

Nascimentos da Física

José Maria Filardo Bassalo

Departamento de Física da Universidade Federal do Pará

66075-900- Belém, Pará bassalo@amazon.com.br

Trabalho recebido em 29 de maio de 1995

Resumo

Com este trabalho, iniciamos uma nova saga. Desta vez, a exemplo do escritor uruguaio Eduardo Hughes Galeano (1940-) em sua fantástica trilogia **Memória do Fogo (Nascimentos, 1986; As Caras e as Máscaras, 1985; O Século do Vento, 1988** - Editora Nova Fronteira), apresentaremos em forma de verbetes, e na ordem cronológica (segundo a divisão clássica das idades históricas), os principais fatos (nascimentos) referentes aos conceitos físicos, os quais serão apresentados por temas separados. Para isso, basicamente, usaremos os dados que coletamos nos quatro tomos de nossas **Crônicas da Física** (EUFPA: 1987, 1990, 1992, 1994) e nas referências aí indicadas.

Abstract

With this work, we begin a new saga. This time, as the Uruguayan writer Eduardo Hughes Galeano (1940-) made in his fantastic trilogy **Memória do Fogo (Nascimentos, 1986; As Caras e as Máscaras, 1985; O Século do Vento, 1988** - Editora Nova Fronteira), we present in entries, and in chronological order (following the classical division of historical ages), the main events (births) concerned to the physical concepts, which will be presented in separated subjects. For that, basically, we use the data that we gather in our four books **Crônicas da Física** (EUFPA: 1987, 1990, 1992, 1994) and in the references therein.

Idade Renascentista: Mecânica

Séculos 15 e 16

Para o cardeal alemão Nicolau de Cusa (1401-1464), a impressão do ímpeto num móvel é como a criação da alma em um corpo, e que basta Deus imprimi-lo inicialmente nas esferas celestes para que se conserve indefinidamente.

Por volta de 1410, o arquiteto florentino Filippo Brunelleschi (1377-1446) construiu relógios que usavam uma mola em espiral, que funcionava como corda, artifício esse que já havia sido utilizado no início do século 15.

O artista, inventor e cientista italiano Leonardo da Vinci (1452-1519) deu nova contribuição ao **princípio da alavanca**, ao demonstrar que dada uma alavanca AB, se na extremidade B são aplicados dois pesos, um

vertical P e um horizontal Q (este, aplicado por meio de uma polia), e se o equilíbrio dessa alavanca ocorre para uma dada posição de sua inclinação, então a relação entre P e 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 denominados. (Resultados análogos a esse foram obtidos por Guido Ubaldi.) Ao observar o vôo das aves e o movimento dos peixes, da Vinci idealizou os mais variados tipos de máquinas, desde as simples (até então conhecidas) como, também, outros tipos que estavam além de sua época, dos quais destacam-se dispositivos para fazer o homem voar (avião, helicóptero), barcos capazes de navegar sob as águas e “tanques” de guerra. Todas essas máquinas foram con-

cebidas como um conjunto de engrenagens, cadeias e rodas dentadas. Ele, também, foi 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 contacto sejam diferentes”; - 2a) “O atrito provoca o dobro do esforço se o peso for dobrado”. Esse gênio italiano renascentista determinou, também, o centro de gravidade da pirâmide. Em seus estudos sobre o movimento, afirmou que “nenhuma coisa se move por si mesma, mas seu movimento é produzido por outros. E mais ainda, que “todo movimento espera ser mantido enquanto conserva a impressão da potência de seu motor”. Com relação ao movimento de uma bala de canhão, afirmou que sua trajetória era uma curva contínua e não, como acreditavam os artilheiros e pirotécnicos da época, uma linha composta de dois segmentos retos ligados por um arco de círculo. Ainda de seus estudos sobre o movimento da Vinci obteve alguns resultados práticos. Por exemplo, estabeleceu as leis do choque intuindo a igualdade da velocidade depois do choque de dois corpos iguais; a igualdade dos ângulos de incidência e reflexão no choque de um corpo contra uma parede rígida; e a troca de velocidades entre si no choque de dois corpos iguais, porém com velocidades diferentes. Ao estudar o movimento de um corpo sobre um plano inclinado, afirmou: - “Os tempos de queda de um corpo num plano inclinado variam inversamente com os senos dos ângulos de inclinação”. Apesar dessa afirmação ser relativamente correta, contudo, suas concepções sobre a queda livre dos corpos (resultante de experiências que realizou deixando cair pedaços de madeira do alto de uma torre) eram confusas, já que, em certas passagens de seus escritos, afirmou que as variações da velocidade dos graves eram proporcionais aos espaços percorridos, enquanto em outros escritos, disse serem proporcionais aos tempos gastos. Da Vinci parece haver tido a noção **do princípio da ação e reação**, bem como a **do princípio da inércia**, conforme se pode depreender de sua afirmação: - “Cada corpo tem um peso na direção de seu movimento”. Muito embora haja intuído todas essas idéias sobre o movimento (inclusive feito a distinção entre força e ímpeto), da Vinci não conseguiu formalizá-las em termos matemáticos. Por fim, para Leonardo da Vinci, “A Física deveria começar por um

conjunto de princípios e proposições que forneceriam a base de desenvolvimentos posteriores”.

Em 1510, o serralheiro alemão Peter Henlein (1480-1542) usou o mecanismo da **corda** para construir os primeiros relógios mecânicos portáteis.

O erudito Domingos Soto (1494-1570) estudou os movimentos **uniforme** por intermédio de experiências com a queda dos corpos.

Em 1537, o matemático italiano Niccolò Fontana Tartaglia (c.1500-1557) publicou o livro *Nova Scientia (Nova Ciência)* no qual considerou que os movimentos natural e violento aristotélicos eram compatíveis; desse modo, utilizou-os para explicar o movimento oblíquo de projéteis cuja trajetória seria, então, composta de uma parte retilínea (correspondente à parte violenta), seguida de uma parte circular (mista) e, por fim, de uma parte vertical (correspondente ao aspecto natural do movimento). Para Tartaglia, “o efeito mais longínquo” (alcance máximo) é medido entre o ponto de partida e o ponto onde começa a vertical e que, tal distância, pode corresponder a duas inclinações diferentes do canhão lançador do projétil, sendo mínima para 90° e máxima para 45° .

Em 1542, em Nuremberg, foi construído o primeiro relógio de bolso na forma ovóide.

Em 1546, Tartaglia publicou o livro *Quesiti et Inventioni Diverse (Questões e Invenções Diversas)* no qual modificou sua explicação sobre o movimento oblíquo de projéteis, passando a defender uma trajetória totalmente curvilínea, que já havia sido considerada por Leonardo da Vinci. Para explicar essa trajetória, Tartaglia admitiu a hipótese de que quanto mais rapidamente o projétil se desloca, mais pesado se torna e, portanto, mais fortemente é puxado pela Terra. Ainda nesse livro, Tartaglia deu continuidade aos estudos (iniciados no *Nova Ciência*) do movimento de corpos em queda livre e em planos inclinados. Nesses estudos afirmou que: - “Todos os corpos graves semelhantes e iguais partem do início de seu movimento natural com a velocidade igual, mas aumentam suas velocidades de maneira tal que, aquele que atravessar um espaço maior, se deslocará mais rapidamente”. Afirmou mais ainda que: - “Quanto mais um corpo grave se afasta do princípio ou se aproxima do fim do movimento violento, mais lentamente ele se desloca”. Ao

analisar o movimento de um corpo através de um hipotético buraco feito na Terra e passando pelo seu centro, concluiu que tal corpo ficaria oscilando em torno do centro de nosso planeta, diminuindo gradualmente sua velocidade, até parar". Com relação ao movimento de um corpo em um plano inclinado, observou que a gravidade natural do corpo colocado em tal plano age tanto menos, quanto maior for sua inclinação. É também de Tartaglia a afirmação de que um corpo em movimento circular, uma vez solto, tomará a direção da tangente.

Em 1553, o físico italiano Gianbattista Benedetti (1530-1590) publicou o livro *Resolutio Omnium Euclidis Problematum Aliorumque una Tantummodo Circuli Data Apertura* criticou a doutrina de Aristóteles (segundo a qual os corpos pesados caem mais rapidamente do que os leves, na proporção de seus respectivos pesos), afirmando que não é o **peso** em si, mas o **excesso** de peso do móvel sobre o peso do meio ambiente que determina a velocidade da queda; e mais ainda, não é o peso individual do corpo em questão, mas somente seu peso específico que está em jogo.

Em 1576, o erudito inglês Thomas Digges escreveu um apêndice intitulado *Perfit Description of the Celestial Orbes* para uma nova edição do livro *Prognostication Everlasting of Good Effecte* que seu pai, o também erudito inglês Leonard Digges (? -1573), escrevera anos antes. Nesses livros, filho e pai afirmaram que se uma pessoa se colocasse no extremo do mastro de um navio (deslocando-se com velocidade constante) e jogasse um corpo no pé desse mastro ou em um ponto qualquer do tombadilho do navio, tal corpo seguiria uma trajetória reta na direção do alvo escolhido. Apesar dessa afirmação, parece que os mesmos não realizaram nenhuma experiência desse tipo e sim, a tomaram como uma verdade evidente em si própria.

Em 1577, o Marquês Guiobaldo del Monte (1545-1607) publicou um importante livro sobre Mecânica: *Liber mechanicorum*.

Por volta de 1582, o astrônomo e físico italiano Galileu Galilei (1564-1642), parece haver sido o primeiro a observar regularmente as oscilações pendulares, ao perceber que os balanços consecutivos de um candelabro na Catedral de Pisa, se tornavam cada vez menores na medida que o mesmo diminuía seu ritmo de movimento.

Em 1585, Benedetti reuniu uma coletânea de artigos, cartas e pequenos tratados no livro intitulado

Diversarum Speculationum Mathematicarum et Physicarum Liber no qual continua sua crítica à física aristotélica e, se proclamando um decidido partidário da dinâmica do **impetus**, afirmou que: - "A velocidade de um corpo separado de seu primeiro motor provem de uma certa impressão natural, de um certo ímpeto recebido pelo citado móvel". E mais ainda: - "Todo corpo grave, quer se mova violentamente ou naturalmente, recebe em si mesmo um ímpeto, uma impressão do movimento, de tal modo que, separado da causa motriz, continua, durante um certo lapso de tempo, a mover-se por si próprio". Ainda apoiado no caráter linear do ímpeto, explicou que um pião em alta rotação permanece durante um certo lapso de tempo na posição vertical, porque suas partes tendem a se deslocarem tangencial e perpendicularmente ao seu eixo e, portanto, não tendem para o centro da Terra.

Em 1586, o matemático flamengo Simon Stevinus (1548-1620) publicou seu livro *De Beghinselen der Weeghconst (Princípios Fundamentais da Arte da Balança)* no qual abordou o estudo das máquinas simples e o da Hidrostática, usando para isso, dois princípios: **Princípio do Equilíbrio das Forças e Princípio da Solidificação**. Com o primeiro, obteve resultados importantes sobre a Estática dos Sólidos. Por exemplo, demonstrou a impossibilidade do movimento perpétuo. Assim, usando uma corrente sem fim (formada de um colar de esferas ou **clootcrans**) e dois planos inclinados reunidos, de modo a formar um triângulo, determinou, geometricamente, que a corrente deveria permanecer imóvel. Sobre essa descoberta - conhecida como **triângulo das forças** - Stevinus escreveu: - "**Wonder en is gheen wonder (A maravilha não é uma maravilha)**". Baseado nesse resultado, Stevinus estudou ainda nesse 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. Em seu estudo sobre polias e suas combinações, chegou a um importante resultado: - "Em um sistema de polias (roldanas) em equilíbrio, são iguais os produtos dos pesos pelos deslocamentos respectivos". (Esse resultado contém o germe do **princípio da velocidade (deslocamento) virtual**.)

Com o **Princípio da Solificação**: - “A solidificação de um fluido em equilíbrio não perturba esse mesmo equilíbrio” -, Stevinus redescobriu os resultados encontrados por Arquimedes e obteve novos. Para chegar a esses resultados, Stevinus imaginou as seguintes experiências. Seja um recipiente contendo água. Então, qualquer parte A dessa água ficará em equilíbrio no seio do líquido, pois, se assim não fosse, essa parte desceria, e uma nova parte de água que ocupasse o seu lugar, também desceria, e assim sucessivamente. Portanto, haveria um movimento perpétuo o que, contudo, não é observado experimentalmente. Desse modo, concluiu Stevinus: - “A água imersa em água perde seu peso”. Agora, continuou Stevinus, se imaginarmos a superfície de uma parte solidificada dessa água, a **vas superficiarium**, como a denominou, ela estará também sujeita às mesmas condições analisadas anteriormente. Assim, concluiu então que uma parte de um líquido em equilíbrio se acha temporariamente solidificada. De posse desses resultados, Stevinus passou a realizar uma série de engenhosas experiências nas quais estudou a distribuição do peso de líquidos sobre as paredes verticais e a base de recipientes, chegando finalmente à sua famosa lei (na linguagem atual, uma vez que o conceito de **pressão interna** de um líquido ainda não estava esclarecido em sua época): - “A pressão (p) exercida por um líquido sobre a base de um recipiente, independe de sua forma, dependendo somente de sua altura (h) e da área (A) dessa base - $p \propto \sigma hA$, onde σ é a gravidade específica do líquido”. (Essa lei permitiu-lhe explicar o famoso **paradoxo hidrostático**: - “Dado um conjunto de recipientes de formas muito diferentes, porém de mesma base, e conectados entre si, se forem cheios com um líquido, a altura atingida pelo mesmo em cada recipiente é a mesma”.) Analisando a distribuição do peso de líquidos em paredes inclinadas por intermédio do método da exaustão de Arquimedes, antecipou os métodos do cálculo integral, ao dividir a superfície sob o peso do líquido, em elementos cada vez menores e cada um dos quais suportando um peso que se encontra entre dois valores determináveis. Aumentando o número dessas divisões, esse processo poderia ir tão longe quanto possível, tal que as diferenças entre valores limítrofes se tornasse menor do que qualquer quantidade dada, por melhor que fosse. Ora, isto está em perfeita analogia com o conceito de **limite**, usado no cálculo integral.

Por outro lado, ao estudar as condições de equilíbrio de corpos flutuantes, chegou a dois resultados importantes: 1º - “O centro de gravidade de um corpo deve achar-se na mesma linha perpendicular com o centro de gravidade da água que ele desloca e que, quanto mais baixo se encontrar o centro de gravidade do corpo flutuante, mais estável será o equilíbrio”; 2º - “O centro de gravidade de um triângulo se encontra na intersecção de suas medianas”.

Ainda em 1586, Stevinus 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, chegam ao chão ao mesmo tempo.

Entre 1589 e 1592, Galileu começou seus estudos sobre os movimentos dos corpos, os quais foram descritos no livro *De Motu (O Movimento)*. Neste livro, relatou experiências que realizou sobre a queda dos corpos, em consequência das quais afirmou que “as velocidades dos corpos em queda num determinado meio são proporcionais à diferença entre seus pesos e o meio em questão”, e que “no vácuo a velocidade do corpo depende do seu próprio peso total”. Ainda nesse livro, Galileu examinou a possibilidade de haver um outro tipo de movimento que não fosse nem o **natural** e nem o **violento** de Aristóteles, o qual chamou de **neutro**. Para o sábio italiano, 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 acima ou abaixo desse mesmo horizonte.

Em 1594, Galileu estudou o equilíbrio dos corpos em um plano inclinado. Assim, ao considerar um plano inclinado de comprimento AB igual ao dobro de sua altura BC 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. Ora, isto nada mais é do que o **princípio da velocidade (deslocamento) virtual** a que Stevinus chegara ao estudar o equilíbrio das polias.

O filósofo italiano Giordano Bruno (1548-1600) se preocupou em descrever o movimento relativo de corpos ao propor experiências que poderiam ser realizadas a bordo de um navio em movimento. Afirmou esse mártir da Santa Inquisição que se uma pessoa se colocasse no extremo do mastro de um navio (deslocando-se com velocidade constante, isto é, com movimento uniforme e jogasse um corpo no pé desse mastro ou em um ponto qualquer do tombadilho do navio, tal corpo seguiria uma trajetória reta na direção do alvo escolhido. Convicto de que um navio em movimento uniforme arrasta qualquer corpo com ele, Giordano Bruno propôs então uma outra variante dessa experiência. Sejam duas pessoas, admitiu Giordano, uma no navio e a outra na margem de um rio. Então, quando estiverem uma defronte da outra, deixam cair uma pedra da mesma altura, e 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. Por exemplo, a pessoa do navio verá a pedra lançada pela que está na margem, cair em direção à popa do navio.

Século 17

Em 1602, Galileu escreveu uma carta ao Marquês Guiobaldo del Monte na qual relatou suas experiências com pêndulos, usando para isso, uma esfera atada à extremidade de um barbante. Nessas experiências, descobriu que, independentemente do peso da esfera, o período de oscilação seria o mesmo desde que fosse mantido o comprimento do barbante. E mais ainda, que o tempo de oscilação do pêndulo independe de sua amplitude.

Em 1605, Stevinus reeditou seu livro *De Beghinselen der Weeghconst* com o título *Wisconstige Gedachtenissen* ocasião em que reproduziu em seu frontispício o desenho de dois planos inclinados reunidos na forma triangular, envolvidos por uma corrente sem fim (um colar de esferas ou **clootcrans**), com a legenda: **Wonder en is gheen wonder (A maravilha não é uma maravilha)**.

Em 1608, o matemático holandês Willeblord van Roijen Snell (1591-1626) traduziu para o latim a edição

de 1605 do livro de Stevinus, com o título: *Hypomnematata Mathematica*.

Em 1612, o italiano Giorgio Coresio, professor de grego em Pisa, parece que fez experiências sobre queda dos corpos na famosa torre inclinada dessa cidade.

Em 1612, no livro *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua (Discorso sobre coisas que flutuam)*, Galileu usou o princípio das velocidades virtuais de Stevinus para demonstrar o equilíbrio de um fluido num sifão, bem como para determinar as condições de flutuação de corpos sólidos em um líquido. (É oportuno registrar que um **sifão** é um tubo recurvado em U, sendo um braço maior do que o outro. Qualquer líquido será transferido de um reservatório colocado na base do braço menor até a extremidade do braço maior, quando o tubo está cheio com o mesmo líquido.)

Em 1613, Galileu publicou o livro *Istoria e Dimostrazione Intorno alle Machie Solari (História e Demonstração sobre as Manchas Solares)* e nele, abordou o problema do movimento neutro, e sua principal consequência - a idéia de **inércia**. (Aliás, é oportuno observar que Galileu usava o termo **impetus**, enquanto o astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630) utilizava o termo **inércia**.) Com efeito, nesse livro, afirmou que: - "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".

Em 1624, Galileu escreveu uma carta a seu amigo Francesco Ingoli (1578-1649) na qual afirmou (sem fazer a experiência por achá-la desnecessária) que a pedra que cai do alto de um mastro de um navio, esteja este imóvel ou em movimento, sempre cai ao pé do mastro.

Por volta de 1625, o engenheiro francês Jean Gallé, a bordo de uma galera veneziana no Mar Adriático, deixou cair uma massa de chumbo do alto de seu grande mastro e observou, então, que a mesma não caiu ao seu pé, mas desviou-se em relação à popa desse navio.

Em 1630, o físico italiano Giovanni Battista Baliani (1582-1666), discípulo de Galileu, realizou experiências nas quais tentou demonstrar o princípio das velocidades virtuais de Stevinus. Nessas experiências, Baliani fez a distinção entre **moles** (massa) e **pondus** (peso).

Por volta de 1630, em resposta a uma carta de Baliani, Galileu explicou a razão porque uma bomba de sucção não conseguia elevar água a uma altura superior a $\sim 10,33$ m. (Essa observação, parece haver sido feita por um jardineiro de Florença, nessa mesma época.) Para Galileu, a ruptura da massa d'água quando atingia essa altura, se devia a que ela, a água, não era capaz de suportar determinado esforço limite. O mesmo deverá acontecer com outros líquidos, acrescentou Galileu. Em vista disso, concluiu que a altura atingida pelo líquido era inversamente proporcional ao seu peso específico e seu valor permite determinar “a resistência ou o peso do vácuo”.

Em 1632, no livro *Dialogo supra i due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano (Diálogo sobre os dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomaico e Copernicano)*, Galileu retomou a questão sobre a queda de um corpo em um navio parado ou em movimento, bem como discutiu, também, a queda de um corpo do alto de uma torre (torre inclinada de Pisa?!), o movimento de projéteis e o vôo das aves, em uma Terra em movimento. Em toda essa discussão, Galileu usou o **princípio da relatividade do movimento** para refutar as objeções aristotélicas-ptolomaicas contra o movimento de nosso planeta. (Hoje, esse **princípio** é conhecido como **princípio de Galileu**, e é formulado pela expressão: $x' = x + Vt$, onde x' é a posição de uma partícula em relação a um observador fixo O' , e x é a posição dessa mesma partícula em relação a um outro observador O que se desloca com uma velocidade V constante em relação a O' , e na direção de uma reta escolhida (eixo dos $x(x')$.) Usando esse princípio, e mais argumentos lógicos diretos, Galileu mostrou que era impossível determinar se um navio está ancorado ou em movimento retilíneo uniforme, realizando uma experiência mecânica em algum de seus camarotes. Ainda nesse livro, Galileu discutiu experiências idealizadas (lógicas) sobre o movimento ascendente e descendente de corpos em planos inclinados, relacionadas com o trabalho sobre **impetus** que havia realizado em 1613.

Em 1634, o físico francês Jean-Baptiste Morin (1583-1656) realizou uma experiência no rio Sena, na qual deixou cair um corpo pesado, do alto do mastro de um navio em movimento. Ao observar que o corpo caiu no pé do mastro, explicou aristotelicamente esse resultado afirmando que a pessoa que segurou o corpo

no alto do mastro, imprimiu-lhe um movimento próprio para a frente, razão pela qual o corpo ao cair, atingiu a base do mastro.

Em 1634, o matemático, filósofo e teólogo, o padre franciscano francês Marin Mersenne (1588-1648) reuniu os trabalhos de Galileu sobre Estática num livro intitulado *As Mecânicas de Galileu*.

Em 1638, no livro *Discorsi e Dimostrazione Matematiche intorno a Due Nuove Scienze Attenenti alla Mechanica ed i Movimenti Locali (Discursos e Demonstrações em torno de Duas Novas Ciências Atinentes à Mecânica e aos Movimentos Locais)*, Galileu abordou geometricamente, as leis do equilíbrio dos corpos - a **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 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: 1a) “As velocidades dos corpos em queda livre são proporcionais aos tempos gastos na mesma”; 2a) “Os espaços percorridos pelos corpos em queda livre são proporcionais aos quadrados dos tempos gastos em descrevê-los”. (É oportuno registrar 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 fluia por esse orifício até uma balança. Ora, devido às grandes dimensões do recipiente, praticamente a altura do nível d'água permanecia inalterável, de modo que no tempo gasto, a vazão era proporcional ao peso d'água que chegava à balança.) Ao aplicar suas leis do movimento uniforme e uniformemente acelerado ao movimento dos projéteis, Galileu demonstrou que sua trajetória é parabólica. 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° . Também nesse livro, Galileu descreveu suas experiências com líquidos.

Por volta de 1638, o filósofo e matemático francês René Descartes (1596-1650) publicou o livro *La Dioptrique (A Dióptrica)*, no qual apresentou seu estudo so-

bre a balística e, para tal, usou um **princípio da relatividade dos movimentos** que havia encontrado independentemente, de Giordano Bruno e de Galileu.

Em 1639, o matemático francês Gilles Personne de Roberval (1602-1675) usou o princípio da relatividade dos movimentos de Giordano Bruno-Galileu-Descartes, em suas aulas no *Collège de France*.

Entre 1640 e 1642, nos dois últimos anos da vida, Galileu os viveu ditando aos seus discípulos, o físico italiano Evangelista Torricelli (1608-1647) e o matemático, também italiano, Vincenzo Viviani (1622-1703), suas últimas idéias sobre a teoria do impacto mais tarde incorporada aos *Diálogos* como a sexta jornada (**Da Força de Percussão**), já que a edição original continha apenas quatro jornadas. (Na quinta jornada, Galileu interpretou o Livro V dos *Elementos de Geometria*, de Euclides.) Na sexta jornada, porém de maneira incipiente, Galileu compreendeu claramente que o trabalho necessário para elevar um corpo a uma certa altura era o mesmo independente do caminho escolhido. E mais ainda, que num corpo em movimento, dois fatores são fundamentais: peso e velocidade.

Em 1641, o físico francês Pierre Gassendi (1592-1655) realizou experiências em Marselha (com o patrocínio de Louis de Vallois, Conde de Allais (1596-1653)), pelas quais estudou a queda de um corpo do alto do mastro de uma galera em movimento. Para explicar o resultado dessas experiências, utilizou o **princípio da relatividade dos movimentos** de Giordano Bruno-Galileu-Descartes.

Em 1642, Gassendi descreveu suas experiências sobre o movimento relativo de corpos, no livro intitulado *De Moto Impresso a Motore Translato*.

Em 1643, Torricelli realizou a sua célebre experiência sobre a pressão atmosférica. Com efeito, esse discípulo de Galileu tomou um tubo de vidro de cerca de quatro pés de comprimento, encheu-o de mercúrio e, com a extremidade tapada, mergulhou-o numa outra cuba contendo também mercúrio. Observou, então, que o nível de mercúrio no tubo descia, deixando no alto um espaço “aparentemente vazio”, enquanto a altura da coluna de mercúrio se mantinha em torno de 76 centímetros. Para explicar esse fato, Torricelli afirmou que a coluna de mercúrio se deslocava devido ao “peso do ar” que pressionava o mercúrio na cuba. Nessa experiência, Torricelli observou ainda que a coluna de

mercúrio variava diariamente.

Em 1643, experiências sobre pressão atmosférica também foram realizadas por Viviani, um outro discípulo de Galileu.

Em 1644, Descartes publicou o livro *Principia Philosophiae (Princípios Filosóficos)* no qual apresentou seus estudos sobre o movimento dos corpos, principalmente sobre o efeito de uma força atuando em um corpo, considerando-o como a sua **quantidade de movimento**. Em virtude desses estudos, fez as seguintes afirmações: - “Cada coisa persevera no estado em que está, enquanto nada muda”; - “Todo o corpo que se move tende a continuar seu movimento em linha reta”; - “Nenhuma coisa muda senão pelo encontro de outras”; - “Deus criou a quantidade de movimento inicial do Universo e, a partir de então, ela permanece sempre conservada, gerando, dessa maneira, as **leis da natureza**”. Sendo partidário da não existência do vácuo e tendo em mente essas idéias sobre o movimento, Descartes considerou o espaço como um **plenum** cheio de matéria e sempre em movimento, de tal modo que uma partícula deve ser sempre substituída por outra, num verdadeiro turbilhão (vórtice). Ainda para Descartes, o próprio sistema solar é um desses turbilhões, com o Sol em seu centro e arrastando os planetas. Com esse modelo, explicou o peso dos corpos da seguinte maneira. O turbilhão que arrebatava a Terra fá-la girar sobre si mesma; por seu lado, ao girar, nosso planeta provoca um outro turbilhão fazendo a matéria sutil afastar-se do centro do turbilhão e ser substituída por uma outra mais pesada. É fácil ver que nesse modelo turbilhonar cartesiano, está a gênese do conceito de **força centrípeta (centrífuga)**.

Em 1644, Mersenne observou que o período de um pêndulo é independente de sua amplitude. Nesse mesmo ano, divulgou em Paris, a experiência de Torricelli sobre a pressão atmosférica, depois de receber informação sobre a mesma, de Roma.

Em 1646, Mersenne tratou pela primeira vez do problema de determinar a duração de oscilação de figuras planas.

Em 1647, o matemático e físico francês Blaise Pascal (1623-1662) publicou o livro intitulado *Expériences Nouvelles Touchant le Vide (Experiências Relativas ao Vácuo)* no qual descreveu uma série de experiências

que realizou sobre o “vácuo torricelliano”. Nessas experiências (algumas das quais teve a ajudá-lo seu cunhado Florin Périer (1605-1672) e o engenheiro e geógrafo francês Pierre Petit (1598-1677)), obteve importantes resultados, tais como; - “Os líquidos pesam segundo a sua altura”; e o famoso **princípio de Pascal** - “A pressão exercida sobre os fluidos, é transmitida com progressiva diminuição, por todas as partes do mesmo e que atua normalmente sobre as superfícies”. Baseado nesse princípio, Pascal demonstrou que “se dois vasos comunicantes são fechados por pistões e estes são carregados com pesos proporcionais às suas áreas, o equilíbrio será conseguido porque, devido à invariabilidade do volume do líquido, os deslocamentos provocados pelos pistões são inversamente proporcionais aos seus carregamentos”, demonstração essa que constitui o também famoso **princípio da prensa hidráulica**. (É oportuno esclarecer que assim como Stevinus, Pascal não fazia uma distinção clara entre pressão de um fluido e seu próprio peso, bem como não fazia distinção entre a pressão elástica de um gás e a pressão não elástica de um líquido. No entanto, quando Pascal falou de uma coluna líquida em um recipiente e se referiu ao peso desse líquido, para ele significou dizer que se tratava do peso propriamente dito do líquido distribuído sobre a base do recipiente.)

Em 1648, Pascal publicou o livro *Récit de la Grande Expérience de l'Équilibre des Liquers (Relato da Grande Experiência do Equilíbrio dos Líquidos)*, no qual demonstrou que “todos os efeitos outrora atribuído ao ‘Horror vacui’ aristotélico, nada mais são do que casos particulares da regra geral do equilíbrio dos líquidos”. (A afirmativa de Aristóteles, segundo a qual “A Natureza tem horror ao vácuo”, parece ser uma consequência de sua teoria sobre o movimento dos corpos através do ar. Para esse filósofo estagirita, a causa do movimento de um corpo lançado no ar, era devida a uma força exercida por esse ar ao ser empurrado para os lados pelo corpo, força essa que o impulsiona em seu movimento.)

De 1649 até 1654, Pascal trabalhou no sentido de ordenar, de maneira lógica e sistematizada, os resultados obtidos por ele e por outros cientistas, relacionados com os líquidos e o “vácuo torricelliano”. Assim, preparou três Tratados: *Traité de l'Équilibre des Liquer (Tratado do Equilíbrio dos Líquidos)*, *Traité de la Pesanteur de*

la Masse de l'Air (Tratado do Peso da Massa do Ar), e o incompleto *Traité du Vide (Tratado do Vácuo)*. Os dois primeiros Tratados foram publicados por seu cunhado Florin e Guillaume Desprez, em 1663, depois de sua morte. Quanto ao terceiro Tratado, uns poucos fragmentos e um esboço de prefácio foram encontrados pelo Abade C. Bossut, que os publicou em 1779.

Em 1656, o físico holandês Christiaan Huygens (1629-1695) descobriu que o período de um pêndulo é independente de sua amplitude.

Em 1657-1658, Huygens utilizou sua descoberta de ser o período de um pêndulo independente de sua amplitude, para construir o primeiro relógio de pêndulo.

Em 1659, Huygens demonstrou 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 e o tempo de sua queda ao longo do diâmetro de seu círculo gerador. De posse dessa relação, obteve pela primeira vez a fórmula do tempo de oscilação simples de um pêndulo: $T = \pi\sqrt{\ell/g}$ e, com esta, determinou para a aceleração da gravidade, o valor $g = 9,806 \text{ m/s}^2$, usando para essa determinação um pêndulo de comprimento igual a 6,18 polegadas e com 4 964 oscilações duplas por hora.

Em 1660, o físico e químico inglês Robert Boyle (1627-1691) ao obter empiricamente sua famosa lei: - “É constante o produto da pressão (P) pelo volume (V) de um gás à temperatura fixa: $PV = \text{constante}$ ”, fez uma distinção clara entre **peso** e **pressão**.

Em 1662, Lord Brouncker confirmou a descoberta de Huygens isto é: a trajetória cicloidal é a que torna o período do pêndulo independente de sua amplitude.

Em 1663, Florin e Guillaume Desprez publicaram nos livros: *Traité de l'Equilibre des Liquers (Tratado do Equilíbrio dos Líquidos)* e *Traité de la Pesanteur de la Masse de l'Air (Tratado do Peso da Massa do Ar)*, os trabalhos realizados por Pascal, entre 1649 e 1654, sobre o equilíbrio dos líquidos e o “vácuo torricelliano”.

Em 1668, a *Royal Society of London* formulou um convite aos cientistas para que apresentassem um melhor estudos sobre o problema da colisão dos corpos. Aceitaram esse convite, além de Huygens, os matemáticos ingleses John Wallis (1616-1703) e Sir Christopher Wren (1632-1723). Nesse mesmo ano, e como

conseqüência desse convite, Wallis descobriu a conservação do momento linear na colisão de corpos.

Em 1668, Roberval parece haver sido o primeiro a formular o **princípio do paralelograma das forças**, que é uma regra geométrica para compor forças.

Em 1669, Roberval inventou uma balança - a **balança de Roberval** - que 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 dois outros lados 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.

Em 1669, Huygens apresentou à *Royal Society* seu estudo sobre o choque recíproco de dois corpos. Nele, há a demonstração de que a soma dos produtos das massas pelos quadrados das velocidades permanece a mesma antes e depois do choque, assim como a demonstração de que a velocidade do centro de gravidade dos corpos antes e depois da colisão permanece inalterada.

Em 1670, o relojoeiro inglês William Clement construiu um relógio bastante preciso, ao reduzir a oscilação do pêndulo (com cerca de um metro de comprimento) a pequenos arcos, em torno de três a quatro graus.

Em 1671 e 1672, o astrônomo francês Jean Richer (1630-1696) observou que o período do pêndulo era menor em Cayena do que em Paris. Para explicar essa diferença, afirmou que a mesma era devido ao fato de que a Terra era alongada no equador e achatada nos polos (e portanto, a aceleração da gravidade era diferente nesses dois lugares), contra a opinião da Academia Francesa de Ciências que atribuíra tal diferença à variação da temperatura.

Em 1673, Huygens publicou seu famoso livro *Horologium Oscillatorium sive de Motu Pendulorum*. Neste, apresentou uma série de resultados sobre os estudos que fez do pêndulo composto, tais como: - “O centro de oscilação (**centrum oscillationis**) de qualquer

figura é o ponto situado na sua linha de gravidade e cuja distância do ponto de suspensão é igual ao comprimento do pêndulo simples que tem o mesmo tempo de vibração que a figura”; - “Sempre que um número qualquer de corpos pesados são postos em movimento sob a ação de seu próprio peso, o seu centro comum de gravidade não pode subir a um plano mais alto do que aquele em que se achava no início do movimento; - “O ponto de suspensão e o centro de oscilação de um pêndulo composto são permutáveis”. Nesse livro, Huygens apresentou ainda o cálculo do comprimento reduzido R do pêndulo composto (para o caso de corpos de figura geométrica simples), que é a distância do centro de oscilação ao ponto de suspensão. Na notação atual, o valor de R é dado por: $R = \frac{\sum_i m_i r_i^2}{\sum_i m_i r_i}$, onde m_i representa a massa de uma partícula (ou parte homogênea) constituinte do pêndulo, e r_i sua distância ao ponto de suspensão.

Em 1673, Ignace Gaston Pardies (c.1638-1673) estudou a **catenária**, isto é, a curva formada por uma corda uniforme suspensa por suas extremidades e sujeita a seu próprio peso. Nesse seu estudo, enunciou um princípio segundo o qual, em um fio flexível em equilíbrio, uma parte dele pode ser substituído por forças (tangentes à catenária formada por esse fio) nos pontos seccionados.

Em 1675, Huygens aperfeiçoou seu relógio de pêndulo (para garantir que o pêndulo descrevesse uma cicloide) construindo um mecanismo constituído de um fio (balancim) que se enrolava e desenrolava em duas placas cortadas na forma cicloidal. Hoje, esse mecanismo constitui-se na **roda de escape** ou **âncora**.

Em 1675, o relojoeiro Isaac Thuret incorporou ao relógio de pêndulo o mecanismo do balancim inventado por Huygens e, com isso, conseguiu uma precisão de dois minutos por dia.

Em 1676, o físico francês Edmé Mariotte (1620-1684) obteve, independentemente, a **lei de Boyle**, razão pela qual essa lei passou a ser conhecida como **lei de Boyle-Mariotte**.