

O Experimento de Queda de Corpos na Perspectiva Epistemológica

The Experiment of Fall of Bodies in an Epistemological Perspective

José Carlos Oliveira de Jesus* e Álvaro Santos Alves†

*Departamento de Física - UEFS
Campus Universitário, Km 03, BR 116
Feira de Santana - BA, Brasil - CEP 44031-460*

Teresinha Fróes Burnham‡

*Faculdade de Educação - UFBA
Av. Reitor Miguel Calmon, s/n, Campus Canela,
Salvador - BA, Brasil - CEP 40110-100*

Neste trabalho, discute-se o clássico experimento de queda de corpos segundo uma perspectiva epistemológica, ressaltando-se a colocação do problema físico, a construção de hipóteses e a escolha dos referenciais teóricos. Enfatiza-se principalmente o papel que esses elementos desempenham na elaboração da metodologia de trabalho experimental, desde a escolha das variáveis relevantes ao contexto teórico em foco, passando pela montagem do experimento até a coleta de dados. Além disso, a análise e discussão dos resultados, bem como a conclusão, estão inapelavelmente ligados ao horizonte teórico previamente estabelecido. As impressões aqui registradas são frutos de uma experiência didática realizada junto a turmas de Física Experimental I do Curso de Graduação em Física da Universidade Estadual de Feira de Santana durante o semestre letivo 2004.2.

Palavras-chaves: Ensino de Ciências, Laboratório, Mecânica, Epistemologia.

In this work the classical experiment of fall of bodies is discussed from an epistemological perspective in which the problem setting, the construction of hypothesis and the choice of a theoretical framework are emphasized, mainly in view of the role they play in the elaboration of the experimental work, from the choice of variables that are relevant in the underlined theoretical context, through the experimental setup, to data collection. Moreover, the analysis and the discussion of results, so as the conclusions, are tight bind to the theoretical horizon previously chosen. The reports registered here came out from a didactical experience performed with undergraduate students of the discipline Experimental Physics 1 of the Physics Course at Universidade Estadual de Feira de Santana during the last academic semester 2004.2.

Key-words: Science Teaching, Laboratory, Mechanics, Epistemology.

I. INTRODUÇÃO

Esse trabalho é fruto de reflexões acerca das atividades experimentais desenvolvidas na disciplina *Física Experimental I* do Curso de Graduação em Física. Ele se baseia numa leitura crítica dos relatos e atitudes dos Estudantes durante o semestre letivo 2004.2. Durante as Atividades de Laboratório, verificou-se que o discurso dominante é o do Laboratório Comprovação, no qual as *Leis da Natureza* serão “demonstradas”. Essa visão, além de negar a ciência enquanto processo historicamente inserido e determinado, não permite que os estudantes participem do processo de construção do conhecimento, uma vez que “as leis já foram descobertas” (por pessoas fantásticas) cabendo-lhes apenas a odiosa tarefa de “medir para confirmar”. Essa visão simplificada da Atividade Experimental é construída sem uma noção do que é uma teoria, do que é um modelo e de como um mesmo modelo pode ser tratado em diferentes contextos teóricos. Como consequência direta dessa visão, o trabalho no Laboratório é esvaziado de

significado, produzindo desinteresse nos Estudantes. Nas seções seguintes, apresenta-se uma série de sugestões e observações acerca da Atividade Experimental, com o intuito de provocar um repensar do cotidiano dos Laboratórios Didáticos. Para tanto, escolheu-se o clássico experimento de queda de corpos (mais conhecido como Queda Livre), por ser um conteúdo obrigatório e bastante debatido no ciclo básico dos cursos da área de ciências exatas. Buscou-se uma forma de articular a colocação do problema físico, as suposições ou hipóteses acerca do sistema físico, a teoria ou o quadro teórico de referência, bem como o papel que esses elementos desempenham na elaboração da metodologia de medida, nos procedimentos experimentais de coleta de dados e na análise e discussão dos resultados. O mais importante, contudo, é tentar aproximar o estudante do processo de construção de conhecimento, confrontá-lo com a necessidade de elaborar hipóteses, testa-las e refuta-las, aproximando-o da práxis profissional, pois segundo Rutherford e Ahlgren (1995).

“Os cientistas não trabalham apenas com dados e teorias bem desenvolvidas. Muitas vezes dispõem apenas de hipóteses precárias em relação ao modo como as coisas poderão passar-se. Tais hipóteses são amplamente usadas em ciência para escolher os dados aos quais prestar atenção e os dados adicionais a procurar, bem como para orientar a interpretação

*Endereço Eletrônico: oliveira@uefs.br

†Endereço Eletrônico: asafis@yahoo.com.br

‡Endereço Eletrônico: tfroesb@ufba.br

desses mesmos dados. Efectivamente, o processo de formular e testar hipóteses é uma das actividades essenciais dos cientistas. Para que uma hipótese possa ser útil deve sugerir as provas que a apóiam e as que a refutam. Uma hipótese que não possa, em princípio, ser sujeita a verificação pode ser uma suposição interessante, mas não será cientificamente útil.”

II. SUPOSIÇÕES E HIPÓTESES

Conceitualmente, um corpo em queda livre está sujeito apenas a ação do campo gravitacional da terra. Esta é a primeira hipótese levantada no experimento. Para as condições concretas do experimento, todavia, não trabalhamos no vácuo. Isso significa que não podemos simplesmente ignorar a influência do ar sobre o movimento do corpo de prova (uma esfera de aço, de raio R e massa m). Primeiro porque o ar é um meio fluido, no qual os pesquisadores e seus laboratórios estão imersos, e exerce sobre tudo o empuxo, descoberto por Arquimedes. Segundo, porque os fluidos exercem uma resistência ao movimento de qualquer corpo¹. Essa força depende basicamente da seção reta do corpo, relativa à direção de movimento, e da viscosidade do fluido. Daí decorre a denominação força de atrito viscoso. No experimento, supõe-se que esses efeitos são muito pequenos e podem ser desprezados. Admite-se também que o campo gravitacional próximo à superfície da terra é praticamente constante. Discutir coletivamente essas considerações no contexto de formação inicial docente é muito importante porque grande parte do trabalho do pesquisador consiste em elaborar e testar hipóteses à luz do arcabouço teórico escolhido ou disponível. Essa última assertiva encontra ressonância em Popper (1989). Além disso, a própria atividade experimental está impregnada de alguma teoria. Primeiro, porque os instrumentos e aparelhos de medição já trazem consigo concepções teóricas desde a sua construção até os procedimentos e restrições de uso. Segundo, porque do exposto até agora, nenhuma teoria é aplicada às atividades experimentais em sua forma pura. É preciso problematizar o trabalho em laboratório. Lopes (2004) posiciona-se sobre essa questão da seguinte forma:

“Com efeito, ao contrário do que possa parecer, a relação entre teoria física e experiência nunca é feita tomando esta como referindo-se às situações físicas em estado bruto. É necessário modelizá-las ao menos como sistemas físicos e em muitos casos é necessário ter um modelo das situações físicas para que as experiências (observação, medição ou experimentação) possam ser efectuadas.”

III. PRESSUPOSTOS TEÓRICOS

No nível de discussão da disciplina *Física Experimental I*, a teoria disponível aos estudantes corresponde ao programa de Newton [4], estabelecido através do princípio de inércia, do princípio de ação e reação e da definição de força em termos da aceleração \vec{a} do corpo de prova, ou seja,

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = m\vec{a}. \quad (1)$$

onde o primeiro membro da Eq. (1) representa a resultante de todas as forças que atuam no corpo de massa m . Assim, de acordo com a discussão no parágrafo precedente, o campo gravitacional, suposto constante nas condições específicas do experimento, é a única causa do movimento do corpo de prova: a força peso. Portanto, tem-se:

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = m\vec{g} = m\vec{a} \Leftrightarrow \vec{a} = \vec{g}. \quad (2)$$

Sendo a aceleração do campo gravitacional, \vec{g} , constante, escolhe-se um sistema de coordenadas no qual $\vec{g} = g\hat{z} \rightarrow g > 0$, conforme o diagrama da Figura 1.

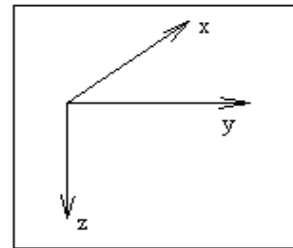


Fig. 1 – Orientação do Sistema de Coordenadas usado Nesse no experimento

sistema de coordenadas a equação de movimento (2) pode ser escrita em termos de suas componentes ao longo dos eixos $\mathcal{O}x$, $\mathcal{O}y$ e $\mathcal{O}z$, isto é,

$$\ddot{x}\hat{x} + \ddot{y}\hat{y} + \ddot{z}\hat{z} = g\hat{z}. \quad (3)$$

onde os pontos sobre as componentes denotam suas derivadas segundas em relação ao tempo. Assim, as soluções das equações para cada componente são dadas por:

$$\begin{aligned} \ddot{x} = 0 &\Rightarrow x(t) = x_0 + v_{0x}t \\ \ddot{y} = 0 &\Rightarrow y(t) = y_0 + v_{0y}t \\ \ddot{z} = 0 &\Rightarrow z(t) = z_0 + v_{0z}t + \frac{1}{2}gt^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Nas equações acima, $\vec{r}_0 = x_0\hat{x} + y_0\hat{y} + z_0\hat{z}$ e $\vec{v}_0 = \dot{x}_0\hat{x} + \dot{y}_0\hat{y} + \dot{z}_0\hat{z}$ correspondem aos vetores posição e velocidade iniciais, respectivamente. O vetor $\vec{r}(t) = x(t)\hat{x} + y(t)\hat{y} + z(t)\hat{z}$ dá a posição do corpo de prova em qualquer instante t .

IV. METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS

A partir deste ponto é possível pensar em estabelecer uma metodologia para o trabalho de investigação do movimento de queda do corpo de prova. Note-se que na concepção de Newton o experimentador tem controle das condições iniciais do movimento. Isso quer dizer que tanto o vetor posição

¹ Não se falou sequer dos efeitos de turbulência, de tratamento matemático muito difícil, mas que tem enorme importância nos modelos de atrito viscoso.

inicial quanto o vetor velocidade inicial do corpo de prova podem ser escolhidos convenientemente. É assim, pois, que pode-se soltar a o corpo de prova desde uma altura h medida a partir do piso da sala ou do tampo de uma bancada do laboratório. Experimentalmente, o ato de soltar o corpo de prova de uma posição em repouso relativamente ao laboratório corresponde a fazer a escolha $\vec{v}_0 = \vec{0}$. Além disso, a origem do sistema de coordenadas pode ser posta exatamente no ponto de onde o corpo de prova foi solto. Com isso, fica fixado também $\vec{r}_0 = \vec{0}$. Após essas considerações, as funções horárias do movimento do corpo resumem-se ao conjunto abaixo:

$$\begin{aligned} x(t) &= y(t) = 0, \\ z(t) &= \frac{1}{2}gt^2. \end{aligned} \quad (5)$$

É a expressão de $z(t)$ acima que ensina quais grandezas devem ser medidas: comprimentos z_i e intervalos de tempo t_i que o corpo de prova gastou para percorrê-los. Estão postas as bases da metodologia de medida.

O próximo passo consiste em descrever os procedimentos de coleta de dados (informações)². Para as medidas de intervalos de tempo usa-se um cronômetro digital com precisão de 1ms, produzido pela Cidepe®. O sistema de contagem é acionado por um foto-sensor sobre qual incide um feixe de luz colimado. A passagem do corpo de prova pelo feixe de luz reduz a zero a intensidade luminosa sobre o sensor e dispara o circuito contador de tempo. Na montagem do experimento o sensor responsável pelo disparo foi colocado infinitesimalmente abaixo do ponto de soltura do corpo de prova para garantir a condição inicial de que ele parte do repouso.

Um segundo foto-sensor colocado abaixo do primeiro, na posição correspondente a z_i , pára o contador digital no instante em que o corpo de prova interrompe o feixe de luz, marcando o valor correspondente de t_i em um display digital. As medidas de altura, isto é, das posições z_i foram feitas com uma régua larga, graduada em milímetros, fixada ao mesmo conjunto de suporte dos foto-sensores.

Para garantir que o corpo de prova será solto sempre da mesma maneira e assegurar que sua velocidade inicial é nula, usa-se um eletroímã, montado acima do primeiro foto-sensor de maneira que a parte inferior do corpo de prova fica infinitesimalmente acima do feixe de luz, como mostrado na Figura 2, abaixo.

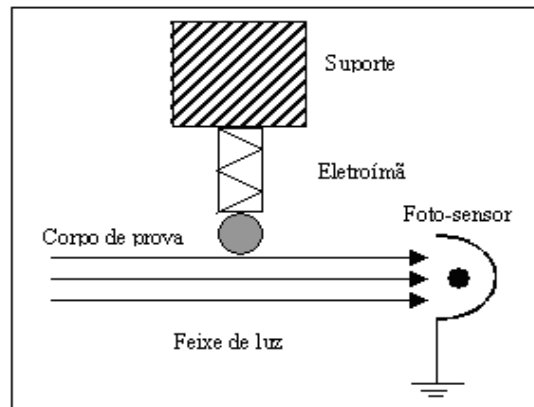


Fig. 2 – Configuração do conjunto eletroímã/corpo de prova/feixe de luz/sensor no instante de soltura da esfera

Para cada ordenada z_i se realizam 10 leituras do tempo de queda t_i de forma que a medida de tempo correspondente é o seu valor médio. Os valores de t_i e z_i são então registrados em uma tabela.

V. INSTRUMENTOS DE ANÁLISE DOS DADOS

Os instrumentos de análise dos dados, assim como a metodologia, estão inseparavelmente atrelados ao horizonte teórico escolhido ou estabelecido pelo investigador³. Portanto, de acordo com a Eq. (5), os dados de comprimento e intervalo de tempo, se exibidos em um gráfico z versus t , devem estar dispostos sobre um arco de parábola. Na prática, entretanto, não é fácil identificar uma curva apenas visualmente. Ainda assim, a teoria ou o modelo pode guiar a análise, pois se as suposições feitas no início são plausíveis, o gráfico de z versus t^2 deveria fornecer uma reta⁴. Caso os pontos (z_i, t_i^2) estejam distribuídos, na média, ao longo de uma reta, então isso pode indicar que as conjecturas feitas acima são razoáveis. Nesse caso, o próximo passo é usar a técnica de regressão linear dos mínimos quadrados para determinar os coeficientes linear e angular da dita reta, seu coeficiente de correlação, o erro global, bem como os erros nos coeficientes. Também a análise e a interpretação dos coeficientes obtidos devem se dar à luz do horizonte teórico previamente traçado. Nesse caso, tomando-se:

$$x_i = t_i^2 \quad \text{e} \quad y_i = z_i \Rightarrow y = ax + b, \quad (6)$$

onde, idealmente, segundo a Eq. (5) $a = \frac{1}{2}g$ e $b = 0$.

Assim, a análise – estritamente referenciada aos pressupostos e ao modelo – permite inclusive estimar o campo gravitacional na superfície da terra.

Por outro lado, se o processo de linearização não funciona na forma acima discutida, isto é, se o coeficiente de correlação estiver distante do valor 1, isso pode ser um indicador de que o expoente da variável t na Eq. (5) é diferente

² Assume-se aqui, tacitamente, que os dados talvez só possam ser considerados como tais em um contexto puramente algébrico. Quando estão sendo considerados dentro de um modelo ou de uma teoria eles ficam impregnados de uma carga conceitual e passam, portanto, a ter o status de informações. Ou seja, dados + modelos ou dados + teoria são iguais a informações. Sem o “+”, dados são apenas dados.

³ Eventualmente, o investigador também pode estar limitado, pelo acordo teórico de seu tempo, a realizar medidas que seriam irrelevantes em uma outra época, passada ou futura. Da mesma forma, a análise de dados também está contextualizada (inserida) e limitada pelo horizonte teórico disponível. Isso pode gerar rupturas e novos paradigmas.

⁴ Essa técnica de linearização é conhecida na literatura por anamorfose.

de 2. Quando isso ocorre, então é possível recorrer a uma lei de potência mais geral na forma:

$$z(t) = Kt^\beta, \quad (7)$$

Note-se que $K = 1/2g$ e $\beta = 2$ recuperam a Eq. (5). Porém, quando $\beta \neq 2$, não é mais possível interpretar os parâmetros de ajuste, pois que eles não foram obtidos das suposições e construções teóricas que levaram ao modelo de queda livre. Tecnicamente, a linearização da Eq. (7) é possível por logaritmação:

$$\log z(t) = \log Kt^\beta = \log K + \beta \log t, \quad (8)$$

Se, agora, as variáveis e parâmetros forem redefinidos segundo a prescrição abaixo:

$$\left. \begin{array}{l} x = \log t \\ y = \log z \\ a = \beta \\ b = \log K \end{array} \right\} \Rightarrow y = ax + b, \quad (9)$$

então obtém-se mais uma vez a equação da reta. É oportuno lembrar, todavia, que não é mais possível interpretar fisicamente os coeficientes linear e angular da reta, pois eles agora não resultam de um modelo onde as quantidades físicas estão declaradas e definidas. Trata-se apenas de um artifício matemático de linearização de leis de potência. O máximo que se pode afirmar com segurança é que quanto mais o valor de β se afasta de 2, maiores são os motivos para se rejeitar as hipóteses [5], ou os pressupostos teóricos, ou ambos [6].

VI. A DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E A CONCLUSÃO

Caso as informações e os dados levados à análise sejam compatíveis com as hipóteses formuladas pelo investigador, então o modelo explicativo da queda de corpos é tido como plausível, razoável. Além disso, aponta para uma técnica de determinação (medida) da aceleração da gravidade na superfície da terra. Caso contrário, pode-se proceder ao longo

de duas direções principais. A primeira delas consiste de fazer uma revisão crítica do experimento, sobretudo no refinamento da técnica e na ampliação do conjunto de dados. A segunda opção consiste de refinar o modelo, ampliando as influências significativas que podem estar presentes na situação experimental concreta. Aqui, pode-se, por exemplo, considerar o efeito do empuxo ou propor um modelo para a resistência do ar. Pode-se ainda rejeitar o modelo ou o suporte teórico e propor novas bases para a explicação do fenômeno. É importante focalizar esse aspecto, pois geralmente os estudantes tendem a argumentar que os “desvios do resultado esperado” se devem à resistência do ar ainda que o modelo de queda livre utilizado não contenha nenhum indício de como identificar efeitos de resistência do ar. Outra forte tendência dos estudantes, registrada nos relatórios de experimentos, é o de desqualificar a infraestrutura do laboratório, seus aparelhos e equipamentos, como se fosse possível responsabilizar apenas as condições de realização do experimento pelo “fracasso na comprovação da lei”.

VII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A abordagem epistemológica do Laboratório Didático é uma alternativa que aproxima os estudantes das bases conceituais da Física, sem retirar da atividade experimental seus aspectos técnicos, também importantes e até determinantes na formação profissional. É ao mesmo tempo uma tentativa de opor-se ao pragmatismo observado nas aulas práticas, nas quais, quase sempre, há uma ênfase exagerada no domínio de ferramentas, mas sem um lastro conceitual que as suporte, promovendo uma visão simplificada das aulas práticas e uma supervalorização da exposição teórica (que esconde também o caráter ideológico de separação do trabalho manual e do trabalho intelectual). Isso é resultado da visão *comprovaçionista* da atividade experimental partilhada por estudantes e professores. Espera-se que esse texto ofereça alguns elementos para reflexão e promova mudanças de atitudes em face ao papel da experimentação no processo de ensino-aprendizagem de Física.

-
- [1] J.F. Rutherford, A. Ahlgren; *Ciência para todos*. Trad. Catarina Caldeira Marins. Lisboa: Gradiva, 32 (1995).
 [2] K.R. Popper; *A lógica da pesquisa científica*, Trad. Leonidas Hegenberg e Octanny Silveira da Mota. São Paulo: Cultrix, 4ª Ed., (1989).
 [3] J.B. Lopes, *Aprender e Ensinar Física*. Lisboa: Calouste Gulbenkian, (2004).
 [4] T.W.B. Kibble, *Mecânica Clássica*. Trad. A.L. da Rocha Barros & D.M. Redondo. São Paulo: Polígono, (1970).

- [5] É claro que deve-se comparar os coeficientes de correlação para as duas técnicas de linearização, bem como os respectivos erros globais; tipicamente, usa-se o teste do chi quadrado.
 [6] Geralmente os estudantes tendem a argumentar que o desvio do esperado se deve à resistência do ar ou às péssimas condições de trabalho no laboratório, pois não percebem a falta de argumentos embasados teoricamente para fomentar e desenvolver a discussão.