



### Galileu, Descartes e uma Breve História do Princípio de Inércia (Galileu, Descartes and a Brief History of Inertia)\*

Antony Marco Mota Polito<sup>†</sup>

*Instituto de Física - IFD, Universidade de Brasília, UnB,  
Campus Universitário Darcy Ribeiro - Asa Norte  
70919-970 Brasília, DF*

A descoberta do princípio de inércia é parte de uma história longa e tortuosa, que se apresentou profundamente entrelaçada com as dificuldades envolvidas na compreensão da natureza da gravidade. Neste trabalho, apresenta-se um breve relato dessa história, concentrando-se nos caminhos seguidos por dois de seus principais personagens, Galileu e Descartes, e que levaram-nos a alcançar, respectivamente, os conceitos de inércia curvilíneo e retilíneo, pelos quais ficaram conhecidos. Procura-se mostrar de que modo seus compromissos ontológicos e suas posturas metodológicas contribuíram para que tivessem visões distintas do princípio de inércia, embora suficientemente assemelhadas para que ambos tenham conseguido superar as deficiências da física medieval, inapelavelmente atrelada a concepções aristotélicas, e mesmo que suas compreensões da natureza da gravidade tenham também sido, na sequência, superadas por Newton.

Palavras-chave: Aristóteles, Newton, Galileu, Descartes, Princípio de Inércia, Gravidade.

The discovery of the principle of inertia is part of a long and tortuous history, which appeared deeply intertwined with the difficulties involved in understanding the nature of gravity. This paper presents a brief account of this story, focusing on the paths followed by two of her main characters, Galileo and Descartes, and that led us to reach, respectively, the concepts of curvilinear and rectilinear inertia, by which became known. We will show how their ontological and methodological commitments contributed to they had different visions about the principle of inertia, even though their visions were similar enough for both were able to overcome the deficiencies of medieval physics, deeply linked to Aristotelian concepts, and even though their understandings of the nature of gravity have also been, as a result, surmounted by Newton.

Key words: Aristotle, Newton, Galilei, Descartes, Principle of Inertia, Gravity.

#### I. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta um breve relato da história que conduziu ao advento do princípio de inércia, essencialmente associada com a contribuição de dois dos principais personagens da Revolução Científica do século XVII: Galileu Galilei e René Descartes. O princípio de inércia está na base de nosso entendimento sobre a natureza do movimento. Esse problema foi enfrentado, pela primeira vez, na Antiguidade, quando Aristóteles, com o objetivo explícito de procurar explicar a relação entre as *causas* potencialmente subjacentes e os *efeitos* manifestos do fenômeno do movimento na superfície terrestre,

criou uma teoria que vigoraria por, aproximadamente, dois milênios. Nessa teoria, uma profunda divisão do movimento em dois tipos completamente diversos – naturais e violentos – evidencia o papel preponderante que o desconhecimento da natureza da gravidade exerceu sobre as mentes que buscavam compreendê-lo.

A teoria aristotélica apresentava, contudo, uma série de fragilidades. Boa parte da história da física na Idade Média foi uma tentativa de resolver esses problemas, e um importante passo foi dado com o advento das teorias do *impetus*. As teorias do *impetus*, entretanto, não conseguiram alterar radicalmente a estrutura da relação de causalidade assumida pela teoria do movimento aristotélica. Um novo e importante ingrediente surgiu durante a Revolução Astronômica, com a reapresentação de uma cosmologia heliocêntrica, por Nicolau Copérnico. O heliocentrismo aprofundou as tensões no seio da visão de mundo aristotélica. A hipótese do movimento da

---

\* Originalmente publicado na Revista dos Estudantes de Física da Universidade de Brasília.

<sup>†</sup> antony.polito@gmail.com

Terra implicava uma fratura nas hipóteses metafísicas e cosmológicas que até então vinham sustentando a classificação do movimento em dois tipos distintos. Mais ainda, ela solapava as concepções originais sobre a natureza do movimento e sobre a estrutura de causalidade que subjaziam à física aristotélica. Coube, principalmente, a Galileu e a Descartes a descoberta de uma nova concepção de movimento que, além de resolver os problemas colocados pela nova cosmologia, permitia abrir o caminho para eliminar a divisão imposta por Aristóteles. Nenhum dos dois, entretanto, esteve imune às dificuldades que a compreensão da natureza da gravidade havia imposto aos seus antecessores. Essas dificuldades estão na base da concepção de inércia circular, criada por Galileu. A postura metodológica "positivista" de Galileu implicou um princípio de inércia que assumia um compromisso com os efeitos da gravidade, cuja natureza, entretanto, ele jamais soube explicar. Coube a Descartes – e, de fato, um pouco antes, a Pierre Gassendi – alcançar, pela primeira vez, uma correta concepção de inércia retilínea. E esse fato está intimamente relacionado com as novas concepções metafísicas que ele criou, em substituição àquelas de Aristóteles, o que lhe permitiu desvencilhar-se das dificuldades impostas pelos efeitos da gravidade à análise do problema do movimento. Descartes, entretanto, teve que pagar um preço relativamente alto por esse sucesso, pois a sua metafísica o impediu de conceber a gravidade como um verdadeiro agente causal. Ao contrário, a gravidade não era, na física cartesiana, nada mais que um efeito. Portanto, nem para Galileu, nem para Descartes, a gravidade foi concebida como um agente causal. Nesse sentido, seus respectivos princípios de inércia apresentam ainda deficiências que só seriam plenamente superadas pela criação da mecânica newtoniana. Newton – seguindo, inicialmente, os passos de Pierre Gassendi, tanto no atomismo quanto na sua confusa filosofia mecânica – criou o moderno conceito de força e, com ele, a teoria da gravitação universal que, finalmente, concebia a gravidade como um verdadeiro agente causal. Isso permitiu que ele, finalmente, superasse a dicotomia imposta pela teoria aristotélica e, ao mesmo tempo, colocasse o princípio de inércia em bases solidamente articuladas com a nova concepção da natureza do movimento, descoberta por Galileu e Descartes, e com a nova teoria da gravidade, descoberta pelo próprio Newton.

O plano de apresentação desse trabalho é o seguinte. Na seção 2, apresenta-se, de forma extremamente resumida, mas suficiente para os nossos propósitos, a estrutura do princípio de inércia na teoria newtoniana, em seus aspectos físico e ontológico. Na seção 3, apresenta-se, também resumida e suficientemente, a teoria de movimento de Aristóteles, nos seus aspectos físico e ontológico, o que permitirá uma clara comparação entre as teorias antiga e moderna. A história do princípio de inércia pode ser vista, essencialmente, como sendo o relato do modo como Newton chegou à superação definitiva de Aristóteles. Na seção 4, apresenta-se o modo como Galileu alcançou, pela primeira vez, a moderna

compreensão da natureza do movimento. Na seção 5, relata-se, em retrospecto, o longo e tortuoso caminho seguido por aqueles que antecederam Galileu e apresenta-se a curiosa e interessante contribuição de Pierre Gassendi, com sua eclética (e confusa) consideração do princípio de inércia. Na seção 6, apresenta-se o modo como Descartes alcançou o princípio de inércia retilíneo com base em sua metafísica. Na seção 7, retorna-se à discussão do problema da gravidade em relação à teoria dos vórtices cartesiana. Na seção 8, apresentam-se algumas considerações finais.

## II. O PRINCÍPIO DE INÉRCIA EM ISAAC NEWTON

Isaac Newton (1642 – 1727) foi responsável por, pela primeira vez, enunciar o princípio de inércia na forma como o conhecemos hoje, ou seja, de um modo completamente articulado com uma teoria geral e consistente do movimento, conforme apresentada nos *Principia Mathematica* [1]. Essa teoria, que passou a ser conhecida por *mecânica newtoniana*, lançou as bases para todas as demais teorias da física. A forma como o princípio de inércia nela comparece está articulada com uma profunda concepção sobre a natureza do movimento. Seu enunciado original é o seguinte:

- "Lei I: Todo corpo continua em seu **estado de repouso**, ou de **movimento uniforme em linha reta**, a menos que ele seja compelido a **mudar este estado** em razão de uma **força** impressa sobre ele".

Uma análise conceitual mostra que, em última instância, a Lei I estabelece, explícita ou implicitamente, os seguintes pontos:

1. *Natureza do movimento*: o movimento é concebido como um *estado* e, portanto, é uma propriedade *relativa* dos corpos e não uma propriedade que lhes seja *absoluta*, ou *intrínseca*[23].
2. *Agente causal*: em termos ontológicos, a Lei I afirma um compromisso implícito com um *princípio de causalidade*. Toda relação de causalidade – assumida como primitiva – estabelece uma *conexão necessária* entre certos tipos de *causas* e certos tipos de *efeitos*. A Lei I afirma, a esse respeito, a existência de certas entidades na natureza que, sendo *categoricamente* diferentes dos corpos materiais – cujo atributo intrínseco é a *massa inercial* –, respondem pelas *causas* de certos tipos de efeitos. Essas entidades são as *forças impressas*.
3. *Efeitos do agente causal*: assumido um princípio de causalidade, a toda causa deve ser prescrito um efeito *real*. A Lei I afirma, explicitamente, que o efeito da ação de uma força impressa sobre um corpo material é a *mudança de seu estado de movimento*. A forma específica dessa mudança, que

deve ter uma expressão espaço-temporal, ou seja, cinemática, é afirmada somente na Lei II, onde se verifica que ela corresponde à *aceleração*. (A rigor, na forma como Newton, de fato, a escreveu, ao impulso.)

4. *Simetria*: embora o faça implicitamente, a Lei I estabelece uma *equivalência entre repouso e movimento uniforme*. Ainda em termos do princípio de causalidade assumido, na ausência de um agente causal, não pode haver efeitos reais. Portanto, é forçoso, em vista da afirmação explícita da Lei I, que repouso e movimento retilíneo uniforme devam ser considerados meras *aparências*, e não efeitos reais. Nesse sentido, são *equivalentes* e a aparência é devida, exclusivamente, ao estado de movimentos dos *observadores*[24].
5. *Geometria/Cinemática*: ao estabelecer a forma geométrica *retilínea* das trajetórias dos corpos livres de influências externas, a Lei I prescreve uma *geometria euclidiana* para o *espaço físico vazio*. E, ao estabelecer que tais trajetórias são percorridas com velocidade *uniforme*, prescreve ao *tempo* a propriedade de *homogeneidade*. Isso permite definir uma estrutura espaço-temporal – ou seja, uma *cinemática* – do tipo  $R^3 \times R^1$ , que corresponde a um dos possíveis espaço-tempos munidos da noção de simultaneidade absoluta. A trajetória retilínea e uniforme, entretanto, só é válida enquanto descrita a partir de uma classe de sistemas de referência privilegiados, ditos *inerciais*. O que caracteriza um sistema inercial é o fato de ser ele mesmo livre da influência de forças externas, o que permite que todos sejam conectados por transformações lineares bastante gerais, formando um *grupo de simetria* denominado *grupo de Galilei*. É essa propriedade de grupo que permite que todos os observadores inerciais concordem não apenas com a trajetória retilínea e uniforme do movimento puramente inercial, mas também com os efeitos reais produzidos pela ação das forças impressas. Dito de outra maneira, a classe de sistemas inerciais é a única que preserva a *forma* da lei dinâmica (equação de movimento, prescrita pela Lei II). Por fim, ao contrário da Lei II, que é uma lei *local* (uma equação diferencial), a Lei I estabelece a estrutura *global* da geometria do espaço-tempo não-relativístico[25].

Pelo que foi exposto, fica evidente que, muito embora pareça extremamente simples, a Lei I carrega em si enorme quantidade de suposições de natureza física e ontológica, o que já aponta para uma história complexa e tortuosa. Seu estabelecimento, por Newton, foi o termo final de uma trajetória que se iniciou mais de dois milênios antes, com Aristóteles, o primeiro filósofo a debruçar-se especificamente sobre o problema da natureza do movimento.

### III. A NATUREZA DO MOVIMENTO EM ARISTÓTELES

Não é o objetivo desse trabalho descrever, de forma detalhada, a teoria do movimento de Aristóteles (384 – 322 a.C.) [3, 4]. Ela é bastante complexa e profundamente entrelaçada com a sua metafísica, ou seja, mais particularmente, com sua (i) *teoria das causas* (material, formal, eficiente e final), com sua (ii) *teoria de categorias ontológicas* (substância e atributos) e com sua (iii) *teoria de ato e potência*. É necessário, e suficiente, entretanto, estabelecer, em contraposição à teoria de movimento newtoniana, que, para Aristóteles, os movimentos eram classificados, *grosso modo*, em dois tipos:

1. *Movimentos Naturais*: definidos como sendo as *atualizações* das *potencialidades* dos corpos de ocuparem seus *lugares naturais no universo*. Tradicionalmente, esses movimentos ganharam uma expressão (semi-) quantitativa do seguinte tipo:

$$W = R.v,$$

onde  $W$  corresponderia a uma determinada *propriedade intrínseca* dos corpos, a saber, seu “*peso*” ou “*leveza*”,  $R$  corresponderia à resistência do meio material – sempre presente – no qual os corpos se movem e  $v$  corresponderia à *velocidade* com que os corpos se movem (sem especificação sobre ser uma grandeza média ou instantânea).

2. *Movimentos Violentos*: definidos como sendo o resultado da *ação de contato* de um corpo sobre outro, ou, dito de modo tipicamente aristotélico, resultado da *atualização* de uma *forma*, impressa pelo *corpo movente*, sobre o *corpo movido*, obedecendo a uma expressão (semi-) quantitativa, também tradicionalmente assumida como:

$$F = M.v,$$

onde  $F$  corresponderia à “*força impressa*” (intensidade da ação do corpo movente),  $M$  corresponderia a uma *propriedade intrínseca* aos corpos movidos (não especificada, mas comumente associada ao seu *peso*) e  $v$  corresponderia à *velocidade* com que os corpos movidos se movem (novamente, sem especificação sobre ser uma grandeza média ou instantânea).

É crucial salientar que, durante toda a história da física, até Newton, não houve nenhuma definição precisa ou mesmo um consenso a respeito dos conceitos dinâmicos de *peso*, *massa* ou *força*, e as definições articuladas por Aristóteles padecem, obviamente, dessas ausências e/ou imprecisões. Entretanto, isso é assim apenas quando queremos considerar a teoria do movimento de Aristóteles *em termos modernos*, porque é evidente que, *nos seus próprios termos*, essas ausências e

deficiências ou não aparecem ou, quando aparecem, dizem respeito apenas à sua inadequação enquanto *teoria empírica*.

Da teoria do movimento esboçada, podemos depreender que ela se compromete, essencialmente, com os seguintes pontos:

1. *Natureza do movimento*: o movimento é concebido não como um estado, no sentido anteriormente especificado, mas como um *processo* que ocorre com o corpo que se move. Nesse sentido, o movimento, embora não corresponda, a rigor, a uma *propriedade intrínseca* é, por outro lado, uma sucessiva ocupação de *lugares* no universo em um esquema cosmológico *geocêntrico* que confere a cada um deles uma distinção *absoluta*. O *lugar natural* é tão somente aquela posição no esquema cosmológico que representa o termo final do processo de movimentação natural. Nesse sentido, pode-se entender todo movimento, seja natural, seja violento, como um *processo absoluto*. Isso significa que ele não depende de observadores ou sistemas de referência [26].
2. *Agentes causais*: Aristóteles também tem compromissos estritos com um *princípio de causalidade*. A relação de causalidade, também assumida como primitiva, estabelece conexões necessárias entre tipos de *causas* e tipos de *efeitos*. Essas causas são, entretanto, distintas, pois, no caso dos movimentos naturais, elas são identificadas com as *potências* que os corpos possuem para ocuparem seus lugares naturais (potências relacionadas com o seu "peso" ou "leveza") e são, portanto, *causas finais*. Já no caso dos movimentos violentos, elas correspondem ao *contato* (relacionado com a "força", compreendida como ação de um corpo sobre outro) e são, portanto, *causas eficientes* [27].
3. *Efeito dos agentes causais*: da mesma forma, a toda causa deve ser prescrito um efeito *real*. A teoria aristotélica afirmava, explicitamente, que, em ambos os casos – movimentos naturais ou violentos –, o efeito correspondente à causa final, no primeiro caso, ou correspondente à causa eficiente, no segundo, é a *mudança de lugar* (em função do tempo), ou seja, o próprio *movimento*. A forma específica dessa mudança também deve ter uma expressão espaço-temporal, ou seja, cinemática, e ela corresponde à *velocidade*.
4. *Ausência de Simetria*: é fácil perceber que a consequência do último ponto é uma explícita *inequivalência entre repouso e movimento*. Ainda em termos do princípio de causalidade assumido, na ausência de um agente causal, não pode haver efeitos *reais*, o que significa que não há movimento. Portanto, é forçoso que repouso e movimento não sejam meras *aparências*. Nesse sentido, como já foi exposto, o movimento não é um *estado* (relativo),

mas um *processo absoluto* que ocorre com os corpos [28].

5. *Geometria/Cinemática*: o universo aristotélico não é homogêneo. Contudo, é verdadeiramente curioso que, se assumíssemos – ainda que anacrônica e erroneamente, dado que, entre outras coisas, o espaço, na física aristotélica, não pode ser vazio – que o universo aristotélico possui a propriedade de *isotropia*, seria possível pensar em restaurar, em certa medida, uma simetria entre repouso e movimento. De fato, não fosse pela metafísica aristotélica conceber o movimento como *processo absoluto*, haveria a possibilidade de acomodá-lo como relativo, contanto que se restringisse às superfícies esféricamente concêntricas ao centro da Terra. Ou seja, repouso e movimento *circular* uniforme passariam a ser *equivalentes* e o movimento puramente "inercial" (livre da ação de forças externas) seria o movimento circular uniforme centrado no centro da Terra. Isso conferiria ao universo aristotélico uma geometria esférica. Como veremos, Galileu advogou um princípio de inércia que basicamente se adequa a essa descrição. É importante, entretanto, observar que a tentativa de restaurar essa equivalência, dentro da teoria aristotélica, esbarra em problemas essenciais. O chamado movimento *local* dos corpos celestes, na esfera supralunar, por exemplo, jamais poderia ser considerado equivalente ao repouso. Como já ficou claro, para Aristóteles, é necessária a presença de um agente causal para existir o movimento. Esse agente, mesmo no caso dos corpos celestes, é também uma potência, típica do elemento etéreo do qual são constituídos. E, se insistíssemos em considerar referenciais girando com velocidade angular uniforme como sendo tipicamente inerciais, seríamos obrigados a desistir de caracterizar os movimentos naturais como retilíneos e radiais, o que, sem dúvida, implica severa contradição com os princípios da física e da metafísica aristotélicas.

Do que foi exposto, ficam evidentes as profundas diferenças entre as teorias aristotélica e newtoniana. Diversos autores já apontaram que, dentre as sínteses promovidas por Newton, está aquela que corresponde à eliminação definitiva da distinção entre movimentos naturais e violentos [5–8]. A história do princípio de inércia está intimamente relacionada com essa superação. Menos pontuado, entretanto, é o fato de que um dos motivos fundamentais para que Aristóteles tenha concebido esses dois tipos de movimento foi o fato de ter tratado os efeitos da *gravidade terrestre* de uma maneira completamente diferente daquela que seria realizada por Newton. Para ele e para todos os físicos antigos e medievais, a gravidade era um fato básico, associado exclusivamente com o fenômeno da queda dos corpos na superfície da Terra, e a teoria dos movimentos naturais foi, em última instância, uma tentativa de dar conta desse fato. Uma das grandes

conquistas da teoria newtoniana foi ter, finalmente, concebido a gravidade como uma *força*. Contudo, como já foi alertado, o caminho para aí chegar foi extremamente difícil.

#### IV. GALILEU GALILEI: A BATALHA PELO SISTEMA HELIOCÊNTRICO

Embora o sistema heliocêntrico tivesse sido reproposto por Nicolau Copérnico (1473 – 1543), em 1543, com a publicação do seu *Sobre a Revolução das Esferas Celestes*, há certo consenso entre os historiadores da ciência de que ele não teria provavelmente prosperado não fosse pela atuação de dois personagens considerados centrais para a Revolução Científica do século XVII: Johannes Kepler (1571 – 1630) e Galileu Galilei (1564 – 1642) [6–8]. Cada um deles foi ardoroso defensor do sistema copernicano, embora tenham trilhado caminhos científicos muitíssimo distintos, a começar pelo modo como consideravam o problema relacionado à demonstração da verdade desse sistema. Para Galileu – que unia em si os atributos de um matemático e de um profundo filósofo da natureza com o gênio de um homem prático, disposto a, literalmente, “ver as coisas funcionando” – o problema sempre fora, essencialmente, como compatibilizar o fato de que a Terra se movia nos céus com o modo como os corpos terrestres se movimentavam sobre sua superfície. Já para Kepler – um homem profundamente místico –, o problema era mostrar que a harmonia e a simplicidade matemática do mundo só se revelariam pela concepção de que o Sol era o centro do universo – sua fonte de poder e vida [5–8].

Eles foram contemporâneos, mas, ironicamente – e apesar de terem, inclusive, chegado a trocar correspondências amigáveis –, ignoraram-se mutuamente durante a maior parte do tempo. Kepler, que indagou, pela primeira vez, por uma causa física que permitisse explicar como o Sol movia os planetas, passou amplamente ao largo das descobertas que Galileu faria na mecânica. Já Galileu continuou sustentando as órbitas circulares copernicanas, sem reconhecer a grande revolução que Kepler estava operando na astronomia, com o abandono da obsessão pelo movimento circular uniforme. Num certo sentido, é possível ver aí um reflexo direto da cisão entre mecânica e astronomia, herdada de seus antecessores medievais. Galileu e Kepler não podiam saber que iniciavam o processo de desvendamento de (parte) do mistério da gravidade, cada um a seu modo, partindo de lados opostos do problema, cuja solução, por fim, caberia a Newton encontrar [29].

Esse afastamento entre os dois grandes homens, contudo, não chegou a ser completo. Foi Galileu quem primeiro utilizou o telescópio – de fato, uma simples luneta – para investigar os céus, e assim contestar o dogma aristotélico da perfeição e imutabilidade do mundo supralunar e a divisão do universo em duas partes completamente distintas. Preparava, com isso, o caminho para a grande unificação que seria realizada, cerca de quarenta

anos depois de sua morte, por Newton. Kepler, por sua vez, iria estudar com grande profundidade as propriedades do novo instrumento de observação, em tão alto grau que ele viria a passar para a história como o pai da ótica geométrica no ocidente.

Em 1610, Galileu publicou o seu *O Mensageiro Sideral*, resultado de suas espetaculares descobertas feitas com o emprego da luneta. Essa obra representou o primeiro ataque frontal contra a cosmologia aristotélica. Dentre as observações e descobertas realizadas, destacaram-se: (i) as crateras na superfície da Lua; (ii) as manchas solares (ambos fenômenos que contradiziam a imutabilidade e a perfeição da esfera supralunar aristotélica); (iii) uma vasta quantidade de novas estrelas não visíveis a olho nu; (iv) os satélites de Júpiter (os quais revelaram um “sistema solar” em miniatura, de tal modo que a Lua, antes um objeto anômalo no sistema solar, passou a ser um mero exemplo, entre outros) e, finalmente, (v) as fases do planeta Vênus.

O problema fundamental, entretanto, consistia muito mais na adesão completa de Galileu à leitura *realista* da obra de Copérnico, assim como havia sido o caso para Giordano Bruno (1548 – 1600) e Kepler [7]. Embora Galileu tenha iniciado sua carreira como um aristotélico, o acúmulo de complicações associadas ao sistema ptolemaico e a incapacidade da física aristotélica de resolvê-los adequadamente levaram-no a dar um passo que nenhum grande pensador até então havia ousado tentar: rejeitá-la ampla e integralmente.

Em uma de suas primeiras obras científicas, intitulada *Sobre o Movimento* (c. 1590), Galileu ainda apresentou-se como um partidário da teoria medieval do *impetus* [9]. Nessa obra, contudo, ele já demonstrava qual de fato seria seu grande objetivo: construir uma *dinâmica* matematicamente exata que permitisse complementar, nos mesmos moldes axiomáticos, a *estática* de Arquimedes, empregando, para isso, métodos geométricos. Galileu abandonou a dinâmica desenvolvida em *Sobre o Movimento* quando percebeu que a teoria do *impetus* não seria capaz de remover as principais objeções à aceitação do sistema heliocêntrico [6]. Essas sérias objeções resumiam-se todas a, essencialmente, um único problema: como seria possível que a dinâmica dos objetos na superfície terrestre não fosse drasticamente afetada pelo movimento da Terra? Nas palavras de Simplicio[30]: “*O problema crucial é ser capaz de mover a Terra sem causar milhares de inconveniências*”.

Esse problema podia ser vivamente ilustrado pela experiência de “queda de um objeto do topo de uma torre”. Essa experiência é, essencialmente, o relato de uma possível observação e a constatação de um aparente paradoxo. Supondo-se que a Terra se mova (em torno do Sol, ou mesmo em torno de si mesma), um objeto que fosse liberado do alto de uma torre, sem velocidade horizontal, em “queda livre”, não poderia cair exatamente junto à base da torre. O problema era que, de acordo com o princípio básico da física aristotélica, sem força não podia haver movimento violento. Enquanto o objeto

estivesse caindo livremente, ou seja, por movimento natural, ele não se encontraria submetido a nenhuma força e, portanto, não deveria apresentar nenhum movimento horizontal. A Terra, entretanto, nesse meio tempo, teria-se movido horizontalmente (e, com ela, a torre), de modo que o objeto, ao chegar ao solo, deveria cair sempre em um ponto, na superfície, afastado da base da torre. E esse efeito, obviamente, nunca era observado. Alegadamente, a teoria do *impetus* não seria capaz de resolver esse problema porque, ao se abandonar o objeto do alto da torre, nenhum *impetus* teria sido efetivamente comunicado ao objeto que inicia a queda. Como veremos na seção seguinte, o conceito de *impetus* permanecia vinculado à física aristotélica. Seu significado era o de *força impressa* (imaterial), e era exatamente uma força impressa nos corpos arremessados que causava seu movimento, segundo a compreensão da física medieval, e que estaria presumivelmente ausente, no exemplo da torre.

O que faltava, evidentemente, à física medieval, era uma concepção de movimento que levasse em conta os conceitos de *inércia e movimento relativo*. É impossível acomodar tais conceitos dentro da física aristotélica. Foi isso que Galileu percebeu e que todos os cientistas e filósofos antigos e medievais ou não conseguiram perceber, ou não tiveram ânimo suficiente para fazer o que era necessário: destruir por completo o antigo sistema e edificar um novo.

Em 1632, Galileu publicou o seu *Diálogo Sobre os Dois Principais Sistemas de Mundo*, onde ele, finalmente, removeu a objeção aristotélica e lançou as bases para a construção da nova física ao introduzir a *ideia* fundamental do que seria elaborado como o *Princípio de Inércia*. Veremos que, a rigor, as primeiras proposições corretas do princípio de inércia foram devidas não a Galileu, mas a Pierre Gassendi (1592 – 1655) e a René Descartes (1596 – 1650). Contudo, a ideia mais importante associada ao conceito já havia sido plenamente entendida por Galileu. O modo como Galileu introduziu essa ideia acabou por implicar uma forma do princípio condicionada a uma situação experimental específica, o que o levou a enunciar um *princípio de inércia circular*, ao invés de retilíneo. Para Galileu, *um corpo, em movimento num plano horizontal ideal, ou seja, sem atrito, continuaria a mover-se com velocidade uniforme até que alguma influência externa operasse no sentido de mudá-la* [5, 6, 9]. Em resumo, não seria necessária qualquer força para manter um corpo em movimento, nesse plano [31].

A fim de avaliarmos a contribuição de Galileu dentro de uma perspectiva panorâmica, vamos esboçar, em seus elementos principais, a história que acabou conduzindo à elaboração definitiva do princípio de inércia.

## V. UMA BREVE HISTÓRIA DO PRINCÍPIO DE INÉRCIA

### A. O esforço medieval: as teorias do *impetus*

No início da Idade Média, o neoplatônico João Philoponus (490 – 570 d.C.) elaborou um conceito de *força impressa* que acabou por antecipar o conceito de *impetus* dos filósofos medievais [8, 10]. O mérito de Philoponus não foi pequeno. Ao analisar criticamente a obra de Aristóteles, ele encontrou vários pontos frágeis, dentre os quais o mais sensível deles tinha a ver com o problema do *lançamento sob ação da gravidade*. Esse movimento não podia ser natural, mas sim violento. O problema estava em que um objeto, uma vez lançado, perdia contato com o agente motor e, portanto, não tinha mais uma causa eficiente para seu movimento. Embora o próprio Aristóteles tivesse tentado, esse problema nunca pôde ser solucionado satisfatoriamente, até o advento das teorias de *impetus*. Para Philoponus, uma “*energeia*” (ato) motora *incorpórea* seria impressa no projétil por quem o havia lançado, passando a ser essa força impressa imaterial a verdadeira causa eficiente responsável pela manutenção do movimento. O *impetus* de Philoponus apresentava, contudo, uma característica indesejada: ele se exauria, durante o movimento, por uma dupla razão: a resistência do meio e uma dissipação gradativa, que existiria mesmo que o lançamento fosse realizado no vazio.

O primeiro filósofo a formular um princípio realmente semelhante ao princípio de inércia foi o árabe neoplatônico Ibn Sina (Avicena) (980 – 1037 d.C.) [8, 10]. Ele também concebeu uma forma do princípio do “*impetus*” – que ele chamou de “*mail*”, ou seja, *inclinação* – muito semelhante àquela formulada por Philoponus. Porém, Avicena afirmava, explicitamente, que, na ausência de um meio resistente, um corpo, *uma vez colocado em movimento*, permaneceria em movimento *retilíneo e uniforme*, sem nenhum decréscimo de seu *impetus* (*mail*).

De volta ao Ocidente, o filósofo medieval Jean Buridan (c. 1292 – 1363), assim como Avicena, também considerou uma força impressa, ou *impetus*, que não se dissipava, a não ser por resistência externa [8, 10]. Porém, para Buridan, a própria ideia de um movimento retilíneo perpétuo era impossível, ligado que estava à noção de universo finito da cosmologia aristotélica. Contudo, em suas investigações, Buridan deu um passo além ao antecipar o conceito de *quantidade de movimento*. Para Buridan, o *impetus* podia ser quantificado e era, basicamente, o produto da massa pela velocidade. Contudo, para Buridan, *massa* era uma medida da *quantidade de matéria*, não de inércia. De acordo com Buridan [11]:

“Após deixar o braço do atirador, o projétil seria movido por um *impetus* dado a ele pelo atirador e continuaria a ser movido enquanto o *impetus* permanecesse mais forte que a resistência, e o movimento seria

de duração infinita não fosse ele diminuído e destruído por uma força contrária que lhe resistisse ou por algo inclinándolo em movimento contrário.”

No final do século XVI, durante o período correspondente ao final do Renascimento e ao início da Revolução Científica, Giovanni Battista Benedetti (1530 – 1590) retomou o conceito de Avicena (movimento retilíneo e uniforme) e reafirmou a conservação do movimento também em termos de uma teoria do *impetus* [5].

Do ponto de vista do moderno princípio de inércia, todas essas abordagens compartilham das mesmas dificuldades. Nelas, repouso e movimento continuavam sendo considerados condições absolutas, intrínsecas aos corpos, e, a despeito de estabelecerem o mesmo *efeito* – a saber, o movimento retilíneo e uniforme – este não se dava na *ausência* de causas e sim na sua *presença*. Assim, era exatamente por existir um agente causal – a força impressa – que o movimento retilíneo e uniforme podia acontecer. Por ser um conceito ligado à física aristotélica, nenhuma teoria de *impetus* poderia representar um verdadeiro princípio de inércia. O conceito de *impetus*, entretanto, representou um importante passo, na medida em que estabeleceu, do ponto de vista da concepção dos agentes causais, a existência de uma entidade imaterial que, por um lado, não existia na física aristotélica e, por outro, apontava para a moderna concepção newtoniana de força.

Com isso, podemos observar em Philoponus, Avicena, Buridan e Benedetti filósofos naturais que, a despeito das aparências, apenas “tangenciaram” o princípio de inércia. Talvez seja mais apropriado identificar, nas suas elaborações, precursores dos conceitos de *energia (cinética)* ou de *quantidade de movimento*, muito embora, do ponto de vista moderno, seja importantíssimo observar que esses conceitos estão completamente atrelados à noção mais fundamental de movimento inercial.

## B. Os precursores imediatos

Sabe-se que tanto Nicolau Copérnico quanto o filósofo italiano Giordano Bruno – um visionário defensor do sistema heliocêntrico, mas que acreditava em um universo infinito, com infinitos mundos, e que, em razão dessas crenças, foi queimado pela Inquisição – já haviam considerado o “problema da queda de um objeto da torre” e formulado linhas de argumentação em favor de uma solução do paradoxo que anteciparam os esforços do próprio Galileu [12]. Ambos atribuíram os resultados negativos da experiência à noção de que o objeto liberado “participava” do movimento global do sistema torre-Terra. Enquanto Copérnico o sustentava em bases metafísicas, alegando que o objeto acompanhava o movimento da Terra em razão de uma *afinidade de essências*, Bruno o fez em *bases físicas*, porém, utilizando a teoria do *impetus*. Para Bruno, o sistema torre-Terra e o

objeto liberado eram parte do mesmo sistema mecânico. O sistema torre-Terra de fato imprimiria *impetus* ao objeto liberado, de modo que era em função dessa força impressa que ele se movia em conjunto com o restante do sistema [12]. A existência de uma possível explicação para o efeito, em termos que os filósofos medievais ainda poderiam aceitar, parece ser uma evidência de que Galileu não estava disposto a compromissos que implicassem a manutenção do sistema aristotélico.

Embora as preocupações de Copérnico e Bruno estivessem condicionadas pelo problema do heliocentrismo e suas explicações estivessem totalmente dentro do contexto da física e da metafísica aristotélicas – não sendo, nesse sentido, diferentes das tentativas dos filósofos medievais –, há um ingrediente novo nas suas discussões e que os aproxima muito mais do pensamento de Galileu, de Descartes e de Gassendi: a ideia de *relatividade dos movimentos*. Para Copérnico, isso significava que nenhum efeito físico era sentido dentro do sistema composto por uma Terra em movimento. Para Bruno, que um corpo podia participar de múltiplos movimentos, sem que isso implicasse qualquer contradição, já que movimento, *agora claramente concebido como um estado*, não era uma propriedade intrínseca aos corpos. Bruno, em particular, chegou até mesmo a antecipar a noção de *composição* de movimentos [12].

Por fim, talvez o precursor mais imediato de Galileu, Gassendi e Descartes tenha sido o cientista e filósofo holandês Isaac Beeckman (1588 - 1637), de quem Descartes veio, inclusive, a ser discípulo, e que é também considerado um dos principais responsáveis pela reintrodução do atomismo na Idade Moderna, tendo inspirado o atomismo de Gassendi. Beeckman parece ter defendido um princípio de inércia muito semelhante ao de Galileu, ou seja, circular, porém, não chegou a publicar seus resultados [5].

## C. O Ecletismo de Pierre Gassendi

Foram Galileu, Gassendi e Descartes, nessa ordem, os que primeiro abandonaram a teoria do *impetus* e conseguiram chegar a verdadeiras formulações de um princípio de inércia. Tanto Gassendi quanto Descartes, entretanto, construíram sobre os alicerces fundados por Galileu. O filósofo francês Pierre Gassendi (1592-1655) enunciou, de fato, um pouco antes de Descartes, o princípio de inércia na sua forma completa [13]. Na sua obra *Sobre o Movimento* (1642, ano da morte de Galileu), ele descreveu a realização do experimento que Galileu apenas imaginara – a queda de uma pedra do topo do mastro de um navio – e discutiu a composição de movimentos que conduzia à famosa trajetória parabólica, deduzida matematicamente por Galileu. Nessa discussão, ele foi capaz de ir além das conclusões de Galileu ao concentrar-se no fato de que o movimento de queda representava, em sua componente *horizontal*, uma *instância de movimento inercial*. Dado que a *composicionalidade* não tinha qualquer influência

no movimento inercial, *ele concluiu que qualquer corpo, livre de influências, deveria seguir um caminho retilíneo, em velocidade uniforme.*

Diferentemente de Descartes, a *filosofia mecânica* de Gassendi era construída sobre um *atomismo de moldes epicuristas*. Ele, portanto, defendia firmemente a existência do espaço vazio. Seu princípio de inércia aparece, assim, de modo consistente com uma metafísica que assumia um espaço que possui *simetrias* (homogeneidade e isotropia) como arena para o movimento dos átomos. Gassendi sustentou exatamente essas simetrias como fundamento para o seu princípio. É curioso, entretanto, observar que Gassendi incorreu em muitas inconsistências com relação não apenas ao seu princípio de inércia, mas também com relação à própria filosofia mecânica, da qual ele foi um dos destacados proponentes. Em escalas astronômicas, ele admitia que o movimento inercial pudesse ser circular e, em escalas microscópicas, que os átomos tivessem características *anímicas* – como, aliás, havia sugerido Epicuro – de modo que seu movimento poderia ser errático e aleatório. Essas inconsistências parecem ter sido relevantes para que Descartes tenha adquirido a maior parte do crédito pelo enunciado do princípio correto. Ainda assim, Gassendi conseguiu ir além de Galileu e de Descartes em um aspecto muito importante, pois ele foi, possivelmente, o primeiro, antes de Newton, a conceber a *gravidade* como uma *força externa*, e o movimento sob ação da gravidade como um movimento violento, ao invés de natural.

Logo em seguida, René Descartes também chegou ao enunciado correto do princípio de inércia [14, 15]. Assim como Gassendi, ele o estabeleceu em termos de uma *relação entre a manutenção do estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme e a ausência de causas externas atuantes*. Basicamente, Gassendi e Descartes estabeleceram o princípio cujo enunciado foi integralmente adotado por Newton, na sua primeira lei. A formulação de Descartes para o princípio de inércia foi, em certo aspecto, mais profunda do que a de Gassendi, pois Descartes estabeleceu o seu princípio de maneira completamente consistente com sua metafísica mecanicista. Como veremos, ele a sustentou no contexto de *leis de movimento* que introduziam um princípio fundamental: o da *conservação da quantidade de movimento*.

#### D. De volta a Galileu

Embora tenha sido corrigido, no que se refere ao movimento retilíneo, pelos enunciados de Gassendi e Descartes, o princípio de inércia de Galileu teve o insuperável mérito de ter estabelecido – pela primeira vez, com toda clareza – a *relação entre estado de movimento e sistema de referência*. O cerne da revolução conceitual galileiana na mecânica estava, desse modo, na mudança radical da própria *natureza* do movimento. Galileu conseguiu conceber o movimento como atributo exclusivamente *relativo*, de tal modo que ele não constituía mais algo similar

a uma *propriedade essencial*, ou seja, *intrínseca*, dos corpos. Para articular essa nova concepção, ele introduziu a importantíssima noção de *sistema de referência* (não com esse nome, obviamente). Movimento e repouso passaram a ser concebidos como sendo apenas *estados* diferentes associados a um mesmo corpo, o que significa que são, intrinsecamente, dependentes da *descrição de um observador*[32]. Ainda que os estados mudem, o corpo em si permanece completamente indiferente ao seu estado de movimento. Essa ideia passou a ser modernamente conhecida como *princípio de relatividade galileano*. Essa indiferença era essencial para a remoção das objeções ao sistema heliocêntrico. Entre outras articulações conceituais que ele viabilizou, no contexto da dinâmica, esse passo foi também fundamental para que, mais tarde, Newton pudesse alcançar uma correta separação dos conceitos de *peso e massa inercial*, na medida em que o peso deixou de ser uma propriedade intrínseca ao corpo, tendo a massa passado a desempenhar esse papel, no contexto da dinâmica[33].

Como já exposto, a falha de Galileu em enunciar corretamente o princípio de inércia estava no fato de que este não expressava exatamente um movimento *retilíneo*, mas circular. Seguindo ainda parte da velha tradição, Galileu sustentou (tal como Buridan) que o movimento circular era o único compatível com um cosmos bem ordenado por uma inteligência divina. Para compreender melhor esse aspecto do conceito de inércia de Galileu, é interessante atentar para o estudo exaustivo que ele fez do movimento acelerado (e desacelerado) em planos inclinados (e que o levaram a descobrir a lei de queda dos corpos) [34].

A partir desses estudos, Galileu concluiu que, independentemente da inclinação do plano, todos os corpos adquiriam a mesma velocidade final ao serem liberados de uma mesma altura inicial. Isso significou, para ele, que era exclusivamente a *variação de altura com relação à superfície da Terra* que alterava o estado de movimento do corpo. Desse modo, mover-se em um “plano horizontal” significava, literalmente, mover-se em uma superfície cujas partes estivessem igualmente afastadas do centro da Terra. O movimento inercial devia ser, portanto, um *movimento circular uniforme*, concêntrico ao centro da Terra [35].

Desses fatos, é possível depreender que a razão profunda pela qual Galileu não pôde conceber o princípio de inércia retilíneo estava no fato de que ele não tinha noções completamente bem definidas – nem, evidentemente, definições matemáticas adequadas – dos conceitos de *massa inercial*, *gravidade* e *força*. Em muitas de suas obras, Galileu sempre julgou prematuro responder à questão do *por quê* os corpos sofrem aceleração em seus *movimentos naturais*[36], tendo quase sempre preferido se ocupar do *como* eles ocorrem. Assim, ele se recusou a construir hipóteses sobre a verdadeira natureza da força, em geral, e da gravidade, em particular. É certo, contudo, que Galileu não interpretava a atuação da gravidade como uma “força” no mesmo sentido de, por exemplo, uma força (de contato) operando na impulsão de um corpo, embora

soubesse que ambas as instâncias representavam sempre a causa de uma aceleração (escalar). Como ele não tinha um conceito de massa, o conceito de peso permaneceu um mistério para ele, e era sempre referido como sendo uma *inclinação natural* dos corpos para chegar ao centro da Terra. E como ele não conseguiu perceber a natureza *vetorial* da velocidade, ele também não percebeu o efeito da gravidade como atuando na mudança de *direção* do movimento. Daí o movimento circular ser, para ele, o movimento preferencial para corpos pesados que fossem impedidos de realizar sua inclinação natural.

Foi com a obra *Discursos e Demonstrações Matemáticas sobre Duas Novas Ciências* (1638) [16] que Galileu estruturou, de forma definitiva, suas novas ideias a respeito dos movimentos uniforme e acelerado, da composição de movimentos e da cinemática da queda dos corpos. Ao restringir-se ao tratamento da cinemática, Galileu se deparou com o problema de não saber de que forma justificar, fisicamente, a atuação da gravidade no processo de queda livre. Então, para fundamentar a postulação de um movimento *uniformemente* acelerado, ele usou um argumento de simplicidade. Assim como no movimento uniforme ocorrem (por definição) incrementos iguais de posição em tempos iguais, ele supôs que, no movimento sob a ação da gravidade, ocorriam incrementos iguais de *velocidade* em tempos iguais. Havia, entretanto, outro argumento pelo qual ele pôde concluir que a queda dos corpos deveria ser descrita em termos de um movimento uniformemente acelerado. Lembremos que Galileu havia mudado o princípio basilar da dinâmica aristotélica, segundo o qual o movimento era um *efeito* de um agente causal. Com a transformação do movimento em *estado*, um novo efeito dinâmico deveria ser atribuído ao agente causal (ou seja, à força, em geral, ou à gravidade, nos movimentos naturais). Galileu supôs, acertadamente, que esse efeito devia ser a aceleração.

## VI. RENÉ DESCARTES E A FILOSOFIA MECÂNICA

O responsável pela formulação mais sistemática da chamada *filosofia mecânica* [37], bem como seu maior defensor, foi o filósofo, cientista e matemático René Descartes (1596 – 1650) [6]. Descartes compartilha com Galileu o reconhecimento de terem sido os principais motores intelectuais do início da Revolução Científica, embora por motivos bastante diferentes. Tanto Galileu quanto Descartes deram importantes e definitivas contribuições ao processo de construção da física como uma ciência matemática e experimental, em particular na mecânica e na ótica [9, 17]. Contudo, embora tenha sido um pensador profundo, e tenha também contribuído decisivamente no que diz respeito a aspectos metodológicos, Galileu eximiu-se, em boa parte de sua obra, de construir qualquer sistema de pensamento completo, seja do ponto de vista metafísico, seja epistemológico. Descartes, por outro lado, investiu parte substancial de seus esforços no

sentido não apenas de resolver problemas específicos de natureza científica, mas de, literalmente, refundar toda a filosofia natural, lançando as bases metafísicas, epistemológicas e metodológicas a partir das quais todo o pensamento moderno seria desenvolvido [7]. Nesse sentido, se é possível considerar Galileu como uma espécie de símbolo máximo da derrocada da cosmologia e da física aristotélicas, Descartes pode ser justamente considerado uma espécie de símbolo máximo da derrocada da metafísica e da visão de mundo aristotélicas, tendo-as substituído pela sua própria *visão de mundo mecanicista*, que dominaria o pensamento científico ocidental por, aproximadamente, dois séculos e meio [6].

### A. A Metafísica Cartesiana

No que se refere à compreensão da história do princípio de inércia, é estritamente necessário compreender a metafísica cartesiana como tendo sido, em larga medida, construída em franca contraposição às concepções metafísicas medievais e, portanto, não apenas às aristotélicas, mas, também, àquelas articuladas em torno do que se convencionou chamar de *naturalismo renascentista* [6]. Com relação a esse último, inclusive, uma chave interpretativa pode ser encontrada na constatação de que a concepção cartesiana de mundo e, principalmente, a sua epistemologia, eram, essencialmente, tributárias de sua *metodologia filosófica*, francamente contrária ao pensamento naturalista. Em uma de suas primeiras e mais conhecidas obras, *Discurso Sobre o Método* (1637), mas, principalmente, em uma obra mais madura, *Meditações Sobre a Filosofia Primeira* (1641), Descartes adotou, como estratégia filosófica, um método de dúvida radical e sistemática, baseado em um racionalismo extremo, que começava por negar todo tipo de segurança aos dados provenientes dos sentidos humanos (intuição sensível). Esse processo culminava na dúvida com relação até mesmo às ideias mais puras da razão, como aquelas provenientes da matemática. Tendo, por fim, estabelecido sua única verdade irrefutável – a de que existia como *ser pensante* (*res cogitans*), no famoso *cogito ergo sum* – Descartes pôde restabelecer, gradativamente, a possibilidade do conhecimento verdadeiro. Esse conhecimento verdadeiro não era mais, entretanto, fundado na intuição sensível, mas, tão somente, nas ideias que o intelecto podia perceber como sendo suficientemente *claras e distintas*. Embora clareza e distinção na percepção intelectual fossem consideradas “marcas da verdade”, na medida em que resistiam ao processo de dúvida metódica, Descartes, ainda assim, reconhecia um papel relevante para a evidência dos sentidos na filosofia natural. Nesse sentido, ele distinguia entre os *princípios gerais* de sua física, que eram derivados exclusivamente a partir de uma investigação das *ideias inatas*, e os *mecanismos particulares*, que era obrigado a postular para explicar os fenômenos observados [18].

Entre as ideias inatas que Descartes julgava serem cla-

ras e distintas estava a de que não havia nenhuma outra propriedade, além da *extensão geométrica*, que fosse capaz de caracterizar, na sua *essência*, os corpos materiais (res extensa). Juntamente com Galileu, Descartes havia retomado aquela perspectiva epistemológica dos Atomistas antigos (Leucipo, Demócrito, Epicuro), a qual conferia prioridade ontológica às chamadas *qualidades primárias* – tamanho, forma, posição e movimento, as únicas passíveis de matematização –, eliminando as *qualidades secundárias* (cor, brilho, textura, sabor, odor, etc.) do âmbito da física [7]. Porém, há, em Descartes, diferenças essenciais com relação a seus predecessores atomistas e a Galileu. Embora existam indícios de que ele tenha sido, inicialmente, um atomista de moldes democritianos, Descartes abandonou, logo em seguida, completamente a crença na existência do *vazio* no universo. Para ele, todo o universo era constituído por corpos que eram como “recortes” da matéria infinitamente extensa (*plenum*). Isso implicava uma total identificação, no contexto da metafísica cartesiana, entre *espaço e matéria*. Além disso, a matéria era considerada completamente *inerte*. Portanto, as únicas propriedades reais dos corpos materiais eram propriedades primárias.

A nova metafísica cartesiana expurgava, desse modo, o universo de todo resquício de animismo e vitalismo, concebendo o mundo como uma máquina composta por corpos que se moviam por exclusiva necessidade física. Contra o empirismo e as crenças mágicas em simpatias, antipatias e forças ocultas agindo na natureza – tão em voga, no contexto do naturalismo renascentista, o qual havia resgatado concepções pitagóricas e (neo)platônicas, de cunho um pouco mais místico –, ele propugnou uma abordagem racional, baseada em princípios físicos que admitiam apenas a ação por contato entre os corpos. Da mesma forma, a nova metafísica cartesiana afastava, de maneira praticamente definitiva, a ontologia de moldes aristotélicos, a começar pelas chamadas *causas formais*. Desse modo, parte considerável das categorias aristotélicas foi considerada “irreal” e foi banida da física, em conformidade com o novo entendimento das qualidades secundárias, operando-se um drástico programa de *redução* da maior parte delas exclusivamente a qualidades primárias. Como a única causalidade atuante no universo era a causalidade eficiente das forças de contato entre os corpos, isso implicava, automaticamente, a total eliminação da noção de *causalidade final* e, por fim, a eliminação das noções de *ato e potência* como fundamento de qualquer teoria do movimento [6].

## B. A Física Cartesiana

A física de Descartes foi apresentada, principalmente, nas obras *O Mundo* (1633) e *Princípios de Filosofia* (1644) [19, 20], e é caracterizada por uma rara sobriedade [14, 15, 17–20]. Também aqui Descartes buscou eliminar da filosofia natural todo e qualquer resquício de metafísica que não estivesse exclusivamente a serviço

da explicação mais simples dos fenômenos. Como na física cartesiana existia uma única matéria, comum a todos os corpos do universo, os antigos limites que haviam sido impostos entre os mundos celeste e terrestre foram completamente dissolvidos, o que preparou o terreno, do ponto de vista cosmológico, para a síntese newtoniana. A matéria universal era infinita em extensão, infinitamente divisível (contínua) e *constituía o próprio espaço*: não havia um espaço vazio, previamente constituído, no qual a matéria estivesse posta, como um conteúdo em um recipiente.

Os *Princípios de Filosofia* de Descartes apresentam, também, sua teoria geral do movimento. Descartes definiu movimento como uma “*transferência de uma porção de matéria, ou de um corpo, das vizinhanças daqueles corpos imediatamente contíguos a ele, e considerados em repouso, para as vizinhanças de outros corpos*”. Essa definição parece sancionar uma interpretação de movimento puramente *relativo*, já que a escolha de que corpos estão em repouso ou em movimento seria, em princípio, *arbitrária*. Esse ponto é, entretanto, passível de questionamento. A dinâmica cartesiana era governada por três *leis de movimento*, que incluem uma das primeiras formulações corretas do princípio de inércia:

- **Primeira Lei do Movimento:** “cada coisa, na medida em que é simples e uma, **permanece no mesmo estado**; e, conseqüentemente, uma vez que seja movida, ela sempre continua a mover-se”.
- **Segunda Lei de movimento:** “cada parte da matéria considerada por si mesma não tende a mover-se ao longo de linhas oblíquas, mas somente em linhas retas. [...] A razão para essa regra, como também para a precedente, é a imutabilidade e a simplicidade da operação pela qual Deus conserva o movimento na matéria. Porque Ele o conserva sem referência ao que era poucos instantes antes. Embora nenhum movimento possa ter lugar em apenas um instante, é, por outro lado, evidente que **toda coisa que se move, em cada instante em que o faz, está determinado a continuar a se mover em uma direção definida, seguindo uma linha reta, não uma linha curva.**”

É interessante fazer aqui, duas observações. A primeira é que Descartes procurou sustentar essas conclusões por meio de um argumento *filosófico*, tipicamente medieval. Ele alegou que, sendo repouso e movimento estados de *natureza oposta*, não havia sentido em considerar que um corpo, estando em um desses estados, pudesse, *em virtude exclusiva de sua própria natureza*, ou seja, sem o concurso de uma causa externa, mudar para o estado oposto. Descartes estaria, nesse ponto, sustentando que *movimento e repouso* devem ser considerados *essencialmente distintos* – rompendo, assim, com sua equivalência fundamental – o que é, evidentemente, incompatível com a ideia de movimento puramente relativo [38]. Há autores que sustentam que essa distinção absoluta entre repouso e movimento demonstra que Descartes, assim como

os teóricos do *impetus*, não teria chegado ao *verdadeiro* princípio de inércia [14].

A segunda observação é que a suposição de Descartes, na Segunda Lei, é deixada sem uma verdadeira justificativa, pois nada impediria que, além de uma tendência de mover-se em uma determinada direção, o corpo tivesse, instantaneamente, uma tendência para *mudar de direção* (e para mudar a mudança de direção, e assim sucessivamente, *ad infinitum*, o que resultaria, em princípio, em qualquer trajetória). Foi apenas com Newton, e sua admissão explícita de que é necessária uma causa *externa* para a tendência de *mudar a direção*, que a segunda lei de Descartes ganhou uma justificativa mais adequada [21].

Para alcançarmos uma compreensão mais profunda do princípio de inércia elaborado por Descartes, é fundamental considerar a sua terceira lei de movimento, que é onde ele articula o seu mais importante princípio físico: o princípio de conservação da quantidade de movimento:

- **Terceira Lei do Movimento:** “um corpo, quando vai ao encontro de um corpo ‘mais forte’, não perde nada de seu movimento; mas, quando vai ao encontro de um corpo ‘mais fraco’, perde tanto de seu movimento quanto transfere para o corpo ‘mais fraco’”.

Notemos que a terceira lei apresenta dois aspectos importantes. Primeiro, ela é uma *lei de interação* entre corpos e, nesse sentido, invoca, implicitamente, uma noção de *agente causal* ou, como afirmado explicitamente, de ‘*força de um corpo*’. Segundo, ela articula uma noção de *quantificação* do movimento que sugere que ele possa ser *medido*. De fato, Descartes esclareceu esses dois pontos, primeiramente, ao definir ‘*força*’ como sendo a *tendência* que um corpo apresenta de permanecer no seu estado original de repouso, ou de movimento, justamente *na situação em que ocorre a ação de um corpo sobre outro*. Em seguida, ao estabelecer que uma medida dessa ‘*força do movimento*’ devia ser provida tanto pela consideração dos *tamanhos* dos corpos envolvidos quanto de suas *velocidades*. Por tamanho, devemos compreender o *volume* (extensão geométrica) e, por velocidade, o que hoje define-se por *velocidade escalar*. Descartes, por fim, estabeleceu que a quantidade conservada nas colisões devia ser igual à soma dos produtos dos volumes pelas velocidades de cada um dos corpos envolvidos. A quantidade de movimento definida por Descartes não era, evidentemente, o *momento linear*, conforme viria a ser definido no âmbito da mecânica newtoniana. Afinal, a dinâmica cartesiana carecia do conceito de *massa* e, de fato, não tinha sequer como acomodá-lo, dados os vínculos metafísicos que identificavam matéria apenas com extensão geométrica [14].

Há, aparentemente, uma falha mais grave na formulação do seu conceito de quantidade de movimento que o impediu de formular seu princípio de conservação para além das situações que envolvem colisões unidimensionais. Para Descartes, quantidade de movimento não era uma grandeza *vetorial*. É surpreendente que, tendo

assumido explicitamente que o corpo, instantaneamente, seria dotado de uma quantidade de movimento *direcional*, Descartes não tenha sido capaz de formulá-la como quantidade vetorial em sua plenitude, inclusive para poder combinar as quantidades de movimento, através da regra do paralelogramo, para formular, por exemplo, suas regras de colisão. Alguns autores sustentam que isso também se deve a um resquício aristotélico, segundo o qual cada corpo possuiria apenas *um movimento* que lhe era peculiar [21]. Desse modo, um corpo não poderia *participar* de vários movimentos, simultaneamente.

De qualquer modo, a terceira lei de movimento, além de apresentar o primeiro princípio de conservação da história da física, também permite iluminar o que talvez seja a essência do princípio de inércia cartesiano. De fato, quando o comparamos com a forma como Galileu estabeleceu o princípio, vemos que, na formulação de Descartes, o princípio de inércia enfatiza a relação entre *movimento e agente causal*: basicamente, ele estabelece que não é necessária uma ‘*força*’ – uma causa, ou seja, ação por contato – para produzir o movimento (retilíneo e uniforme). Para Descartes, *as causas são os próprios corpos*, na medida em que são dotados de quantidade de movimento, e o princípio de inércia é tão somente a constatação de que, na ausência de interações, a quantidade de movimento de um corpo se conserva. Por outro lado, em Galileu, a formulação é sutilmente diferente e, em pelo menos um aspecto, vai um pouco adiante, pois, além de estabelecer, na essência, a mesma independência entre movimento e agente causal, ele também enfatiza uma relação entre *movimento e sistema de referência*. Talvez não seja totalmente despropositado dizer que, enquanto Descartes pensava em um “princípio de inércia *dinâmico*” – que não era mais do que uma forma de articular o seu princípio de conservação da quantidade de movimento –, Galileu pensava em um “princípio de inércia *cinemático*”. Novamente, foi apenas no contexto da nova dinâmica, formulada por Newton, que essas duas “interpretações” puderam ser, definitivamente, unificadas [39].

## VII. A NATUREZA DA GRAVIDADE: A TEORIA DOS VÓRTICES

Ainda assim, é possível fornecer melhores justificativas do motivo pelo qual Descartes defendeu um princípio de inércia retilíneo. Novamente, a explicação mais razoável só pode ser encontrada nas exigências de sua metafísica. Quando Galileu estabeleceu o princípio, ele procurou compatibilizá-lo com as evidentes inclinações naturais dos corpos pesados de dirigirem-se ao centro da Terra, de tal modo que o seu princípio de inércia valeria exatamente quando os corpos fossem *impedidos* de realizar sua inclinação natural. Portanto, seu princípio de inércia é profundamente mesclado com os efeitos da gravidade. Nesse sentido, o “verdadeiro movimento inercial” de um corpo, quando ele *de fato* estivesse completamente livre para seguir suas inclinações naturais, deveria ser uma

composição de movimentos circular e radial [9].

Descartes, por sua vez, não podia aceitar nenhum ingrediente oriundo da metafísica aristotélica, principalmente a explicação dos efeitos da gravidade através de obscuras inclinações naturais. No sistema cartesiano, *tudo* tinha que ser explicado *exclusivamente* em termos de extensão e movimento, *inclusive os efeitos da gravidade*. Há, entretanto, como sabemos, *dois* efeitos da gravidade que, até a época de Galileu e Descartes, estavam completamente desconectados: a queda dos corpos em direção ao centro da Terra e a órbita dos planetas. Galileu continuou a conceber esses dois fenômenos como sendo intrinsecamente diferentes. Descartes, porém, os viu como efeitos devidos essencialmente aos mesmos princípios físicos, e isso se deve, voltamos a enfatizar, exclusivamente à sua metafísica.

Com relação ao problema das órbitas, era crucial *explicá-las* e não assumi-las como um dado primário. Nesse sentido, o enunciado do princípio de inércia retilíneo aplicou um segundo golpe na ideia de necessidade metafísica dos movimentos circulares planetários [40]. Afinal, no novo contexto dinâmico, movimentos que se desviassem de linhas retas requereriam uma explicação pela presença de um agente mecânico (através de impactos) [41]. Por outro lado, como no universo cartesiano não havia lugar para o espaço *vazio*, toda partícula ou corpo que se movesse devia fazê-lo, necessariamente, cedendo lugar, *instantaneamente*, a outra partícula ou corpo, como nos movimentos de um fluido completamente *incompressível e sem atrito*. (Essas são consequências necessárias da identificação da matéria com extensão geométrica e da imposição de conservação da quantidade total de movimento do universo.) Isso implicava uma dinâmica global em que cada elemento de matéria devia mover-se em um *circuito fechado*. É importante parar para refletir sobre esse ponto: por maiores que sejam os circuitos, eles devem ser *fechados*. Essa é uma consequência necessária, dentro de um universo constituído por um *plenum* de matéria, ou seja, um todo *contínuo e compacto*, onde não existem nem fontes nem sorvedouros de matéria. Além disso, todos os circuitos fechados deveriam mover-se como um *bloco único*, dada a incompressibilidade da matéria. Isso quase automaticamente implica que o universo, que é considerado infinito, deva ser constituído por um número ilimitado de *vórtices* adjacentes, mas interligados e estruturados, como em um reticulado. Essa *teoria dos vórtices* cartesiana possibilitava explicar os movimentos circulares dos planetas. Contudo, ela fazia um pouco mais: ela também era capaz de explicar o fenômeno de queda dos corpos pesados, na superfície da Terra [14, 15, 17].

De fato, nos movimentos circulares, os corpos têm uma permanente tendência a afastarem-se do centro em torno do qual se movem: uma tendência *centrífuga* [14, 15, 17]. As variadas tendências centrífugas dos “elementos” constituintes de cada vórtice geram *pressões* nas camadas imediatamente exteriores. Por outro lado, em um circuito fechado, qualquer afastamento que uma partícula

realize com relação ao centro do vórtice deve ser instantaneamente compensado pela aproximação de uma outra partícula, pertencente ao mesmo circuito fechado, o que gera uma *contrapressão*, na direção do centro, ainda que efetuada em uma outra parte do sistema. Assim, uma *órbita* é estabelecida pelo balanço dinâmico entre a tendência centrífuga do próprio planeta e a contrapressão, efetuada sobre ele, que surge como consequência da tendência centrífuga de outras partes da matéria que constitui o vórtice. Entretanto, se esse balanço fosse rompido, um corpo poderia ou afastar-se do centro ou aproximar-se. O *peso* dos corpos na superfície terrestre, ou seja, a sua *gravidade*, era, portanto, explicado como uma *deficiência de tendência centrífuga* com relação à matéria circundante, de tal modo que os corpos eram impelidos para o centro de um vórtice, convenientemente imaginado em torno da Terra, com limite superior situado na altura da órbita lunar [42].

## VIII. EPÍLOGO

O desconhecimento da verdadeira natureza da gravidade estorvou os cientistas por séculos em sua busca por compreender a natureza do movimento, por identificar seus verdadeiros agentes causais e por determinar quais efeitos eram aparentes e quais eram reais. Foram todas essas dificuldades que estiveram envolvidas na descoberta do princípio de inércia. Para Galileu, o princípio de inércia devia estar, necessariamente, compatibilizado com a inclinação natural de queda dos corpos, considerada como dado primário. Para Descartes, o princípio de inércia foi a chave para a sua elucidação da gravidade como um mero efeito: balanço ou deficiência de força centrífuga, conforme o caso. Para ambos, portanto, *a gravidade não era uma força*. Como se sabe, coube a Newton prover uma solução unificada para esses problemas criando, para isso, o moderno conceito de força e articulando-o com sua grande descoberta da “verdadeira” natureza da gravidade, por meio de sua *teoria da gravitação universal*. Essa é, entretanto, uma outra história. A história de uma teoria extremamente bem sucedida. Pelo menos, por “curtos” 230 anos...

A história pode ser cruelmente irônica. Como se sabe, já por volta do final do século XIX, a física newtoniana começou a ser superada em duas frentes. Uma delas consistiu justamente no advento da teoria da relatividade geral, criada por Albert Einstein, que acabou por mostrar que a gravidade não era, no fim das contas, uma força, mas sim algo relacionado com a *geometria* do espaço-tempo. De fato, a gravidade foi identificada com a *curvatura* do espaço-tempo, gerada pela presença de matéria/energia. O princípio de inércia não ficou, como é evidente, incólume. No contexto da relatividade geral, o movimento dos corpos livres da ação de agentes causais não é mais retilíneo, mas *curvo*, ou melhor, *geodésico*.

Embora seja totalmente anacrônico imaginar Galileu pensando nesses termos, vimos que ele sempre fez, impli-

citamente – assim como fora o caso do próprio Aristóteles – uma diferença entre as *naturezas* da gravidade e das forças em geral. Contudo, ainda que se possa ver, nesse fato, que Galileu continuava atrelado a alguns resquícios de uma visão aristotélica, ao propor um tratamento *matemático*, ele certamente preparou o caminho para a subsunção do conceito de gravidade pelo conceito de força, efetuado por Newton. Só *matematicamente* esse passo foi possível, pois, passando ao largo de considerações de *natureza*, as relações matemáticas permitiram que fenômenos a princípio qualitativamente diversos pudes-

sem ser concebidos como quantitativamente equivalentes. Porém, a história continuou. E continua...sempre...

## IX. AGRADECIMENTO

O autor agradece ao professor Olavo Leopoldino da Silva Filho pela inestimável leitura do original, bem como por algumas sugestões, sobretudo no que se refere à discussão da física aristotélica.

- 
- [1] Newton, I., Cohen, I. B., Whitman, A. *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Berkeley: University of California Press, 1999.
- [2] Barbosa, P. V., Polito, A. M. M., Olavo, L. S. F. *Espaço, Tempo e Realidade: um Estudo Comparativo entre Três Concepções de Mundo*. Cad. Bras. Ensino de Física, v. 31, no 3 (2014) p. 571-600.
- [3] Aristóteles. *Metaphysics* (traduzido para o inglês por Sachs, J.). Oxford: Oxford University Press, 2008.
- [4] Aristóteles. *Physics* (traduzido para o inglês por Waterfield, R.). Oxford: Oxford University Press, 2008.
- [5] Jammer, M. *Concepts of Force: A Study in the Foundations of Dynamics*. New York: Dover, 1999.
- [6] Westfall, R. S. *The Construction of Modern Science: Mechanisms and Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1977.
- [7] Burt, E. A. *As Bases Metafísicas da Ciência Moderna*. Brasília: Editora UnB, 1984.
- [8] Cushing, J. T. *Philosophical Concepts in Physics: The Historical Relations Between Philosophy and Scientific Theories*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [9] Swerdlow, N. M. *Galileo's Mechanics of Natural Motion and Projectiles*, em *The Oxford Handbook of The History of Physics*, editado por Buchwald, J. Z. e Fox, R. Oxford: Oxford University Press, 2013.
- [10] Grant, E. *Physical Science in the Middle Ages*. Cambridge: Cambridge University Press, 1977.
- [11] Glick, T. F., Livesay, S. J., Wallis, F. *Medieval Science, Technology and Medicine: an Encyclopedia*. UK: Routledge, 2005.
- [12] Dugas, R. *A History of Mechanics*, NY: Dover Publications, 1988.
- [13] Pav, P. A. *Gassendi's Statement of the Principle of Inertia*. Isis, v. 57, no 1 (1966) p. 24-34.
- [14] Slowik, E. *Cartesian Spacetime*. Dordrecht: Kluwer, 2002.
- [15] Gaukroger, S., Schuster, J., Sutton, J. (eds.). *Descartes' Natural Philosophy*. London: Routledge, 2000.
- [16] Galilei, G. *Dialogues Concerning Two New Sciences*. NY: Prometheus Book, 1991.
- [17] Schuster, J. *Cartesian Physics*, em *The Oxford Handbook of The History of Physics*, editado por Buchwald, J. Z. e Fox, R. Oxford: Oxford University Press, 2013.
- [18] Descartes, R. *Oeuvres de Descartes*. Adams, C. e Tannery, P. (eds.). Paris: J. Vrin, 1976.
- [19] Descartes, R. *The World*. Mahoney, M. S. (trad.). New York: Abaris Books, 1979.
- [20] Descartes, R. *Principles of Philosophy*. Miller, V. R. e Miller, R. P. (trad.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1983.
- [21] Torretti, R. *The Philosophy of Physics (The Evolution of Modern Philosophy)*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [22] Abrantes, P. C. *Imagens de Natureza, Imagens de Ciência*. Campinas: Editora Papirus, 1998.
- [23] O conceito de *estado* é bastante complexo e não é meu objetivo, neste trabalho, empreender uma discussão exaustiva a esse respeito. Ele passou por um longo processo de construção, até resultar no moderno conceito de *estado físico*. Ocorre que o que se designa por *estado*, na física, depende fundamentalmente de qual é a teoria que se está considerando. E isso tem implicações no modo como o conceito é articulado matematicamente. Na formulação hamiltoniana da mecânica clássica, o estado é representado por um ponto no espaço de fases de  $2N$  dimensões, onde  $N$  é o número de graus de liberdade do sistema físico. Na formulação usual da mecânica quântica, ele é representado por uma *direção* (a classe de equivalência de vetores proporcionais entre si) em um *espaço de Hilbert*. Na termodinâmica, é representado por um ponto em um espaço de configurações abstrato rotulado pelas variáveis extensivas de um sistema macroscópico em equilíbrio. Em quaisquer dos casos, entretanto, o que se deseja é que o estado possua um *descriptor matemático* que represente um sistema físico de maneira suficientemente *completa*, ou seja, de tal forma que ele permita que, dadas as *leis físicas* que regem o sistema, seja possível prever, *deterministicamente*, sua evolução temporal, em pelo menos algum sentido a ser especificado. (Isso significa que as leis devem ser suficientes para, dado o estado anterior, prever o estado posterior do sistema físico.) Assim, o que eu designo, no presente contexto, por *estado* corresponde justamente ao descriptor matemático que melhor se adequa à formulação *vetorial* da mecânica newtoniana de pontos materiais. Isso significa que o estado é especificado por dois *vetores*: o vetor *posição* e o vetor *velocidade*. O mais relevante, entretanto, é observar que, qualquer que seja a teoria a ser considerada, o estado, por ser um descriptor matemático, é *relativo*. Isso significa que ele depende, crucialmente, da noção de observador que, fisicamente, corresponde essencialmente a um *sistema de referência*. E, ainda, é apenas com *relação* a um sistema de referência que se pode descrever, sem ambiguidades, não apenas o próprio estado, mas, principalmente, o processo de *mu-*

*dança de estado*. Dessa forma, qualquer outra propriedade que se queira imputar a sistemas físicos que seja *invariante* por mudanças de sistemas de referência é denominada de *intrínseca ou absoluta*. Pelo que ficou exposto, é evidente que nem toda mudança envolvendo o estado de um sistema físico é absoluta. Ainda no contexto da mecânica newtoniana, mudanças de posição (que envolvem, portanto, a velocidade), não podem ser absolutas, mas mudanças de velocidade (aceleração), sim. O fato é que, para corresponder a uma mudança absoluta, uma mudança precisa ter um *agente causal* associado. À mudança de velocidade está associada uma *força impressa*. Em princípio, poder-se-ia argumentar que também a mudança de posição tem um "agente causal" associado, a saber, o *momento mecânico* (a rigor, o momento mecânico dividido pela massa inercial da partícula). Porém, é precisamente isso que diferencia a concepção de movimento newtoniana da aristotélica. Como veremos nas seções seguintes, negar a existência de um agente causal para a mudança de posição está no cerne da concepção de inércia de Galileu, Descartes e Newton. Por fim, vale salientar que, nesse mesmo contexto, a propriedade intrínseca relevante é a *massa inercial*. Isso não quer dizer, obviamente, que propriedades invariantes sejam, necessariamente, *imutáveis*. Apenas quer dizer que, no contexto dinâmico de aplicação da teoria, requer-se que tais propriedades sejam *contingencialmente* imutáveis, quando elas forem *dinamicamente relevantes*, como é o caso da massa inercial.

- [24] É importante salientar que, por *aparências*, não se está querendo afirmar que mudanças de posição sejam *ilusórias*. Aparências são modos particulares de existência intrinsecamente dependentes da existência de observadores e, portanto, também apresentam um caráter de realidade. (Não é, portanto, o caso de se dizer que, no contexto da relatividade restrita, espaço e tempo, como medidos em um sistema de referência inercial, sejam irrealis ou ilusórios. Eles são, entretanto, relativos.) Com o fim de simplificar a discussão, entretanto, reservamos o adjetivo *real* para aquelas propriedades que são independentes da existência de observadores, ou seja, absolutas [2].
- [25] Estamos assumindo que definir *fisicamente* um espaço-tempo corresponde a prescrever qual é a classe de geodésicas, ou seja, das curvas correspondentes ao movimento que objetos, massivos ou não (e.g., luz), apresentam quando são considerados livres da atuação de agentes externos. No caso não-relativístico, as simetrias do espaço-tempo correspondem a todas as transformações de coordenadas que preservam essas geodésicas para objetos massivos (o grupo de Galilei). Já as simetrias do espaço-tempo relativístico incluem a preservação das geodésicas também para a luz, estendendo o princípio de relatividade da mecânica para a ótica (o grupo de Poincaré). Essa extensão, contudo, não é trivial, pois as simetrias do espaço-tempo relativístico fazem algo muito mais dramático: elas preservam não apenas o movimento retilíneo e uniforme da luz, mas também a sua *velocidade*. O que caracteriza, portanto, as simetrias do espaço-tempo relativístico é a invariância do chamado *cone de luz*. Observe-se que, na presença de campos de força, o espaço vazio perde, na prática, suas simetrias, ou seja, entre outras coisas, suas características peculiares de homogeneidade e/ou isotropia. Esses campos de força, sendo associados a verdadeiros agentes causais, devem ser descritos por vetores próprios, de modo que sua covariância articule sua invariância com relação a sistemas de referência inerciais. Essa prescrição permite "restaurar" a identidade ontológica do espaço vazio, essencialmente capturada pela sua geometria euclidiana. Contudo, parece haver uma boa dose de arbitrariedade e convencionalismo na escolha de preservar a geometria euclidiana e associar os desvios com relação aos movimentos retilíneos (e uniformes) a uma força ou, por outro lado, alterar a geometria euclidiana – e, com ela, a classe de curvas geodésicas – e, ao mesmo tempo, eliminar a força como verdadeiro agente causal. (Esse ponto foi brilhantemente argumentado por Henry Poincaré, ao investigar filosoficamente o impacto das geometrias não-euclidianas na física.) Embora dentro de um contexto geométrico diferente (e mais amplo, já que não se trata mais apenas do espaço, mas do *espaço-tempo*), a teoria da *gravidade* da relatividade geral é, essencialmente, uma escolha por essa última opção. Porém, mesmo dentro do contexto da mecânica clássica não-relativística, a eliminação da força como agente causal é um fato consumado nas formulações analíticas. Na mecânica de Lagrange, por exemplo, a eliminação das forças de vínculo, a formulação variacional em termos de funções escalares (energias cinética e potencial) e a restrição da dinâmica às coordenadas generalizadas conduz a uma descrição em que a mecânica é traduzida na linguagem da geometria diferencial (riemmaniana). Desse modo, o espaço no qual o sistema mecânico se move, embora não seja mais considerado o "espaço físico", é *curvo*.
- [26] É interessante observar que, se analisada em termos modernos, essa afirmação pode não ser, de fato, inteiramente correta. Se insistirmos em conceber o universo aristotélico como *esfericamente simétrico* – e, portanto, *isotrópico* – há uma ambiguidade na definição de lugar natural que o torna dependente da *orientação* do sistema de referência (centrado no centro da Terra). Essa sutileza é, contudo, irrelevante para o que se segue, pois, além do universo aristotélico não ser homogêneo, ele também não comporta uma simetria entre observadores em movimento relativo, o que é um ingrediente essencial para a concepção newtoniana de movimento.
- [27] Curiosamente, na formulação variacional ou *energeticista* da mecânica (não adotada por Newton, mas por outros físicos, sobretudo a partir do século XVIII) uma certa ideia de causalidade final parece ter sido preservada. Contudo, pode-se dizer que, *grosso modo*, a passagem da física aristotélica para a física newtoniana apenas preservou a causalidade do tipo eficiente.
- [28] Embora o movimento não possa ser considerado uma *propriedade* intrínseca de um corpo, já que se define em *ato*, por outro lado, uma *propensão* ao movimento pode ser tratada como uma propriedade intrínseca. Essa *propensão* ao movimento (dado o lugar inicial do corpo) é, de fato, *absoluta*. Neste caso, entretanto, em potência, não em ato.
- [29] Os mistérios envolvendo a força gravitacional, entretanto, não foram devidamente desvendados até hoje. Einstein foi criador da revolucionária teoria sobre a gravidade que superou a teoria da gravitação universal de Newton, concebendo a gravidade como um certo tipo de *campo*. Ainda assim, até hoje não foi possível unificar a força da gravidade com as demais interações da natureza, em grande parte devido a características que lhe são intrínsecas e que

- a fazem bastante diversa das demais teorias de campo.
- [30] Simplício era (dos três personagens) o representante do aristotelismo nas grandes obras galileanas *Diálogo Sobre os Dois Principais Sistemas do Mundo* (1632) e *Discursos e Demonstrações Matemáticas sobre Duas Novas Ciências* (1638). Os outros dois eram Salviati, porta-voz de Galileu e do copernicanismo, e Sagredo, um personagem neutro e cientificamente leigo, mas inteligente, que acabava tomando sempre o partido de Salviati, em razão das evidências apresentadas e de sua argumentação superior.
- [31] Essa forma explícita do princípio de inércia apareceu não no *Diálogo*, mas na outra grande obra de Galileu, os *Discursos*. Além disso, é interessante observar que Galileu jamais usou o termo *inércia*. Foi Kepler quem o introduziu, porém, para Kepler, inércia significava tão somente *resistência a entrar em movimento*, ainda dentro do sentido aristotélico de que o repouso era uma propriedade intrínseca aos corpos.
- [32] Note-se o modo como o conceito de estado apareceu na física. Não sendo mais um atributo dos corpos (como são o seu tamanho, massa, carga elétrica, etc.), o estado passou a ser uma característica associada a *alguma outra coisa*. Na verdade, o estado é um *aspecto* segundo o qual o corpo se apresenta para um *observador*. Portanto, o estado é *relativo*. Mas a própria noção de observação não pode manter-se subjetiva. Daí a necessidade de atrelar a determinação do estado a um *sistema de referência*, que permite que o estado seja uma caracterização *matemática* e, portanto, objetiva. Embora o sistema de referência seja inicialmente uma construção matemática, ele não só pode como deve ser imaginado como um sistema *físico*, constituído por instrumentos de medida. Mais comumente, tal sistema é imaginado (na física newtoniana) como um conjunto de três eixos ortogonais em que unidades-padrão estendidas ao longo de tais eixos permitem medidas de comprimento. (Cf. também a nota 1.)
- [33] O conceito de massa inercial também possui antecedentes na física medieval. Preocupados com um sério problema relacionado com a queda livre no espaço vazio – que, pela “fórmula” aristotélica dos movimentos naturais, implicaria velocidade infinita – os filósofos medievais perceberam uma maneira de reinterpretar a grandeza  $R$ , no denominador, como *resistência interna* do corpo, e não como resistência do meio [10].
- [34] O relato dessas experiências aparece na terceira jornada dos *Discursos*. Essa obra, também em forma de diálogo, era dividida em quatro jornadas, ou dias de discussão. As duas primeiras tratavam de problemas de coesão e resistência dos corpos, enquanto as duas últimas tratavam da cinemática [16].
- [35] É interessante observar que essa forma galileana do princípio de inércia guarda certa semelhança *conceitual* com a da moderna teoria da gravidade, a *teoria da relatividade geral*, conforme voltaremos a frisar, ao final desse trabalho.
- [36] Galileu sempre se referiu assim aos movimentos sob a ação da gravidade. Isso mostra em que medida ele ainda estava atrelado a certas parcelas da visão de mundo aristotélica [5-7].
- [37] O termo *filosofia mecânica* foi cunhado por Robert Boyle (1627-1691), um destacado cientista da Revolução Científica que trabalhou inteiramente sob o escopo dessa visão de mundo [6].
- [38] É nesse ponto que a forma encontrada por Galileu para o princípio de inércia parece ser superior, ao menos no que se refere aos desenvolvimentos posteriores da mecânica. Galileu tinha plena consciência da natureza *relativa* dos estados de movimento e repouso. Em termos não apenas físicos, mas também metafísicos, a ênfase de Descartes residia em um princípio de conservação, ao passo que Galileu enfatizava o papel dos sistemas de referência, tendo sustentado o seu princípio com base na relatividade do movimento. Contudo, é interessante observar que, do ponto de vista metafísico, *Newton também sustentava essa mesma distinção fundamental entre movimento e repouso*, através de sua teoria do *espaço absoluto* [1]. Newton, entretanto, tinha perfeita consciência de que, do ponto de vista *físico*, era impossível *observar* essa diferença.
- [39] Porém, Christiaan Huygens (1629 - 1695), outro gigante da Revolução Científica, foi o primeiro a perceber o uso dinâmico do conceito de “inércia cinemático”, ao utilizá-lo para corrigir as regras de colisão de Descartes [21].
- [40] O primeiro golpe fora dado por Kepler, com a descoberta das trajetórias elípticas.
- [41] Embora Kepler tenha precedido Descartes na proposição de um *mecanismo* para explicar os movimentos dos corpos celestes, os elementos desse mecanismo eram inaceitáveis para a filosofia mecânica já que, entre outras coisas, invocavam “forças ocultas” (a *anima motrix* de Kepler) [6].
- [42] Também Newton procuraria, inicialmente, por um modelo de explicação da gravidade nesses termos, ou seja, através de um modelo “convectivo” [22]. É interessante observar que esse modelo “vortical” deveria implicar uma impulsão cuja direção seria perpendicular ao eixo de rotação da Terra, e não radialmente dirigida para o seu centro, o que exhibe não apenas uma falha grave do modelo, mas, também demonstra que havia uma grande tolerância, por parte de Descartes, com relação a eventuais discrepâncias.