

Uma Investigação Sobre a Natureza do Movimento ou Sobre uma História para a Noção do Conceito de Força

Marcos Cesar Danhoni Neves,

Departamento de Física, Universidade Estadual de Maringá,

Av. Colombo, 5790, Maringá-PR, 87020-900,

e-mail: macedane@yahoo.com web sites: <http://www.dfi.uem.br/~macedane> e <http://www.pet.dfi.uem.br>

Recebido em 10 de dezembro, 1999. Aceito em 15 de setembro, 2000

O presente artigo procurará mostrar a longa e contraditória história sobre a noção do conceito de força, mostrando a confusão e a multiplicidade de conceitos que hoje encontram-se diferenciados (energia, momento, etc.). Procuramos resgatar a importância da obra de Jammer sobre este tema e, mais ainda, a falta de uma compreensão da mecânica em meios dissipativos, muitas vezes responsável pela confusão de conceitos sobre a noção de força.

This paper is concerned with the history of the concept of force. I emphasize the various meanings of this concept throughout its history. The confusion and multiplicity of other concepts (energy, momentum, etc.) is also shown. We revisited some assumptions of Jammer's important work about the concept of force, discussing the lack of comprehension of the mechanics of dissipative media. This is, perhaps, the origin of confusions playing the notion of force.

Key-words: concept of force, history of physics, physics teaching.

“Mas não preciso de uma definição da força: a idéia de força é uma noção primitiva, irreduzível, indefinível. Todos sabemos que coisa ela é, temos uma intuição direta dela. Ela deriva da noção de esforço, que nos é familiar desde a infância. Mas, quando também, tal intuição nos fizesse conhecer a verdadeira natureza da força, ela seria, sobretudo, o fundamento da Mecânica, e, em consequência, inútil. Aquilo que conta não é saber que coisa é a força, mas saber medi-la.”

(Poincaré)

I Introdução

A pesquisa em Ensino de Física sobre conceitos alternativos, especialmente os relativos aos fenômenos mecânicos, tem demonstrado que os estudantes possuem noções conflitantes com a física newtoniana a respeito do conceito de força. Muitas vezes, esse conceito aproxima-se mais da noção de “*ímpetus* adquirido”, “*capital de força*”, “*energia*”, etc. Na pesquisa em história da ciência, muitas vezes encontramos um quadro semelhante.

Assim, para discutir o conceito de força numa perspectiva histórica, devemos, sem sombra de dúvidas, retornar ao antigo universo grego, onde sua maturidade chegou com as obras de Aristóteles, de Estágira. Suas obras, especialmente aquelas relativas à Física e Astronomia (*Physis e De Caelo*), contém críticas a seus predecessores e apresenta confrontos entre teorias existentes em seu tempo. Aristóteles confronta cada uma dessas teorias e destrói aquelas onde falta uma estrutura lógica dentro de seu universo. Esse universo era dividido em duas partes: supralunar (acima da esfera da lua) e sublunar (abaixo da esfera da lua). As diferentes qualidades dos corpos que compõem estes mundos definem diferentes tipos de movimentos.

Para os corpos acima da esfera da lua, ou seja, todos os planetas visíveis naquela época (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno), o Sol, a própria Lua e a esfera das estrelas fixas, somente um tipo de movimento era concebível: o movimento circular perfeito e eterno. Para os planetas, que apresentam curiosos movimentos de retrogradação, um sistema de esferas homocêntricas, baseado numa antiga concepção de Eudoxo, “explicava” o fenômeno observado.

Para os corpos terrestres (sob a esfera da lua), somente o movimento retilíneo era possível, uma vez que a Terra era imóvel e localizada no centro do Universo.

Porém, os corpos terrestres deviam ser caracterizados por suas naturezas. De acordo com essa natureza, foram divididos em quatro diferentes elementos: água, terra, ar e fogo. O quinto elemento, aquele que preenchia o mundo supralunar, foi denominado *éter* (que não se misturava com os outros elementos terrestres). Os movimentos dos elementos terrestres eram, como já dissemos anteriormente, determinados por suas naturezas específicas, que, no universo aristotélico tinham relação com a composição desses corpos. A terra é o corpo mais pesado, depois vem a água, o ar e, por último, o fogo. A terra possuía um movimento retilíneo natural para baixo, enquanto o fogo possuía movimento retilíneo natural para o alto. A água e o ar eram intermediários. Os outros movimentos eram considerados resultado de uma “violência”. Segundo Aristóteles,

“... deve-se ter presente que todo movimento é ou por violência ou por natureza. Mas a existência do movimento violento pressupõe necessariamente aquela do movimento natural (de fato, o movimento violento é contra a natureza e, se é contra a natureza, é posterior àquele natural); de modo que se não existirá para qualquer corpo físico um movimento natural, não existirá sequer nenhum dos outros movimentos. Mas como poderá haver um movimento natural ao longo do vazio e infinito, se nestes não persiste nenhuma diferença?” (Aristóteles, 1993, p. 91).

Pode-se notar aqui um grande argumento lógico de Aristóteles contra a existência do vácuo. Em sua lógica, todo o universo, seja aquele terrestre seja aquele da quintessência, era preenchido pelos seus respectivos elementos. Além disso, segundo ele, o movimento no vácuo seria impossível já que o corpo colocado em movimento deveria apresentar uma velocidade infinita (porque não encontraria nenhuma resistência do meio) e deslocar-se em todas as direções. Podemos observar esta curiosa e importante asserção da “Física” de Aristóteles, na seguinte passagem:

“...o deslocamento natural ... tem suas diferenças ... de modo que os objetos que naturalmente se movem são diferentes. Assim, não existe, por natureza, nenhum deslocamento em nenhum lugar e por nenhuma coisa, [e], se isto existe, não existe de fato um vácuo. Além do mais, os projéteis movem-se ainda, se não os tocam mais aqueles que os lançaram, e se movem ou por reação, como dizem alguns¹, ou porque o

ar, empurrado, empurra-o por sua vez com um movimento mais veloz daquele deslocamento do corpo empurrado em virtude do qual o corpo mesmo é deslocado em direção ao seu lugar próprio. Nenhuma destas coisas pode ser verificada no vácuo e nenhuma coisa poderá ser deslocada, senão mediante um veículo. Além de tudo, ninguém poderia dizer por qual razão o movido parará em algum lugar: porque, de fato, pararia aqui ou ali? De modo que o corpo ou deverá estar em repouso ou necessariamente será deslocado ao infinito, já que não haverá qualquer atrito mais forte. Além disso, parece que o movido é transportado em direção ao vácuo pelo fato de que este cede: mas uma tal cisão se verificará em todas as partes do vazio, de modo que o movido se deslocará para todas as partes.

“Além do mais, a nossa asserção fica esclarecida também do que se segue: na verdade, nós vemos que o mesmo peso e o mesmo corpo movem-se mais rapidamente por duas causas: ou porque é diferente [o meio] pelo qual o objeto passa (por exemplo, se passa através da água ou da terra, ou através da água ou ar), ou porque o objeto deslocado, uma vez que outros fatores sejam os mesmos, difere por excesso de peso ou de leveza.

“É causa o meio através do qual o objeto passa, enquanto este exerce atrito; e isto se verifica especialmente se o meio é deslocado em sentido contrário, mas depois mesmo se está parado. E o atrito é maior quando o meio é menos divisível, ou seja, quando esse possui uma densidade maior.” (Aristóteles, 1993, p.92).

Deste longo trecho, podemos deduzir que a física de Aristóteles possui, como já dissemos, uma formidável coerência, uma vez que se baseia na ocorrência de fenômenos em um meio altamente dissipativo (no caso, o ar), onde o atrito joga um papel decisivo. Podemos também, numa linguagem matemática moderna, descrever sinteticamente a cinemática aristotélica para a queda dos corpos graves (corpos com *gravidade*, ou seja, *peso*, ao contrário dos corpos com *leveza*):

$$v = k \cdot (P/\rho), \quad (1)$$

em que o v é a velocidade de queda do corpo grave, P é o seu peso, ρ é a densidade ou a resistência do meio onde se dá a queda e k é uma constante de proporcionalidade qualquer.

¹Aqui encontramos a conhecida noção de *antiperistasis*, *αντιπεριστασις*, de Platão. O termo quer dizer “substituição mútua” do ar pelo projétil em movimento, com o ar se deslocando atrás daquele, servindo-lhe de motor. Segundo Clagett (1981, p. 533-534): “Aristóteles parece refutar a primeira destas opiniões [sobre a causa do movimento], ou seja, a teoria da *antiperistasis* ou mútua substituição; uma teoria que ele encontrou provavelmente em Platão, que a usava para explicar a respiração (...) a teoria foi elaborada posteriormente por Simplicio [um dos grandes comentadores de Aristóteles], que, no comentário a este trecho de Aristóteles observa que na *antiperistasis*, “quando um corpo é empurrado violentamente por um outro, há uma troca de lugares, e a estrutura toma o lugar daquilo que foi empurrado, o qual, por sua vez, empurra o próximo, e assim sucessivamente ...”

Observando melhor a Eq. (1), podemos deduzir três importantes conseqüências da descrição cinemática dos movimentos segundo a *física* de Aristóteles:

(i) a natureza do corpo (sua quantidade de peso ou de leveza) determina a sua velocidade;

(ii) as velocidades dos corpos são sempre constantes, não havendo nenhuma espécie de variação temporal;

(iii) é impossível o movimento num vácuo (de (1) se vê que, quando $\rho \rightarrow 0$, a velocidade $v \rightarrow \infty$). A existência do vácuo, portanto, é impossível.

Outra conseqüência muito importante da física aristotélica é que um corpo é *movido sempre pela ação constante de um agente*. Uma asserção que, durante a Idade Média, ficou conhecida como *cessante causa cessat effectus* (cessada a causa, cessa o efeito), ou seja, era uma física basicamente não inercial.

A concepção dinâmica da força e a cinemática descritiva dos movimentos elaborada por Aristóteles permaneceu durante um tempo muito longo na história da ciência. Seus sucessores mais conhecidos aceitaram os argumentos cunhados pelo Estagirita, porque esses argumentos permitiram descrever muito razoavelmente os fenômenos observados. Na astronomia, Ptolomeu foi o arquiteto máximo da engenharia celeste, escrevendo a sua obra prima, o *Almagesto*.

Todavia, Aristóteles teve seus críticos, especialmente Hiparco, que acreditava em uma força impressa que passava do motor ao movente e que diminuía, enquanto o corpo se deslocava através de um meio dissipativo. Era uma espécie de impulso, *impetus* interno, uma noção absolutamente nova e que foi redescoberta, independentemente (acredita-se), no sexto século depois de Cristo, por Philoponus, e no século XIV, por Buridan.

Philoponus, por exemplo, em sua crítica a Aristóteles, dizia (sobre o vôo de uma flecha):

“... o ar em questão deve fazer três movimentos diversos: deve ser empurrado pela flecha, deve mover-se para trás e, finalmente, deve girar e proceder novamente para frente. Uma vez que o ar é facilmente movido, e se move a uma distância considerável, como, em conseqüência, pode o ar, empurrado pela flecha, não mover-se na direção do impulso impresso, mas, ao invés, girar para trás, por algum comando, e retrair o seu curso? Além do mais, como pode o ar, girando para trás, evitar de escapar para o espaço (circundante), e imprimir precisamente sobre a parte final da flecha, e novamente empurrá-la? Uma tal idéia é não somente incrível como também bastante fantástica. (Philoponus, in: Grant, 1983).

Philoponus acreditava que a força impressa fosse a responsável pelo movimento de todos os corpos lançados. Prevalcia, ainda, a concepção do *cessante causa cessat effectus*, mas agora, pelo menos, uma conseqüência muito importante estava clara: a possibili-

dade de movimento no vácuo, uma vez que sem um meio resistente ($\rho \rightarrow 0$), a velocidade equivaleria à força empregada [ver Eq. (2) abaixo]. Com isso, uma das objeções à existência do vácuo ficava eliminada. Em termos modernos, poderíamos escrever que

$$v = k'(F - \rho). \quad (2)$$

Philoponus escreve, ainda, sobre a questão de uma *força impressa* (“cessante causa, cessat effectus”), necessária ao movimento dos corpos no vácuo:

“... é necessário supor que alguma força motiva incorpórea seja dada do projetor ao projétil, e que o ar posto em movimento contribui em nada ou muito pouco para o movimento do projétil... E não será necessário nenhum agente externo ao projetor.” (Philoponus, in: Grant, 1983).

Avicenna, estudando as questões e os argumentos de Aristóteles escreve:

“... a força é enfraquecida no projétil, de tal forma que a inclinação natural (mail) e a ação do atrito torna-se dominante sobre ele e, assim, a força é dissolvida e, conseqüentemente, o projétil passa na direção de sua inclinação [tendência] natural.”

Segundo Avicenna, um corpo era capaz de receber um empurrão violento em proporção ao seu peso. Isto explicava, por exemplo, porque uma pequena bola de chumbo podia ser lançada a uma distância grande com relação a um pedaço de madeira leve ou de uma pluma. De uma perspectiva ontológica, Avicenna concebia o empurrão como uma qualidade permanente que devia durar, num corpo, indefinidamente, na ausência de resistência externa. Disso ele concluía que, se um corpo fosse movido violentamente num vácuo, seu movimento deveria ser indefinido em extensão e duração, posto que não existiria nenhuma razão para induzi-lo a parar, uma conclusão a que Aristóteles havia, também, chegado (sem apelar para a força impressa), e por essa mesma razão, entre outras, ele havia refutado a existência do vácuo. Uma vez que a experiência não revela movimentos deste gênero, Avicenna, também, negou a existência do vácuo (v. Grant, 1983, p. 67).

Em seu comentário da *Física* de Aristóteles, Averroes faz referência a Avempace (forma latinizada de Ibn Bajja - um árabe espanhol morto em 1138 - seus trabalhos nunca foram traduzidos para o latim, mas foram citados por Averroes - v. Franklin, 1976), o qual negava a idéia aristotélica de um meio motor externo. Sua idéia assemelhava-se mais àquela de uma força impressa ao corpo que se move.

Para avaliar a importância da discussão sobre a natureza do movimento dos graves, encontramos num texto clássico da Idade Média, o Livro IV das *Questões*

sobre os Oito Livros da Física de Aristóteles (ver Clagett, 1981, p. 158-161; Grant, 1964), de Alberto da Saxônia, importante comentador da Universidade de Paris, os seguintes quesitos para discussão (entre dezessete enumerados):

“8. Se a existência de um vácuo é possível.

“9. Se, em seu movimento descendente, um simples corpo pesado possui uma resistência interna; e, ao mesmo tempo, [se] em seu movimento ascendente um [simples] corpo leve [possui uma resistência interna].

“10. Se um meio de resistência é necessário em todo movimento de corpos pesados e leves.

“11. Se, existindo um vácuo, um corpo pesado poderia mover-se nele.

“12. Se alguma coisa pode mover-se no vácuo - admitindo-se a existência - com uma velocidade finita ou com um movimento circunscrito ou com um movimento alterado.”

II Buridan e Galileu

Através do percurso histórico traçado até aqui, chegamos agora à mais elaborada teoria sobre a força impressa: a teoria medieval do *impetus*. Essa noção aparece primeiramente com Philoponus, mas parece que Buridan desconhecia seu trabalho. Como Avicenna, Buridan atribuía à noção de força impressa uma qualidade de permanência, sustentando que o *impetus* impresso deveria conservar-se ao infinito, a menos que fosse *corrompido* por uma resistência externa (ainda, com mais intensidade, a noção de *cessante causa cessat effectus*).

Portanto, o *impetus* seria uma força motriz incorpórea, transmitida de um motor inicial ao corpo posto em movimento. A velocidade e a quantidade de matéria de um corpo eram tidas como medida da força do *impetus* que produzia o movimento. Sobre a asserção correta de que existia mais matéria em um corpo pesado, denso, que de um mais leve, mais rarefeito de mesmo volume e da mesma forma, Buridan explicava que se um pedaço de ferro ou pedaço de madeira de forma e volume idênticos fossem movidos com a mesma velocidade, o ferro atravessaria uma distância maior porque a sua maior quantidade de matéria poderia receber mais *impetus* e durar por mais tempo contra as resistências externas. É por tal razão que Buridan utilizava a *quantidade de matéria* e a *velocidade* como meios para determinar a medida do *impetus*, as mesmas quantidades que serviram para definir o *momentum* na física newtoniana, se bem que, nessa última, o *momentum* é concebido como uma quantidade de movimento ou uma medida do efeito do movimento de um corpo, enquanto o *impetus* é a sua causa. De fato, o *impetus* foi considerado como uma internalização da força motriz que Aristóteles havia considerado como externa (Grant, 1983, p. 68).

É curioso como Buridan e seu discípulo, Oresme, ambos da Universidade de Paris, não obstante a noção de *impetus*, tenham tido, antes de Galileu, noções bastante acertadas sobre sistemas de referências, considerando, inclusive, a possibilidade do movimento diurno e anual da Terra. Chegaram, inclusive, à conclusão de que os efeitos físicos, tanto em um sistema (geocêntrico - Terra estática) quanto em outro (heliocêntrico - Terra girante), os fenômenos de movimento seriam os mesmos. Porém, ao final, decidiram optar pelo velho sistema aristotélico-ptolomaico.

É importante salientar, aqui, que a assim chamada *Revolução Científica* inicia-se com o sistema copernicano. Mas Copérnico, ou melhor, o sistema arquitetado por ele, não fornece um sistema físico de mundo plausível, capaz de explicar porque os corpos não são lançados fora da Terra devido ao seu movimento de rotação. A explicação é, ainda, no contexto filosófico de Aristóteles segundo o qual, o movimento de rotação terrestre era um *movimento natural* e, por esta razão, não podia produzir os mesmos efeitos de dispersão observados nos movimentos violentos de rotação. Enquanto Oresme e Buridan procuravam as causas para uma dinâmica física do Universo, Copérnico descrevia o mundo segundo o *método de astrônomo*, preocupando-se mais com uma *descrição matemática do mundo* que, propriamente com sua *compreensão última* (“método do físico”). O sistema aristotélico-ptolomaico continuava a fornecer uma “explicação” mais coerente de Universo, ligando os mundos supralunar e sublunar de forma mais harmoniosa e previsível.

Évora salienta que “embora Copérnico no seu *De Revolutionibus Orbium Coelestium* tenha apresentado uma teoria planetária completamente nova, iniciando assim uma revolução na astronomia, de um modo geral procura explicar a rotação da Terra em termos da doutrina aristotélica do movimento e dos elementos (é bem verdade que usando os princípios da física aristotélica a seu favor). Como afirma Richard Westfall, Copérnico propôs *uma reformulação limitada na teoria planetária dentro das linhas gerais da estrutura aceita da ciência aristotélica* [Westfall, 1971, p.3]. Porém, embora Copérnico não chegue a assumir um rompimento com a física aristotélica, sua teoria astronômica necessita de uma nova física” (Évora, 1988, pp. 107-108).

Sucessor de Copérnico, Johannes Kepler, além de formular as leis para o movimento dos planetas, acreditava que estes permaneciam em suas órbitas porque existiam forças de origem (ou semelhantes àquelas) magnéticas, emanando de um corpo central, o Sol, como gigantescos braços que empurrassem os planetas sobre suas órbitas.

Enquanto o mundo pré-copernicano debatia-se na crítica à obra aristotélica sem, no entanto, superá-la, Galileu Galilei ensaiará os primeiros passos para sua completa dissolução. Porém, Galileu é um homem de seu tempo e permanecerá atrelado ainda a uma certa

influência medieval. Para dar um exemplo, em seu *De Motu*, escrito em torno a 1590, Galileu baseia suas explicações sobre a queda natural dos corpos utilizando a noção de peso específico (peso por unidade de volume), ao invés de uma relação entre força e resistência interna por unidade de matéria, como acreditava Aristóteles. Galileu sustentava que os corpos homogêneos de medidas desiguais, e, portanto, de pesos diferentes, deviam cair com velocidades iguais no pleno e no vácuo, se bem que suas respectivas velocidades deveriam ser maiores no segundo que no primeiro. Para Galileu, o peso efetivo era igual à diferença no peso específico de um corpo e ao meio através do qual este caía. Assim, era realmente uma diferença nos pesos específicos que determinava a velocidade.

Uma outra influência medieval em Galileu pode ser observada na contribuição ao desenvolvimento da cinemática pelos estudiosos do Merton College, em Oxford. Esses estudiosos desenvolveram, por exemplo: a) uma clara distinção entre a *dinâmica* e a *cinemática*, expressa como distinção entre as *causas* do movimento e os *efeitos* espaço-temporal; b) uma nova abordagem de “rapidez” ou velocidade, definindo velocidade instantânea (determinando a idéia de *função*, ou *aceleração*); c) a definição do movimento uniformemente acelerado, entendido como aquele movimento no qual incrementos iguais de velocidade são adquiridos em intervalos de tempos iguais; d) a formulação e a demonstração do teorema cinemático fundamental que estabelece a igualdade, com respeito ao espaço percorrido em um tempo dado, de um movimento uniformemente acelerado e de um movimento uniforme no qual a velocidade é igual à velocidade do movimento acelerado no instante da metade do tempo de aceleração (v. Clagett, 1981, p. 235-236).

Esta influência da física da Idade Média permaneceu em Galileu durante o seu primeiro cargo na Universidade de Pisa e constitui a base de seu tratado (não publicado) *De Motu*. Neste tratado, ele tentou explicar o movimento forçado em direção ao alto e a conseqüente aceleração de um corpo pesado na direção para baixo. Como fundamento de sua explicação, ele adotou a idéia de uma força residual que derivava, de certa forma, de Hiparco, cujas opiniões eram descritas por Simplicio no *Comentário sobre o Céu de Aristóteles*, um tratado amplamente conhecido na Idade Média. A ele, Galileu adiciona o mecanismo de uma força impressa incorpórea auto-exaustiva, ou *impetus*, que ele provavelmente emprestava de fontes medievais. Inicialmente, o motor compartilha uma força impressa a uma pedra que é jogada para o alto. Quando diminui a força, o corpo gradualmente reduz a sua velocidade em direção ao alto, até que a força impressa é contrabalançada pelo peso da pedra e, nesse momento, a pedra começa a cair, primeiro, lentamente, e depois, mais velozmente, enquanto a força impressa diminui e gradualmente se consome. A aceleração resulta como a diferença entre

o peso da pedra e a diminuição da força impressa que cresce continuamente. Devido a isso, sobre a linha de queda do movimento, a força impressa funciona realmente como uma resistência. De um ponto de vista teórico, se o corpo caísse através de uma distância suficientemente longa, toda a força impressa desapareceria, e, nesse momento, o corpo deveria cair com uma velocidade uniforme. Ao final, Galileu abandonou o conceito de força impressa exaustiva e explicou a queda acelerada por meio de um *impetus* que é conservado e acumulado, uma explicação que difere muito pouco daquela de Buridan, segundo Grant (1971, pp. 72-73).

Sobre a influência medieval em Galileu, Cohen (citando Murdoch e Sylla), diz:

“... na verdade, o objetivo de muitos estudiosos medievais que trataram o movimento estava a mundos de distância de Galileu e seus confrades ... Não deve ter sido fácil a transição destes últimos trabalhos dos escolásticos para a nova e revolucionária ciência do movimento de Galileu. Não há, de fato, melhor índice para a verdadeira qualidade revolucionária da nova ciência do movimento de Galileu [sic] do que o contraste entre estas abstrações medievais, expurgadas de toda a imperfeição da natureza, e a ciência de Galileu, baseada diretamente em observações e experiências e testada pelo seu grau de conformidade à natureza, que é revelado pela experiência. (Cohen, 1988, p.262).

Ainda sobre a influência do mundo medieval sobre o jovem Galileu, Évora (1988, pp.88-89) diz:

“Embora reconhecendo os limites da teoria do *impetus* [em Buridan] e a importância arquimediana sobre o trabalho de Galileu, acreditamos que não se pode negar a influência de Philoponus, Avempace e dos nominalistas de Paris no desenvolvimento das idéias de Galileu, que culminarão com o estabelecimento da inércia circular. Isto pode ser evidenciado pela similaridade entre as idéias defendidas por Galileu, sobre movimento no vácuo e movimento de queda livre, e aquelas defendidas pelos autores (...) citados. Idéias estas, que terão importante papel no estabelecimento da visão inercial de Galileu”.

Apesar de tudo, a física de Galileu apresenta outros pontos que divergem do “Galileu inventado” pelos livros-textos (didáticos), ou seja, divergem do cientista que inventou o assim chamado *método científico* e construiu uma cinemática absolutamente precisa. No campo da cinemática não podemos esquecer que Galileu, até 1604, acreditava que a velocidade de um corpo era proporcional ao espaço percorrido. I.B. Cohen, sobre essa questão afirma:

Em “Duas Nova Ciências”,..., Galileu admite bastante explicitamente que acreditara na relação

$$V \propto D$$

e apenas mais tarde se converteu ao princípio correto

$$V \propto T$$

Sagredo (no diálogo da terceira jornada) pergunta se o “movimento uniformemente acelerado” não é “aquele em que a velocidade vai aumentando de acordo com o correspondente aumento do espaço percorrido”. A resposta, dada por Salviati (que geralmente fala por Galileu) é que descobriu “ser muito confortável ter tido um tal companheiro no erro” e que “o nosso Autor [...] durante algum tempo trabalhou sob a mesma falácia”. Simplicio, o aristotélico do grupo, acrescenta que também acredita “que a velocidade aumenta na mesma proporção que o espaço percorrido”. (Cohen, 1988, p. 258).

Somente depois de considerar a queda acelerada de um corpo a partir do repouso, percorrendo espaços em intervalos de tempos iguais e sucessivos, é que Galileu chega à conclusão de que aqueles [espaços] “estarão entre si [na mesma razão] em que estão os números ímpares, a partir da unidade, isto é, 1, 3, 5, 7, ...” (Galileu *apud* Cohen, 1988, p. 119). Fazendo uso, posteriormente, de uma série de experimentos, entre os quais, experimentos envolvendo planos inclinados, Galileu muda a descrição da queda dos corpos graves para uma velocidade proporcional ao tempo de queda e de um espaço percorrido proporcional ao quadrado do tempo (Galileu, 1953), ou seja, enfim é reconhecida a grandeza física *aceleração* (que, podemos dizer, é fruto do teorema da velocidade média cunhado na Idade Média, e desenvolvida, como já dissemos anteriormente, no Merton College), o que abrirá estradas para o conceito newtoniano de *força*.

O Galileu histórico e aquele pseudo-histórico (cantado e cantado sinteticamente pelos livros didáticos e de divulgação científica) divergem em outras situações presentes em sua discussão física. Por exemplo, o conceito de inércia, como o formulado por Galileu (que se encontra numa bela passagem da discussão entre Simplicio, Salviati e Sagredo), está equivocado em sua discussão final. Recordando este trecho de discurso, o argumento apresentado é aquele do que aconteceria a uma bola colocada sobre um plano inclinado. Depois da aceleração experimentada pela bola em seu movimento sobre o plano inclinado, o que deveria acontecer ao movimento da bola depois dela deixar o plano? Simplicio responde que a bola deveria continuar o seu movimento com a velocidade com que deixou o plano. A discussão se dá sobre o movimento “para cima” e “para baixo”, ou, respectivamente, para aquele corpo que se distancia

do centro da Terra e para aquele que se aproxima. Ao final da discussão, os protagonistas do diálogo concordam que se a superfície da Terra fosse completamente lisa, sem mares e montanhas, a bola deveria continuar rolando infinitamente, em seu movimento ao redor da Terra, com a mesma velocidade ao final do plano. Sabemos que isto não é inércia, porque a bola está sujeita à ação constante de uma força em direção ao centro (gravidade). O que permanece é a conservação do momento angular, de todo desconhecido por Galileu, assim como a própria natureza da gravidade (permanecia a velha noção de corpos graves, com peso ...). A discussão é interessante, porém a conclusão conduz a um grave erro: a noção de uma *inércia circular!*

Outra coisa curiosa na obra de Galileu é uma “prova” (ver o seu *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*) que ele fornece para demonstrar a rotação diária da Terra e seu movimento de translação ao redor do sol: as marés. Aqui, Galileu comete o seu mais clamoroso erro físico (depois daquele do *Il Saggiatore*, livro que escreve para criticar a suposição de um jesuíta de que os cometas são corpos supralunares, acima da esfera da lua; para Galileu, mais uma “recaída” aristotélica: ele, apoiado pelos membros da *Accademia dei Lincei*, defende a idéia de uma natureza sublunar, pertencente ao campo da meteorologia), contradizendo inclusive o seu princípio de relatividade mecânica (onde é impossível perceber os efeitos de repouso ou de movimento de um sistema em translação uniforme). Para sair do “relativismo”, dos dois diferentes sistemas de mundo, o ptolomaico (geocêntrico, com a Terra imóvel) e o copernicano (heliocêntrico, com a Terra girante), que se equivalem fisicamente, e provar que o sistema de Copérnico é mais válido que aquele de Ptolomeu, Galileu explica o fenômeno das marés (Martins, 1994) como resultado dos movimentos da Terra. Sem estes movimentos, acreditava o físico italiano, as marés seriam impossíveis numa Terra em repouso. Esta teoria já havia sido desenvolvida pelo próprio Galileu antes da publicação do *Dialogo (Quarta Giornata)* em uma carta enviada ao Cardeal Orsini em 18 de janeiro de 1616. Galileu refuta a explicação dada por um padre jesuíta, Marcantonio de Dominis, que supunha, acertadamente, que as águas dos mares eram atraídas pela Lua. Galileu procura as causas mecânicas para provar que as marés eram explicáveis pelos movimentos conjuntos de rotação e translação terrestre.

Ele imagina um vaso cheio de água que, uma vez agitado, faria com que o nível de água subisse de um lado e descesse do outro, num movimento oscilante. Galileu imagina agora um navio sobre o mar cheio d'água. Se o navio acelera subitamente a água permanecerá para trás e subirá pela popa, deixando a proa com um nível de água mais baixo. Se a nave pára improvisadamente, ocorrerá o inverso: a água subirá pela proa e descerá pela popa. Galileu compara, assim, este fenômeno com aquele que acontece no Mediterrâneo, afirmando que

partes da Terra ora se aceleram, ora se retardam periodicamente. Portanto, a composição dos movimentos de rotação e translação terrestre produziriam nos mares acelerações e retardamentos explicando as marés. Esta dedução se liga, pois, ao exemplo imaginário do navio, onde as sucessivas acelerações e retardamentos fazem oscilar, igualmente, as águas. Deste modo, Galileu, finalmente, justifica o fenômeno das marés como uma prova empírica do sistema copernicano.

No entanto, sabemos que esta teoria apresenta dois gravíssimos defeitos: é contraditória, no sentido de que, segundo Galileu, as marés deveriam ocorrer num ciclo de 24 horas, e não de 12 horas como é efetivamente observado na natureza (sabe-se, por exemplo, que uma maré alta não se manifesta a uma hora fixa do dia; os horários das marés variam no transcorrer dos dias); e, está fora da mesma mecânica criada pelo físico italiano, violando seu princípio de relatividade do movimento.

Sobre o argumento galileano da rotação da Terra, Martins conclui:

“Assim sendo, Galileu não conseguiu defender o sistema de Copérnico nem derrubar o de Ptolomeu. A revolução copernicana não se completou com Galileu. Se for possível indicar uma época e um nome, deve-se dizer que a revolução copernicana se completou com Newton, 35 anos depois (...)” (Martins, 1994, p.210).

III Descartes, Newton e Além

O filósofo italiano Paolo Rossi em sua obra *La Nascita della Scienza Moderna in Europa*, salienta que:

“a história da física, das elaborações tardo-escolásticas da teoria do impetus até as límpidas páginas dos Principia de Newton, é a história de uma profunda revolução conceitual que leva a uma modificação profunda das noções de movimento, massa, peso, inércia, gravidade, força, aceleração. Trata-se (...) de um novo método e de uma nova concepção geral de universo físico. Trata-se, também, de novos modos para se determinar os fins, os trabalhos e os objetivos do conhecimento da natureza” (Rossi, 1997, p. 5)

Proseguindo, pois, nesta história, Descartes foi outro grande nome da Física na busca de um conceito unificador que permitisse a explicação do *por quê* da persistência do movimento. Sobre Descartes, escreve Jammer:

“Se bem que Descartes fizesse referência, sobretudo em seus primeiros escritos, a forças de atração exercidas pela Terra sobre

objetos cadentes, e explicasse o movimento acelerado de tais objetos mediante a ação cumulativa da força, mais tarde ele concebeu a “força” simplesmente em termos de aparência fictícia. A absoluta dicotomia da existente em pura matéria e puro espírito, segundo o que ele sustentava, lhe parecia incompatível com a suposição de forças na matéria ou exercitadas pela matéria mesma, enquanto as forças, aos seus olhos, eram ainda noções de tipo, sobretudo, psíquicas. A matéria devia ser despojada de todo constituinte espiritual, de todas as formas ou tendências inatas. Somente a extensão e o eterno movimento eram suas características. Por conseqüência, na carta a Mersenne de 13 de novembro de 1629, ele discute a queda livre sem nenhuma referência a forças do tipo atrativa. Na tentativa de eliminar o conceito de força de seu sistema, ele utiliza nesta ocasião o conceito medieval de impetus, mas mais tarde recorrerá à teoria dos vórtices que, para ele, tinham uma característica puramente cinemática. O acumular de experiências com forças diversas e a sempre crescente massa de informações concernentes à pneumática e à hidrostática, nas quais apareciam forças que contrastavam à inércia, enquanto a gravidade era de todo irrelevante, empurraram o conceito de inércia para primeiro plano nas considerações teóricas de Descartes, de Pierre Gassendi e de Giovanni Battista Baliani. Sobre o terreno do princípio de inércia, Descartes pensava que fosse possível eliminar a força enquanto conceito físico isolado. Ele sustentava que todos os fenômenos físicos deviam ser deduzidos de somente duas suposições fundamentais de tipo cinemático: a lei da conservação da quantidade de movimento - que, para ele, não era um corolário do princípio de inércia, mas sim o seu real conteúdo físico - e a sua teoria dos vórtices de éter girantes. De fato, refutando toda possibilidade de ação à distância, Descartes construiu a teoria dos vórtices para render inteligibilidade aos distantes movimentos celestes. Ele sustentava que assumir uma ação à distância para explicar estes movimentos equivalia a atribuir a partículas materiais uma forma de conhecimento e a torná-las efetivamente divinas, “quase como se pudessem ser conscientes, sem intermediações, do que ocorre em lugares muito distantes daquelas.” O conceito de força não encontrava lugar na física de Descartes ...” (Jammer, 1979, p.

116-117).

Enquanto houvesse formulado um princípio de inércia como aquele que conhecemos hoje (primeira lei de Newton) e, também, inventado o conceito de *quantidade de movimento* [é importante salientar aqui que a noção de “força” em Descartes tem a ver com o produto $m.v$ - massa e velocidade; um conceito ainda não vetorial. Leibniz e, posteriormente, D’Alembert, Johann Bernoulli, entre outros, serão aqueles que sintetizarão os conceitos $m.v$ e $m.v^2$ (vis viva - v. Westfall, 1982, p.369)]. Descartes não teve sucesso ao substituir o conceito de “força” pela sua teoria dos vórtices. A síntese de Descartes para o *sistema de mundo* encontrará na obra de Newton a mecânica necessária para a explicação dos fenômenos terrestres e celestes. Porém, antes de entrarmos nos axiomas ou leis do movimento, vejamos como Newton arquiteta suas definições que precedem os axiomas em seus *Principia*:

“Definição I: A quantidade de matéria é a medida da mesma, obtida conjuntamente a partir de sua densidade e volume.

Definição II: A quantidade de movimento é a medida do mesmo, obtida conjuntamente a partir da velocidade e da quantidade de matéria.

“Definição III: A vis insita, ou força inata da matéria, é um poder de resistir, através do qual todo o corpo, estando em um determinado estado, mantém esse estado, seja ele de repouso ou de movimento uniforme em linha reta. [sobre esta definição, Newton esclarece a noção de força inata: “... essa vis insita pode ser chamada, mais significativamente, de inércia (vis inertiae) ou força de inatividade. Mas um corpo só exerce essa força quando outra força, impressa sobre ele, procura mudar sua condição; e o exercício dessa força pode ser considerado tanto como resistência quanto como impulso; resistência na medida em que, para conservar seu estado, o corpo opõe-se à força impressa; e impulso na medida em que o corpo, não cedendo facilmente à força impressa por um outro, esforça-se para mudar o estado deste outro corpo. Resistência é normalmente atribuída a corpos em repouso, e impulso àqueles em movimento; mas movimento e repouso, como vulgarmente concebidos, diferem apenas relativamente um do outro; nem esses corpos estão sempre verdadeiramente em repouso, como vulgarmente são considerados.”

“Definição IV: Uma força impressa é uma ação exercida sobre um corpo a fim de alterar seu estado, seja de repouso, ou de mo-

vimento uniforme em linha reta.” [Newton explica assim a noção de força impressa: “essa força consiste apenas na ação, e não permanece no corpo quando termina a ação. Pois um corpo mantém todo novo estado que ele adquire, somente por sua inércia. Mas as forças impressas têm origens diferentes, tais como de percussão, de pressão e de força centrípeta.”

“Definição V: Uma força centrípeta é aquela pela qual os corpos são dirigidos ou impelidos, ou tendem de qualquer maneira, para um ponto como centro.” [Newton explica: “... são forças desse tipo: a gravidade, pelo qual os corpos tendem para o centro da Terra; o magnetismo ...”

“Definição VI: A quantidade absoluta de uma força centrípeta é a medida da mesma, proporcional à eficácia da causa que a propaga a partir do centro, através dos espaços ao seu redor.

Definição VII: A quantidade acelerativa de uma força centrípeta é a medida da mesma, proporcional à velocidade que ela gera em um dado tempo.

“Definição VIII: A quantidade motora de uma força centrípeta é a medida da mesma, proporcional ao movimento que ela gera em um dado tempo.” (Newton, 1990, p. 1-5).

Estas definições que nunca ou quase nunca aparecem em livros-textos (didáticos) e de divulgação científica de física, são muito interessantes no sentido de mostrar as bases sobre as quais se apóia o edifício newtoniano, especificamente seus axiomas de movimento e toda sua dinâmica. Jammer, ainda, escreve a respeito da terceira definição:

“O termo ‘força’ (vis) aparece pela primeira vez na Definição III da opus magnum de Newton: “Materiae vis insita est potentia resistendi, Qua corpus unumquodque, quantum in se est, perseverat in statu suo vel quiescendi vel movendi uniformiter in directum” ... A natureza inerte da matéria é aqui concebida como uma força de inatividade. Segundo a opinião de Newton, a inércia é um certo tipo de força interna (insita) à matéria, cuja força permanece latente até que uma outra força impressa ao corpo não “tente modificar a sua condição”. Essa pode ser considerada seja como resistência seja como impulso. O mesmo Newton admite: “o exercício dessa força pode ser considerado tanto como resistência quanto como impulso; resistência

na medida em que, para conservar seu estado, o corpo opõe-se à força impressa; e impulso na medida em que o corpo, não cedendo facilmente à força impressa por um outro, esforça-se para mudar o estado deste outro corpo". Trata-se de resistência se o corpo está em repouso, de impulso se está em movimento." (Jammer, 1979, p. 132).

Este aspecto significativo da definição de força dada por Newton faz Jammer escrever:

"É claro que, nesta definição, a força não é concebida como uma causa do movimento ou da aceleração. Então, como era possível, para Newton, chamar "força" a qualidade da inércia?" (Jammer, 1979, p. 133).

Ele avança uma resposta sobre esta questão estudando os editores dos *Principia*:

"De fato, Thomas Le Seur e Franciscus Jacquier, que republicaram os *Principia* em 1760, assim comentaram a Definição III: "Vis duplex, activa et passiva; Activa est potentia motum efficienti; Passiva potentia recipiendi vel amittendi" ("A força é dupla, ativa e passiva. Ativa é a potência de cumprir um movimento; passiva a potência de recebê-la ou perdê-la.) ... Segundo Newton, a inércia é proporcional à quantidade de matéria possuída pelo corpo. Em claro contraste com a "força inata", a "força impressa" é assim definida na Definição IV dos *Principia* de Newton: [ver definição precedente] ... Quando Newton escreve que "a força centrípeta origina-se da força impressa", parece que ele tinha em mente que a força centrípeta, ou força "central", é um elemento irreduzível, em última análise, do aparato conceitual, um elemento que se manifesta mediante a força impressa exercitada sobre um corpo e mensurável graças à variação da quantidade de movimento. A definição que Newton expõe a propósito da força impressa, compreendida como causa de variações do estado de repouso ou de movimento uniforme de um corpo, está estritamente conectada ao seu princípio metafísico de causalidade. Isto porque a toda variação deve corresponder a uma causa, a variação do movimento é um efeito, e a força impressa é a sua causa. Quando se fala de caráter efêmero desta força impressa, Newton dá a impressão de conservar, no fundo da própria mente, o velho ditado escolástico do cessante causa cessat effectus" (Jammer, 1979, p. 133-134).

Nesta citação, o autor parece insinuar que Newton, que havia feito uma verdadeira e profunda revolução seja de conceitos, seja de visão do sistema de mundo, era, ainda, uma transição entre a velha física aristotélica e a não distante física dos nominalistas parisienses e da cinemática galileana.

Uma coisa muito importante da obra de Newton é que ele inicia seu texto com duas definições novas e essenciais: a *quantidade de matéria* (definição primeira) e a *quantidade de movimento* (definição segunda). Sobre a quantidade de matéria, podemos afirmar que Newton imaginou uma proporcionalidade entre a *vis inertiae* e a *quantidade de matéria*, ou seja, estes conceitos ou definições estavam ligados à noção de que diversos corpos com iguais volumes apresentavam diversas *forças inerciais*, ligadas ao conceito de *densidade*. Mas por que isto é importante em nossa presente discussão sobre força? Porque a *quantitas materiae* pode ser identificada com a *potentia* que todo corpo apresenta ao resistir à aplicação de uma *força impressa*, responsável pela mudança da característica cinemática do movimento do corpo: repouso ou movimento uniforme. Devemos recordar que, nos *Principia*, a diferença entre os modernos conceitos de *massa* e *peso* não foi estabelecida explicitamente. Somente em 1742, com o trabalho de Johann Bernoulli, é que se chegou à definição de peso como o produto da massa pela aceleração da gravidade: "*ex ratione materiae quantitatis, quam vocabo vel modum, et ex ratione gravitum acceleratricium; componendo namque duas posteriores, nascitur ratio ponderum*".

Após suas *Definitiones*, Newton estabelece os seus famosos três axiomas ou leis para o movimento dos corpos:

"LEI I: Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças impressas sobre ele.

"Projéteis continuam em seus movimentos, desde que não sejam retardados pela resistência do ar, ou impelidos para baixo pela força da gravidade. Um pião, cujas partes por sua coesão são continuamente afastadas de movimentos retilíneos, não cessa sua rotação a não ser quando retardado pelo ar. Os corpos maiores dos planetas e cometas, encontrando menos resistência em espaços mais livres, preservam seus movimentos, tanto progressivo como circular, por um tempo muito maior.

"LEI II: A mudança de movimento é proporcional à força motora impressa e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é impressa.

“Se qualquer força gera um movimento, uma força dupla vai gerar um movimento duplo, uma força tripla, um movimento triplo, seja aquela força impressa completa e imediatamente, ou gradual e sucessivamente. Esse movimento (sendo sempre orientado na mesma direção da força geradora), caso o corpo se mova antes, é adicionado ou subtraído do primeiro movimento, dependendo se eles cooperam na mesma direção ou se são diretamente contrários um ao outro ou obliquamente combinados, quando oblíquos, de modo a produzir um novo movimento composto a partir da determinação de ambos.

“LEI III: A toda 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.

“Seja o que for que puxe ou empurre alguma coisa, é da mesma forma, puxado ou empurrado por ela. Se você empurra uma pedra com seu dedo, o dedo é também empurrado pela pedra. Se um cavalo puxa uma pedra amarrada a uma corda, o cavalo (se posso dizer assim) vai ser igualmente puxado de volta na direção da pedra, pois a corda distendida, pela mesma tendência a relaxar ou distorcer-se, puxará o cavalo na direção da pedra, tanto quanto ela puxa a pedra na direção do cavalo, e obstruirá o progresso de um tanto quanto promove o do outro. Se um corpo choca-se com outro, e pela sua força muda o movimento desse, aquele corpo também (por causa da igualdade da pressão mútua) sofrerá uma mudança igual no seu próprio movimento, em direção à parte contrária. As mudanças feitas por essas ações são iguais não nas velocidades mas nos movimentos dos corpos, quer dizer, se os corpos não são obstruídos por quaisquer outros impedimentos. Pois, porque os movimentos são igualmente alterados, as mudanças de velocidades feitas em direções a partes contrárias são inversamente proporcionais aos corpos. Essa lei também ocorre em atrações (Newton, 1990, p. 15-16).

Como podemos depreender, lendo as definições e os axiomas juntos, não está explícita a famosa fórmula $F = m \cdot a$. Sobre esta questão, Jammer escreve:

“Uma vez que Newton distingue claramente entre definições e axiomas (ou leis de movimento) é óbvio que a segunda lei do movimento não era entendida por ele como

uma decorrência de uma definição da força, mesmo se é isso que vem sendo interpretado por modernos estudiosos da fundação da mecânica. E não se tratava tanto do simples enunciado de um método para a medida das forças; segundo Newton, a força era um conceito dado a priori, intuitivamente, e, em última análise, em analogia à força muscular do homem. A Definição IV não pode, portanto, ser interpretada como se se tratasse de uma definição nominal, mas, sobretudo, como uma asserção sintética da propriedade característica das forças de determinadas acelerações.” (Jammer, 1979, p. 137).

Já Westfall (1984, p.185-186) escreve:

“a segunda lei e as definições ligadas a ela introduziram realmente o conceito na mecânica racional. Graças ao conceito de força, a cinemática de Galileu pôde ser integrada com a ciência da dinâmica. “A mudança de movimento é proporcional à força motora impressa e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é impressa”. Usando os termos a rigor, as palavras de Newton dizem que $F = \Delta mv$, e não $F = ma$, nem $F = d(mv)/dt$, formas da segunda lei que nos são familiares. A enunciação newtoniana da lei reflete a fonte de seus primeiros estudos sobre choques e as exigências da geometria com a qual ele apresentou os Principia. Considerava que $F = \Delta mv$ se aproxima a $F = ma$ como limite quando Δt se aproxima de zero. Na definição de força estava implícita [grifo do autor] a definição de massa, agora, pela primeira vez, claramente distinta do peso.”

A moderna fórmula da força, foi escrita pela primeira vez em 1747 por Euler. Truesdell, em seu livro *Essays in the History of Mechanics*, à página 167, escreve que aquilo que hoje definimos como “sistema newtoniano” é fruto da física desenvolvida por Bernoulli, D’Alembert e Euler. Este último, por exemplo, resolveu três grandes problemas para desenvolver uma mecânica baseada sobre a “descoberta” das equações diferenciais para corpos particulares: o corpo rígido, o fluido perfeito e uma barra elástica. Segundo Truesdell, o primeiro passo de seu raciocínio culminou na idéia de que o princípio do momento linear poderia ser escrito a partir de um conjunto de equações diferenciais. Não antes de 1747, Euler (e ele foi o primeiro a escrever), observou que, para todos os sistemas discretos, as equações do movimento são da forma:

$$m_k \cdot \ddot{x}_k = F_k,$$

onde, F_k é a força que age sobre o k -ésimo corpo. Truesdell escreve algures:

Enquanto os físicos chamam estas de “equações de Newton”, elas não aparecem em nenhum lugar do trabalho de Newton ou de qualquer outro antes de 1747. É verdade que hoje podemos lê-la facilmente nas palavras de Newton, mas o fazemos por elaboração a posteriori. (Truesdell, 1968, p. 167).

Com respeito a Euler:

“Aceitando ainda o ponto de vista do realismo clássico, Euler considera a força como o conceito fundamental de sua dinâmica, mesmo se o confronto e a medida das forças são relegadas na estática. A definição I de seu sistema dedutivo soa como: “Potentia est vis corpus vel ex quiete in motum perducens, vel motum ejus alterans” (a potência é uma força que leva um corpo do repouso ao movimento ou que não altera o movimento). A gravidade, por exemplo, é uma força do gênero, e é, portanto, uma potência. A “potência” (potenza) de Euler corresponde àquela que se chama geralmente de “força celerativa” (vis acelerativa), e, a partir de agora, a chamaremos simplesmente de “força”. No Escólio II, Euler discute como a estática está envolvida na medida destas forças. A força A corresponde à força B como (o número) m corresponde a n , se A, aplicada n vezes em um certo ponto numa certa direção, e B, aplicada m vezes no mesmo ponto na direção oposta, deixa-se o estado de equilíbrio; É axiomático, no esquema conceitual de Euler, que aquelas forças, cuja equivalência era provada da estática, produziam os mesmos efeitos dinâmicos. Considerada de um ponto de vista operativo, a estática fornece os fundamentos da dinâmica, mesmo se esta última, segundo Euler, forma a base de uma teoria dedutiva da mecânica. Em contraste com Varignon que, em sua “Nouvelle Méchanique”, funda a própria teoria sobre a estática, Euler, em sua “Meccanica Sive Motus Scientia”, reduz a mecânica teórica à dinâmica. Euler distingue três forças absolutas, como a gravidade, cujos efeitos dinâmicos são independentes do fato de que o corpo solicitado esteja em repouso ou em movimento, e forças relativas, cujos efeitos dependem da velocidade do corpo, como ocorre no caso da força hidrodinâmica exercitada por uma corrente líquida sobre

um objeto. Primeiramente, Euler discute o efeito de uma força sobre um corpo simples (corpus significa ponto material ou partícula material). Depois, por fim, generaliza os resultados em um conjunto de corpos, introduz o conceito de massa e completa as bases para o seu posterior desenvolvimento da mecânica.” (Truesdell, 1968, p. 168)

IV Algumas Considerações Críticas

Das considerações históricas que fizemos até então, podemos concluir que a física galileana e newtoniana fez um longo percurso em direção a uma idealização da fenomenologia do mundo terrestre. O efeito da resistência do ar e do atrito foi desprezado, e, assim, a crença de que a física de Galileu e de Newton foi um matrimônio entre céu e Terra, só pode ser parcialmente verdadeira, já que a “física terrestre” foi considerada exceção ao sistema da idealidade máxima do sistema de mundo pós-newtoniano. É verdade que o mesmo Newton dedicou o segundo livro de seus *Principia* aos fenômenos do movimento em um meio fluido. Por exemplo, nas proposições XV e XVI, Newton formulou um problema da resistência do meio durante a queda de um corpo sob a ação de uma aceleração central (uma força proporcional ao quadrado da velocidade).

Tomemos agora uma longa citação de Toulmin que procura na obra aristotélica os fundamentos em sua forma de conceber o movimento:

É necessário fazer três observações sobre proporções asseveradas por Aristóteles antes de tomar em consideração as inovações da dinâmica no século XVII. A primeira observação é esta: Aristóteles concentrou sua atenção sobre o movimento dos corpos contra uma resistência apreciável e sobre a duração de tempo requerida para uma mudança completa de posições de um lugar para outro. Por uma série de razões, realmente, não dedicou-se nunca ao problema de definir “a velocidade” como expressão de períodos sempre mais curtos de tempo - isto é, a velocidade instantânea. Nem estava em condições de dedicar sua atenção ao problema de como os corpos se moveriam se todas as causas de resistência vissem efetivamente ou completamente removidas. Com os desenvolvimentos sucessivos suas asserções se demonstraram infelizes; todavia, as razões de tais incertezas são compreensíveis e, a seu modo, meritórias. Se bem que ele fosse um filósofo e, portanto, aos olhos de certas pessoas, desti-

nado a ter a cabeça entre as nuvens e os pés elevados da terra - Aristóteles foi sempre arredio a ser atraído pelo desânimo de casos impossíveis ou extremos. Deixando de lado por um momento a queda livre, como um caso especial, todos os movimentos que observamos ao nosso redor ocorrem, segundo Aristóteles, à causa de um equilíbrio, mais ou menos completo, entre dois conjuntos de forças: aquelas que tendem a conservar o movimento e aquelas que tendem a opor a ele resistência. Na verdade, um corpo sempre emprega um tempo finito para cobrir uma distância finita. Assim, a questão da velocidade instantânea teria representado para Aristóteles um problema bastante abstrato; e ele tinha a mesma opinião em relação à idéia de um movimento completamente privado de resistência, que ele liquidou como não real. Na verdade (suponho) ele estava no caminho certo. Mesmo no vazio interestelar, onde os obstáculos ao movimento de um corpo são, em prática, de todo desprezíveis, sempre haverá um atrito mínimo, mesmo se descontínuo.

“Em segundo lugar: se atentarmos para os tipos de movimento que Aristóteles considera típicos, encontraremos que as rudimentares razões de proporcionalidade fixadas por ele têm uma posição de todo respeitosa inclusive na física do século XX. Interpretada não como lei de natureza rival àquela de Newton, mas como generalizações da experiência cotidiana, muitas das coisas que ele afirmavam são verdadeiras. Se pode até afirmar que ele tenha falado mais corretamente do que ele mesmo soubesse. Porque lá onde ele raciocinava em termos de proporções rudimentares e qualitativas, associando quantidades aproximativas de espaço e de tempo, a física contemporânea individualizou uma exata equação matemática correspondente e bastante próxima da sua [de Aristóteles], uma vez que, naturalmente, tal equação matemática aplique variáveis de acelerações que Aristóteles jamais utilizou.

“Esta equação é conhecida como “lei de Stokes”. Essa coloca em relação a velocidade ao qual o corpo se move em um meio, por exemplo, um líquido, com a força que age sobre esse e a densidade (viscosidade) do meio. Segundo Stokes, a velocidade do corpo, em tais condições, será diretamente proporcional à força que o move e inversamente proporcional à viscosidade do líquido. Suponhamos que tomamos uma

bola de bilhar e a deixemos cair, de vez em vez, em líquidos de viscosidades diferentes, como água, mel e mercúrio; em cada caso [a bola] acelerará por um momento para, depois, descer com uma velocidade limite constante, determinada pela viscosidade do líquido em questão. Se a força impressa for duplicada, a velocidade de queda será dupla; se um líquido é duas vezes mais viscoso que um outro, a bola de bilhar se moverá com apenas a metade da velocidade.

“O terceiro ponto liga os dois precedentes. O fato é que Aristóteles baseava suas análises sobre um conceito particular ou paradigma explicativo, que ele formulou tomando em consideração exemplos correntes da natureza; ele usava estes exemplos como objetos de confronto para procurar entender e explicar qualquer tipo de movimento. Se se quer compreender o movimento de um corpo (segundo o seu ponto de vista) dever-se-ia pensar nesse em termos do movimento de um cavalo e de uma carroça: dever-se-ia, isto é, procurar dois fatores - o fator externo (o cavalo) que tem o corpo (a carroça) em movimento, e a resistência (a aspereza da estrada, o atrito da carroça) que tendem a parar o movimento. Explicar o fenômeno significa reconhecer que o corpo está se movendo à velocidade adequada a um objeto de seu peso, quando está sujeito àquele particular equilíbrio de força e de resistência. É natural, portanto, atentar, em condições de equilíbrio entre ação e resistência, para o movimento constante do corpo. Resultará, então, explicado qualquer fato que exemplifique este equilíbrio.” (Toulmin, 1982, p. 45-46).

Podemos escrever, para dar um exemplo mais claro, a equação do movimento em um meio fluido, utilizando as leis de Newton (não um meio ideal, mas um meio dissipativo):

$$m \cdot a = (m \cdot g) - (k \cdot v)$$

[onde m é a massa, a é aceleração, g é a aceleração da gravidade, k é a viscosidade e v é a velocidade]

$$m \cdot (dv/dt) = (m \cdot g) - (k \cdot v) \quad (1)$$

quando $v = 0 \Rightarrow a = g$, e quando v_t é a velocidade terminal, $(m \cdot g) - (k \cdot v) = 0$, e

$$v_t = (m \cdot g) / k \quad (2)$$

Usando (2) em (1), podemos obter,

$$v = v_t \cdot [1 - e^{-(k/m)t}] \quad (3)$$

A aceleração poderá ser escrita como,

$$a = g \cdot e^{-(k/m)t} \quad (4)$$

e a distância d percorrida,

$$d = v_t \cdot [t - (m/k) \cdot e^{-(k/m)t}]. \quad (5)$$

Para grandes partículas que se movem muito rapidamente (gotas de chuva que caem da atmosfera), a lei de Stokes deixa de ser uma boa aproximação; as forças resistivas tornam-se proporcionais mais ao quadrado da velocidade (e não à velocidade, como nas equações anteriores) e são muito mais influenciadas pela viscosidade que pela densidade do fluido. Uma vez que as forças resistivas crescem com a velocidade, um corpo caindo experimentará um decréscimo da aceleração. Para uma força do tipo $F = c \cdot v^2$, a velocidade terminal será expressa por: $v_t = (m \cdot g/c)^{1/2}$. Sobre esta questão, Arons escreve:

“se não existisse este processo de atrito, um temporal seria uma experiência muito dolorosa; as gotas de chuva caindo livremente atingiriam velocidades que se aproximariam àquelas do som, e se pareceriam mais com balas [de revólver] que propriamente gotas de água.” (Arons, 1995).

Um capítulo esquecido e desprezado da física é aquele que não liga os desenvolvimentos das ciências técnicas à resolução dos problemas relativos ao atrito e, em consequência, ao desenvolvimento da própria física como ciência experimental. Por exemplo, sabe-se que Leonardo da Vinci, nos *Códigos Atlântico* já havia introduzido o conceito de coeficiente de atrito como a razão entre a força e o peso ($\mu = F/P$) mensurável seja na superfície horizontal seja em planos inclinados (Danhoni Neves, Savi *et al.*, 1999; Danhoni Neves *et al.*, 2000). Ele estudou todo um conjunto de possíveis materiais para reduzir a resistência ao movimento das máquinas. Estes estudos conduziram à pesquisa de diversos tipos de lubrificantes durante toda a Idade Média, chegando, inclusive, ao uso do óleo de oliva (coeficiente entre 0,07 e 0,08 - ver Muendel, 1995) pelos artesãos em seus moinhos de grãos. Outra importante consequência dos estudos relativos ao atrito está ligada à construção dos aparatos experimentais para medir o tempo de queda de um corpo e, por fim, a aceleração da gravidade. A máquina de Atwood (de George Atwood, 1746-1807), desenvolvida sob a concepção newtoniana das forças, não fornecia os resultados que deviam estar de acordo com as previsões estabelecidas por Galileu e Newton Segundo Gliozzi:

“o cálculo [derivado dos resultados] das máquinas tinha caído em tal descrédito, como nota Guglielmo Amontons (1663-1705), que o nome da máquina [de Atwood]

é visto com desconfiança e de forma jocosa. Amontons indicava a causa do descrédito: a escassa atenção prestada pelos construtores ao atrito e rigidez das amarras, isto é, à resistência oposta das amarras ao ser enroladas em um cilindro.” (Gliozzi, 1970).

Este tipo de problema foi enfrentado, inclusive, usando como meio um concurso para resolver a não correspondência entre as previsões teóricas e os efeitos práticos. O concurso, promovido em Paris em 1779, repetido em 1781, com o prêmio duplicado, foi vencido por Coulomb, que demonstrou experimentalmente que a “razão da pressão ao atrito é sempre uma quantidade constante e a extensão da superfície influencia de forma não sensível” (Gliozzi, 1970). Estes tipos de estudos resultaram em uma ampla gama de outros estudos, especialmente aquele de Arthur Morin (ver Cannata, Danhoni Neves e Albanese, 1996; Danhoni Neves, Savi *et al.*, 1999), da Academia de Metz (Paris), que desenvolveu um outro aparato de medida da aceleração da gravidade baseado num conceito muito mais cinemático e galileano que sobre a dinâmica de Newton.

Da história do conceito de força e da busca em direção à natureza íntima das causas responsáveis pelo movimento, podemos entrever um conjunto diverso de construções de confusas concepções e conceitos físicos que, freqüentemente, atribuíam o movimento devido à intervenção externa (o ar, como na física da antipersistasis) ou a uma propriedade interna (como o impetus de Hiparco, Philoponus, Avicenna e Buridan), ou, ainda, a um misto de uma propriedade inercial (mais a mudança da velocidade no momento da aplicação da ação sobre o objeto) e uma noção de impetus medieval, como se pode ver ainda na física dos *Principia*. Infelizmente, nos livros didáticos e de divulgação, a física aristotélica e medieval é pré-concebida como algo de profundamente errado, de *nonsense*, de absurdo. É tratada, inclusive, de forma jocosa! A física de Newton é ainda o paradigma vigente. O fato de que a física newtoniana não é aquela de Newton, mas de seus seguidores (Bernoulli, Euler, etc.), onde o quadro geral dos objetos físicos é, de tudo, uma outra coisa, não é sequer considerada na bibliografia vigente. A pesquisa em ensino de física tem mostrado as grandes similaridades entre as concepções dos estudantes e aquelas cunhadas ao longo da história do conhecimento científico. Porém, o panorama do ensino de ciências e de física permanece inalterado, cumprindo seu papel de ensino dogmatizador e “desmemoriado”, no sentido de uma absoluta falta de historicidade.

Assim, no universo tradicional do ensino de física, onde se desconsidera as concepções dos estudantes [Danhoni Neves e Savi, 2000] nascidas na cotidianidade de um mundo muito distante das idealidades, o *meio ideal* [vácuo; superfícies sem atrito] é a escolha absoluta, ou seja, não existe uma mecânica dissipativa na dinâmica

do movimento. Parece que a quintessência aristotélica foi roubada dos aristotélicos e deslocada, pelos newtonianos, para o mundo terrestre, igualando céu e Terra, numa nova e estranha idealidade, esquecendo inexoravelmente o mundo da “violência”, da “corrupção” e da dissipação ...

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer aos ricos debates sobre o presente tema e sobre diversos outros temas de interesse didático e histórico tidos com os professores Arlindo Antonio Savi (UEM), André Koch Torres Assis (Unicamp), Matilde Vicentini (Università “La Sapienza” di Roma, Itália) e Alessandro Albanese (Enciclopedia Italiana Treccani, Roma) e aos alunos do grupo tutorial PET (Programa Especial de Treinamento da Física-UEM). Agradecimentos também à CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro nos últimos anos.

References

- [1] ALBANESE, A., DANHONI NEVES, M.C. e VICENTINI, M., *Le Ricerche sulle Idee degli Studenti sui Fenomeni di Movimento*, Q.8, LDS-Università “La Sapienza”, Roma, 1997.
- [2] ARISTÓTELES, *Física*, publicado em italiano in: “Opere”, Laterza, Roma, 1993.
- [3] ARONS, A., *A Guide to Introductory Physics Teaching*, Wiley, New York, 1995.
- [4] CANNATA, I., DANHONI NEVES, M.C. e ALBANESE, A., *L'Apparato di Morin e L'Insegnamento della Meccanica*, Didattica della Scienza, 1996.
- [5] CLAGGETT, M., *La Scienza della Meccanica nel Medioevo* [título original da obra: *The Science of Mechanics in the Middle Ages*], Feltrinelli, Milano, 1981.
- [6] COHEN, I.B., *O Nascimento de uma Nova Física* [título original da obra: *The Birth of a New Physics*], Gradiva, Lisboa, 1988.
- [7] DANHONI NEVES, M.C., SAVI, A.A. et al. *O Aparelho de Morin Revisitado*, Science & Technology Magazine (S&TM), vol. II, n. 3, 1999.
- [8] DANHONI NEVES, M.C., SAVI, A.A. et al. *Uma História para a Noção do Conceito de Força*, vídeo de curta metragem, Laboratório de Criação Visual (LCV), Universidade Estadual de Maringá, 1999.
- [9] DANHONI NEVES, M.C. et al. *Leonardo, il Genio in Officina*, Science & Technology Magazine (S&TM), vol. II, n.5, 2000 (www.cptec.br/stm).
- [10] DANHONI NEVES, M.C. e SAVI, A.A. *A Sobrevivência do Alternativo: Uma Pequena Digressão sobre o Por quê não Ocorrem Mudanças Conceituais no Ensino de Física*, Atas (eletrônica - CD-ROM) do VII EPEF (Encontro de Pesquisadores em Ensino de Física), SBF, Florianópolis, 2000.
- [11] ÉVORA, F.R.R., *A Revolução Copernicana-Galileana*, 2 volumes, Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, Unicamp, Campinas, 1988.
- [12] FRANKLIN, A., *Principle of Inertia in the Middle Ages*, American Journal of Physics, v. 44, n. 6, 1976, 529-545.
- [13] GALILEI, G., *Discorsi Intorno a Due Nuove Scienze* [editado no Brasil com o título: *Dois Novas Ciências* pela Editora Nova Stella], in: “Opere”, Ricciardi, Milano, 1953.
- [14] GLIOZZI, M., *Problemi di Meccanica Sperimentale nel XVIII Secolo*, La Fisica nella Scuola, n.1, 1970, 5-13.
- [15] GRANT, E., *Motion in the void and the Principle of Inertia in the Middle Ages*, Isis, v.55, 3, n. 181, 1964 265-292.
- [16] GRANT, E., *Physical Science in the Middle Ages*, John Wiley&Sons, New York, 1971.
- [17] JAMMER, M., *Storia del Concetto di Forza* [título original da obra: *Concepts of Force*], Feltrinelli, Milano, 1979.
- [18] MARTINS, R., *Galileo e a Rotação da Terra*, Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 11, n.3, 1994, 196-211.
- [19] MUENDEL, J., *Friction and Lubrication in Medieval Europe: The Emergence of Olive Oil as a Superior Agent*, Isis, 86, 1995: 373-393.
- [20] NEWTON, I. (traduzido para o inglês por Cajori), *Principia* [editado no Brasil o livro I], republicado pela Dover, Berkeley, 1960.
- [21] ROSSI, P., *La nascita della Scienza Moderna in Europa*, Editori Laterza, Roma-Bari, 1997.
- [22] TOULMIN, S., *Previsione e Conoscenze: Un'Indagine sugli Scopi della Scienza* [título original da obra: *Foresight and Understanding. An Enquiry into the Aims of Science*], Armando, Roma, 1982.
- [23] TRUESDELL, C., *Essays in the History of Mechanics*, Sprenger-Verlag, Berlin, 1968.
- [24] WESTFALL, R.S. *The Construction of Modern Science*, 5th edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1981.
- [25] WESTFALL, R.S., *Newton e la Dinamica del XVII Secolo* [título original da obra: *Force in Newton's Physics. The Science of Dynamics in the Seventeenth Century*], Il Mulino, Bologna, 1982.
- [26] WESTFALL, R.S., *La Rivoluzione Scientifica del XVII Secolo*, Il Mulino, Bologna, 1984.