

O TEMPO DE QUEDA DE OBJETOS LANÇADOS DO ALTO DE UM EDIFÍCIO: UM EXPERIMENTO DIDÁTICO DO IFUSP

Zwinglio Guimarães-Filho, Alexandre Correia, Alexandre Suaide, José Fernando Chubaci, Leandro Gasques, Marco Bregant, Raphael Liguori Neto

Instituto de Física da USP, zwinglio@if.usp.br

Palavras-chave: Laboratório didático; Modelo de queda livre; Tempo de reação.

O estudo da queda de objetos no ar é muito usado como experimento didático em disciplinas de física experimental, em geral, tendo como foco a determinação da aceleração da gravidade no local do experimento (GUIMARÃES-FILHO, 2005). A queda é interessante por ser um fenômeno comum no cotidiano e por estar relacionada ao início do desenvolvimento da Mecânica Newtoniana.

Em 2012, foi introduzido no curso de Física Experimental I do IFUSP (para o bacharelado em Física, Geofísica, Meteorologia e Astronomia) uma atividade baseada na queda de objetos lançados do topo do Edifício Oscar Sala (o mais alto do IFUSP, onde fica o acelerador *Pelletron*). Inicialmente, os objetos utilizados eram bexigas (usadas em festas infantis) enchidas de água e lançadas manualmente pelos professores com uma pequena velocidade horizontal, para evitar que caíssem sobre um corredor lateral de $\sim 3\text{ m}$ de largura. Os objetos eram lançados pouco acima de uma grade de proteção, de modo que a altura de queda era $\Delta H = (34,5 \pm 0,5)\text{ m}$.

Um dos objetivos do experimento é mostrar a flutuação dos resultados de medições feitas nas mesmas condições e, com base nisso, introduzir os conceitos de desvio-padrão e de desvio-padrão da média (VUOLO, 1996), assim como salientar a importância de se realizar medições de qualidade. O procedimento começa com algumas medidas preliminares para que os alunos se acostumem com o fenômeno e com o procedimento de cronometragem. Essas medidas não são usadas na análise.

Em seguida, é efetuada uma série de lançamentos e os tempos de queda são registrados de acordo com o número do lançamento. Os alunos são instruídos a não registrar as medições em que houver problemas, como falha no acionamento do cronômetro ou desatenção. Após as medições, os alunos transcrevem os dados em uma planilha e os enviam para os professores. A dispersão das medidas de todos os alunos em um mesmo lançamento é usada para mostrar que medições equivalentes de um mesmo fenômeno (mesma queda) podem resultar em valores diferentes, reforçando a importância de se associar uma incerteza às medições.

Essas medidas servem para introduzir o conceito de desvio-padrão amostral como forma de estimar a incerteza em cada dado devido a erros aleatórios e para demonstrar o uso de histogramas. Nota-se que os desvios-padrões amostrais dos grupos são similares, entre $0,07\text{ s}$ e $0,13\text{ s}$. A incerteza do valor médio é discutida com base no argumento de que a incerteza da média devido a erros aleatórios deve ser menor que a de cada dado, introduzindo o conceito de desvio-padrão da média.

Com isso, cada grupo obtém o valor médio do tempo de queda, $\overline{\Delta t}$, com sua respectiva incerteza, e calcula a velocidade vertical média, $v_m = \Delta H / \overline{\Delta t}$, e a aceleração equivalente para percorrer a distância ΔH a partir do repouso com aceleração constante, $a = \Delta H / (2\overline{\Delta t}^2)$. O modelo de queda livre com velocidade vertical inicial nula prevê que a seja a aceleração da gravidade, $g = 9,7864\text{ m/s}^2$.

Após as análises de cada grupo, os dados de todos os alunos que realizaram as medidas nas mesmas condições são coletados pelos professores, embaralhados e disponibilizados para análises adicionais. Nestas análises, é feito o histograma dos dados compilados e se observa que o desvio-padrão amostral é similar ao obtido usando as medidas do grupo. Isso possibilita reforçar o conceito de que o desvio-padrão corresponde à incerteza de cada um dos dados devido a erros aleatórios e, portanto, que é razoável que sua estimativa (o desvio-padrão amostral) não dependa de forma significativa da quantidade de dados medidos (VUOLO, 1996).

Os dados de todos os alunos também são utilizados para demonstrar que o desvio-padrão da média corresponde à dispersão (esperada) de médias. Para isso, gera-se conjuntos de médias de n em n dados (o que reduz por um fator n o número de dados no conjunto) e se observa que o desvio-padrão amostral é similar ao desvio-padrão da média de n dados originais. É fundamental que os dados tenham sido embaralhados, para separar as medidas de cada pessoa, uma vez que há uma pequena componente sistemática em cronometragens manuais.

Assim, é importante ter um conjunto grande de dados medidos em condições equivalentes. Porém, como pode ser visto na **Figura 1(a)**, os dados medidos nos anos de 2012, 2013 e 2014, em que o lançamento manual dos balões foi utilizado, não eram equivalentes entre as turmas. As diferenças são grandes e não podem ser atribuídas às condições de iluminação, o que seria razoável uma vez que no Noturno os alunos só sabiam do lançamento pelo aviso sonoro feito por quem lançava os balões. A principal causa desta diferença é o procedimento de lançamento, uma vez que não é razoável supor que os balões sejam lançados apenas com velocidade horizontal.

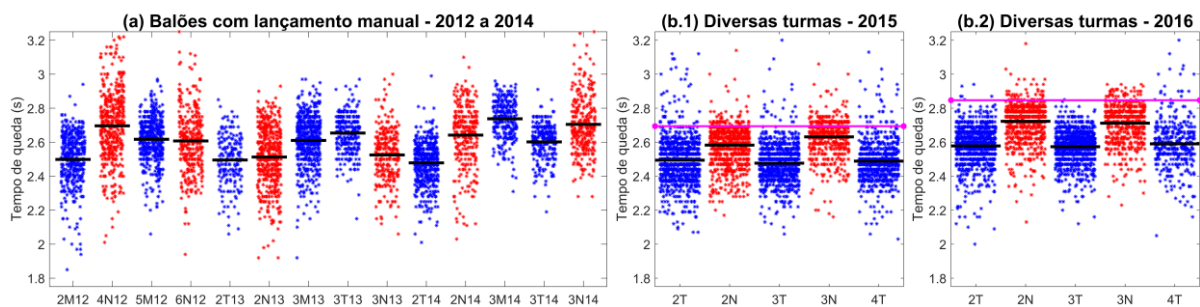


Figura 1: (a) Dispersão das medidas de tempo de queda de balões com água em lançamento manual. (b) Dispersão com o uso da primeira versão do lançador usando bolas com água (2015) e bolas de tênis (2016). Dados em azul correspondem ao Diurno e em vermelho ao Noturno e as linhas em preto aos valores médios correspondentes. A linha roxa contínua em 2015 e 2016 indica a média dos tempos por filmagens em câmera lenta.

Para melhorar a reprodutibilidade do experimento, em 2015 foi construído um dispositivo para o lançamento das bolinhas que consistia em um tubo de flexível de ~ 15 cm de diâmetro apoiado na base da grade de proteção, reduzindo a altura para $\Delta H' = (34,0 \pm 0,5) m$. Há uma foto do dispositivo em (GUIMARAES-FILHO, c2023). Os objetos passaram a ser bolinhas de plástico de 76 mm de diâmetro que eram furadas, enchidas de água e depois tapadas com fita adesiva. Um sensor ótico disparava um sinal luminoso sincronizado com a saída das bolinhas para indicar o início das quedas no Noturno. Isso tornou as medidas reprodutíveis [Figura 1(b.1)], porém, com diferenças significativas entre os períodos, com os tempos do Diurno bem menores e resultando em uma aceleração de queda maior que a gravidade.

A **Figura 1(b.2)** mostra que, em 2016, a diferença entre os períodos se manteve quando os objetos passaram a ser bolas de Tênis, que apesar de menos

densas que as bolinhas de plástico com água, não se estragam quando chegam ao chão. A mudança no tempo de queda ($\sim 0,13\text{ s}$, cerca de um desvio-padrão amostral) indica que o modelo de queda livre não é adequado, ao menos para as bolas de Tênis. De fato, a solução numérica da equação de movimento considerando uma força de arraste adequada ao número de Reynolds fornece tempos de queda de $2,72(3)\text{ s}$ para a bolinha com água e de $2,85(4)\text{ s}$ para a bola de Tênis (GUIMARAES-FILHO, c2023).

A **Figura 2** mostra que a distribuição dos tempos medidos nos dois períodos é diferente, sendo bastante assimétrica no Noturno. Isso se manteve quando o lançador foi substituído, em 2019, por uma estrutura montada com canos de PVC de 10 cm de diâmetro e com um refletor LED colocado ao lado do cano, para que no Noturno também fosse possível ver a saída da bola (GUIMARAES-FILHO, c2023).

A interpretação dos resultados requer uma análise cuidadosa do procedimento experimental: todos iniciam a cronometragem atrasados em relação ao momento em que, de fato, a bola inicia a queda, pois a informação visual começa quando a bola sai do tubo. No Diurno, os alunos acompanham a trajetória da bola durante toda a queda e, portanto, procuram interromper a cronometragem juntamente com a colisão com o chão. Por outro lado, no Noturno a trajetória da bola não é visível durante a maior parte da queda e, portanto, a cronometragem é interrompida após a colisão, compensando, em parte o atraso para inicia-la.

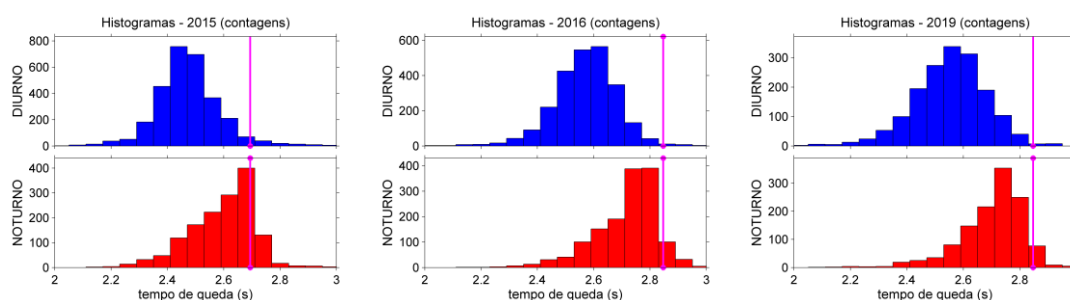


Figura 2: Histograma dos tempos de queda em diversos anos. A linha em roxo indica a média dos tempos com filmagens em câmera lenta para o tipo de bolinha correspondente.

Assim, a média dos tempos medidos nos dois períodos são sistematicamente menores que o tempo de queda, sendo essa diferença mais pronunciada no Diurno, caso em que deve corresponder, aproximadamente, ao tempo de reação a estímulos visuais. De fato, a média do tempo de queda obtida por filmagens em câmera lenta com celulares é cerca de $0,25\text{ s}$ maior que a média das medidas do Diurno.

Este trabalho ilustra a importância do controle experimental e do entendimento do procedimento de medição para que se possa interpretar adequadamente os resultados experimentais, conteúdos fundamentais nas disciplinas de Física Experimental voltadas para a formação em ciências naturais.

Referências

- GUIMARÃES-FILHO, Z.O. et al., ***Aprendendo física com o uso de experimentos de grande precisão em laboratórios didáticos: o estudo da queda de um corpo***, in: XVI SNEF, 2005, Rio de Janeiro-RJ. Anais do XVI SNEF, disponível em: <https://sec.sbfisica.org.br/eventos/snef/xvi/cd/resumos/T0291-3.pdf>, acesso: 26/06/23
- VUOLO, J.H., ***Fundamentos da Teoria de Erros***, Ed. Edgard Blücher, 2ª Ed, 1996.
- GUIMARAES-FILHO, Z.O., **Material suplementar sobre o experimento de queda**, c2023, <http://www.fap.if.usp.br/~zwinglio/queda.html>, acesso: 09/07/2023.