



SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



As Leis do Pêndulo, as da Queda Livre e a Composição de Velocidades de Galileu.

São bem conhecidas as histórias sobre as experiências que levaram o astrônomo e físico italiano Galileu Galilei (1564-1642) à descoberta das leis do pêndulo e das leis da queda livre. Nos dois casos, não há uma data precisa quando ele foi motivado a realizar experiências que o levaram à formulação daquelas leis. Essa imprecisão, segundo o físico e historiador da ciência, o norte-americano Tony Rothman, em seu livro Tudo é Relativo e Outras Fábulas da Ciência e Tecnologia (DIFEL, 2005), decorre do fato de que tais histórias não foram registradas por Galileu em nenhum de seus livros, e sim, que elas foram descritas por seu discípulo, o físico italiano Vincenzo Viviani (1622-1703), em um livro inacabado que escreveu sobre a vida de seu mestre. Como era um perfeccionista, levou cinquenta anos, vendo e revendo o que escrevia, sem concluí-lo. Morreu sem vê-lo publicado, o que só aconteceu em 1717. Em vista disso, historiadores da ciência apresentam datas e versões diferentes sobre a motivação da formulação daquelas leis. No caso das leis do pêndulo, foi em 1581 [segundo o químico e historiador da ciência, o russo-norte-americano Isaac Asimov (1920-1992) em Gênios da Humanidade (Bloch Editores, 1972)], ou em 1583 [segundo os historiadores da ciência, o norte-americano James Reston, Jr., no livro Galileu: Uma Vida (José Olympio, 1995) e o italiano Ludovico Geymonat, no livro Galileu Galilei (Nova Fronteira, 1997)], que Galileu foi levado a descobri-las ao observar, quando trabalhava (assistia) à missa na Catedral de Pisa, que o período de oscilações de um candelabro (lanterna decorativa), colocado em movimento pelo vento, não dependia do fato de que tais oscilações fossem rápidas ou lentas. Ele comparou os períodos dessas oscilações contando sua própria pulsação. Registre-se que esse isocronismo já havia sido observado, no século X, pelo astrônomo árabe Ibn Junis, conforme Geymonat.

Estimulado ou não por essa observação, o fato é que Galileu realizou experiências com pêndulos de diversos comprimentos de corda e diferentes pesos. Nelas, percebeu que as oscilações desses pêndulos, embora de amplitudes (ângulo entre o fio na posição vertical e na da distância máxima alcançada na oscilação) diferentes, sempre levam o mesmo tempo na oscilação completa (ida e volta), conforme comunicou ao marquês italiano Guidobaldo del Monte (1545-1607), em carta que escreveu no dia 29 de novembro de 1602, segundo seus biógrafos: Stillman Drake (Galileu, Publicações Dom Quixote, 1981) e Cortes Pla (Galileu Galilei, Espasa-Calpe Argentina, S. A., 1946).

Sobre o pêndulo, é oportuno destacar três fatos curiosos. O primeiro deles é que o isocronismo Galileano levou o médico italiano Sanctorius Sanctorius (1561-1636) a inventar o pulsilogium para usar em diagnósticos médicos. Aliás, foi também esse médico que inventou o primeiro termômetro clínico, para auxiliar em seus diagnósticos, ao adaptar uma escala termométrica rudimentar no termoscópio inventado por Galileu, em 1592 ou 1597.

O segundo fato sobre o pêndulo refere-se à formulação correta de suas leis. Ela só foi apresentada pelo físico holandês Christiaan Huygens (1629-1695), em 1659, ao demonstrar matematicamente que a trajetória cicloidal é a que torna o período do pêndulo independente de sua amplitude. Com isso, determinou a relação entre o tempo de queda de um corpo ao longo de uma cicloide (curva gerada por um ponto situado sobre um círculo que se desloca ao longo de uma linha reta) e o tempo de sua queda ao longo do diâmetro do círculo gerador da cicloide. De posse dessa relação, obteve pela primeira vez a expressão para o período T (metade do tempo de uma oscilação completa) de um pêndulo simples: $T = \pi\sqrt{\ell/g}$ e, de posse dessa expressão, determinou o valor da aceleração da gravidade, ou seja: $g = 9,806 \text{ m/s}^2$. Nessa experiência, usou um pêndulo com $\ell = 6,18$ polegadas e com 4.964 oscilações duplas por hora. É oportuno registrar que Huygens publicou, em 1673, seu famoso livro Horologium Oscillatorium sive de Motu Pendulorum, no qual

descreveu suas experiências com pêndulos (simples e compostos), inclusive a construção de seu relógio de pêndulo.

O terceiro fato sobre pêndulo está ligado ao seu uso na determinação da velocidade de projéteis: o pêndulo balístico. Ele foi inventado pelo matemático e engenheiro militar inglês Benjamin Robins (1707-1751) e descrito em seu livro *New Principles of Gunnery*, publicado em 1742. Basicamente, esse tipo de pêndulo é constituído de um corpo suspenso por um fio, no qual se atira um projétil, cuja velocidade e, portanto, energia cinética se quer determinar. Trata-se de uma colisão inelástica e, desta maneira, após o choque do projétil com a massa do pêndulo os dois caminham juntos com a mesma velocidade. Hoje se sabe que, em primeira aproximação (já que se despreza a energia térmica), pode-se aplicar o princípio da conservação do momento linear e da energia (apenas cinética e potencial) do sistema projétil-pêndulo, antes e após a colisão, para se calcular a velocidade aproximada do projétil ao sair da arma.

Agora, vejamos as experiências realizadas por Galileu que o levaram a apresentar as leis da queda livre. Conforme registra Reston Jr., Galileu teria observado, da Torre (Campanário) da Catedral de Pisa, a queda de bolas de vários tamanhos e composição (chumbo, cobre, ouro, ébano, pórfiro), para contrastar um resultado descrito pelo filósofo italiano Girolamo Borro (1512-1592) que havia deixado cair, no mesmo instante e de uma janela bastante alta de sua residência, duas peças com a mesma forma e de pesos diferentes e observado que a mais pesada caía mais rapidamente que a mais leve, confirmando o que havia afirmado o filósofo grego Aristóteles de Estagira (384-322). Galileu, na suposta experiência da Torre de Pisa, observou que as bolas de pesos e materiais diferentes caíam quase ao mesmo tempo. Segundo a lenda, depois de realizar essa experiência, Galileu foi aclamado por uma multidão composta de estudantes, professores e filósofos. Provavelmente, pequenas vaias foram ouvidas por aristotélicos empedernidos, ao verem que as bolas não chegavam ao solo no mesmo instante. A diferença, teria respondido Galileu, se deve ao fato da resistência do ar. No vácuo, elas chegariam no mesmo instante, teria concluído. É oportuno registrar que o astronauta norte-americano Neil Alden Armstrong (n.1930), em sua histórica chegada à Lua (que não possui atmosfera), em 20 de julho de 1969, ao largar um martelo e uma pena e ver que tinham chegado ao solo lunar no mesmo instante, teria afirmado: Estão vendo? Galileu tinha razão! É ainda oportuno registrar que, segundo afirma o físico Peter R. Holland em seu livro *The Quantum Theory of Motion: An Account of the de Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, 1993), os corpos no vácuo não caem com a mesma aceleração, independentemente de sua massa, ou seja: $\vec{a} \neq -\vec{g}$. Creio que o teste dessa afirmação poderá ser confirmado na Lua (ou em um ambiente sem atmosfera), com os objetos caindo de grandes alturas, caso essa Mecânica Quântica Não-Ortodoxa venha a ser confirmada e aceita pela comunidade científica mundial.

Como no caso da lendária observação realizada por Galileu na Catedral de Pisa sobre o isocronismo do pêndulo, a suposta observação que fez no Campanário dessa Catedral sobre a queda dos corpos também não foi registrada diretamente por ele em seus trabalhos sobre o movimento dos corpos. Com efeito, no livro *De Motu* que escreveu relatando seus estudos, realizados entre 1589 e 1592, sobre a queda dos corpos, Galileu não menciona especificamente as experiências na Torre (inclinada) de Pisa, diz apenas que, em consequência de experiências que realizou sobre a queda dos corpos, chegou as seguintes conclusões: 1) As velocidades dos corpos em queda em um determinado meio são proporcionais à diferença entre seus pesos e o meio em questão; 2) No vácuo a velocidade do corpo depende do seu próprio peso total. Ainda como no caso da lendária observação na Catedral de Pisa, essa igualmente lendária observação realizada em seu Campanário, também foi descrita por Viviani, conforme afirmam Reston, Jr. e Rothman. É interessante registrar que o matemático flamengo Simon Stevinus (Stevin) de Bruges (1548-1620), em 1586, na Bélgica, realizou experiências sobre a queda dos corpos, ocasião em que observou que duas esferas de chumbo, uma dez vezes mais pesada que a outra, ao serem largadas de uma altura de 30 pés, chegaram ao chão ao mesmo tempo.

Embora Galileu haja escrito para o amigo, o frei Paolo Sarpi (1532-1623) (conhecido como o Maquiavel de Veneza), em 16 de outubro de 1604, sobre suas idéias iniciais a respeito das leis que regem o movimento dos corpos, elas só foram apresentadas e discutidas em seus dois famosos livros: *Dialogo supra i due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano* (“Diálogo sobre os dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomaico e Copernicano”, publicado em 1632, e *Discorsi e Dimostrazione 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”), de 1638.

No Dialogo, Galileu examinou a queda dos corpos em um navio parado ou em movimento e do alto de uma torre (seria a torre inclinada de Pisa?), o movimento de projéteis e o vôo das aves, em uma Terra em movimento. Desse modo, ele mostrou, por intermédio de argumentos lógicos, a impossibilidade de se determinar se um navio está ancorado ou movendo-se tranqüilamente no mar. Segundo Galileu, se um observador estiver em um camarote sob o convés do referido navio, a simples observação que constatou do movimento de insetos no ar, ou do de peixes em uma banheira cheia d’água, é insuficiente para ele determinar o estado de movimento do navio, isto é, se ele está parado ou em movimento retilíneo uniforme. Ainda nesse livro, discutiu experiências idealizadas (lógicas) sobre o movimento ascendente e descendente de corpos em planos inclinados, relacionados com o trabalho sobre impetus (veja verbete nesta série) que havia realizado em 1613, bem como tratou de duas questões polêmicas: a das marés e da rotação da terra.

Sobre a rotação da Terra, Galileu refutou o argumento principal dos aristotélicos-ptolomaicos, qual seja, de que se nosso planeta girasse em torno de seu centro, os corpos não poderiam ficar em cima da mesma, pois seriam lançados para fora (isto é, haveria extrusão); a própria Terra seria despedaçada segundo aqueles argumentos. Em favor de seu argumento, Galileu afirmou que quando um corpo é lançado horizontalmente a partir de um ponto da superfície terrestre, ele tem um “ímpeto” para se mover segundo a tangente, mas tem ao mesmo tempo uma tendência de se desviar para baixo, por causa da gravidade. E esse desvio, por menor que seja, basta para reter o corpo na superfície de nosso planeta, concluiu Galileu. Para justificar essa conclusão, ele apresentou argumentos geométricos nos quais comparou a distância percorrida pelo corpo na tangente à superfície terrestre e a percorrida em queda devido à ação da gravidade, e observou que esta última é muito maior que a primeira. No entanto, não soube precisar o quanto, devido à insuficiência daqueles argumentos. Em vista disso, em 1636, o matemático, filósofo e teólogo, o padre franciscano francês Marin Mersenne (1588-1648) mostrou que Galileu havia cometido um erro de interpretação em seus argumentos.

Com relação ao problema das marés, Galileu voltou a cometer o mesmo erro que havia praticado em 1616, quando afirmou que as marés decorriam dos dois movimentos da Terra: o de translação em torno do Sol e o de rotação já referido. Portanto, disse ainda Galileu, a associação desses dois movimentos faz com que alguns pontos da Terra tenham maior velocidade resultantes e outros com menor velocidade e, desse modo, o ciclo de marés deveria ser de 24 horas. Contudo, essa explicação de Galileu é inconsistente com as observações das marés, cujo ciclo conhecido é de cerca de 12 horas. Registre-se que a explicação correta das marés foi apresentada pelo físico e matemático Sir Isaac Newton (1642-1727), com a sua Lei da Gravitação Universal, proposta em 1687.

Em toda a discussão referida acima, Galileu usou o princípio da relatividade do movimento que, em linguagem atual, é representado pelas expressões: $\mathbf{x}' = \mathbf{x} + \mathbf{Vt}$, $\mathbf{y}' = \mathbf{y}$, $\mathbf{z}' = \mathbf{z}$, $\mathbf{t}' = \mathbf{t}$ (ou, equivalentemente, $\mathbf{v}' = \mathbf{v}$), onde \mathbf{x}' é a posição de uma partícula que se desloca com uma velocidade \mathbf{v}' em relação a um observador fixo \mathcal{O}' , e \mathbf{x} é a posição dessa mesma partícula que se desloca com a velocidade \mathbf{v} em relação a um outro observador \mathcal{O} que, por sua vez, se desloca com a velocidade constante \mathbf{V} em relação ao observador \mathcal{O}' , e na direção de uma reta escolhida [no caso, o eixo dos \mathbf{x}' (\mathbf{x})]. É interessante ressaltar que esse “princípio Galileano”, que deixa invariante a Segunda Lei de Newton ($\mathbf{\ddot{x}}' = \mathbf{\ddot{x}}$), recebeu do físico alemão Philipp Frank (1884-1966) o nome de Transformação de Galileu, em trabalho realizado em 1909 [Sitzungsberichte Berlin Akademie der Wissenschaften (Wien) 118, p. 373]. Ressalte-se também que, a invariância indicada acima, demonstra a afirmação de Galileu sobre a impossibilidade de determinar o movimento de um navio deslocando-se com velocidade constante.

No Discorsi, Galileu abordou geometricamente as leis do equilíbrio dos corpos - a hoje conhecida Resistência dos Materiais (sua Primeira Ciência) – e as leis do movimento (sua Segunda Ciência). Nesta, inicialmente, estudou o movimento uniforme e o movimento uniformemente acelerado (conforme dizemos hoje) para, em seguida, aplicá-los à queda livre dos corpos, ao movimento dos corpos em planos inclinados, ao movimento do pêndulo, e ao movimento dos projéteis. Ao estudar a queda livre dos corpos, descobriu suas célebres leis: 1^a.) As velocidades (\mathbf{v}) dos corpos em queda livre são proporcionais aos tempos (\mathbf{t}) gastos nas

mesmas - $v \propto t$; 2^a .) Os espaços (s) percorridos pelos corpos em queda livre são proporcionais aos quadrados dos tempos gastos em descrevê-los - $s \propto t^2$.

É interessante notar que Galileu usou um artifício engenhoso para medir esses tempos. Tomou um recipiente de grandes dimensões transversais, fez um diminuto furo em seu fundo e colocou uma certa quantidade de água que fluía por esse orifício até uma balança. Ora, devido às grandes dimensões do recipiente, praticamente a altura do nível d'água permanecia invariável, de modo que o tempo gasto na vazão era proporcional ao peso d'água que chegava à balança.

É interessante observar que, em 1784, o físico e matemático inglês George Atwood (1745-1807) publicou o livro intitulado *A Treatise on the Rectilinear Motion* no qual descreveu um dispositivo – mais tarde conhecido como máquina de Atwood – composto de duas massas (m) iguais, ligadas por um fio muito leve e que passa pelo sulco de uma roldana, também leve, e com o atrito desprezível em seu eixo de rotação. Quando uma terceira massa m' é adicionada a uma das extremidades da máquina, o sistema se desloca com uma aceleração constante (a) dada por: $a = m'g/(2m + m')$, expressão essa que concorda com as leis da queda livre obtidas por Galileu. Também por intermédio dessa máquina de Atwood, foi possível medir a aceleração da gravidade g com alguma precisão, já que o método direto da determinação de g , por intermédio do pêndulo, teve de esperar o desenvolvimento de relógios precisos.

Ainda no *Discorsi*, ao aplicar suas leis do movimento uniforme e uniformemente acelerado ao movimento dos projéteis, Galileu demonstrou que sua trajetória é parabólica (claro, não considerando o efeito do ar atmosférico). Demonstrou mais ainda que o alcance máximo dos projéteis em lançamento oblíquo ocorre para um ângulo de 45° , e que nesse tipo de lançamento, o mesmo alcance ocorre para ângulos simétricos em relação a 45° . Registre-se que seu aluno, em 1630, o físico italiano Evangelista Torricelli (1608-1647) já havia chegado a esse mesmo resultado. É interessante chamar a atenção para o fato de que somente por ocasião da Primeira Guerra Mundial (1914-1918) é que foi descoberto, acidentalmente, ser o alcance do projétil maior se o canhão se elevasse um pouco acima de 45° , conforme registra o físico norte-americano Keith R. Symon em seu livro *Mechanics* (Addison-Wesley, 1961).

Na parte referente à Segunda Ciência, Galileu descreveu no *Discorsi* suas experiências com líquidos e com a resistência dos materiais, chegando a determinar a resistência à tração de fios de cobre, bem como desenvolveu teorias sobre essa resistência. Segundo Asimov (op. cit.), Galileu foi o primeiro a mostrar que, se um corpo cresce uniformemente em todas as dimensões, o faz à custa de um enfraquecimento progressivo. Assim, o volume aumenta ao cubo, mas a resistência aumenta apenas ao quadrado. É por causa dessa lei, depois conhecida como Lei do Cubo-Quadrado, que os animais de grande porte necessitam de patas proporcionalmente mais robustas que os de pequeno porte. Também nessa Segunda Ciência, Galileu estudou a adesão e a aderência dos corpos e a semelhança física entre os mesmos. No entanto, ele não chegou a encontrar nenhuma relação entre a tração exercida por uma força e seu respectivo alongamento. Essa relação só foi obtida pelo físico inglês Robert Hooke (1635-1703), em 1678, a hoje conhecida Lei de Hooke.

Creemos ser oportuno concluir esse verbete sobre o trabalho de Galileu, dizendo que, apesar do aspecto revolucionário desse trabalho, principalmente em sua luta no sentido de reformular a física aristotélica, ele apresentou momentos de atitude reacionária, como, por exemplo, ao afirmar que os cometas eram ilusões atmosféricas, contrariando, assim, evidências de seu próprio telescópio (vide verbete nesta série), que utilizara por diversas vezes para refutar opiniões de Aristóteles. Talvez uma das atitudes mais reacionárias de Galileu, foi a de ignorar os trabalhos do astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630), principalmente a forma elíptica das órbitas planetárias proposta por ele no livro intitulado *A Nova Astronomia*, publicado em 1609, já que Galileu só concebia o movimento dos corpos celestes se fossem explicados por intermédio de círculos e epiciclos. Isso não é de estranhar, pois o modelo de Copernicano, arduamente defendido por Galileu, constituía-se de uma série de círculos e epiciclos, como, aliás, também era o modelo Ptolomaico.