o tempo de queda do corpo é cerca de meio segundo, pequeno demais para ser medido acuradamente com cronômetros de mão. Podemos obter tempos de queda maiores partindo de alturas maiores, mas a raiz quadrada na Eq. (1) não favorece essa

solução: para dobrar o tempo necessitamos quadruplicar a altura. Uma queda de dois segundos, por exemplo, precisa de uma altura inicial de aproximadamente vinte metros, muito grande para experimentos realizados no interior de uma sala de aula ou laboratório. Outro problema de se usar grandes alturas é que altas velocidades são alcançadas ao final da queda, e nesse caso a resistência do ar pode invalidar a Eq. (1).

Galileu superou essas dificuldades com auxílio de seu plano inclinado, e os laboratórios didáticos modernos fazem o mesmo com fotogates. As gravações de áudio fornecem uma alternativa mais precisa que a de Galileu e mais econômica que os fotogates. O procedimento (proposto originalmente na Ref. [11]) é muito simples e está esquematizado na Fig. 5.

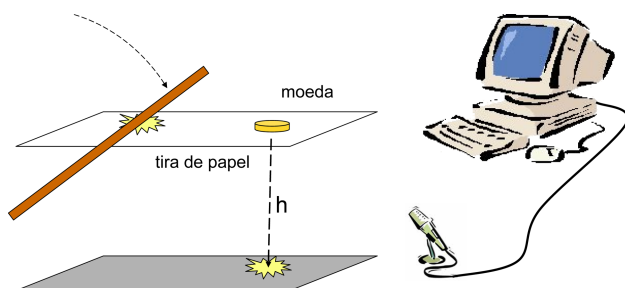


Figura 5 - Experimento para medição do tempo de queda de um corpo.

Uma moeda (ou algum outro objeto pequeno) é colocada sobre uma tira de papel que está a uma dada altura h do solo. Em seguida, a tira é golpeada com força, de modo a rompê-la. Com isso a moeda perde a sustentação do papel e cai.

A Fig. 6 mostra a gravação do som produzido nesse processo. O microfone foi colocado à meia altura entre o papel e o solo, para cancelar os atrasos associados à propagação do som. Dois pulsos sonoros podem ser vistos (e ouvidos) na gravação. O primeiro corresponde ao golpe dado na tira de papel e o segundo ao choque da moeda com o chão (os pulsos seguintes são produzidos pelos quiques após a queda). O intervalo entre os dois primeiros pulsos é o tempo de queda t . No experimento mostrado na Fig. 6, a moeda caiu de uma altura $h = 96,1$ cm. Tomando $g = 9,79$ m/s² (a aceleração da gravidade no Rio de Janeiro), o tempo de queda previsto pela Eq. (1) é $t = 0,443$ s. O tempo de queda medido na gravação da Fig. 6 é $t = 0,449$ s. A diferença entre o resultado previsto pela Eq. (1) e o encontrado na medida é da ordem de 1%. Esta é uma ótima precisão (principalmente quando se considera a simplicidade do experimento), impossível de ser alcançada com cronômetros manuais.

Uma das fontes de erro no experimento é a determinação da altura de queda. Se a fita for segura com as mãos, movimentos involuntários podem alterar sua distância ao solo. Nesse caso é útil prender ao papel um fio de prumo de comprimento h e baixá-lo até que encoste no chão. Isso torna mais simples controlar a al-

tura e mantê-la num valor bem determinado. A forma da moeda também introduz algum erro: a distância de queda será diferente se a moeda cair “em pé” ou “deitada”. Esse problema pode ser eliminado trocando a moeda por uma esfera (uma bolinha de gude, por exemplo). Um pequeno orifício no papel pode ajudar a equilibrar a esfera sobre a fita.

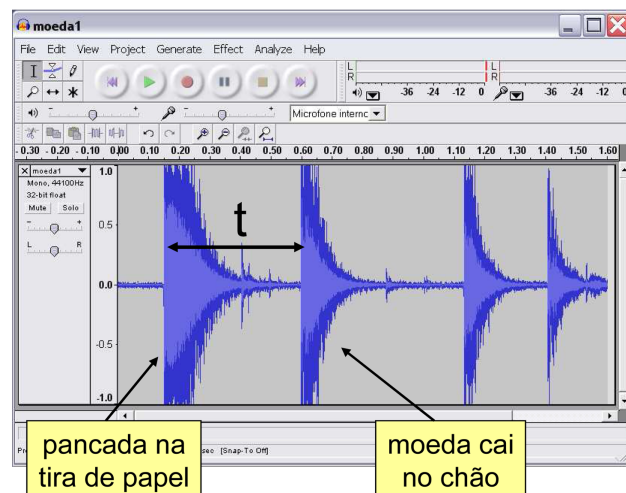


Figura 6 - Gravação do som produzido durante o experimento.

O experimento foi testado com sucesso em atividades didáticas regulares realizadas em turmas do ensino médio público do Rio de Janeiro. Assim como nas medidas de velocidade da bola, relatadas na seção anterior, utilizamos em cada turma um conjunto de netbooks compartilhados por pequenos grupos de alunos. Como os grupos quase sempre escolhem alturas h diferentes para suas medidas, é instrutivo combinar durante a aula os resultados obtidos por diferentes equipes. A Fig. 7 mostra as medidas realizadas por alunos de duas turmas, agregadas em um único gráfico de $h \times t$. No gráfico, a curva tracejada representa a “lei de queda dos corpos” $h = (1/2)gt^2$, com $g = 9,79$ m/s². Podemos notar que os pontos medidos pelos diferentes grupos de alunos estão muito próximos da previsão teórica. A Fig. 8 mostra o gráfico de $h \times t^2/2$. Este gráfico é útil pois permite obter facilmente a aceleração gravitacional g , dada pelo coeficiente angular da reta que melhor descreve os pontos medidos. Os dados obtidos pelos alunos resultaram em $g = 9,83$ m/s². A diferença entre essa medida e o valor de g no Rio de Janeiro é 0,4%, uma discrepância notavelmente pequena.

A possibilidade de fazer as mesmas medidas utilizando cronômetros manuais foi investigada por alguns grupos de alunos. Os resultados estão nas Figs. 9 e 10. As diferenças em relação às medidas feitas com o som são flagrantes. Com cronômetros não é sequer evidente que a equação $h = (1/2)gt^2$ seja válida, como mostra a Fig. 9. Mesmo aceitando essa equação, a aceleração gravitacional obtida a partir do ajuste feito na Fig. 10 é $g = 8,70$ m/s². A discrepância relativa ao valor esperado é de aproximadamente 10%, mais de vinte vezes

maior que os 0,4% encontrados com a gravação sonora.

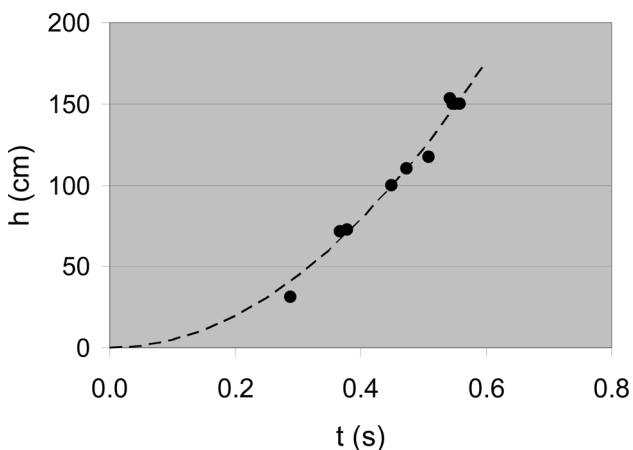


Figura 7 - Comparação entre as medidas de diferentes grupos de estudantes e a “lei de queda dos corpos” $h = (1/2)gt^2$.

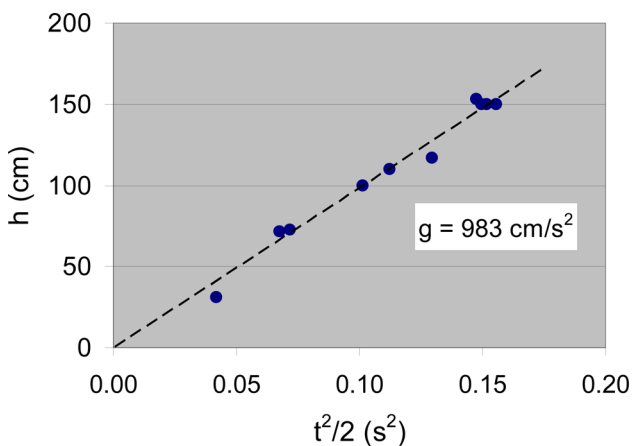


Figura 8 - Gráfico de $h \times t^2/2$, mostrando os pontos medidos pelos estudantes e a reta que melhor se ajusta a eles. Do ajuste obtém-se que a aceleração da gravidade é $g = 9,83 \text{ m/s}^2$.

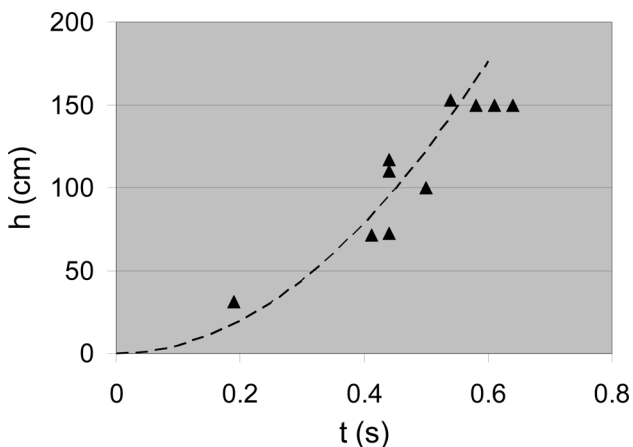


Figura 9 - O mesmo que na Fig. 7, porém com medidas realizadas com cronômetros manuais.

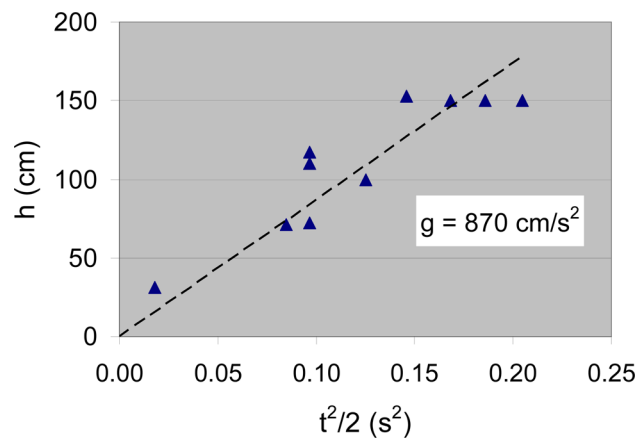


Figura 10 - O mesmo que na Fig. 8, porém com medidas realizadas com cronômetros manuais. O valor obtido para a aceleração gravitacional é $g = 8,70 \text{ m/s}^2$.

4. Comentários finais

Um computador equipado com placa de som e microfone é um instrumento de laboratório útil e versátil, embora tal fato nem sempre seja reconhecido. O estudo de fenômenos sonoros é a primeira (e mais óbvia) utilização que se costuma imaginar para esse equipamento, mas aplicações em muitas outras áreas são possíveis. Neste trabalho nós vimos como os recursos de áudio do computador podem ser usados para realizar experimentos didáticos de mecânica. Com uma gravação digital somos capazes de medir intervalos de tempo da ordem de centésimo de segundo (e até menos), o que permite realizar experimentos que seriam impraticáveis com cronômetros manuais. As medidas da velocidade da bola e do tempo de queda que descrevemos no presente trabalho são bons exemplos do que pode ser feito com essa técnica, mas nem de longe esgotam suas possibilidades de aplicação.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj).

Referências

- [1] I. Stensgaard and E. Lægsgaard, American Journal of Physics **69**, 301 (2001).
- [2] M.A. Cavalcante, E. Silva, R. Prado e R. Haag, Revista Brasileira de Ensino de Física **24**, 150 (2002).
- [3] C.E. Aguiar and F. Laudares, American Journal of Physics **71**, 499 (2003).
- [4] J.A. White, A. Medina, F.L. Román and S. Velasco, The Physics Teacher **45**, 175 (2007).

- [5] R. Barrio-Perotti, E. Blanco-Marigorta, K. Argüelles-Díaz and J. Fernández-Oro, *European Journal of Physics* **30**, 1039 (2009).
- [6] C.E. Aguiar and M.M. Pereira, *The Physics Teacher* **49**, 33 (2011).
- [7] *Audacity*, <http://audacity.sourceforge.net>.
- [8] C.E. Aguiar e G. Rubini, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **26**, 297 (2004).
- [9] J. Wesson, *The Science of Soccer*, (IoP Publishing, Bristol and Philadelphia, 2002).
- [10] A. Vieira, *The Physics Teacher* **44**, 286 (2006).
- [11] J.L. Hunt, *The Physics Teacher* **43**, 412 (2005).