

## APRENDENDO FÍSICA COM O USO DE EXPERIMENTOS DE GRANDE PRECISÃO EM LABORATÓRIOS DIDÁTICOS: O ESTUDO DA QUEDA DE UM CORPO

Zwinglio O. Guimarães-Filho<sup>a</sup> [zwinglio@if.usp.br]

Leandro Mariano<sup>a</sup> [lmariano@if.usp.br]

Pedro B. Mendonça<sup>a</sup> [pedro@if.usp.br]

Aline Regis Faro<sup>a</sup> [afaro@fge.if.usp.br]

Ricardo B. Malaquias<sup>a,b</sup> [ricardo.malaquias@polytechnique.fr]

<sup>a</sup> Instituto de Física da Universidade de São Paulo

<sup>b</sup> École Polytechnique, França

### RESUMO

Relatamos o caso de um estudo efetuado no Instituto de Física da USP sobre um experimento onde se analisa a queda de um corpo. Apresentamos como o aumento de precisão, conseguido ao se acumular informações experimentais (resultado de uma dupla, resultados de uma turma, resultados de muitos anos), levou à melhora do conhecimento sobre a Física envolvida e deu origem a análises sobre possíveis efeitos, efetuadas por alunos da disciplina de modo semelhante ao utilizado no meio científico. Os resultados demonstraram que os efeitos devidos à presença do ar (Empuxo e Força de Arraste) eram os responsáveis pela diferença de ~0,35% entre a aceleração de queda determinada experimentalmente e a aceleração da gravidade no local, sendo o efeito da Força de Arraste o principal responsável por esta diferença (~0,30% contra ~0,05%).

### INTRODUÇÃO

Os dados experimentais obtidos em aulas de laboratório didático são muitas vezes considerados pelos alunos como de baixa qualidade, principalmente quando envolvem medições não “automatizadas” como é o caso, por exemplo, de comprimentos determinados com o uso de uma régua ou trena. Por outro lado, os alunos costumam considerar que o objetivo das atividades do laboratório didático é o de “mostrar” a validade de modelos teóricos “consagrados” para descrever os fenômenos experimentais observados. Esta combinação de valores é altamente prejudicial para a aquisição da confiança em resultados experimentais e para a construção da postura crítica frente às limitações dos modelos físicos. A modificação de dados, com o objetivo de tornar os resultados mais próximos aos previstos pela teoria, é uma das piores conseqüências destas posturas, pois leva ao estabelecimento de um círculo vicioso e compromete a compreensão do significado das ciências naturais.

No planejamento das atividades das disciplinas de Física Experimental I e II do IFUSP, ministradas para ingressantes dos bacharelados em Física, Geofísica e Meteorologia, o combate a estas concepções tem sido considerado de fundamental importância e atacado desde os primeiros contatos com as atividades experimentais. Entre as estratégias didáticas utilizadas nesta tarefa destacam-se: o uso de atividades onde os resultados não podem ser previstos a priori; o compartilhamento de informações obtidas por diferentes medidores; e a fundamentação das conclusões no conceito de incerteza.

Neste trabalho relatamos o caso de um estudo efetuado no Instituto de Física da USP sobre a queda de um corpo, apresentando como o aumento de precisão, conseguido ao se acumular

informações experimentais (resultado de uma dupla, resultados de uma turma, resultados de muitos anos), levou à melhora do conhecimento sobre a Física envolvida e deu origem a uma série de análises sobre os possíveis efeitos (efetuadas por alunos da disciplina), de modo semelhante ao utilizado no meio científico.

## EVIDÊNCIAS EXPERIMENTAIS

O experimento consiste<sup>[1]</sup> na análise da queda de um corpo de formato aproximadamente oval que cai entre dois fios submetidos a pulsos de alta tensão sincronizados com a rede elétrica. Um anel metálico ao redor do corpo (“ovinho”) permite que faíscas sejam transmitidas entre os dois fios, marcando uma fita de papel encerado colocada entre o ovinho e um dos fios, registrando, assim, as posições do corpo em intervalos de tempo iguais ao período da rede elétrica. Considerando que a força resultante ( $F_R$ ) sobre o corpo seja constante ao longo da queda, a aceleração de queda ( $a$ ) também será constante e a relação funcional esperada entre a velocidade do ovinho ( $v$ ) e o tempo ( $t$ ) durante a queda é do tipo:

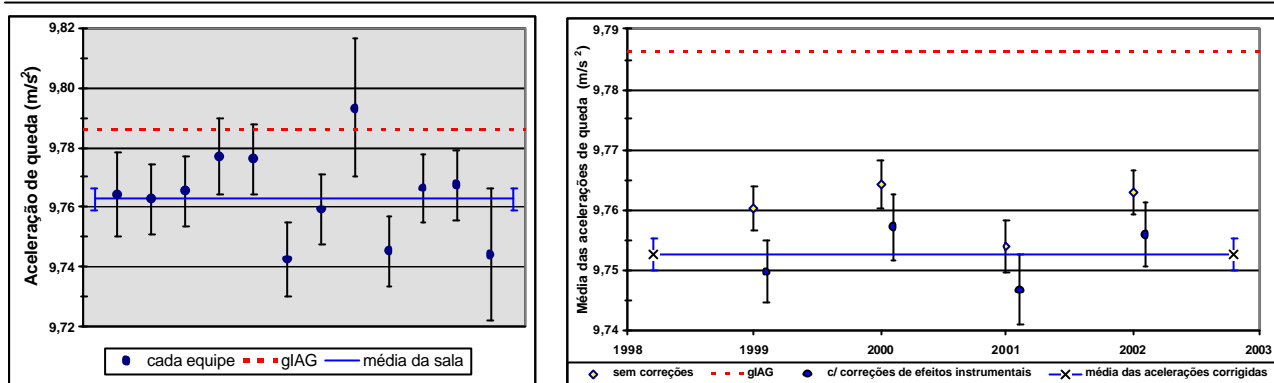
$$v = v_0 + a \cdot t \quad (1)$$

onde  $v_0$  corresponde à velocidade do ovinho no início da contagem de tempo. O modelo inicialmente proposto é o de queda livre que considera a força peso como a única força atuante sobre o corpo. Segundo este modelo, a aceleração de queda deve ser a aceleração da gravidade no local, que nos laboratórios didáticos do IFUSP é conhecida com grande precisão (pois foi determinada por pesquisadores do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP usando um gravímetro) resultando em  $g_{IAG}=9,786\ 4\ (3)\ \text{m/s}^2$ .

Cada equipe de alunos (geralmente duplas) coleta e analisa os dados de uma queda, determinando, a partir das posições marcadas na fita de papel encerado, as velocidades médias entre intervalos de tempo correspondentes a dois ciclos da rede elétrica. Estas velocidades médias são consideradas iguais às velocidades instantâneas do corpo no tempo médio do intervalo (onde se considera que a aceleração seja constante neste intervalo de tempo). Da relação entre a velocidade do corpo e o tempo, equação (1), são determinadas a aceleração média de queda ( $a$ ) e a velocidade inicial do corpo ( $v_0$ ) através de um ajuste de reta usando o Método dos Mínimos Quadrados.

Com os resultados obtidos individualmente pelas equipes neste ajuste não é possível perceber problemas com a consideração inicial de que a força resultante seja constante ao longo de toda a queda. Porém, considerando o conjunto de acelerações médias de queda obtidas por todas as equipes de uma turma de ~20 alunos, Figura 1a, nota-se que as acelerações médias de queda são sistematicamente inferiores ao valor da aceleração da gravidade no local ( $g_{IAG}$ ), sendo a média das acelerações de queda incompatível com essa, embora o resultado de cada uma das equipes não o seja.

A reprodutibilidade destes resultados pode ser percebida através da compilação dos resultados obtidos por diversas turmas ao longo de vários anos, mostrada na Figura 1b. Nela se verifica que as médias das acelerações de queda obtidas por diferentes turmas ao longo de diversos anos são compatíveis entre si e incompatíveis com a aceleração da gravidade no local ( $g_{IAG}$ ). Estes resultados foram discutidos com os alunos e foram então levantadas algumas hipóteses sobre as prováveis origens destas diferenças entre a previsão do modelo simples e os resultados experimentais, que podem ser classificadas em dois grupos: (i) motivos instrumentais e (ii) motivos físicos.



**Figura 1 – (a) Acelerações de queda obtidas pelas equipes de uma única turma (2 002); (b) Média das acelerações de queda obtidas por diversas turmas ao longo de vários anos.**

A importância de se considerar eventuais motivos instrumentais se justifica pela elevada precisão alcançada pela média global das acelerações de queda,  $a_m=9,760\ 8(19)\ m/s^2$ , ou seja, incerteza relativa de 0,019%. Os motivos instrumentais considerados foram: (i.1) erro nas escalas das réguas disponíveis no laboratório didático, o que levaria a um efeito sistemático residual e (i.2) diferença entre a frequência da rede elétrica e seu valor nominal de 60 Hz que foi utilizado para determinar o tempo em todas as análises. Os motivos físicos considerados foram: (ii.1) força de empuxo do ar; (ii.2) força de resistência do ar; e (ii.3) força de atração gravitacional entre o corpo e a Lua e/ou o Sol (hipótese levantada na discussão com os alunos).

Os estudantes de uma sala foram convidados a se dividir em equipes para investigar cada um dos motivos de acordo com suas preferências (quanto ao assunto ou aos procedimentos a serem empregados). Os resultados destas investigações, apresentados a seguir, foram divulgados para todas as turmas na Aula Síntese da disciplina<sup>1</sup>.

### Investigação dos motivos Instrumentais

(i.1) Erro nas escalas das réguas disponíveis no laboratório didático<sup>2</sup> - As escalas das réguas foram comparadas com a de um paquímetro especial com fundo de escala (f.e.) de 50 cm e menor divisão (m.d.) de 0,05 mm. Todas as 53 réguas acrílicas de m.d. 1 mm e f.e. de 40 cm (modelo *Desetec 7140*) disponíveis no laboratório e uma amostra de ~20 escalas metálicas de 50 cm e de 60 cm de f.e. e 0,5 mm de m.d. foram investigadas. As escalas das réguas acrílicas revelaram diferenças sistemáticas correspondendo a fatores de correção para a aceleração de queda de 0,998 65(14) e 0,999 35(14), respectivamente para as réguas dos lotes de 1995 e 2000. As escalas metálicas não apresentaram diferenças perceptíveis em 50 cm.

(i.2) Diferença entre a frequência da rede elétrica e seu valor nominal<sup>3</sup> - O sinal da rede elétrica foi analisado em osciloscópios digitais e sua frequência determinada com relação ao padrão de tempo dos osciloscópios utilizados (frequências máximas de amostragem de 100 MHz, 400 MHz e 1 GHz). Os valores determinados para a frequência da rede elétrica foram sempre compatíveis com o valor nominal, sendo as incertezas limitadas pelo padrão de tempo dos osciloscópios.

<sup>1</sup> A aula Síntese é uma aula especial conjunta para todas as turmas ministrada em um sábado, aproximadamente na metade do semestre, que tem por objetivo auxiliar os alunos a refletirem e organizarem os conceitos envolvidos nas diversas atividades da disciplina. Maiores detalhes sobre a Aula Síntese, podem ser obtidos na referência 2.

<sup>2</sup> Airton Sebastião Gaudenci Filho, Fábio Calixto Cabral e Leandro Cardoso Costa.

<sup>3</sup> Aline Regis Faro e Gustavo Rocha sa Silva.

Utilizando os resultados de (i.1) e (i.2), foram obtidas as acelerações de queda corrigidas para os efeitos instrumentais ( $a_{cor}$ ), apresentados na Figura 1b, que se distanciam ainda mais da aceleração da gravidade no local, já que as escalas das réguas acrílicas empregadas são sistematicamente menores que seus valores nominais (há também um pequeno aumento de incerteza por conta da incerteza com que foram determinados os fatores de correção).

### Investigação dos motivos Físicos

Como o resultado corrigido é incompatível com o previsto pelo modelo de queda livre ( $a_{cor}=9,752\ 5(27)\text{ m/s}^2$  enquanto  $g_{IAG}=9,786\ 4(3)\text{ m/s}^2$ ) foi necessário aprimorar o modelo (e conseqüentemente aprender mais sobre a Física envolvida). Mantendo a aproximação de que a aceleração de queda possa ser considerada constante ao longo da queda, esta aceleração se relaciona com as forças atuantes sobre o ovinho por:

$$a^{\#} = \frac{\sum F}{m} = g + \Delta a_{(ii.1)} + \Delta a_{(ii.2)} + \Delta a_{(ii.3)} \quad (2)$$

onde  $\Delta a_{(ii.x)}$  corresponde à alteração da aceleração média de queda devida à força considerada no efeito (ii.x) e  $m$ , a massa média dos ovinhos utilizados, é  $84,3(5)\text{ g}$ .

(ii.1) Empuxo<sup>4</sup> – A força de empuxo sobre o ovinho é dada por  $E = -\mathbf{r}_{ar} \cdot V_{ovo} \cdot g$ , onde  $\mathbf{r}_{ar}$  é a densidade do ar ( $1,11(4)\text{ kg/m}^3$  na média das condições dos experimentos realizados),  $V_{ovo}$  é o volume do ovinho ( $41(3)\text{ cm}^3$ ). O efeito do empuxo é, portanto,  $\Delta a_{(ii.1)} = -0,0052(4)\text{ m/s}^2$ .

(ii.2) Atrito com o ar<sup>5, 6</sup> – A força de resistência do ar no caso deste experimento é devida basicamente aos efeitos da inércia do fluido (“tirar o ar da frente”), pois o número de Reynolds varia entre  $5 \cdot 10^2$  e  $1,4 \cdot 10^4$  ao longo da queda. Assim, a força de resistência do ar pode ser calculada por  $F_{ar} = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \mathbf{r}_{ar} \cdot A_{ovo} \cdot v^2$ , onde  $A_{ovo}$  é a área frontal do ovinho durante a queda ( $9,15(10)\text{ cm}^2$ ) e  $C_D$  é o coeficiente de arraste, que depende tanto da forma do corpo quanto do número de Reynolds. Para uma esfera nesta faixa de número de Reynolds o valor de  $C_D$  é aproximadamente constante e igual a  $\sim 0,45$  e para o ovinho foi considerado  $C_D=0,45(10)$ , o que leva a  $\Delta a_{(ii.2)} = -0,029\ 4(65)\text{ m/s}^2$ , calculado usando a força de atrito com o ar média ao longo da queda.

(ii.3) Atração gravitacional do corpo pela Lua e pelo Sol<sup>7</sup> – A força de atração gravitacional entre dois corpos de massas  $M_1$  e  $M_2$  é  $F_G = \frac{G \cdot M_1 \cdot M_2}{d_{12}^2}$ , onde  $G$  é a constante de gravitação universal ( $\sim 6,67 \cdot 10^{-11}\text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ ) e  $d_{12}$  é a distância entre os centros de massa dos corpos. Assim, para a Lua ( $M_{Lua} \sim 7,3 \cdot 10^{22}\text{ kg}$  e  $d_{ovo-Lua} \sim 3,8 \cdot 10^8\text{ m}$ ) a razão entre a força de atração gravitacional e a massa do ovinho é de  $\sim 0,000\ 034\text{ m/s}^2$ , portanto desprezível frente às incertezas experimentais, e para o Sol ( $M_{Sol} \sim 2,0 \cdot 10^{30}\text{ kg}$  e  $d_{ovo-Sol} \sim 1,5 \cdot 10^{11}\text{ m}$ ) a mesma razão é  $\sim 0,005\ 9\text{ m/s}^2$ , superior à incerteza da aceleração de queda corrigida obtida no experimento e, portanto, potencialmente relevante. No entanto, a aceleração de queda determinada no experimento, conceitualmente, não é

<sup>4</sup> Alexandre dos Reis Alves Pereira e Amanda Sabatini Dufek

<sup>5</sup> Adriana Rocha Lima, Henrique Poli de Souza, Marcelo Guarido de Andrade, Rogério Monteiro de Oliveira e Sérgio Biscaro Uliana.

<sup>6</sup> Bárbara Kato, Flávio Tanikawa e Silvia de Lucca.

<sup>7</sup> Francisco Carlos Pons, Leandro Mariano e Otávio de Campos Emmert.

alterada pela atração gravitacional entre o ovinho e o Sol (uma vez que, assim como o ovinho, a Terra também sofre o efeito da atração gravitacional do Sol e a aceleração de queda determinada no experimento é a aceleração relativa entre o corpo e a Terra).

A compilação dos resultados obtidos com a consideração dos efeitos relevantes permite perceber que a aceleração média de queda prevista pelo modelo aprimorado, equação (2),  $a^{\#} = 9,7518(65) m/s^2$ , é compatível com a determinada experimentalmente,  $a_{cor} = 9,7525(27) m/s^2$ .

## DISCUSSÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram que os efeitos devidos à presença do ar (Empuxo e Força de Arraste) eram os responsáveis pela diferença de ~0,35% entre a aceleração de queda determinada experimentalmente e a aceleração da gravidade no local, sendo o efeito da Força de Arraste o principal responsável por esta diferença (~0,30% contra ~0,05% do Empuxo).

Este experimento tem sido retomado por diversos alunos na atividade em que estes escolhem o que desejam investigar (denominada Experimento Eletivo<sup>[3]</sup>) envolvendo alterações na forma do corpo, na metodologia de análise dos dados e, em um caso no tamanho da queda considerada. Um grupo com 4 alunos e um professor da disciplina (autores deste trabalho) continuou a investigação após o término do período letivo utilizando um ovinho oco, onde a massa podia ser variada entre ~35 e ~120 g sem alteração de volume, forma e área frontal. No estudo de ~25 quedas com ovinhos com diferentes massas os resultados apresentam uma relação linear entre a aceleração de queda e o inverso da massa do ovinho. Desta relação foi possível determinar a gravidade no local ( $g$ ) e o coeficiente de arraste do ovinho ( $C_D$ ), resultando em valores compatíveis com os utilizados neste trabalho.

Este tipo de atividade mostra que o fator indispensável para a obtenção de resultados de grande qualidade no laboratório didático não está necessariamente ligado à utilização de equipamentos automatizados de alta tecnologia (e preço), mas ao cuidado com que os dados são coletados e as análises efetuadas. Experimentos para os quais o modelo não se revela satisfatório para descrever os resultados obtidos são adequados para ilustrar uma das formas como se dá a evolução do conhecimento em ciências naturais.

**Os autores agradecem à equipe de técnicos dos Laboratórios Didáticos do IFUSP pelo suporte para a realização das atividades descritas neste trabalho, em especial ao Sr. Manoel M. Silva que confeccionou o ovinho oco utilizado na continuação deste estudo e à equipe de professores da disciplina de Física Experimental 2 pelas proveitosas discussões sobre este problema. Na revisão deste trabalho os autores contaram com o auxílio dos professores Ruy Castro, Lighia Matsushigue e Marcos Martins.**

## REFERÊNCIAS

- 1) J.H. Vuolo *et al.*, *Apostila de Física Experimental 2*, IFUSP (2004)
- 2) L.B. Horodynski-Matsushigue *et al.*, *Planning an introductory laboratory for physics freshmen: ten years of growing understanding at São Paulo University*, in: anais da  $\Psi$ IACPE, em CD-ROM (2000)
- 3) L.B. Horodynski-Matsushigue *et al.*, *Um experimento optativo como avaliação de aprendizagem em um curso introdutório de Laboratório de Física*, in Atas do XIII SNEF, Brasília, (1999)