SEARA DA CIÊNCIA
CURIOSIDADES DA FÍSICA
José Maria Bassalo

<u>Uma Breve História das Máquinas Simples</u>.

As primeiras civilizações (dos sumerianos, egípcios, caldeus, assírios, fenícios, chineses, dentre outras) que viveram milhares de anos antes de Cristo, usaram **máquinas simples** [rodas, arados, balanças, cunhas, planos inclinados, parafusos, alavancas (p.e. os remos das canoas e veleiros), roldanas ou polias] para melhorar a agricultura, construir cidades, ampliar o comércio, guerrear e, com isso, promover o seu ***processo civilizatório***, conforme salienta o antropólogo brasileiro Darcy Ribeiro (1922-1997) em seu livro intitulado **O Processo Civilizatório: Etapas da Evolução Sócio Cultural** (Vozes, 1978). Neste verbete, iremos ver como essas **máquinas simples** foram entendidas em seu aspecto físico-matemático.

Conforme vimos em verbete desta série, parece haver sido o filósofo, astrônomo e matemático grego Archytas de Tarentum (f.c. 400-350) quem construiu o primeiro autômato consistindo em um pombo voador de madeira, assim como construiu também vários instrumentos mecânicos para descrever curvas geométricas. Ele também desenvolveu a teoria da **roldana** ou **polia**, uma das primeiras **máquinas simples** baseada no ***princípio da alavanca***. Este princípio teve uma primeira explicação por parte do filósofo grego Aristóteles de Estagira (384-322) ao afirmar que os pesos colocados nas extremidades de uma **alavanca**, variam na razão inversa das velocidades com que as suas pontas se deslocam quando o equilíbrio é rompido (Jun´ichi Osada, **Evolução das Idéias da Física**, Edgard Blücher Ltda./EDUSP, 1972).

Muito embora o astrônomo grego Estratão de Lâmpsaco (340-270) haja também se referido ao ***princípio da alavanca***, foi o matemático grego Arquimedes de Siracusa (c.287-212) quem o formalizou em seu tratado **De Aequiponderantibus** ("Sobre o Equilíbrio dos Planos"). Com efeito, nos dois livros que compõem esse tratado, Arquimedes além de apresentar as ***leis da alavanca***, discutiu, também, o problema da determinação do centro de gravidade de qualquer figura plana, inclusive do segmento parabólico [Arquimedes, **Great Books of the Western World 10** (Encyclopaedia Britannica, Inc., 1993)]. Tais estudos se constituem no que ficou então conhecido como ***Estática***: o estudo do equilíbrio dos corpos.

Segundo R. Locqueneux [**História da Física** (Publicações Europa-América, 1989)], Arquimedes formulou as leis básicas da Estática a partir de hipóteses ou "pedidos" dotados de um caráter de evidência, deduzindo deles, por intermédio de argumentos lógicos diretos e, geometricamente, várias proposições. Por exemplo, partindo de seu Postulado 1, qual seja: *Pesos iguais a igual distância estão em equilíbrio, e pesos iguais a distâncias desiguais não estão em equilíbrio, mas inclinam-se para o peso que está na maior distância*, Arquimedes demonstrou duas proposições, às quais denominou 6$^{a.}$ e 7$^{a.}$ – *Grandezas comensuráveis (*6$^{a.}$*) ou incomensuráveis (*7$^{a.}$*) equilibram-se quando são* *inversamente proporcionais às suas distâncias ao ponto de apoio* (Arquimedes, op. cit.). Essas proposições ficaram conhecidas como as ***Leis da Alavanca de Arquimedes***. Conforme vimos em verbete desta série, foi o historiador grego Plutarco (c.46-c.120) quem afirmou que a convicção firme de Arquimedes sobre a potência de uma **alavanca**, levou esse grande engenheiro da Antiguidade ao famoso apotegma: *Dai-me uma alavanca e um ponto de apoio e eu moverei a Terra*.

Em nossa Era Cristã (d.C.), as **máquinas simples** foram objeto de estudo por parte do engenheiro grego Heron de Alexandria (c. 20 d.C.- ?), que as tratou em sua **Mecânica**, obra composta de três livros. No Livro II, apresentou as **máquinas simples** e os problemas mecânicos da vida diária, enquanto no livro III há a descrição da construção das mais variadas espécies de máquinas. Por exemplo, ele utilizou a ***roda dentada*** para converter as rotações das rodas de uma carroça em giros de um ponteiro, constituindo-se, desse modo, em uma espécie de ***velocímetro primitivo***. Muito embora haja cometido alguns erros sérios de matemática nessa obra, Heron, contudo, generalizou a lei da ***alavanca de Arquimedes*** ao afirmar que *todo aumento de força se fazia com um devido encurtamento da distância*, bem como utilizou o conceito atual de **máquina**, qual seja, o de que *a máquina serve para canalizar e ampliar o trabalho*. Registre-se que esse livro de Heron sobreviveu graças a uma tradução efetuada pelos árabes, porém, com alterações. Registre-se, também, que esse livro foi citado pelo matemático grego Pappus de Alexandria (c.260 a.C.- ?) que, inclusive, apresentou uma primeira aproximação da Teoria do Plano Inclinado.

Um outro avanço para o entendimento do ***princípio da alavanca*** foi dado pelo artista, inventor e cientista italiano Leonardo da Vinci (1452-1519) ao reconhecer a importância do ***braço de alavanca***. Com efeito, em seus escritos sobre esse tema, demonstrou que dada uma **alavanca** AB, de extremidade A móvel, se em sua extremidade B são aplicados dois pesos, um vertical P e um horizontal Q (este aplicado por intermédio de uma **roldana**), e se o equilíbrio dessa **alavanca** ocorre para uma dada posição de sua inclinação, então a relação P/Q depende das distâncias, horizontal e vertical, entre, respectivamente, as direções de P e Q e o ponto de rotação A. Essas distâncias são justamente as ***alavancas potenciais***, conforme o próprio da Vinci as denominou, ou os ***braços de alavanca*** de P e Q, conforme mais tarde foram reconhecidos quando foi introduzido o conceito de ***momento estático*** no estudo da Estática, conforme veremos mais adiante. É oportuno registrar que resultados análogos a esse de da Vinci foram obtidos por Guido Ubaldi.

Como é bastante conhecido, da Vinci foi um exímio idealizador dos mais vários tipos de máquinas, desde as **máquinas simples** (até então conhecidas) como, também, imaginou outros tipos que estavam além de sua época, dos quais se destacam dispositivos para fazer o homem voar (avião e helicóptero), barcos capazes de navegar sob as águas e tanques de guerra. Todas essas máquinas foram concebidas como um conjunto de engrenagens, cadeias e rodas dentadas. Convém ressaltar que para realizar tais projetos, da Vinci observou o voo das aves bem como o movimento dos peixes. Para detalhes dessas máquinas, ver: Clifford Ambrose Truesdell III, **Essays in the History of Mechanics** (Springer-Verlag, 1968).

É interessante notar que grande parte dos trabalhos de da Vinci foram escritos em caracteres invertidos, isto é, escritos com a mão esquerda e da direita para a esquerda, e só decifráveis diante de um espelho. No entanto, existe uma controvérsia em relação a essa postura de da Vinci. Alguns historiadores falam que ele agia dessa maneira para proteger suas idéias; outros, contudo, afirmam que, sendo ambidestro, ele usava a mão direita para expressar o resultado de seus estudos e reflexões críticas, e a esquerda, para expressar o que lhe vinha espontaneamente à mente; e, há ainda outros que registram que sendo notas sobre inventos de outros, essa atitude dissimulava o plágio [Alexandre Koyré, **Estudos de História do Pensamento Científico** (Forense-Universitária/EUnB, 1982)].

Muito embora a questão do **atrito** já preocupasse as civilizações antigas (como se pode ver em um mural em uma tumba egípcia, datado de cerca de 1.900 a.C., que mostra uma estátua de pedra sendo puxada por um trenó, enquanto um homem, à frente dele, coloca um lubrificante em seu caminho), foi da Vinci o primeiro a estudar o **atrito** nas máquinas, chegando a enunciar suas leis: - *1ª) O atrito provocado pelo mesmo peso terá a mesma resistência no início do movimento, embora as áreas ou comprimentos de contato sejam diferentes*; *2ª.) O atrito provoca o dobro do esforço se o peso for dobrado*. Observe-se que resultado análogo a esse foi obtido pelo físico francês Charles Augustin Amontons (1663-1705), em 1699, e que foi o físico francês Charles Augustin Coulomb (1736-1806) que, em 1781, realizou muitas experiências sobre **atrito** e assinalou a diferença entre **atrito estático** e **atrito dinâmico**. Mais detalhes sobre **atrito** ver verbete nesta série.

Ainda em seus estudos, da Vinci discutiu a impossibilidade do movimento perpétuo e, até certo ponto, compreendeu o ***princípio do paralelograma das forças***, do qual falaremos mais adiante. No entanto, foi o matemático e físico flamengo Simon Stevinus (Stevin) de Bruges (1548-1620) em seu livro intitulado **De Beghinselen der Weeghconst** ("Princípios Fundamentais da Arte da Balança"), publicado em 1586, quem demonstrou a impossibilidade do movimento perpétuo. Para tanto, usou uma corrente sem fim (formada de um colar de esferas ou ***clootcrans***) e dois planos inclinados reunidos, de modo a formar um triângulo e, com isso, determinou, geometricamente, que a corrente deveria permanecer imóvel. Baseado nesse resultado, ele estudou ainda naquele livro (e também geometricamente) a condição de equilíbrio de toda espécie de corpos (esféricos, cilíndricos, prismáticos etc.) em um **plano inclinado**, lançando mão de arranjos mecânicos envolvendo outras **máquinas simples**, principalmente, balanças e **polias** (**roldanas**) (estas são formadas de um disco com um sulco em sua periferia). Em seu estudo sobre **polias** e suas combinações, chegou a um importante resultado: *Em um sistema de polias em equilíbrio, são iguais os produtos dos pesos pelos deslocamentos respectivos*. Observe-se que esse resultado contém o germe do ***princípio da velocidade (deslocamento) virtual***, que foi mais tarde, em 1717, discutido e analisado pelo matemático suíço John (Johann, Jean) Bernoulli (1667-1748) [Ernst Mach, **The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development** (The Open Court Publishing Company, 1960)].

É interessante registrar que sobre a sua descoberta – conhecida como ***triângulo de forças*** – Stevin escreveu: ***Wonder en is gheen wonder*** ("A maravilha não é uma maravilha"), frase essa que aproveitou para reproduzir no frontispício de uma outra edição daquele seu livro, surgida em 1605, agora com o título **Wisconstige Gedachtenissen**. Em 1608, o matemático holandês Willebrord van Roijen Snell (1591-1626) preparou a versão latina dessa nova edição: **Hypomnemata Mathematica** ("Notas Matemáticas") (Mach, op. cit.). Registre-se também que, em 1599, Stevinus publicou um projeto de uma carroceria movida à vela cujas rodas dianteiras podiam servir para dirigi-la, sendo esta, provavelmente, a primeira proposta sobre tração dianteira. Um aspecto curioso sobre Stevinus é que ele escreveu todos os seus trabalhos em holandês e não em latim que era, até então, a linguagem científica universal.

O estudo do equilíbrio dos corpos no **plano inclinado** também foi realizado pelo astrônomo e físico italiano Galileu Galilei (1564-1642), em 1594. Com efeito, ao considerar um **plano inclinado** de comprimento AB igual ao dobro de sua altura BC, ele demonstrou que um corpo Q colocado sobre AB seria equilibrado por um corpo P atuando ao longo de BC, desde que P = Q/2. Demonstrou mais ainda que, se esse sistema fosse colocado em movimento, e se P descesse de uma altura h, por exemplo, Q subiria no **plano inclinado** de uma distância h/2, marcada na vertical. Portanto: P h = (Q/2) h = Q (h/2). Ora, esse resultado nada mais é do que o ***princípio da velocidade (deslocamento) virtual*** a que Stevinus chegara ao estudar o equilíbrio das **polias** (**roldanas**), conforme vimos acima. É oportuno registrar que os trabalhos de Galileu sobre Estática só foram publicados em um livro intitulado **As Mecânicas de Galileu**, em 1634, pelo matemático francês Marin Mersenne (1588-1648) (Locqueneux, op. cit.). Note-se que o equilíbrio das **máquinas simples** foi também analisado pelo físico italiano Evangelista Torricelli (1608-1647), porém, ele o estudou por intermédio do conceito de ***centro de gravidade***. Assim, para o discípulo de Galileu, o equilíbrio de uma **máquina simples** ocorre quando o seu centro de gravidade fica imóvel para um pequeno deslocamento de seus componentes (Mach, op. cit.).

Conforme vimos até aqui, o equilíbrio dos corpos era estudado quer por intermédio do ***princípio da alavanca*** ou do ***princípio do plano inclinado*** e, embora um pudesse ser deduzido do outro, faltava um princípio único que, por seu intermédio, aqueles princípios pudessem ser obtidos. Conforme vimos em verbete desta série, este princípio foi encontrado pelo matemático francês Pierre Varignon (1654-1722). Com efeito, em um trabalho intitulado **Projet d´une Nouvelle Mécanique**, apresentado por ele à *Academia Francesa de Ciências*, em 1687, ele o apresentou com o seguinte enunciado: *Quando um corpo está em equilíbrio sob a ação de forças concorrentes, a resultante dessas forças é nula*. Para chegar a esse princípio, Varignon usou a regra geométrica sobre composição de forças – o célebre ***princípio do paralelograma das forças*** -, cuja idéia para esse "paralelograma" ele a obteve usando uma espécie de **máquina simples** que idealizou e construiu – o **funicular**. Ainda nesse trabalho, Varignon apresentou a demonstração do hoje famoso Teorema de Varignon: *O momento da resultante de um sistema de forças é igual à soma dos momentos de suas componentes*. É oportuno destacar que, ainda em 1687 e de maneira independente, o **Princípio do Paralelograma das Forças**, foi apresentado pelo padre francês Bernard Lami (1640-1715) em um pequeno apêndice ao seu livro intitulado **Traité de Mécanique**, e pelo físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727) em seu famoso livro **Philosophiae Naturalis Principia Mathematica**.

Em livro póstumo publicado em 1725 e intitulado **Nouvelle Mécanique-Statique**, Varignon aplicou o ***princípio do paralelograma das forças*** a todos os tipos de problemas mecânicos. Por exemplo, demonstrou que o equilíbrio de uma **alavanca** é realizado por intermédio de um sistema de forças paralelas que pode ser considerado como um caso limite de um sistema de forças concorrentes. Ainda nesse livro, Varignon demonstrou ainda existir uma relação entre aquele princípio e o ***princípio da velocidade (deslocamento) virtual***, cuja descoberta pelo matemático suíço Johann Bernouilli (1167-1748), lhe havia sido comunicado por este, em carta escrita em 1717.

Na carta acima referida, Johann afirmou: *Quando forças quaisquer são aplicadas (direta ou indiretamente), de uma maneira também qualquer em um corpo, há equilíbrio quando a soma das energias positivas é igual à soma das negativas*. Para esse membro da família de brilhantes matemáticos suíços, o termo ***energia*** significava o produto da foca pela ***velocidade virtual*** dessa mesma força. Por seu lado, esse tipo de "velocidade" representava a projeção do deslocamento do ponto de aplicação da força sobre sua direção. Essa projeção seria então positiva se fosse no sentido da força e negativa, no sentido contrário (Mach, op. cit.).

O princípio de J. Bernoulli tratado acima, teve uma demonstração mais completa feita pelo matemático francês Joseph Louis Lagrange (1736-1813), em sua famosa **Mécanique Analytique**, publicada em 1788, que o tomou, inclusive, como o axioma básico da Estática. Registre-se que esse ***princípio de Bernouilli*** já havia também sido objeto de estudo por parte dos matemáticos, os franceses Pierre Louis Moureau de Maupertuis (1698-1759), em 1740 (com o nome ***lei do repouso***), Jean le Rond d´Alembert (1717-1783), em 1743, e Marquês Gaspard Courtivron (1715-1785), entre 1748 e 1749; e o suíço Leonhard Euler (1707-1789), em 1751. Registre-se, também, que o matemático russo Mikhail Vasilievich Ostrogradsky (1801-1861) generalizou esse mesmo princípio ao aplicá-los aos problemas mecânicos com vínculos unilaterais, em seus trabalhos realizados entre 1838 e 1842 [Mach, op. cit.; S. Targ, **Theoretical Mechanics** (Peace Publishers, s/d)].

–

O ***princípio de Bernouilli*** que tratamos acima representou uma outra maneira de estudar o equilíbrio de determinadas **máquinas simples**, como a **balança de Roberval** (bR), a **polia diferencial de Weston** (pdW) e o **sarilho** ou **cabrestante**. A bR foi inventada pelo matemático francês Gilles Personne de Roberval (1602-1675), em 1669. Ela consta, basicamente, de quatro hastes formando um paralelograma de ângulos variáveis. Os lados opostos, o superior e o inferior, são capazes de girar em torno de seus pontos médios. Nos outros dois verticais estão adaptados os pratos da balança. Se dois pesos iguais forem colocados nos pratos dessa balança, a mesma ficará em equilíbrio qualquer que seja a posição que esses dois pesos ocupem nos pratos. É interessante registrar que, para construir essa balança, Roberval usou o ***princípio do paralelograma das forças*** que havia formulado no ano anterior: 1668. Por sua vez, o pdW é um dispositivo constituído de duas polias coaxiais de raios diferentes e ligadas a um mesmo eixo, e uma polia móvel; o **sarilho** consta de um cilindro que gira em torno de um eixo por intermédio de uma manivela (Mach, op. cit.). É interessante salientar que o equilíbrio dessas **máquinas simples** também pode ser obtido do Teorema de Varignon, que, aliás, é um teorema geral da Estática.

Concluindo este verbete, vejamos mais um conceito importante para o estudo do equilíbrio das **máquinas simples**. Trata-se do ***binário*** ou ***conjugado*** ("couple") apresentado pelo matemático francês Louis Poinsot (1777-1859) em seu livro de nome **Éléments de Statique** publicado em 1803. O ***binário*** é um conjunto de duas forças de mesma intensidade, paralelas e de sentidos contrários, cujos pontos de aplicação não se situam na mesma reta. Poinsot foi levado a introduzir esse novo conceito físico ao estudar a aplicação de um conjunto de forças em um corpo. Desse estudo, concluiu: *Qualquer número de forças, aplicado de qualquer maneira em um corpo, pode ser sempre reduzido a uma única força que passa por qualquer ponto considerado, e de um binário ("couple") simples, cujo plano será, em geral, inclinado em relação a essa força*. Depois de demonstrar esse teorema, Poinsot enunciou o corolário: *Um corpo estará em equilíbrio sob a ação de um sistema de forças se a resultante das forças R for nula, e se o conjugado resultante (S, - S) também for nulo e ao mesmo tempo*. Excertos desse livro encontram-se em: William Francis Magie, **A Source Book in Physics** (McGraw-Hill Book Company, 1935).

Hoje, essas duas condições demonstradas por Poinsot são traduzidas pelas equações: $\sum_i \vec{F}_i = 0$ e $\sum_i \vec{N}_i = 0$, onde $\vec{F}_i$ e $\vec{N}_i$ representam, respectivamente, a força e o ***torque*** (cujo módulo é o ***momento estático***) totais externos que atuam em um corpo rígido. Registre-se que o ***torque*** é definido por: $\vec{N} = \vec{r} \times \vec{F}$, sendo $\vec{r}$ o vetor posição do ponto de aplicação da força $\vec{F}$. Registre-se, ainda, que usando esse novo conceito Poinsot fez um estudo da rotação nos corpos em um outro livro intitulado **Nouvelle Théorie de la Rotation des Corps**, publicado em 1834.
