
FÍSICA ARISTOTÉLICA: POR QUE NÃO CONSIDERÁ-LA NO ENSINO DA MECÂNICA?⁺

Luiz O. Q. Peduzzi

Departamento de Física

Programa de Pós-Graduação em Educação/ Ensino de Ciências Naturais

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis - SC

Resumo

Neste trabalho discute-se as idéias de Aristóteles sobre o movimento dos corpos como parte integrante e indissociável de sua filosofia natural. Este tema tem um grande potencial didático para lidar com algumas concepções alternativas dos estudantes, como a de que não pode haver movimento sem força e de que força e velocidade são proporcionais. Além disso, a física aristotélica apresenta-se como um referencial indispensável para a compreensão da física medieval e da revolução na mecânica ocorrida no século XVII. Assim, não pode continuar ausente ou ser apresentada de forma descaracterizada nos livros de texto e em sala de aula. O uso da história no ensino da Física tem sido defendido por um número crescente de investigadores. Como com propriedade destaca T. Kuhn, teorias antigas e obsoletas não são acientíficas simplesmente porque foram descartadas.

I. Introdução

Em estudo anterior⁽¹⁾ criticou-se a pouca ênfase atribuída por livros de texto do ensino médio brasileiro à aspectos históricos da relação entre força e movimento. A física aristotélica, por exemplo, é apresentada em geral de forma insipiente e amplamente descontextualizada nos materiais instrucionais. Com isso, mostra-se pouco atrativa e mesmo desprovida de sentido para o leitor que, não compreendendo os seus fundamentos básicos, vê com desconfiança e incredulidade algumas idéias aparentemente superfi-

⁺ Este trabalho, em versão simplificada, foi apresentado em forma de painel na Conferência Internacional “Science and Mathematics Education for the 21 st. Century: Towards innovatory approaches”, Concepción, Chile, 26 de setembro a 1º de outubro, 1994.

ciais e ingênuas, aos olhos de hoje, aparecerem como elementos essenciais de uma teoria científica.

Como ressalta Koyré, *“A física de Aristóteles não é um amontoado de incoerências mas, pelo contrário, é uma teoria científica, altamente elaborada e perfeitamente coerente, que não só possui uma base filosófica muito profunda como está de acordo muito mais do que a de Galileu com o senso comum e a experiência quotidiana”*⁽²⁾.

A descaracterização do paradigma aristotélico nos textos didáticos acaba inibindo qualquer relacionamento entre este referencial e o senso comum do aluno, deixando à margem do processo educativo um importante resultado da pesquisa educacional: o fato de que para estudantes de qualquer nível de escolaridade não pode haver movimento sem força e que força e velocidade são proporcionais.

Contudo, há muito mais a se explorar em Aristóteles do que apenas a sua tão divulgada idéia de que deve haver compulsoriamente um agente motor atuando sobre um corpo para a manutenção de seu movimento. O meio, também, e não apenas a força motora, desempenha um papel de destaque na dinâmica aristotélica. O vácuo, para Aristóteles, não existe; assim como não existe movimento sem resistência, devido às suas conseqüências inerciais. Para rejeitar o movimento no vazio Aristóteles, curiosamente, acaba utilizando como argumento o que a partir do século XVII seria conhecido como o princípio da inércia. Segundo suas próprias palavras, *“[Deste modo] ninguém poderá dizer por que uma coisa uma vez colocada em movimento deveria parar aqui ou ali? Assim, uma coisa estará ou em repouso ou movendo-se ‘ad infinitum’ a menos que algo mais forte se lhe oponha como obstáculo”*⁽³⁾. Aristóteles, de fato, não pode aceitar este princípio porque um movimento infinito implicaria em um universo sem limites, o que era inconcebível para ele.

Nas próximas seções discute-se as idéias de Aristóteles sobre o movimento dos corpos como parte integrante e indissociável de sua filosofia natural*. Além do seu valor didático junto a certas idéias intuitivas do estudante sobre o relacionamento entre força e movimento, a física aristotélica apresenta-se como um referencial indispensável para a compreensão da física medieval e da revolução na mecânica ocorrida no século XVII.

* Idéias estas que se apresentam, essencialmente, como de consenso para autores de grande prestígio dentro da história da ciência, enquanto campo de investigação. Com este pressuposto de trabalho, considerou-se desnecessária a consulta às obras ‘De caelo’ (Dos céus)⁽⁴⁾ e ‘Physica’⁽⁵⁾, de Aristóteles, ambas de difícil leitura e interpretação.

II. O universo aristotélico

Aristóteles (384-322 a.C.), de Estagira, é apontado por historiadores da ciência como uma das mentes mais brilhantes de todos os tempos. Contribuiu com trabalhos em várias áreas do conhecimento, como a Biologia, Astronomia, Física, Filosofia, Teologia, Política e outras. Foi, por séculos, considerado como o “Mestre daqueles que sabem”. *“Se alguém desejava saber, a maneira de o conseguir era ler os textos de Aristóteles com cuidado, estudar comentários sobre Aristóteles para compreender o seu significado em passagens difíceis, e explorar questões que tinham sido levantadas e debatidas a partir dos livros de Aristóteles.”*⁽⁶⁾

Aristóteles foi um atento observador da natureza. As suas constatações sobre o que via ocorrer na Terra e no firmamento levaram-no a fazer afirmações sobre a natureza das coisas e a formular um modelo do universo.

Na Terra, Aristóteles encontrava um mundo em constante mudanças: as alterações no clima promoviam variações drásticas em suas paisagens; o progresso e a decadência na vida dos povos eram períodos que se podiam observar com frequência; o nascimento, desenvolvimento e posterior morte dos seres humanos, dos vegetais e dos animais exemplificavam algumas destas mudanças. Estas e tantas outras coisas fizeram com que Aristóteles associasse a Terra a mundo imperfeito, corruptível, sujeito a contínuas e profundas modificações.

Toda e qualquer mudança, para Aristóteles, resulta de um propósito intrínseco ou pré-determinado que as coisas têm para se comportar da maneira como se comportam. Assim, um menino cresce porque é da sua natureza transformar-se num homem; uma semente desenvolve-se e transforma-se em uma planta porque assim é da sua natureza. Da mesma forma, uma pedra cai porque há nela um propósito intrínseco em dirigir-se, como se verá, para o centro do universo que é o seu lugar natural. O termo mudança, para Aristóteles, insere-se dentro de um contexto bastante amplo, significando tanto mudança por crescimento (com a passagem do tempo) como mudança por locomoção (mudança de lugar em relação ao tempo), como também alterações verificadas na natureza, em geral.

Quando, por outro lado, Aristóteles voltava-se para o céu via a perfeição. Exceto pelos movimentos dos astros, não havia qualquer espécie de mudança no firmamento. Tudo parecia harmonioso e igual para sempre: a mesma Lua, o mesmo Sol, os mesmos planetas, as mesmas estrelas.

O mundo dos céus e o mundo da Terra eram diferentes e portanto deveriam apresentar constituições físicas diferentes. Isto ainda era reforçado pelo fato de que a Terra parecia ocupar um lugar de destaque neste cenário, a julgar-se pela constatação de que todos os corpos celestes pareciam girar ao seu redor. A própria imobilidade da Terra podia ser constatada por um fato bastante corriqueiro: lançando-se um objeto para

cima este retornava, rigorosamente, ao mesmo lugar de onde partira. Se, por outro lado, a Terra estivesse em movimento (de rotação, ou de translação, ou de ambos, simultaneamente) isto, de acordo com o pensamento da época, não deveria acontecer porque enquanto o objeto estivesse no ar a Terra se deslocaria e, desta forma, o objeto cairia num ponto afastado em relação àquele do lançamento.

Estes fatos fizeram com que Aristóteles, ao organizar o seu sistema filosófico natural, retomasse a concepção de Empédocles segundo a qual a terra, a água, o ar e o fogo se combinariam entre si para formar todas as coisas. Ele, no entanto, colocou a restrição de que esses elementos comporiam apenas as coisas da Terra. Os corpos celestes, diferentemente, eram compostos, exclusivamente, de uma quinta substância, o éter, um elemento puro, inalterável, transparente e sem peso, que contrastava com os encontrados na Terra, que estão sujeitos a mudanças e que portanto são corruptíveis. Com isso explicava Aristóteles a decadência, o nascimento e a morte das coisas etc. na Terra e a permanência dos objetos celestes.

O universo de Aristóteles é finito e esférico. Tem a Terra, imóvel, como centro, e a região onde se encontram as estrelas como seu limite. Para além da esfera das estrelas não existe nada. *“Na ciência de Aristóteles, matéria e espaço andam juntos ... e devem terminar juntos; não é preciso construir uma parede para limitar o universo e a seguir ficar se interrogando sobre o que limita esta parede”*⁽⁷⁾. Conforme ele menciona em uma das passagens de seu livro ‘Dos céus’, *“Não há qualquer massa ou corpo para além do céu. O mundo, no seu todo, é constituído pela soma total da matéria disponível ...”*⁽⁸⁾

Com Aristóteles chegam a 55 o número de esferas necessárias para descrever o mundo físico. Valendo-se dos períodos aparentes de revolução da Lua, do Sol e dos planetas em torno da Terra classificou-os de acordo com a seguinte ordem crescente de afastamento a partir desta: Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter e Saturno. Devido à maior proximidade com a Terra, a Lua era o único corpo celeste no qual se podia detectar alguma imperfeição, conforme se podia constatar pela sua aparência manchada. Isto, contudo, não representava nada de mais grave porque, afinal, ela se constituía *“numa espécie de marco divisório entre a região terrestre da mudança (corruptibilidade) e a região celeste da permanência e da incorruptibilidade.”*⁽⁹⁾ Para Aristóteles só podiam ocorrer mudanças no céu em regiões circunvizinhas à Terra. Assim, não considerava os cometas como astros, mas como evaporações que tinham origem na Terra e que ascendendo a alta atmosfera se inflamavam.

De acordo com Aristóteles, não há, em nenhum ponto do universo, o vácuo, isto é, ausência de matéria. As esferas associadas aos movimentos dos astros são esferas materiais, constituídas de éter. Sete destas esferas contêm o Sol, a Lua e os cinco planetas, que são condensações locais do éter que ‘preenche’ toda a região celeste. As demais fornecem as ligações mecânicas necessárias para a reprodução dos movimentos obser-

vados. “A esfera das estrelas é movida uniformemente por um motor divino. Por atrito, o movimento dessa esfera se transmite às outras, o que mantém a Lua, o Sol e os planetas em movimento ... O atrito gerado pelo movimento relativo das esferas aquece os corpos celestes, o que explica tanto o seu brilho como o calor que irradiam.”⁽¹⁰⁾

É importante observar que com suas esferas materiais Aristóteles pretendia estabelecer um modelo que tivesse realidade física, ao contrário de Eudoxo e Calipo que se limitaram a construir dispositivos puramente geométricos para o céu. As esferas aristotélicas, no entanto, mesmo possibilitando um sem número de combinações de movimentos circulares envolvendo cada planeta, restringiam o movimento destes astros a distâncias fixas em relação a Terra, não sendo possível, por esse motivo, conciliar o modelo com as flutuações nos brilhos dos planetas.

III. Aristóteles e os movimentos naturais

No campo da mecânica, as considerações de Aristóteles sobre o movimento dos corpos foram objeto de extensos estudos e debates, notadamente no período que vai do final do século XII até Galileu. A sua concepção de movimento, e em particular o de um movimento natural, é parte fundamental da sua cosmologia. Ela relaciona-se com a forma pela qual imaginava estar constituída a matéria e com a idéia de que os elementos terra, água, ar e fogo possuíam lugares definidos no universo físico.

O lugar natural da terra e da água (por serem ‘pesados’) é embaixo. Assim, eles tendem a se mover para baixo. Por ser mais leve (menos densa) do que a terra, o lugar natural da água é sobre a terra.

O lugar natural do fogo e do ar (por serem ‘leves’) é em cima. Por isso eles tendem a se mover para cima. Por ser mais leve do que o ar, o fogo procura o seu lugar natural que é acima do ar.

Idealmente, isto é, livre de perturbações, estes quatro elementos seriam encontrados em sua forma pura dispostos em camadas concêntricas tendo como centro o centro da Terra (Fig.1). Isto, contudo, não acontece, porque a região terrestre é perturbada pelo movimento da esfera da Lua, “que empurra constantemente camadas de fogo para baixo estabelecendo correntes que impelem e misturam os elementos em todo o mundo sublunar”⁽¹¹⁾. Desta forma, a água dos rios, por exemplo, é constituída principalmente do elemento água, mas também apresenta pequenas quantidades de terra ar e fogo: a água contém terra porque aparecem resíduos da mesma no fundo de um recipiente com água; contém ar porque os seres vivos marinhos respiram; contém fogo porque quando aquecida ela tende a subir (dilata-se).

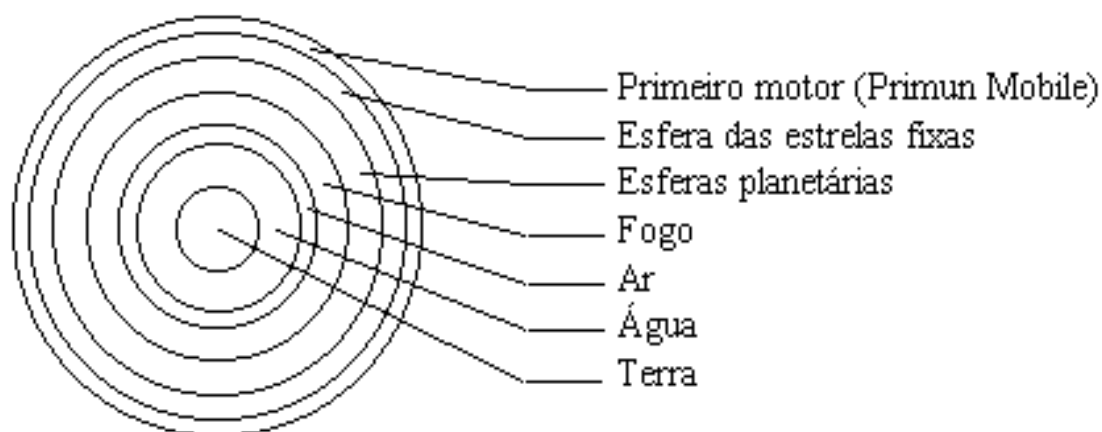


Fig.1 - Um esboço geral do universo aristotélico. As camadas concêntricas dos elementos terra, água, ar e fogo, nesta ordem, constituem a região sub-lunar. Seguem-se as esferas planetárias e a esfera das estrelas fixas, situadas na região celeste. A esfera das estrelas é movida pelo Primum Mobile (Primeiro Motor), de origem divina.

Ao ferver, a percentagem do elemento fogo existente na água aumenta muito e a mistura ‘sobe’, como vapor. Analogamente, a terra de que fala Aristóteles não é aquela que se pode pegar com as mãos, mas sim “*uma substância mais refinada e sublime, liberta das misturas e impurezas que caracterizam a terra vulgar*”⁽¹²⁾.

Segundo Aristóteles, as diferentes substâncias e objetos do mundo terrestre originam-se de diferentes combinações dos elementos terra, água, ar e fogo. Um corpo será mais leve ou mais pesado de acordo com o percentual em que nele figuram cada um destes quatro elementos.

Dentro desta concepção de lugar natural e da constituição da matéria pode-se, então, entender porque uma pedra cai quando solta de uma certa altura. Por ser uma pedra constituída basicamente do elemento terra, ela cai porque deve retornar ao centro do universo, seu lugar natural. O movimento da pedra em direção ao solo é um movimento natural e por isso não precisa ser objeto de uma discussão mais aprofundada. A propósito, para Aristóteles, se duas pedras, uma pesada e outra leve, são soltas de uma mesma altura, a pedra mais pesada atinge o solo primeiro. Isto acontece porque a pedra mais pesada possui mais ‘terra’ do que a pedra mais leve. Com isso, a pedra mais pesada tem uma tendência maior para alcançar mais depressa a sua posição natural.

De modo análogo, a fumaça, por ser leve, sobe para ocupar o seu lugar natural, que é ‘em cima’. O movimento de subida da fumaça é também um movimento natural.

Movimentos naturais (como o da pedra e da fumaça), isto é, movimentos ‘para baixo’ de corpos pesados ou movimentos ‘para cima’ de substâncias leves, resultam de um propósito intrínseco que as coisas têm para buscar o seu lugar natural.

O Sol, a Lua, os planetas e as estrelas também apresentam movimentos naturais que, no entanto, são distintos dos movimentos naturais retilíneos terrestres, que têm um início e um fim, como qualquer fenômeno na Terra. Os corpos celestes estão em constante movimento natural em seu lugar próprio. O movimento circular perpétuo que executam é compatível com a sua natureza e com a idéia de um universo finito.

Assim, a diferença entre os movimentos naturais terrestres e celestes explicita dois tipos de realidades físicas diferentes. Uma é a que existe na Terra, imperfeita, onde tudo muda e decai e nada é o mesmo para sempre. A outra é a que envolve o mundo dos céus, onde tudo é perfeito e incorruptível.

O universo imaginado por Aristóteles tem uma estrutura logicamente ordenada. Nele *“as coisas estão (ou devem estar) distribuídas e dispostas de uma maneira bem determinada; estar aqui ou ali não lhes é indiferente, mas, ao invés, cada coisa possui, no universo, um lugar próprio conforme a sua natureza. (É só no ‘seu lugar’ que se completa e se realiza um ser, e é por isso que ele tende para lá chegar). Um lugar para cada coisa e cada coisa no seu lugar; a noção de ‘lugar natural’ traduz esta exigência teórica da física aristotélica”*⁽¹³⁾.

A busca de um corpo a seu lugar natural implica, portanto, num processo de mudança que tem por finalidade a preservação da ordem em um universo hierarquicamente estruturado. De acordo com esta concepção, o repouso de um corpo no seu lugar próprio não necessita de maiores explicações. *“É a sua própria natureza que o explica, que explica, por exemplo, o repouso da Terra no centro do mundo.”*⁽¹⁴⁾ O movimento, e não o repouso, é o objeto das atenções de Aristóteles.

Na cosmologia aristotélica, as noções de movimento natural e de lugar natural trazem consigo a exigência de um universo finito em extensão. Isto ocorre porque um universo infinito não tem centro. E se não há um ponto central com concentração do elemento terra não pode haver qualquer movimento natural para cima ou para baixo, porque o conceito de lugar natural num universo infinito não tem sentido, já que todos os pontos num universo sem limites são igualmente equivalentes.

IV. A lei de força de Aristóteles

Além dos movimentos naturais, existe uma infinidade de outros movimentos, como o de uma caixa que é empurrada ou o de um projétil que é lançado, que são denominados de movimentos violentos ou forçados (por não serem naturais).

Acerca do movimento, em geral, Aristóteles conclui que ele só é possível quando, necessariamente, está associado àquele que se move uma força⁺. Esta é uma afirmação inteiramente plausível dentro do contexto das observações de Aristóteles. Afinal, quando se deixa de empurrar um objeto, ele pára; quando um cavalo pára de puxar uma carroça, cessa o movimento. A ênfase é sobre forças de contato, isto é, sobre a ação de puxar ou empurrar alguma coisa. Para haver um movimento, portanto, o que se move e o que se movimenta devem estar em permanente contato.

O meio também desempenha um importante papel sobre as idéias de Aristóteles em relação ao movimento dos corpos. As suas discussões orientam-se para o estudo de situações concretas encontradas na natureza e não para uma situação abstrata, não observável, como a que envolveria movimento em um vácuo hipotético. Assim, detinha-se na questão da influência de meios como o ar e a água no movimento dos corpos. Aristóteles não concebia a existência de um movimento no vazio (vácuo) porque, segundo ele, sem haver uma resistência ao movimento de um objeto este teria velocidade infinita. Esta impossibilidade é exemplificada considerando o caso do movimento natural de retorno de um objeto (como o de uma pedra, por exemplo) ao seu lugar natural. Ao voltar ao seu lugar natural (depois de lá ter sido retirado por violência) o corpo movimenta-se em linha reta e tanto mais rápido quanto o meio lhe permite. *“Se, pelo contrário, nada o detivesse, se o meio no qual ele se move não opusesse qualquer resistência ao seu movimento (tal como se passaria no vazio), então ele dirigir-se-ia para lá com velocidade infinita. Ora, um movimento instantâneo parece a Aristóteles (não sem razão) perfeitamente impossível. Assim, portanto, o movimento não se pode efetuar no vazio.”*⁽¹⁵⁾

Para fins didáticos, pode-se expressar a ‘lei de movimento’ de Aristóteles através da relação:

$$v \propto \frac{F}{R}, \quad (1)$$

Na qual F representa a intensidade da força aplicada ao corpo e R a ‘resistência’ do meio. Ou seja, a velocidade, v , de um corpo é diretamente proporcional à força motriz a ele aplicada e inversamente proporcional à resistência do meio no qual ele se movimenta.

⁺ O leitor deve ter claro, aqui, para não ser induzido em erro, que Aristóteles não tinha uma conceituação de força no sentido mais moderno deste termo. Ele, na verdade, falava em motor ou em causa do movimento. A substituição destas expressões por força, visa, apenas, facilitar a denominação, tornando-a atualizada.

É importante frisar que Aristóteles não deu forma matemática às suas conclusões porque para ele a descrição matemática dos fenômenos terrestres era de pouco valor. Ele, na verdade, estudou, separadamente, os efeitos sobre a velocidade de um objeto decorrentes do meio por onde o objeto se movimenta e de variações nas forças a ele aplicadas. A relação (1), contudo, expressa em parte o pensamento de Aristóteles sobre este assunto. Dela pode-se concluir que:

a) Sendo a resistência constante, sob a influência de uma força constante um objeto se movimenta com velocidade constante;

b) a magnitude da velocidade é proporcional à intensidade da força aplicada;

c) para uma resistência constante, um objeto apresenta variação de velocidade quando sobre ele age uma força variável;

d) uma força aplicada a um objeto produz movimento;

Para, no entanto, traduzir corretamente o pensamento de Aristóteles com relação a esta situação deve-se ter um certo cuidado, já que, evidentemente, ele sabia que nem sempre a aplicação de uma força a um corpo resultava, necessariamente, no seu movimento. O caso de uma pessoa que empurra uma carroça sem que esta saia do lugar é um exemplo. Assim, pensando na força aplicada e na resistência como efeitos opostos, ele colocou a condição adicional de que para haver movimento era necessário que a ação da força fosse maior do que a resistência oferecida. Desta forma, para ser fiel a Aristóteles, deve-se restringir a relação (1) à situação em que $F > R$ porque, segundo Aristóteles, para $F < R$ não há movimento. Obviamente, sem força ($F = 0$) não há movimento.

e) é necessária a presença de um meio para que haja movimento. Não existe o vácuo.

De acordo com a relação (1), uma resistência nula implica em uma velocidade infinitamente grande, que necessariamente se associa a idéia de um universo infinito em extensão, noção frontalmente contrária a visão de mundo aristotélica que sustenta um universo limitado pela esfera das estrelas fixas.

V. A questão da ‘força’ e da resistência no movimento natural de uma pedra

Se qualquer movimento está vinculado à existência de uma força responsável por ele, o que diz Aristóteles, neste sentido, sobre o movimento natural de um corpo, tal como uma pedra, solto de uma certa altura? Quando a pedra é solta ela entra em movimento, dito natural, por não se encontrar no seu lugar natural. Com esse movimento ela dirige-se para o centro do universo, que coincide com o centro da Terra. A porção de terra que já existe na região central a impede de lá chegar fazendo com que a

pedra atinja o solo e aí permaneça em repouso. Contudo, se durante a queda da pedra a Terra deixasse de existir este fato em nada alteraria o seu movimento, isto é, a pedra prosseguiria com a sua tendência inalterada de deslocar-se até o ponto central e de lá permanecer em repouso. Isto significa que *“os corpos pesados se dirigem para o centro não porque alguma coisa lá se encontre ou porque alguma força física os atraia para lá; eles se dirigem para o centro porque é sua natureza que para lá os impele”*⁽¹⁶⁾. Não há, portanto, nenhuma interação entre a pedra e a Terra, pois uma atração ao lugar natural da pedra implicaria em uma ação à distância, o que era inconcebível para Aristóteles. Por se tratar de um movimento natural este deslocamento da pedra também não pode se dar através de nenhuma força, como as que são produzidas por agentes responsáveis por movimentos violentos.

Aristóteles concluiu então que uma ‘força’ inerente ao próprio corpo é a responsável por sua queda, isto é, por este seu movimento natural. *“O objeto não se move por si mesmo mas tem, intrinsecamente, a fonte do movimento - não a capacidade de mover alguma coisa ou a de causar movimento, mas a de sofrê-lo.”*⁽¹⁷⁾

Como salienta Jammer⁽¹⁸⁾, mesmo tendo presente esta concepção de ‘força’ inerente à matéria (que hoje estaria mais próxima ao conceito de energia potencial), Aristóteles não se interessa em discutí-la mais a fundo. De fato, é a noção de força como um agente compulsório do movimento, ou seja, é a idéia de força diretamente vinculada aos atos de puxar ou empurrar um corpo que Aristóteles submete a investigação ‘quantitativa’ e que forma o núcleo central da sua mecânica. Desta forma, o ‘peso’ associado à pedra que cai é, para Aristóteles, manifestação de movimento natural e não causa compulsória de movimento.

E com relação à resistência oferecida pelo meio aos movimentos naturais? Nos movimentos naturais esta resistência está relacionada com a densidade do meio. No caso da pedra que cai no ar, *“nos instantes sucessivos da queda a pedra ocupa posições em que se encontrava o ar, e esse ar estava no seu lugar natural. Ora, ao ar ‘repugna’ ser desalojado do seu lugar próprio e a gravidade da pedra deve constantemente vencer esta repugnância”*⁽¹⁹⁾. Um meio mais denso do que o ar dificultaria mais o movimento da pedra.

A relação (1) aplicada, como tentativa, ao movimento natural da pedra resulta

$$v \propto \frac{P}{d}, \quad (2)$$

sendo a velocidade da pedra diretamente proporcional ao seu peso, P, e inversamente proporcional a densidade do meio, d.

Ao se igualar o peso a uma força e tentar ‘equacionar’ o pensamento de Aristóteles para um movimento natural, percebe-se as dificuldades que advêm da ma-

tematização de uma situação para a qual a matemática não fazia sentido. Ocorre que para Aristóteles a queda de um objeto não se dava com velocidade constante durante todo o tempo. Para Aristóteles, “*dando-se o movimento de queda dos corpos pesados (ou, correlativamente, o movimento de elevação dos corpos leves) em virtude de uma tendência natural do objeto para chegar ao seu ‘lugar próprio’, que haveria de mais ‘natural’ do que ver tal movimento acelerar-se à medida da sua aproximação do fim?*”⁽²⁰⁾.

Vê-se, assim, a inviabilidade da relação (2) para essa situação, pois estaria a representar uma velocidade variável com uma ‘causa’ constante (peso). O fato de um corpo ‘ansiar’ por chegar cada vez mais depressa ao seu lugar natural, com conseqüentes acréscimos de velocidade quando em suas imediações, manifesta uma qualidade finalística que se faz presente à matéria da física aristotélica na preservação da ordem das coisas.

VI. O movimento violento de um projétil

Contrastando com o movimento natural de queda de um objeto, que dispensa a ação física de uma **força**, está o movimento de um projétil, como o de uma pedra, que é lançado pelo projetor, e a questão da força responsável pelo seu deslocamento depois de cessado o contato projétil-projetor. A discussão deste tipo de movimento é particularmente importante porque a situação pós-arremesso parece evidenciar a persistência de um movimento sem uma causa aparente, isto é, a continuidade de um movimento sem uma força motora responsável pelo mesmo. As explicações de Aristóteles para o movimento violento dos projéteis foram objeto de muita polêmica, por vários séculos, devido ao duplo carácter que ele atribuiu ao meio: o de sustentar o movimento e o de também opor uma resistência a ele.

Segundo Aristóteles, a continuidade do movimento de um projétil depois da perda de contato com o projetor tem a seguinte explicação: quando se movimenta, o projétil passa a ocupar o lugar que antes era preenchido pelo ar que havia à sua frente. Este mesmo ar, por sua vez, flui em torno da pedra para ocupar o ‘espaço vazio’ deixado pela mesma. Com este movimento o ar impele o objeto para a frente. Este processo, denominado antiperistasis (Fig.2), é imperfeito e a força sobre o projétil gradualmente se extingue e ele pára.

A resistência do projétil ao movimento inclui tanto o meio, na medida em que a antiperistasis não é perfeita, como o próprio peso do corpo, cuja função é a de fazer com que ele retorne ao seu lugar natural.

No movimento de projéteis constata-se, mais uma vez, a impossibilidade de movimento no vazio. O vazio não é um meio e como tal não pode transmitir e conservar o movimento de um corpo.

Além da antiperistasis, Aristóteles aventou uma outra possibilidade do meio agir sobre um objeto para movimentá-lo. De alguma forma, o meio adquire uma ‘força’, um ‘poder’ para movimentar um corpo, seja a partir do projetor (que ao arremessar um projétil movimenta junto o ar que por sua vez empurra o projétil) ou ele próprio (como na situação em que um corpo com densidade menor do que a da água sobe, depois de submerso).

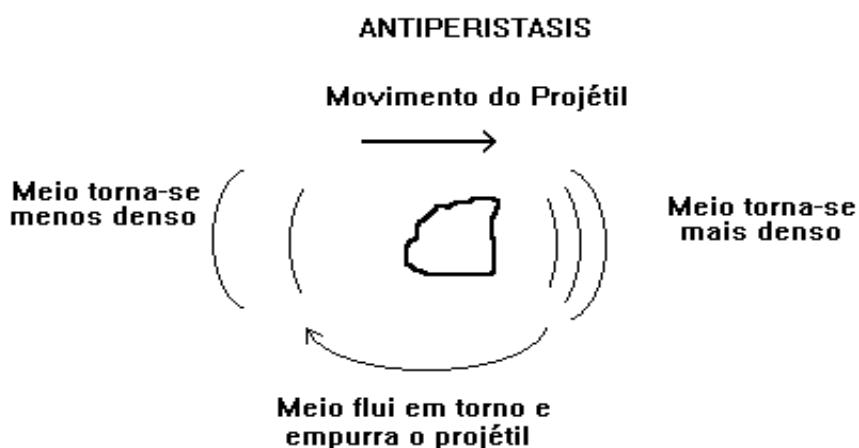


Fig.2 - Aristóteles concluiu que o meio fornece a força necessária para manter um projétil em movimento (extraído da referência 21).

VII. Implicações para o ensino e comentários finais

A dinâmica aristotélica, como se viu, é parte integrante e indissociável da cosmologia aristotélica. Por esta razão, o estudo das idéias de Aristóteles sobre o movimento dos corpos não pode prescindir de uma discussão preliminar sobre a sua concepção de mundo. Somente assim as idéias deste sábio grego, que tão profunda e duradouramente influenciaram o pensamento científico, exibirão coerência e serão dotadas de sentido para o estudante que as procura entender como um dos paradigmas da história da ciência.

Por outro lado, como mostra a literatura especializada na área de investigação das concepções alternativas em mecânica⁽²²⁻²⁶⁾, as observações e interações das pessoas, e do estudante em particular, com objetos em movimento induzem um conhecimento empírico que pode ser sintetizado matematicamente pelas relações:

$$F = \text{constante, se } v = \text{constante,}$$

$$F = k v. \tag{3}$$

Assim, em termos didáticos, e tendo em vista o construtivismo do aluno, parece não apenas inevitável como salutar o estabelecimento de algumas analogias entre a ‘lei de movimento’ de Aristóteles e certas concepções mantidas por estudantes de qualquer grau de escolaridade sobre força e movimento.

Estas semelhanças, contudo, não devem ser superestimadas.

A antiperistasis aristotélica é rejeitada pelo aluno. As explicações causais dos estudantes para o movimento de projéteis, na verdade, detêm analogias com o conceito ou idéia de força impressa de Hiparco/Filoponos⁽²⁷⁾ e com a teoria do impetus de Buridan e seus seguidores⁽²⁸⁾.

Ao contrário do leigo que, quando indagado, examina apenas com uma certa curiosidade e sem maiores preocupações de coerência interna as suas predições sobre o movimento dos corpos, Aristóteles vê no mundo sensível, perceptível, a matéria prima para a investigação científica. Com esta perspectiva, Aristóteles opõe-se ao platonismo, que concebe o indivíduo voltado para si mesmo a fim de descobrir a verdade que lhe é inata.

A grande ênfase que Aristóteles dá a observação qualitativa ‘o conduz a uma atitude fundamentalmente empirista em relação aos fenômenos da natureza’⁽²⁹⁾. Mas se Aristóteles “*nos mostra o pensamento sendo penosa e lentamente elaborado a partir da sensação bruta*”, também é verdade que “*em certa altura o sensível é inteiramente ultrapassado*”.⁽³⁰⁾

Ainda que não o seja matematicamente, a física aristotélica é uma teoria altamente elaborada, que transcende os fatos do senso comum que servem de base à sua elaboração. “*Não é nem um prolongamento grosseiro e verbal do senso comum nem uma fantasia infantil, mas sim uma teoria, isto é, uma doutrina que, partindo, bem entendido, dos dados do senso comum, os submete a uma elaboração sistemática extremamente coerente e severa*”.⁽³¹⁾

Conceitos como movimento natural, movimento forçado, lugar natural, etc. estruturam princípios (como, por exemplo, todo movimento forçado pressupõe um motor, etc.) não dedutíveis de outros mais gerais. Isto é, enunciados que ‘funcionam como premissas para a dedução de correlações a serem encontradas em níveis mais baixos de generalidade’⁽³²⁾ (tal como a velocidade de um corpo é diretamente proporcional à força motriz a ele aplicada e inversamente proporcional à resistência do meio no qual ele se movimenta)

Há, em Aristóteles, “*uma concepção geral da realidade física, concepção cujas peças mestras parecem ser a) a crença na existência de ‘naturezas’ bem determinadas e b) a crença na existência de um cosmo, isto é, em princípios de ordem em virtude dos quais o conjunto dos seres forma um todo (naturalmente) bem ordenado*”⁽³³⁾.

Entende-se, assim, as razões das explicações teleológicas⁺ em Aristóteles, que envolvem não apenas seres vivos (uma semente germina e se desenvolve a fim de se tornar uma planta, ou uma árvore) mas também elementos inanimados (o fogo dirige-se para cima com o propósito de alcançar o seu lugar natural - ‘uma camada esférica próxima e dentro da órbita lunar’).

A história da mecânica mostra a evolução do conceito de força. Sem a física e a cosmologia aristotélica esta história, e tudo o que ela representa, não tem sentido e nem mesmo pode ser contada.

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Dr. Arden Zylbersztajn e também aos árbitros deste trabalho pelas valiosas críticas e sugestões.

Referências Bibliográficas

1. PEDUZZI, L. O. Q. Força e movimento na ciência curricular. Revista Brasileira de Ensino de Física, 14 (2): 87-93, 1992.
2. KOYRÉ, A. Estudos de história do pensamento científico. Brasília, Universidade de Brasília, 1982. p.185.
3. FRANKLIN, A. Principle of inertia in the middle ages. American Journal of Physics, 44(6): 529-545, 1976.
4. HARDIE, R. P. & GAYE, R. K. Physica. In: The works of Aristotle. Ross, W. D. & Hon. L. L. D. (Ed.), V. II, Oxford, at the Clarendon Press, 1953.
5. STOCKS, J. L. De Carlo. In: The works of Aristotle. Ross, W.D. & Hon. LL.D. (Ed.), V. II, Oxford, At the Clarendon Press, 1953.
6. DRAKE, S. Galileu. Lisboa, Publicações Dom Quixote, 1981. p.25.
7. KUHN, T. S. A revolução copernicana. Rio de Janeiro, Edições 70. p.100.
8. Citado por KUHN, T. S. Referência 7, p.100.

⁺ Para Aristóteles “*toda a explicação científica de uma correlação ou processo deveria incluir um relato de sua causa final. Explicações teleológicas são explicações que utilizam a expressão ‘a fim de que’ ou equivalentes desta*”.⁽³²⁾

9. COHEN, I. B. O nascimento de uma nova física. São Paulo, Livraria Editora, 1967. p.17.
10. LUCIE, P. A gênese do método científico. Rio de Janeiro, Edições Campus, 1977. p.45.
11. KUHN, T. S. Referência 7, p.104.
12. BUTTERFIELD, H. As origens da ciência moderna. Rio de Janeiro, Edições 70, 1992. p.129.
13. KOYRÉ, A. Estudos galilaicos. Lisboa, Publicações Dom Quixote, 1986. p.22-23.
14. KOYRÉ, A. Referência 13, p.24.
15. KOYRÉ, A. Referência 13, p.28.
16. KOYRÉ, A. Referência 2, p.50.
17. LYTHCOTT, J. Aristotelian was given as the answer but what was the question? American Journal of Physics, 53 (5): 428-432, 1985.
18. JAMMER, M. Concepts of force: a study in the foundations of dynamics. Cambridge, Harvard University Press, 1957.
19. LUCIE, P. Referência 10, p.45.
20. KOYRÉ, A Referência 2, p.41.
21. FRANKLIN, A. Inertia in the middle ages. The Physics Teacher, 16 (4): 201-208, 1978.
22. PEDUZZI, S. S. Concepções alternativas sobre força e movimento: a ciência dos alunos. In: ZYLBERSZTAJN, A., PEDUZZI, L. O. Q., PEDUZZI, S. S. & SILVA, S. M. Concepções alternativas em dinâmica: o que podemos fazer a respeito em sala de aula. Florianópolis, Departamento de Física , Universidade Federal de Santa Catarina, Dez.1991. Publicação interna.
23. HEWSON, P. W. La enseñanza de “fuerza y movimiento” como cambio conceptual. Enseñanza de las Ciencias, 8(2): 157-171, 1990.
24. AXT, R. Conceitos intuitivos em questões objetivas aplicadas no concurso vestibular unificado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Ciência e Cultura, 38(3): 444-452, 1986.
25. SEBASTIÁ, J. M. Fuerza y movimiento: la interpretación de los estudiantes.

Enseñanza de las Ciências, 2 (3): 161-169, 1984.

26. ZYLBERSZTAJN, A. Concepções espontâneas em física: exemplo em dinâmica e implicações para o ensino. Revista de Ensino de Física, 5 (2): 3-16, 1983.
27. PEDUZZI, L. O. Q. & ZYLBERSZTAJN, A. A física da força impressa e suas implicações para o ensino da mecânica. Trabalho apresentado na Conferência Internacional “Science and Mathematics Education for the 21 st. Century: Towards innovatory approaches”, Concepción, Chile, 26 de setembro a 1º de outubro, 1994.
28. McCLOSKEY, M. Intuitive physics. Scientific American, 248 (4): 114-122, 1983.
29. DIJKSTERHUIS, E. J. The mecanization of the world picture. Oxford, Oxford University Press, 1969. p.18.
30. KOYRÉ, A. Referência 2, p.40.
31. KOYRÉ, A. Referência 13, p.21.
32. LOSEE, J. Introdução histórica à filosofia da ciência. Belo Horizonte, Editora Itatiaia, 1979, p.22.
33. KOYRÉ, A. Referência 13, p.22.
34. LOSEE, J. Referência 32, p.23.