



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

As “Experiências de Pensamento” em Física: 1) Galileu.

A importância de uma “**Experiência de Pensamento**” (*Gedankexperimente*) foi ressaltada pelo físico e filósofo austríaco Ernst (Waldfried Josef Wenzel) Mach (1838-1916) em seu famoso livro intitulado **Die Mechanik in Ihrer Entwicklung Historisch-Kritisch Dargestellt** (“A Ciência da Mecânica e seu Desenvolvimento Crítico-Histórico”), publicado em 1883 [**The Science of Mechanics: A Critical & Historical Account of Its Development** (The Open Court Publishing Co., 1960)]. Uma “**Experiência de Pensamento**” ou “**Lógica**”, como a chama o filósofo da ciência e físico francês Michel Paty (n.1938), tem por função *fazer aparecer, eventualmente, propriedades insuspeitas, porém, implicitamente contidas na representação teórica* [Michel Paty et Banesh Hoffmann, **L’ Étrange Histoire des Quanta** (Seuil, 1981)]. Ou ainda, nas palavras do físico russo-norte-americano George Antonovich Gamow (1904-1968), por intermédio de semelhante experiência, *apenas se visualiza a situação e se procura concluir o que acontecerá com base nos resultados conhecidos de outras experiências* [George Gamow, **A Biografia da Física** (Zahar, 1963)]. Neste verbete, mostraremos que, além de permitir a visualização de certa experiência, por ser impossível de realizá-la na ocasião em que a mesma é pensada, ou de realçar propriedades implicitamente contidas em determinada teoria, a “**Experiência de Pensamento**”, permite, também, em alguns casos, criticar conceitos físicos tradicionalmente incorporados em uma **ciência normal**, no sentido usado pelo físico e filósofo da ciência Thomas Samuel Kuhn (1922-1996) [**The Structure of Scientific Revolutions** (University of Chicago Press, 1962); **A Estrutura das Revoluções Científicas** (Perspectiva, 1975); **The Road Since Structure** (The University of Chicago Press, 2000)] e, com os resultados “lógicos” decorrentes de tal crítica, propor novos conceitos.

Neste verbete, analisaremos as experiências “pensadas” pelo astrônomo e físico italiano Galileu Galilei (1564-1642), em seus dois livros: **Dialogo supra i due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano** [**Diálogo sobre dois Máximos Sistemas no Mundo Ptolomaico e Copernicano** (Discurso Editorial/FAPESP, 2001)], publicado em 1632, e **Discorsi e Dimonstrazione Mathematiche intorno a Due Nuove Scienze Attenenti alla Mechanica ed i Movimento Locali** (“Discursos e Demonstrações Matemáticas em torno de Duas Novas Ciências Atinentes à Mecânica e aos Movimentos Locais”) [**Dialogues Concerning the Two New Sciences/Great Books of the Western World 26** (Encyclopaedia Britannica, Inc./Chicago, 1993)], publicado em 1638. Nesses dois livros (**Dialogo** e **Discorsi**), os diálogos que acontecem neles ocorrem entre três personagens: SALVIATTI, que representa o próprio Galileu, SIMPLÍCIO, defensor de Aristóteles, e SAGREDO, que simboliza um observador imparcial e inteligente. Tais nomes foram escolhidos por Galileu para homenagear a dois de seus amigos. Filippo Salviatti (1582-1614) era um patrício florentino, em cuja casa, em 1611, Galileu se reuniu, juntamente com outros intelectuais, para discutirem problemas polêmicos, como por exemplo, os relacionados com a condensação e rarefação, principais temas de discussões entre aristotélicos e os atomistas. Giovanfrancesco Sagredo (1571-1620), um talentoso cientista amador, era um nobre veneziano que estudara com Galileu e a quem este recorria quando tinha necessidades financeiras. Por sua vez, Simplício de Cilícia (500-549) era um filósofo grego que ficara famoso por haver sido o mais célebre e profundo comentador das obras de Aristóteles, durante a Idade Média.

Agora, vejamos a experiência “pensada” por Galileu no **Dialogo**. Ao analisar a lei aristotélica da queda dos corpos (*O corpo pesado cai mais rápido do que o corpo leve*), SALVIATTI diz: - *Se tomarmos dois corpos cujas velocidades naturais são diferentes é claro que unindo os dois, o mais rápido será parcialmente retardado pelo mais lento, e este será, de algum modo, apressado pelo*

primeiro. Você concorda com essa opinião? Responde SIMPLÍCIO: - *Você está inquestionavelmente certo.* Prossegue SALVIATTI: - *Mas se isso é verdade e, se uma pedra grande se move com velocidade de, digamos, oito (8) enquanto uma menor se move com a velocidade de quatro (4), então quando elas são unidas, o sistema se moverá com uma velocidade menor do que 8; mas quando as duas pedras são unidas elas formam uma pedra maior do que a que antes se movia com a velocidade de 8. Portanto, o corpo mais pesado se move com uma velocidade menor do que o mais leve; um efeito que é contrário à vossa suposição. Então, como você vê, de vossa suposição segundo a qual o corpo mais pesado se move mais rapidamente do que o mais leve, eu infiro que o mais pesado se move mais lentamente* (Galileu, **Diálogo**, op. cit.). Os diálogos prosseguem com argumentos de ambos os lados, porém SALVIATTI (Galileu) concluiu que só existe uma forma de resolver a contradição: os dois corpos devem cair com a mesma velocidade, de modo que, ligados, continuem a manter essa mesma velocidade.

Portanto, convencido de que todos os corpos largados de uma mesma altura caem com a mesma velocidade, Galileu teria realizado essa experiência do alto de uma torre (de Pisa?) e comprovado essa afirmação, segundo conta a lenda. Contudo, existem divergências entre historiadores da ciência [C. G. Adler and B. L. Coulter, *American Journal of Physics* **46**, p. 199 (1978)] sobre a realização dessa experiência. Uns dizem que Galileu a realizou durante o período em que ensinou na *Universidade de Pisa*: 1589-1592, já que seu aluno e posterior biógrafo, o físico italiano Vicenzio Viviani (1622-1703), fez comentários sobre a mesma e que teria sido realizada por volta de 1590. Outros, no entanto, afirmam que essa experiência foi realizada por seu opositor aristotélico, o físico italiano Giorgio Coressio (c.1570-c.1660), em 1612. Por sua vez, o filósofo e matemático polonês Jacob Bronowski (1908-1974), no livro intitulado **Um Sentido no Futuro** (EdUnB, s/d) escreveu que se Galileu tivesse realizado a experiência do alto da torre de Pisa, ele teria obtido resultados muito duvidosos, já que seu amigo, o matemático e astrônomo italiano Vincenzo Renieri (1606-1647) escreveu-lhe uma carta de Pisa, em 1641, sobre uma experiência que recentemente havia sido feita com duas balas: de canhão e de mosquete. No entanto, uma das personagens de Galileu no **Discorsi** (de 1638) declara que esse tipo de experiência é bem sucedido “desde que a altura seja de 200 cúbitos”. Ora, como 1 cúbito = 60 cm, então 200 cúbitos = 120 m, isto é, quase o dobro da altura de Pisa, que tem pouco mais de 60 m. Assim, se Galileu tivesse realizado a experiência da torre de Pisa certamente o resultado não seria confiável.

Verdadeira ou não essa versão, o que realmente levou Galileu à afirmação de que: - *No vácuo, todos os corpos caem com a mesma aceleração* – foram as várias experiências que realizou com corpos deslizando em planos lisos e inclinados, e que foram descritas no **Discorsi**. Com efeito, partindo de sua definição de movimento uniformemente acelerado, isto é: - *Um movimento é dito ser igualmente ou uniformemente acelerado quando, partindo do repouso, seu momentum (interessante destacar que Galileu usou o termo *momentum* para indicar que a velocidade é uma grandeza que necessita de direção e sentido, além de sua intensidade que ele chamava de velocidade) recebe iguais incrementos em tempos iguais* (podemos ver nessa definição o moderno conceito de *aceleração*), Galileu demonstrou uma série de resultados relacionados com o movimento de corpos em planos lisos e inclinados como afirmamos acima. Esses resultados foram relatados no terceiro dia do **Discorsi** e constituem o que hoje chamamos de **Leis da Queda Livre dos Corpos**, resumidas nos seguintes enunciados: **Lei das Velocidades**: - *As velocidades dos corpos em queda livre são proporcionais aos tempos gastos na mesma*; **Lei dos Espaços** - *Os espaços percorridos pelos corpos em queda livre são proporcionais aos quadrados dos tempos gastos em descrevê-los.*

É interessante registrar o artifício empregado por Galileu para medir esses tempos. Nessa época, os relógios mecânicos disponíveis não eram precisos. Como vimos em verbete desta série, o primeiro deles foi construído em Milão, em 1335. O mecanismo de corda só foi introduzido, em 1510, pelo serralheiro alemão Peter Henlein (1480-1542), e a invenção dos ponteiros dos minutos só ocorreu, em 1577, pelo inventor suíço Jost Bürgi (1552-1632). Apesar disso, a precisão de tais relógios era muito precária; esta só veio a acontecer com a invenção do **relógio de pêndulo cicloidal** pelo astrônomo, físico e matemático holandês Christian Huygens (1629-1695), em 1673. Desse modo, Galileu lançou mão do seguinte modo engenhoso: tomou um recipiente de grandes dimensões

transversais e fez um diminuto furo no fundo dele. Colocou certa quantidade de água e tapou o furo com seu dedo. Quando o corpo (uma bola) começava a deslizar no plano inclinado liso, ele retirava o dedo e a água fluía até uma balança. Quando a bola atingia a base do plano inclinado, ele voltava a fechar o orifício. Ora, devido às grandes dimensões transversais do recipiente, praticamente a altura do nível da água permanecia invariável, de modo que o tempo gasto na vazão era praticamente proporcional ao peso da água que chegava à balança. Portanto, medindo os espaços percorridos pela bola rolando no plano inclinado e os pesos dos jatos da água na balança, ele chegou à lei dos espaços registrada acima (Mach, op. cit.).

É também interessante registrar que as **Leis de Galileu** só foram demonstradas com o desenvolvimento da Mecânica (no vácuo), principalmente com os trabalhos do físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727), em 1687 [**Philosophiae Naturalis Principia Mathematica** (“Princípios Matemáticos da Filosofia Natural”)], e do matemático e físico suíço Leonhard Euler (1707-1783), em 1750. Assim, temos: **Aceleração de um Corpo em um Plano Inclinado**: $a = g \sin \alpha$; **Lei das Velocidades**: $v = v_0 + gt$; **Lei dos Espaços**: $s = s_0 + v_0t + \frac{1}{2}gt^2$, onde o índice 0 indica tempo inicial (t_0), g é a aceleração da gravidade, α é o ângulo de inclinação do plano e não depende da massa (m) do corpo. Note-se que, no caso da queda livre dos corpos no vácuo ($\alpha = 90^\circ$), então: $a = g$, confirmando o que Galileu havia intuído com essas experiências e já registrado acima: - *No vácuo, todos os corpos caem com a mesma aceleração.*

Finalizemos este verbete com outra “**Experiência de Pensamento**” de Galileu e, desta vez, relacionada com o conceito de **inércia** que decorre do estudo do **movimento** dos corpos, iniciado pelo filósofo grego Aristóteles de Estagira (384-322) em seu livro intitulado **Physis** (“Física”), no qual apresentou suas próprias ideias sobre o **movimento**, que o considerava como: - *O ato do que está em potência enquanto em potência.* Com relação aos atributos (*categorias*) dos seres que são afetados pelo **movimento**, Aristóteles distingue quatro espécies dele: o **movimento** segundo a **essência** do ser é geração e corrupção; segundo a **qualidade**, é alteração; segundo a **quantidade**, é crescimento e decréscimo; segundo o **lugar**, o **movimento** de um corpo pode ser **natural** se ele se dirige para o seu lugar natural (por exemplo, para o alto como o **fogo** e o **ar**, e para baixo, como a **água** e a **terra**); e **forçado** ou **violento**, se afastar-se de seu lugar natural (por exemplo, o caso de uma pedra lançada para o alto).

Na Era Cristã (d.C.), a primeira tentativa de explicar o **movimento**, ocorreu por volta de 520, quando o filósofo grego John (Ioannes) Philoponos (c.475-c.565) afirmou que o movimento de um corpo lançado no ar não se devia ao empurrão exercido pelo ar sobre o corpo, como afirmavam os aristotélicos, e sim a uma “espécie de inércia” – **impetus**, **impetus impressa**, **virtus motiva**, **virtus impressa** -, a qual o mantinha em **movimento**. A proposta do **impetus** de Philoponos foi aceita e divulgada no mundo árabe pelo médico e filósofo persa Abu-Ali al-Husain ibn Abdullah Ibn Sina (Avicena) (980-1037), o mesmo acontecendo com Abbu al-Barakat Hibatallah ibn Malka al-Baghdahi (f.c. Século 12). O erudito alemão Alberto Magno (1193-1280) também aceitou a ideia do **impetus** ao discutir o movimento de um projétil. Por sua vez, apesar de ser aluno de Alberto Magno, o teólogo italiano São Tomás de Aquino (c.1225-1274) não aceitou a ideia do **impetus**, pois, aristotelicamente, interpretava a queda dos corpos como sendo devido a causas finais, ao admitir que a proximidade do “lugar natural” aumentava o **apetitus** (mais tarde, gravidade) do movido. Note-se que o conceito do **impetus** de Philoponos recebeu novas elaborações por parte do filósofo francês Jean Buridan (c.1300-1358), do Bispo alemão Nicholas Oresme (Nicole d’Oresme) (c.1325-1382), do Cardeal alemão Nicolau de Cusa (1401-1464), do artista, inventor e cientista italiano Leonardo da Vinci (1452-1519) e do físico italiano Giovanni Battista Benedetti (1530-1590).

Por fim, a doutrina do **impetus**, que permaneceu confusa e ambígua por mais de mil anos, começou a ser esclarecida com os trabalhos de Galileu sobre a queda dos corpos, entre 1589 e 1592, por ocasião em que era professor na *Universidade de Pisa*. Nessa ocasião, por volta de 1590, ele preparou notas sobre essas experiências e que só foram publicadas 200 após aquela data no livro **De Motu, De Mechanica** (“Sobre o Movimento, Sobre a Mecânica”) (Adler and Coulter, op. cit.). Assim,

nesse livro, ele examinou a possibilidade de haver outro tipo de movimento que não fossem os movimentos - **natural** e **violento** – propostos por Aristóteles, chamando-lhe de **neutro**. Para ele, dois tipos de movimento não se enquadravam nessa classificação aristotélica: o de **rotação** de um corpo em um plano vertical, já que o mesmo ora se encontra acima e ora abaixo do horizonte; e o **movimento uniforme** de um corpo em um plano horizontal liso, o qual nunca está abaixo ou acima desse mesmo horizonte.

As ideias de Galileu sobre o **movimento neutro** foram retomadas por ele em várias ocasiões. Assim, no livro **Istoria e Dimostrazione Intorno Alle Machie Solari** (“História e Demonstração Sobre as Manchas Solares”), publicado em 1613, ele aborda esse tipo de movimento e sua principal consequência – a ideia de **inércia** –, conforme se pode ver nessa afirmação: - *Se todos os impedimentos internos são removidos, um corpo pesado sobre uma superfície esférica concêntrica com a Terra, será indiferente ao repouso ou ao movimento para qualquer parte do horizonte. E ele permanecerá no estado em que pela primeira vez for colocado; isto é, se for colocado em movimento para oeste, por exemplo, ele manter-se-á nesse movimento.* Registre-se que o termo **inércia** é devido ao astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630), uma vez que Galileu continuou usando o termo **impetus**. [Stillman Drake, **Galileu** (Publicações Dom Quixote, 1981); Alexandre Koyré, **Estudios Galileanos** (Siglo Veintiuno Editores, S. A., 1985)].

O **impetus** voltou a ser mais claramente estudado por Galileu em **Dialogo** (de 1632), conforme se pode ver nos seguintes diálogos, sobre **“Experiências de Pensamento”**. SALVIATI: - *Num plano inclinado para baixo, o corpo móvel desce espontaneamente e continua acelerando, e é preciso uma força para mantê-lo em repouso. Num plano inclinado para cima, é preciso uma força para lançar o corpo ou mesmo para mantê-lo parado e o movimento impresso ao corpo diminui continuamente até cessar de todo. Você diz ainda que, nos dois casos, surgem diferenças conforme a inclinação do plano seja maior ou menor, de forma que um declive mais acentuado implica maior velocidade, ao passo que, num aclave, um corpo lançado com uma dada força se move tanto mais longe quanto menor for o aclave. Diga-me agora o que aconteceria ao mesmo corpo colocado sobre uma superfície sem nenhum aclave ou declive.* Responde SIMPLÍCIO: - *Aqui preciso pensar em um instante sobre a resposta. Não havendo declive, não pode haver resistência ao movimento. Parece-me, portanto, que o corpo deveria naturalmente permanecer em repouso. Mas eu esqueci, faz pouco tempo que SAGREDO me deu a entender que isto é o que aconteceria.*

Continuando com seus argumentos **“lógicos”**, Galileu, por intermédio de SALVIATI, afirma: - *Acredito que aconteceria se colocássemos o corpo firmemente num lugar. Mas que sucederia se lhe déssemos um impulso numa certa direção?* Responde SIMPLÍCIO: - *Ele teria que se mover nessa direção.* Retruca SALVIATI: - *Mas com que tipo de movimento? Seria continuamente acelerado, como no declive, ou continuamente retardado, como no aclave?* SIMPLÍCIO: - *Não posso ver nenhuma causa de aceleração ou desaceleração, uma vez que não há aclave e nem declive.* Continua SALVIATI: - *Exatamente. Mas se não há razão para que o movimento do corpo móvel se retarde, ainda há menos razão para que ele pare; por conseguinte, por quanto tempo você acha que o corpo móvel continuaria se movendo?* SIMPLÍCIO: - *Tanto longe quanto a superfície se estendesse sem subir e nem descer.* SALVIATI acrescentou: - *Então, se este estado fosse ilimitado, o movimento sobre ele também seria ilimitado? Ou seja, perpétuo?* O arremate final é de SIMPLÍCIO: - *Parece-me que sim, desde que o móvel fosse feito de material durável.* É interessante registrar que o **impetus** continuou a ser estudado por Galileu em outros trechos, agora, de seu **Discorsi** (de 1638).



ANTERIOR

SEGUINTE