



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo
www.bassalo.com.br

O Tempo na Mecânica Clássica.

De um modo geral, para entender um fenômeno em nosso Universo é necessário conhecer a **lei** que o rege. Conhecida essa **lei**, procura-se, então, quais conceitos (e suas relações) são importantes, não só para a sua compreensão, bem como para a previsão de novos aspectos desse mesmo fenômeno. Em Física, para as suas **leis** [Richard Philips Feynman, **O que é uma lei física?** (Gradiva, 1999)], existem alguns conceitos fundamentais, dentre os quais o **tempo** é um dos principais, já que ele é importante para saber como evoluiu ou evoluirá um fenômeno em estudo. Muito embora hoje a importância do **tempo** seja inquestionável, o seu conceito, contudo, ainda continua a ser uma questão polêmica.

É claro que desde o aparecimento do **Homem** em nosso Universo, o **tempo** sempre esteve presente em suas observações, já que algumas coisas por ele observadas tinham começo e fim (a vida), outras se repetiam periodicamente (movimento dos astros) e, por fim, outras eram aparentemente eternas (minerais e o próprio Universo). Porém, o **Homem** custou a conhecer a relação direta entre o **tempo** e o que observava. Por exemplo, tomemos o caso do **movimento de um modo geral**. Parece que foram os gregos antigos os primeiros a estudar o movimento dos corpos. Com efeito, o filósofo grego Aristóteles de Estagira (384-322) tratou o movimento, quer do ponto de vista **cinemático**, isto é, apenas relacionando com sua trajetória geométrica; quer do ponto de vista **dinâmico**, para o qual é importante saber a sua causa: a **força**. Assim, para esse filósofo, uma pedra lançada em certa direção descrevia uma trajetória retilínea até um determinado ponto e, depois caía na vertical. Por outro lado, a causa do movimento da pedra, afirmava o *estagirita*, era devido a uma força exercida pelo ar ao ser empurrado para os lados pela passagem da pedra através do mesmo.

Apesar da afirmação de Aristóteles sobre a trajetória retilínea de um corpo lançado no espaço, logo se verificou tratar-se de uma trajetória curva. Porém, restava saber a forma dessa curva. Uma pergunta que se coloca com relação a essa questão, é a seguinte: por que os gregos antigos tiveram tanta dificuldade em compreender o movimento aproximadamente parabólico dos corpos lançados ao espaço se, por exemplo, as curvas cônicas (elipse, parábola e hipérbole) já haviam sido descobertas pelo matemático grego Menecmo

(Menaechmus) de Atenas (f.c.350 a.C.) e estudadas pelo matemático grego Apolônio de Pérgamo (c.261-c.190) por volta de 220 a.C.? Duas parecem ser as razões básicas. A primeira delas é devida ao fato de que não tinham a ideia de movimento relativo e, conseqüentemente, a ideia da independência dos movimentos, ideias essas só aparecidas no começo do Século 17, para as quais é fundamental o conceito de **referencial**. A segunda razão decorre, em nosso entendimento, do desconhecimento que tinham dos conceitos modernos de limite, derivada e integral, conceitos esses necessários para a definição de **velocidade** e de **aceleração**, que são os parâmetros físicos característicos do movimento, e que só foram definidos na segunda metade daquele Século. Para esses três conceitos (**referencial**, **velocidade** e **aceleração**), o **tempo** e o **espaço**, são grandezas essenciais.

As ideias aristotélicas sobre movimento (considerado como uma **categoria-qualidade** do corpo) permaneceram por muitos séculos até serem re-estudadas pelos físicos e matemáticos da Idade Média e da Renascença. Na Idade Média, o problema do movimento foi analisado por professores das *Universidades de Oxford e de Paris*. Os *oxfordianos* – conhecidos também como *calculadores* (vide verbete nesta série) - consideraram o movimento analisando o problema aristotélico relacionado ao crescimento (*intensio*), ou ao decréscimo (*remissio*), em intensidade, das qualidades (grandezas) cinemáticas. Esses cientistas conseguiram, trabalhando apenas hipoteticamente e sem nenhuma tentativa experimental (presume-se!), demonstrar que o **movimento uniformemente disforme** (hoje chamado **variado**) era equivalente ao **movimento uniforme**, desde que este último fosse descrito com a *velocidade média* do primeiro, conforme dizemos hoje. Esse resultado ficou conhecido como a *Regra de Merton* (RM), porque os *calculadores* ensinavam no *Merton College*, da *Universidade de Oxford*.

Essa RM foi demonstrada geometricamente pelo matemático alemão, o Bispo Nicholas Oresme (Nicole d´Oresme) (c.1325-1382), do *Colégio Navarra* da *Universidade de Paris*. Em seus estudos sobre o movimento, Oresme representava a variação da intensidade da qualidade de movimento (hoje, **velocidade**) de modo geométrico. Assim, ao longo de uma linha horizontal marcava pontos (chamado por ele de *longitudes*, que nada mais eram do que os instantes de **tempo**) e, em cada um desses pontos, levantava uma perpendicular a essa mesma linha, cujo comprimento (chamado por ele de *latitude*) representava a intensidade da qualidade de movimento. Desse modo, o **movimento uniforme** era indicado por um retângulo, e o **uniformemente disforme** por um trapézio ou um triângulo. Oresme afirmou ainda que a soma das *latitudes* (hoje, **velocidades**) nesses gráficos, significava a distância (hoje, **espaço**) percorrida pelo corpo. Resultados análogos a esses de Oresme foram

encontrados pelo seu professor, o filósofo francês Jean Buridan (1300-1358). Vê-se, portanto, que esses estudiosos medievais substituíram, para o caso do movimento de um corpo, a *categoria-qualidade* aristotélica, por uma *categoria-quantidade*.

Não obstante o esforço dos estudiosos da Idade Média no sentido de entender e descrever o movimento, o fato de ser a Terra considerada como imóvel, segundo indicava o **modelo planetário geocêntrico** do astrônomo grego Cláudio Ptolomeu (85-165), proposto entre 151-157 d.C., fez com que, presumivelmente, esses estudiosos não se preocupassem em descrever o movimento de um corpo em relação a um outro, também em movimento, isto é, eles não estudaram o **movimento relativo**. No entanto, com o **modelo planetário heliocêntrico** proposto em 1543 pelo astrônomo polonês, o Cônego Nicolau Copérnico (1473-1543), surgiu a necessidade de descrever o movimento de um corpo em relação a uma Terra móvel que, contudo, apresentava uma questão interessante, qual seja, a de saber por que um corpo lançado para cima não cairia a oeste de sua posição inicial, como afirmavam os aristotélicos? Esta e outras questões sobre o movimento começaram a ser respondidas pelos estudiosos da Renascença (vide verbete nesta série).

Parece haver sido o artista e inventor italiano Leonardo da Vinci (1452-1519) um dos primeiros a fazer experiências sobre o movimento dos corpos e relacioná-los explicitamente com o **tempo**. Por exemplo, ao estudar o movimento num plano inclinado, observou que *os tempos da queda de um corpo num plano inclinado variam inversamente com os senos de seus ângulos de inclinação*. Da Vinci também estudou novos tipos de movimento, principalmente o **lançamento oblíquo** de projéteis. Ao observar esse tipo de movimento, concluiu que sua trajetória era a de uma curva contínua e não, como acreditavam os artilheiros e pirotécnicos de sua época, uma linha composta de dois segmentos de reta ligados por um arco de círculo. Essa afirmação foi também confirmada pelo físico italiano Niccolo Fontana Tartaglia (c.1500-1557), em 1546.

Como vimos em verbete desta série, a questão da descrição do movimento de um projétil em relação a uma Terra (ou um outro corpo qualquer) móvel foi abordada pelo filósofo italiano Giordano Bruno (1548-1600) ao propor a seguinte experiência. Sejam duas pessoas, uma em um navio em **movimento uniforme** e a outra na margem de um rio. Então, quando estiverem uma defronte da outra, deixam cair uma pedra da mesma altura, em queda livre. Cada pessoa, em particular, verá cair sua pedra ao pé da vertical, numa trajetória retilínea. No entanto, a trajetória descrita pela pedra lançada por uma dessas pessoas, vista pela outra, será uma curva. Experiências desse tipo foram realizadas pelo engenheiro francês Jean Gallé, no mar Adriático, por volta de

1625, e pelo físico francês Jean-Baptiste Morin (1583-1656), em 1634, no rio Sena.

O estudo do movimento de corpos também foi objeto de pesquisa por parte do físico e astrônomo italiano Galileu Galilei (1564-1642) entre 1589 e 1592, por ocasião em que era professor da *Universidade de Pisa*. O resultado dessa pesquisa foi apresentado no livro **Dialogo supra i due Massimi Sistemi Del Mondo Tolemaico e Copernicano** (“Diálogo sobre os dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomaico e Copernicano”) [Discurso Editorial (2001)], publicado em 1632, no qual Galileu discutiu a queda de um corpo em um navio parado ou em **movimento uniforme**, bem como o movimento de projéteis e o voo das aves, em uma Terra móvel. Em toda essa discussão, Galileu usou o que, mais tarde, ficou conhecido como o **princípio da relatividade do movimento** segundo o qual, um corpo sob a ação de dois movimentos, descreve um terceiro que é resultante da composição dos dois, isoladamente. Por exemplo, se um corpo é lançado horizontalmente do alto de uma torre, ele descreverá uma parábola (no caso de ser desprezado o ar atmosférico) que resulta da composição de um **movimento uniforme** (horizontal) e de uma queda livre (**movimento uniformemente variado**).

Esse **princípio da independência de movimento de Giordano Bruno-Galileu** foi corretamente utilizado pelo físico francês Pierre Gassendi (1592-1655), em 1641, ao examinar a queda vertical de um corpo do alto do mastro de uma galera em movimento. Esse princípio hoje conhecido como **Princípio da Relatividade de Galileu** (PRG) é hoje expresso na forma:

$$x' = x + V t, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t,$$

onde x' é a posição de uma partícula em relação a um objeto fixo O' , e x é a posição dessa mesma partícula em relação a um outro objeto O que se desloca com uma velocidade constante V em relação a O' e na direção $O'x'$ (ou Ox). Usando as expressões acima e lembrando da definição de velocidade (espaço dividido pelo tempo), teremos a seguinte expressão:

$$x'/t' = x/t' (=t) + V t/t' (=t) \rightarrow v' = v + V,$$

que é a famosa **Lei de Composição de Velocidades de Galileu**. É oportuno registrar que essa lei foi também encontrada, independentemente, pelos franceses, o físico, matemático e filósofo francês René du Perron Descartes (1595-1650), em 1638, e o matemático Gilles Personne de Roberval (1602-1675), em 1639 (vide verbete nesta série).

Muito embora Galileu não usasse o PRG na forma analítica como descrita acima, ele o utilizava por intermédio de argumentos lógicos diretos, auxiliados pela Geometria, como se pode ver em seu **Dialogo**. Foi também dessa maneira que Galileu, ainda nesse livro, demonstrou que o PRG levava a um outro resultado importante, qual seja, o de ser impossível determinar se um navio está ancorado ou em **movimento retilíneo uniforme**, realizando uma experiência mecânica em algum de seus camarotes fechados.

A relação explícita (e correta) entre o movimento dos corpos e o **tempo**, foi apresentada por Galileu em seu livro **Discorsi i Dimostrazioni Matematiche intorno à Due Nuove Scienze Attenenti alla Meccanica e Movimenti Locali** (“Discursos e Demonstrações Matemáticas em torno de Duas Novas Ciências”) [Great Books of the Western World 26 (Encyclopaedia Britannica Inc./Chicago, 1993)], publicado em 1638, no qual há o estudo da resistência dos corpos em equilíbrio: sua *Primeira Ciência* [Fernando Luiz Lobo Barboza Carneiro, *La Recherche* 147, p. 1166 (1983)], e o do movimento dos corpos, sua *Segunda Ciência*. Assim, ao aplicar o resultado de suas pesquisas sobre os movimentos **uniforme** e **uniformemente variado** dos corpos em queda livre e em planos inclinados, Galileu descobriu as seguintes leis: 1) *As velocidades dos corpos em queda livre são proporcionais aos tempos gastos na queda*; 2) *Os espaços percorridos pelos corpos em queda livre são proporcionais aos quadrados dos tempos gastos em descrevê-los* (vide verbete nesta série).

A *Segunda Ciência* de Galileu – a **Mecânica** – foi sistematizada pelo físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727), em seu tratado intitulado **Philosophiae Naturalis Principia Mathematica** (“Princípios Matemáticos da Filosofia Natural”) [Great Books of the Western World 32 (Encyclopaedia Britannica Inc./Chicago, 1993)], publicado em 1687, composto de três Livros. No Livro I, Newton apresentou uma série de definições nas quais são conceituadas a **quantidade de matéria (massa)**, a **força inata da matéria (inércia)** e a **força centrípeta**. Logo em seguida à apresentação desses conceitos, Newton apresentou as famosas definições de **espaço** (*absoluto, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre similar e imóvel*) e de **tempo** (*absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e da sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa e é também chamado de duração*). Em seguida, Newton examina a questão relacionada com os movimentos absoluto e relativo dos corpos, concluindo que o movimento ou o repouso de um corpo é sempre tomado em relação ao **espaço imóvel das estrelas fixas**, espaço esse mais tarde conceituado como **referencial inercial** (RI). É oportuno destacar que, para Newton, a **massa** também era **absoluta**, isto é, não dependia do RI.

Ainda no Livro I dos **Principia**, Newton enunciou os célebres **axiomas** ou **leis do movimento**:

1ª Lei – **Lei da Inércia**: *Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele;*

2ª Lei – **Lei da Força**: *A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida;*

3ª Lei – **Lei da Ação e Reação**: *A toda a ação há sempre oposta uma reação igual, ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.*

Depois de apresentar as **leis do movimento**, Newton começa então a estudar o movimento geral dos corpos. Ainda no Livro I, há o tratamento do movimento curvilíneo, com ênfase na questão da **força centrípeta**, como causa desse tipo de movimento. No Livro II, Newton discutiu o movimento de corpos em meios resistentes e, por fim, no Livro III, aplicou todos os resultados obtidos anteriormente para *demonstrar a estrutura do sistema do mundo*, por intermédio da **Lei da Gravitação Universal**: - *A gravidade opera proporcionalmente à quantidade de matéria e propaga sua virtude para todos os lados a distâncias imensas decrescendo sempre com o inverso do quadrado da distância.*

Para o objetivo deste verbete, vamos nos deter um pouco sobre a **Segunda Lei de Newton** (SLN). Esta **lei** e mais o PRG nos permitem afirmar que a Mecânica é incapaz de determinar a velocidade de um **referencial inercial**. Vejamos como. Seja o movimento retilíneo de um corpo (tomado na direção x , sem perda de generalidades) sob a ação de uma força (\vec{F}) que, neste caso especial, terá a componente F_x . Desse modo, usando a SLN (em sua notação euleriana, conforme veremos mais adiante), ou seja: $F_x = m a_x = m d^2x/dt^2$. Por outro lado, considerando o PRG, visto acima, resultará que:

$$F'_{x'} = m' d^2x'/dt'^2 = m d^2(x + V t)/dt^2 = m d^2 x /dt^2 = F_x .$$

Esse resultado significa dizer a **lei da força** apresenta a mesma expressão em qualquer RI, quer este esteja parado ou em **movimento retilíneo uniforme**. Este resultado tem hoje o estatuto de um Teorema: - *As leis da Mecânica são invariantes por uma transformação de Galileu.*

Apesar da sistematização das **leis do movimento** realizada por Newton, havia uma grande dificuldade com as mesmas, já que elas só se aplicam a corpos que pudessem se comportar como partículas, isto é, pontos geométricos e massivos. Em vista disso, no Século 18 foi desenvolvida a Mecânica dos Sólidos, para a qual houve a contribuição de vários cientistas (vide verbete nesta série). No entanto, para o escopo deste verbete, vamos considerar as mais fundamentais. As **leis gerais** da Mecânica dos Sólidos foram formuladas pelo físico e matemático suíço Leonhard Euler (1707-1783), em 1776, com os seguintes enunciados (vide verbete nesta série):

1ª Lei – A força total (\vec{F}) atuando em um corpo é igual à taxa de variação do momentum linear total ($\vec{P} = m\vec{v}$): $\vec{F} = d\vec{P}/dt = m d\vec{v}/dt = m \vec{a}$ [**equação de Newton-Euler** (EN-E)];

2ª Lei – O torque total ($\vec{N} = \vec{r} \times \vec{F}$) é igual à taxa de variação do momento do momento (momento angular $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{P}$): $\vec{N} = d\vec{L}/dt$.

Uma outra contribuição importante para o desenvolvimento da Mecânica dos Sólidos (Mecânica Geral) foi apresentada pelo matemático francês Joseph Louis, Conde de Lagrange (1736-1813) em seu livro **Mécanique Analytique** (“Mecânica Analítica”), publicado em 1788. Nesse livro, há um sumário de todo o trabalho no campo da Mecânica, desde Newton até o instante em que escreveu esse livro. No entanto, nele, Lagrange não considerou nem as construções geométricas utilizadas por Newton em seu **Principia** e nem a Mecânica de Euler, mas somente operações analíticas e algébricas e dois outros **princípios**: 1) o **variacional da mínima ação**; 2) o do **trabalho virtual**. Além disso, em seu estudo da Mecânica Analítica, Lagrange considerou o **tempo** como uma quarta dimensão (vide verbete nesta série) e não como um parâmetro, como fizera Euler ao desenvolver a sua Mecânica. Note que essas duas descrições do movimento são conhecidas, respectivamente, como **lagrangeana** e **euleriana** (vide verbete nesta série).

Um novo aspecto conceitual da Mecânica foi considerado pelo matemático e físico francês Pierre Simon de Laplace (1749-1827) em sua importante obra intitulada **Mécanique Celeste** (“Mecânica Celeste”), composta de cinco volumes, publicado entre 1799 e 1825. Nesse livro, Laplace aplica a Mecânica Analítica ao movimento dos astros no Universo. Contudo, um dos importantes resultados da Mecânica Celeste já havia sido demonstrado por Laplace e Lagrange, em 1786, ao estudarem a excentricidade total das órbitas dos planetas do sistema solar: a **estabilidade**. Para uma discussão sobre essa

estabilidade ou ***determinismo físico***, ver: David Miller (Organizador), **Textos Escolhidos de Popper** (Contraponto, 2010).



ANTERIOR

SEGUINTE