

Universidade de Lisboa

Faculdade de Letras

Departamento de Estudos Clássicos



Princípios Matemáticos da Filosofia Natural:
A lei de inércia

Raquel Balola

Mestrado em Estudos Clássicos

(Edição e Tradução de Textos Clássicos)

2010

Universidade de Lisboa

Faculdade de Letras

Departamento de Estudos Clássicos



Princípios Matemáticos da Filosofia Natural:
A Lei de inércia

Dissertação orientada pelos Prof. Doutores Arnaldo Espírito Santo e Ricardo Lopes
Coelho

Raquel Balola

Mestrado em Estudos Clássicos

(Edição e Tradução de Textos Clássicos)

2010

Ao Carlos Filipe,

Pois sem ti não seria possível...

RESUMO

O presente trabalho consiste na tradução dos fundamentos dos *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de Newton, ou seja, da parte axiomática, e no seu estudo, dando principal relevância ao estudo da Primeira Lei de Newton, ou lei da inércia.

Na tentativa de compreender a importância que a Primeira Lei de Newton assume na história da ciência, é impreterível que se recue a Aristóteles, e aos primórdios dos estudos sobre o movimento e que, a partir de aí, se acompanhem as contribuições que autores posteriores tiveram no desenvolvimento desta ciência, para uma melhor percepção das alterações que esta física sofreu até ao tempo de Newton.

Dada a extensão do objecto em estudo, cingimo-nos aos autores principais, Aristóteles, Kepler, Galileu, Descartes, Huygens, visto terem sido estes os autores que mais contribuíram para o desenvolvimento da lei consagrada por Newton.

No entanto, não é um objectivo deste trabalho fazer um resumo da história da ciência, mas sim fazer uma síntese da génese e evolução do conceito de inércia, que culmina na Primeira Lei de Newton, para que se compreenda em que contexto surgiu e que condições proporcionaram o seu aperfeiçoamento. Assim sendo, analisámos e comparámos os textos dos referidos autores que mais importância tiveram nas alterações que o conceito de inércia experimentou até assumir a sua forma final nos *Principia*.

Como grande parte da nossa atenção incide sobre a história do conceito em Newton, faz todo o sentido o debruçar sobre o texto original dos *Principia*, mais concretamente sobre a terceira e última edição, tentando entender a importância do termo na obra que o consagrou. Assim sendo, é indispensável a sua versão para a nossa língua, permitindo uma maior aproximação ao texto original.

Em termos gerais, conclui-se que os predecessores de Newton foram essenciais, e as suas contribuições bastante significativas para que Newton chegasse onde chegou, no entanto, não podemos esquecer o mérito pessoal do autor.

Palavras-chave: *Principia*, inércia, primeira lei de Newton, estado, repouso, movimento rectilíneo e uniforme.

Abstract

This work consists of translating the fundamentals of Newton's *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, that is, from axiomatic, and in his study, giving primary importance to the study of Newton's First Law, or the law of inertia.

In an attempt to understand the importance that Newton's First Law takes in the History of Science, it is imperative to go back to Aristotle, and early studies on movement and, from there, understand the contributions that later authors have given to the development of this science.

Given the extent of the object under study, we tried to focus on the main authors, like, Aristotle, Kepler, Galileo, Descartes, Huygens. These authors contributed the most to the development of the law laid down by Newton.

The main goal of this study is to review the evolution of the concept of inertia, which culminated in Newton's First Law. In order to understand the context in which they arose and the conditions provided its improvement. Therefore, we analyzed and compared the texts of those authors who had the most important changes that the concept of inertia tried to take it a final shape in the *Principia*.

Our attention focused on the history of the concept in Newton, it makes sense to look into the original text of the *Principia*, more specifically on the third and last edition, and trying to understand the importance of the term in the work that made him famous. Therefore, it is indispensable to our language version, allowing closer to the original text.

Overall, we conclude that Newton's predecessors were essential, and their very significant contributions to Newton where he arrived, however, we can not forget the value of the discovery of the author.

Key-words: *Principia*, inertia, Newton's first law, state, rest, uniform and rectilinear motion

Agradecimentos

A elaboração desta tese só foi possível graças ao apoio de muitas pessoas, a quem devo os meus mais sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar, aos meus orientadores. Ao Professor Doutor Arnaldo Espírito Santo, por me ter dado a conhecer a obra de Isaac Newton, por me ter mostrado que havia muito mais do que a literatura e cultura com que tomamos contacto durante a nossa licenciatura em Estudos Clássicos. Também não poderia deixar de agradecer, o apoio, paciência e disponibilidade demonstrada ao longo deste percurso, e, do mesmo modo, agradecer as suas sugestões e larga experiência que contribuíram de forma substancial para uma melhoria no trabalho. Ao Professor Doutor Ricardo Coelho, por me dar a conhecer a área de História e Filosofia das Ciências, que me trouxe uma nova perspectiva de olhar e pensar o tema. E como não poderia deixar de ser, a sua dedicação, a sua ajuda e disponibilidade indefectível para uma melhor compreensão dos assuntos abordados, a sua valiosa contribuição na partilha do seu conhecimento e a disponibilização de material bibliográfico essencial para o progresso e desenvolvimento do trabalho. O resultado final não seria possível sem os seus incansáveis esforços.

Em segundo, gostaria também de deixar patente a minha gratidão ao corpo docente do Departamento de Estudos Clássicos da Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, pelo muito que me ensinaram ao longo do meu percurso, que tanto contribuiu para estimular o meu interesse pelo conhecimento da Língua e Cultura Greco-Latina.

Agradeço também à minha família e, em especial, à minha irmã Ana, pelo seu apoio e tempo dedicados. Ao meu namorado, Carlos Filipe, sempre paciente, pelo seu apoio e incentivo, incondicionais e incansáveis, tidos durante esta longa jornada, que se revelaram fundamentais para a elaboração e concretização desta tese.

Devo ainda agradecer à Marina Castanho, que se revelou uma amiga sempre presente, com palavras de estímulo e sempre encorajadora. À Susana Costa que, apesar de ausente, nunca deixou de demonstrar a amizade e estima e o seu inconcusso apoio. À Alexandra Caroco pela sua ajuda na compilação dos materiais.

A todos, muito obrigada.

ÍNDICE GERAL

INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO INTRODUTÓRIO	3
I - Isaac Newton.....	3
II - As Duas Rubricas	7
CAPÍTULO 1 - PRINCÍPIOS MATEMÁTICOS DA FILOSOFIA NATURAL.....	18
Introdução ao Aparato Crítico	18
Guia do Aparato Crítico	19
Aparato Crítico e Tradução	20
CAPÍTULO 2 - INÉRCIA: GÊNESE E EVOLUÇÃO DE UM CONCEITO	47
2.1 - Inércia.....	47
2.2 Aristóteles.....	48
2.3 Johannes Kepler (1571-1630).....	53
2.4 Galileu Galilei (1564-1642)	58
2.5 René Descartes (1596-1650)	71
2.6 Christiaan Huygens (1629-1697)	80
2.7 Isaac Newton	82
CONCLUSÃO.....	98
BIBLIOGRAFIA	101

INTRODUÇÃO

A presente tese, intitulada “*Princípios Matemáticos da Filosofia Natural: A Lei de Inércia*”, reveste-se de real importância tendo em conta que não existe em língua portuguesa uma tradução dos *Principia*, o que representa uma grave lacuna na literatura de Newton. O facto de a obra em questão assumir especial destaque no panorama científico, por ser, provavelmente, a obra mais importante jamais publicada no contexto das Ciências Naturais, resultando do culminar de milhares de anos de estudo sobre o movimento foi um factor de motivação decisivo na escolha do tema.

Assim, o nosso trabalho compõe-se da tradução dos fundamentos dos *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de Isaac Newton e do estudo da lei de inércia, tentando compreender a importância do conceito na história da ciência. No entanto, dada a extensão e abrangência do tema, que inclui inúmeros autores de diversas épocas, cingir-nos-emos apenas às figuras principais, cujas contribuições foram mais importantes e significativas para o desenvolvimento do conceito, dando especial relevância a Newton e aos *Principia*, visto que foi este o autor que consagrou o termo e o elevou ao seu expoente máximo.

Todos reconhecem a posição de Isaac Newton na história da ciência, de tal modo que muitos autores defendem que o seu trabalho é um dos maiores alcançados pelo intelecto humano. Como refere Richard Westfall, com Newton, a filosofia mecanicista da natureza atingiu um tal grau de sofisticação que iria fornecer as bases do pensamento científico por mais de duzentos anos. No entanto, escreveu Newton numa carta a Robert Hooke, em 1676¹, “if I have been able to see further, it was only because I stood on the shoulders of giants.”² Assim sendo, para compreendermos como se tornou possível que Newton formulasse a lei de inércia e para entendermos este princípio em toda a sua extensão revela-se essencial o retroceder às origens da ciência do movimento e que, a partir daí, se trace a história do seu desenvolvimento, tendo em conta a interdependência dos acontecimentos. É preciso ter presente que os avanços da ciência dependem, sempre,

¹ Como esclarece Stephen Hawking (2002: ix), Newton, na ocasião, referiasse às suas descobertas em óptica, e não aos seus trabalhos mais importantes sobre a gravitação universal e sobre a lei dos movimentos.

² Refere Alexandre Koyré (1968: 11) que esta famosa frase de Newton não é da sua autoria, mas que teria tido origem na Idade Média com Bernard Chartres.

da contribuição de diferentes autores. Quando alguma descoberta é anunciada, é necessário perceber que ela não nasceu apenas de um só homem, é fruto de uma sabedoria combinada. Todos dependem do trabalho dos seus antecessores. Cada um acrescenta algo ou apresenta uma forma diferente de pensar o mesmo problema e, deste modo, a ciência evoluciona.

Esta dissertação na globalidade visa dois objectivos primordiais. O primeiro tem como propósito verter para a língua portuguesa uma obra basilar da ciência moderna, tornando acessível o seu conteúdo, essencial para a compreensão das leis do movimento que regem a física. Como segundo objectivo, pretendemos, através de uma breve incursão pelo nascimento e evolução do conceito de inércia, mostrar porque é que a física moderna considera a lei de inércia como o seu princípio fundamental e porque é que só ganhou expressão com Newton.

A tese foi estruturada da seguinte forma. A primeira parte corresponde a um capítulo introdutório onde se fará um breve resumo da vida de Newton, e também uma apresentação expositiva do sistema axiomático dos *Principia*. A segunda parte está subdividida em duas. A primeira secção consistirá num guia do aparato crítico que será utilizado, para facilitar a sua consulta e compreensão. A segunda secção constituirá o aparato crítico e tradução, propriamente ditos. Na tradução, tentei o mais possível ser fiel ao texto original, para não deturpar o sentido do mesmo. Para a tradução foi utilizado o original latino, de acordo com a terceira edição e última edição, datada de 1726. Pretende-se também fazer a reprodução do texto latino, com base na terceira edição, elaborada pelo próprio autor pouco antes de morrer. A terceira e última parte, consta de um capítulo sobre o estudo da lei de inércia, do qual gostaria de salientar o seu carácter introdutório. Neste capítulo procederemos a uma hermenêutica de alguns textos mais significativos para o tema em análise, que nos permitirá aumentar o nosso conhecimento sobre o tema.

CAPÍTULO INTRODUTÓRIO

I - Isaac Newton

“Nature and Nature’s Laws lay hid in night;
God said, “Let Newton be,” and all was light.”³

Alexander Pope

Isaac Newton⁴ nasceu, prematuramente, em 25 de Dezembro de 1642⁵, em Woolsthorpe, Lincolnshire, Inglaterra. Era filho de Isaac Newton e de Hannah Ayscough. Quando Newton nasceu, seu pai tinha falecido há apenas 2 meses.

Algum tempo depois, sua mãe voltou a casar, com Barnabas Smith, reverendo de North Witham, tendo abandonado Newton aos cuidados dos avós maternos. Newton tinha então três anos de idade.

Isaac Newton frequentou a escola local de Woolsthorpe, onde aprendeu a escrever e a ler. Foi criado pela sua avó materna até Agosto de 1653, data em que faleceu o seu padrasto e a sua mãe voltou para a sua antiga casa, trazendo consigo mais três filhos, meio-irmãos de Newton.

Newton herdou os livros que eram do seu padrasto, sobre teologia, e entre os quais se encontrava um caderno de anotações das leituras do seu padrasto o qual Newton aproveitou para si e ao qual chamou *Waste Book*. Segundo Richard Westfall (1983), este *Waste Book* contém os primeiros passos de Newton no cálculo e os primeiros passos na mecânica.

³ A Natureza e as suas leis jaziam ocultas nas trevas, Deus disse: «Faça-se Newton!», e em todo o lado se fez luz.

Epitáfio escrito para o túmulo de Newton na abadia de Westminster, porém não foi autorizado a aí ser colocado. Segundo Edwin Arthur Burt (1980), o epitáfio encontra-se em *Poetical Works*, Glasgow, 1785, vol. II, p. 342.

⁴ Para uma bibliografia mais aprofundada recomendo a leitura de dois livros de Richard Westfall: *Never at Rest: a biography of Isaac Newton* e *The life of Isaac Newton*. O primeiro livro é uma bibliografia exaustiva que inclui aspectos técnicos e matemáticos. A segunda referência é uma súmula do primeiro livro, tendo como alvo um público mais lato. Também Alfred Rupert Hall lhe dedica uma biografia *Isaac Newton: adventurer in thought*.

⁵ Segundo Richard Westfall, na Inglaterra, naquela época ainda vigorava o calendário juliano. Assim sendo, pelo calendário gregoriano, Isaac Newton nasceu a 4 de Janeiro de 1643.

Em 1655, Newton é enviado para a Free Grammar School of King Edward VI de Grantham, que poucos quilómetros distava de Woolsthorpe. Durante essa época, Newton ficou a viver em casa de Mr. Clark, o boticário de Grantham. Numa primeira fase, a adaptação à nova escola não foi fácil, estando entre os piores alunos da sua turma.

Durante a sua estada em casa do boticário, Newton foi desenvolvendo o seu gosto por pequenos objectos mecânicos que ele próprio construía, feitos com materiais que o próprio comprava com o dinheiro que recebia de sua mãe. Foi na escola, em Grantham, que iniciou a aprendizagem do latim e do grego, dos livros clássicos e também da Bíblia, sob o magistério de Henry Stokes.

Passados quatro anos de estar na escola em Grantham, a sua mãe exigiu-lhe que abandonasse a escola e que voltasse para a quinta, para que começasse a encarregar-se da mesma. Newton revelou um grande desinteresse pela quinta da família, então, sua mãe decidiu que o melhor seria Newton voltar a Grantham e preparar a sua entrada na Universidade de Cambridge. Quem preparou a sua entrada em Cambridge foi Stokes, que ao fim de cerca de 9 meses de preparação considerou Newton apto para entrar na Universidade.

Aos dezoito anos, no dia 5 de Junho de 1661, ingressa na Universidade de Cambridge, no Trinity College e diz-se que graças aos conhecimentos de sua mãe e da família Clark. Sua mãe tinha uma situação económica que podia fazer face às despesas de Newton na Universidade, no entanto, como não aceitava de boa vontade a ida do seu filho para Cambridge, reduziu-lhe o seu dinheiro, e como tal, Newton teve de servir à mesa os estudantes ricos e os *Fellows* do Trinity College, enquanto *subsizar*, para poder continuar os seus estudos ali.

Naquela altura, a Universidade de Cambridge era um centro de poder real e eclesiástico e o Trinity College era frequentado por candidatos a altos cargos eclesiásticos e do governo. Como tal, o ensino neste contexto era meramente escolástico o que desagradou a Newton que nunca frequentou assiduamente as suas aulas, preferindo a biblioteca, onde podia trabalhar e investigar sozinho. Como tal, embora pensemos que Newton deveria ter sido o melhor aluno, sendo aplicadíssimo, nada disso aconteceu. Os seus cadernos de apontamentos revelam a sua falta de interesse pelos programas curriculares e revelam também as suas leituras e o seu interesse de então. Leu obras de autores como Descartes, Gassendi, Galileu, Henry More, entre outros. Tudo o que sabia aprendeu sozinho nas suas leituras.

Em Abril de 1664 Newton é eleito *scholar* do Trinity College, conseguindo uma bolsa de estudos. É desse período que datam também notas e apontamentos seus sobre a geometria de Descartes. Ao mesmo tempo toma também contacto com o cálculo infinitesimal de Wallis. Conhece então Issac Barrow, que foi seu professor Lucasiano.

Em 1665, Newton acaba o seu bacharelato com distinção. No mesmo ano, a Universidade de Cambridge é fechada devido à peste bubónica que assolou Inglaterra e Newton vê-se obrigado a regressar a casa, em Woolsthorpe, durante cerca de 18 meses. Esse período de tempo, ou seja, os anos de 1665-1666, é designado pelo próprio «*annus mirabilis*». Foi nesta época que, segundo a lenda, uma maçã lhe caiu sobre a cabeça inspirando-o para o fenómeno da gravidade. Foi, também, neste período de tempo, que Newton desenvolveu o seu método das fluxões, as teorias de luz e cor, e adentrou bastante no conhecimento dos problemas dos movimentos dos planetas que, eventualmente, conduziram à posterior publicação dos *Principia*. A sua relação com Barrow já tinha, nesta altura, começado, e ambos desenvolvem uma série de estudos matemáticos, ópticos e alquímicos.

Em Abril de 1667, quando regressa a Cambridge, Newton é eleito *Minor Fellow* do Trinity. No ano seguinte ascende a *Senior Fellow* e recebe o seu degrau de mestre em Artes. A 29 de Outubro de 1669 assume a cátedra Lucasiana de matemática, que Barrow recusou em seu favor. O desempenho desta função permitiu-lhe que organizasse os resultados da sua investigação no domínio da óptica. Nos dez anos seguintes, até 1679 a sua atenção centrou-se em três áreas de investigação da filosofia natural: a óptica, a análise e a alquimia.

Newton, em 11 de Janeiro de 1672, entra para a Royal Society, como Membro, onde participa nos debates enviando ensaios sobre temas ópticos, e é também aí que faz a sua primeira participação pública.

Em 1679 morre a sua mãe e Newton volta a Woolsthorpe para tratar de assuntos familiares. Durante um curto período de tempo, Newton afasta-se da Royal Society e não participa mais em debates. Porém, em Novembro de 1679, inicia uma troca de correspondência com Robert Hooke sobre o movimento dos planetas. Esta correspondência cessaria no dia 13 de Dezembro, e reiniciaria em 17 de Janeiro. Não se sabe ao certo que influência terá tido, de facto, esta comunicação epistolar entre Newton e Hooke, no entanto, Newton admite que o conduziu à descoberta do teorema da elipse.

Em Agosto de 1684, Newton recebe a visita de Edmund Halley em Cambridge. Esta visita ficou legendária, poderíamos nós dizer, porque diz-se que foi a pergunta

formulada por Halley a Newton que o levou aos *Principia*.⁶ A pergunta foi: “Qual seria a forma da órbita de um planeta ao redor do Sol se ele fosse atraído em direção ao Sol por uma força que variasse inversamente com o quadrado da distância?”, ao que Newton respondeu que seria uma elipse. Como promessa, para comprovar que tinha calculado o que afirmara, Newton envia a Halley, em Novembro de 1684, o tratado *De Motu*. Em 1687, surgem os *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, considerado por muitos como o mais importante livro publicado na história da ciência.

Em 1696, abandona Cambridge e assume o cargo de *Master of the Mint*, cuja tarefa seria a de reformar e supervisionar a cunhagem da moeda britânica.

Em 1703, depois da morte de Robert Hooke, então presidente da Royal Society, assume Newton esse cargo, para o qual foi anualmente eleito até à sua morte.

Em 1705, é armado cavaleiro, pela rainha D. Ana. Newton viria a falecer com oitenta e cinco anos, a 20 de Março de 1727⁷, em Londres, enquanto dormia. No dia seguinte seria enterrado na Abadia de Westminster.

⁶ Sobre esta visita *vide* COHEN (1971).

⁷ No calendário actual, 31 de Março de 1727.

II - As Duas Rubricas

Os *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* são compostos por três livros: *De Motu Corporum Liber Primus*, *De Motu Corporum Liber Secundus* e *De Mundi Systemate*, cujo primeiro livro é precedido por duas rubricas (seguindo a designação atribuída por Michel Blay⁸) intituladas *Definições* e *Axiomas ou Leis do Movimento*. Estas duas rubricas constituem os fundamentos da teoria. Esta tem pois um carácter axiomático.

Os fundamentos dos *Principia* são compostos por oito definições e três axiomas. Como sintetiza Ricardo Lopes Coelho⁹ as oito definições podem ser agrupadas em função dos conceitos de matéria, movimento e força. Pois, a primeira definição diz respeito à matéria, a segunda ao movimento e as restantes seis à força, como veremos seguidamente. Formalmente, as definições podem ser agrupadas em dois conjuntos, porque em três delas são definidos “conceitos” e nas restantes cinco “quantidades”. Analisemos, agora, as palavras de Newton.

Começemos por analisar os conceitos definidos por Newton que, como destaca S. Chandrasekhar¹⁰, são complexos e estão correlacionados. Explica Bernard Cohen¹¹ que as oito definições que Newton apresenta não são desconhecidas do leitor em geral, são, é, novos conceitos que Newton atribui aos termos e por isso os define, conforme a sua perspectiva.

Newton abre a rubrica *Definições* com a de “quantidade de matéria”. Para Newton, esta grandeza resulta do produto da densidade pelo volume e tem o nome de corpo ou massa.¹² Como afirma Bernard Cohen (1999), a Definição I, de facto, não funciona como uma verdadeira definição, uma vez que não define um termo, um conceito, mas estabelece, sim, uma regra ou uma relação entre quantidades. Augusto

⁸ BLAY, Michel, *La science du mouvement, De Galilée à Lagrange*, Paris, Éditions Belin, 2002.

⁹ COELHO, Ricardo Lopes, «Filosofia e Mecânica: Matéria inerte e força activa», *Revista Portuguesa de Filosofia*, 60, 2004, pp. 247-280.

¹⁰ CHANDRASEKHAR, Sum

¹¹ NEWTON, Isaac, *The Principia – Mathematical Principles of Natural Philosophy*, A new translation by I. Bernard Cohen & Anne Whitman, preceded by a A Guide to Newton's Principia by I. Bernard Cohen, University of California Press, 1999.

¹² Explica Bernard Cohen (1999) que é uma medida da matéria diferente das que estavam em uso.

Santos Fitas¹³ aponta uma circularidade a esta definição, pois é feita com base numa relação entre duas novas grandezas. Isto leva-nos a colocar a questão: o que é a densidade? Poderíamos esperar que Newton no-la desse, no entanto, não há resposta para esta pergunta. A massa é uma definição circular se for definida como o resultado da densidade e do volume ou sendo definida como proporcional ao produto, pois o que sabemos a este respeito é que a densidade é invariável. Como diz Bernard Cohen (1999), “this measure...does not change if a sample of matter is heated, bent, stretched, squeezed or compressed, or transported from one place on the earth to another or even to a position out in space”. Depende sim do grau de condensação de um corpo, tal como esclarece Maria do Rosário Branco¹⁴. Newton não discute o conceito de densidade. Newton não se sente na obrigação de o explicitar porque parte do princípio que é um dado adquirido. Ainda no seu comentário à definição de quantidade de matéria, Newton esclarece que dali em diante designará a quantidade de matéria “sob o nome de corpo ou massa, indistintamente”, ou seja, a quantidade de matéria é equivalente à massa ou ao corpo. E que a referida quantidade de matéria “é conhecida pelo peso de qualquer corpo”, pois como o autor dos *Principia* clarifica, “por meio de experiências cuidadosamente realizadas com pêndulos”, descobriu que “é proporcional ao peso”. Com isto Newton pretende significar que as experiências dos pêndulos provam a proporcionalidade dos pesos dos corpos e as suas massas. Defende Eloy Rada¹⁵ que a “quantidade de matéria” embora seja um conceito impreciso, é, no entanto, agora um conceito susceptível de medida com valores proporcionais ao peso, quer se chame corpo, ou massa. Destaca também Rada (2004) que esta definição permite a utilização do termo “corpo” nas seguintes definições sem dar azo a equívocos no seu entendimento. E como explica Bernard Cohen (1999), este argumento é a prova de que a Definição I de Newton não é circular, pois Newton não afirma que determinará a massa encontrando densidades e volumes, o que Newton nos diz é que as massas dos corpos são conhecidas pelos pesos dos corpos.

¹³ FITAS, Augusto J. Santos, “Os Principia de Newton, alguns comentários (Primeira Parte, a Axiomática)”, *Vértice*, 72, 1996, 61-68.

¹⁴ BRANCO, Maria do Rosário, *A física de Descartes e a física de Newton: os temas controversos*, Lisboa, 1996, tese de doutoramento Filosofia e História da Ciência, Universidade Nova de Lisboa.

¹⁵ NEWTON, Isaac, *Princípios Matemáticos de la Filosofia Natural*, trad. Eloy Rada, Madrid, Alianza Editorial, 2004.

Na Definição II, Newton define a “quantidade de movimento”. Estamos também perante uma grandeza, à semelhança do que acontece com a definição anterior, que desta vez resulta “da velocidade e da quantidade de matéria em conjunto”. Esta segunda medida está dependente do resultado da grandeza anterior. Clarifica Bernard Cohen (1999) que é uma nova forma de medir o movimento, uma vez que se baseia na definição anterior, na medida da quantidade de matéria. Na sua explicitação sobre o que entende por quantidade de movimento, Newton diz-nos que a quantidade de movimento duplica se a massa de um corpo duplicar e se a velocidade se mantiver igual. No entanto, se a velocidade também duplicar, o resultado será que a quantidade de movimento quadruplicará. Pois, como clarifica Newton, o movimento total “é a soma dos movimentos de cada uma das partes”.

As definições III, IV e V determinam o que Newton entende por força ínsita, força impressa e força centrípeta, respectivamente.

A Definição III define um dos conceitos centrais dos *Principia*, o conceito de inércia. Acerca desta definição, afirma Bernard Cohen (1999) que esta definição é “in many ways, the most puzzling of all the definitions in the *Principia*.” A força ínsita, tal como Newton a define, “é o poder de resistir, pelo qual cada corpo, tanto quanto dele depende, persevera no seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha recta.” Ou seja, é a resistência que um corpo oferece à mudança do estado em que se encontra. E, acrescenta Maria do Rosário Branco (1996), é a causa do movimento rectilíneo uniforme, apresenta-se como força de conservação, pois conserva é a quantidade de movimento. No entanto, como destaca Bernard Cohen (1999) existe uma limitação a essa condição, isto é, ao facto de o corpo permanecer no estado em que se encontra. Essa limitação está exposta na expressão latina “quantum in se est”, que nós optámos por traduzir por “tanto quanto dele depende”. Segundo Bernard Cohen (1999), com esta expressão Newton alerta-nos para o facto de que existem situações em que o corpo é impedido de perseverar no estado em que se encontra. Como veremos mais à frente o novo conceito do termo é uma inovação de Newton.

Para Newton, a inércia é uma força inerente à própria matéria, “ínsita”, e latente enquanto não existir qualquer outra força aplicada ao corpo. Afirma Allan Gabbey¹⁶, “something which did not possess “inertia” would not be a body”. Diz o autor dos

¹⁶ GABBEY, Allan, «Force and Inertia in the Seventeenth Century: Descartes and Newton», in Stephen Gaukroger [ed.], *Descartes: Philosophy Mathematics & Physics*, Totowa, New Jersey, pp. 230- 320, p. 254.

Principia que esta força “é sempre proporcional ao seu corpo, e não difere em nada da inércia da massa”, ou seja, a força ínsita da matéria é a massa de um corpo. Segundo Newton, a força ínsita pode chamar-se “com um termo mais significativo, força da inércia”, pois é devido a esta força, que todos os corpos possuem, que os corpos dificilmente saem do estado em que se encontram. É esta a força que os corpos exercem quando uma força impressa lhes tenta mudar o seu estado, e é esta a força, na medida da sua massa, que permite aos corpos permanecerem por si, no estado em que se encontram. Ou seja, é esta a propriedade que é responsável pela resistência à alteração do estado de movimento e, ao mesmo tempo, é também ela que garante o estado de movimento do corpo se sobre ele nenhuma outra força actua. Assim, a “vis insita” é a capacidade que cada corpo tem de resistir à alteração do seu estado de movimento.

Ainda nesta definição Newton diz que “atribui-se vulgarmente a resistência aos corpos que estão em repouso e o ímpeto aos corpos que se movem”. No entanto, clarifica Newton que essa distinção não é clara, pois movimento e repouso “distinguem-se um do outro só pela perspectiva, e nem sempre estão realmente em repouso os corpos que vulgarmente se observam como tal.” Bernard Cohen (1999) afirma que o interesse nos *Principia* da definição de força de inércia reside no facto de que implica a primeira lei do movimento. Achamos interessante o ponto de vista de Bernard Cohen quando sugere que Newton ao introduzir o conceito de força de inércia ao contrário de simples inércia, como propriedade da matéria, pode significar que Newton não tivesse abandonado por completo a antiga noção de que todos os movimentos requerem um motor. Neste sentido, afirma Michel Blay (2002: 106) que “le rôle de cette “vis insita”, qui ne s’éclaire que par rapport à l’énoncé du principe d’inertie qui sera formulé dans la loi I, est finalement de faire persévérer les corps dans son nouvel état, nouvel état acquis par l’action de la «force imprimée» [*vis impressa*] qui est précisément définie au paragraphe suivant [...]”.

Na definição seguinte surge o conceito de força impressa. A força ínsita e a força impressa são os dois grandes conceitos sobre os quais Newton erigirá a sua física. A força impressa é uma força externa, uma força que é aplicada no corpo. Como destaca Bernard Cohen (1999), não se pode compreender os *Principia* se não percebermos na íntegra esta antítese entre força de inércia, uma força interna, e força impressa, uma força externa.

Segundo Newton, a força impressa “é a acção exercida num corpo, para mudar o seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha recta”, ou seja, é uma força

que, actuando sobre um corpo, é responsável por modificar o seu estado de movimento ou de repouso. Se não houver força, não haverá mudança. É uma força externa, uma força exterior que actua sobre um corpo. Acrescenta Cohen (1999) que a força impressa consiste apenas na acção que é exercida num corpo para mudar o seu estado, quer este seja o repouso ou o movimento. Ou seja, a força impressa é a acção pela qual um novo estado é adquirido, no entanto, é a força da inércia que permite que o corpo se mantenha no novo estado, pois este tipo de força não permanece no corpo depois de a acção terminar. É o oposto da força da inércia, que é uma força interior do corpo, como já anteriormente foi referido. Como explica Bernard Cohen (1999), Newton faz uso de um tradicional termo medieval, como mais adiante veremos, mas tal como na definição anterior, atribui um novo conceito ao termo. Explica também o mesmo autor que a definição deste conceito, não só é uma referência parcial ao segundo axioma, como antecipa a primeira lei quando refere que “um corpo persevera em todo o novo estado somente pela força da inércia”.

Não podemos deixar de destacar a ordem em que Newton elabora os conceitos de força nos *Principia*. Primeiramente surge o conceito de força de inércia, que é uma força inata, uma força que o corpo possui e só depois surge o termo força impressa, que é uma acção de carácter transitivo, que não permanece no corpo quando essa acção termina. Como clarifica Augusto Santos Fitas (1996), “o carácter efémero destas forças traduz a ideia escolástica “cessante causa cessat effectus”, pois as forças aplicadas resultam de uma acção exterior sobre o corpo, enquanto as forças inatas constituem uma característica do próprio corpo, residem nele.”

Newton termina a sua definição explicitando as diferentes origens da força impressa que pode provir “do choque, da pressão ou da força centrípeta.” Ou seja, “los cambios de estado pueden ser un resultado de una fuerza de contacto instantánea, de una fuerza de contacto continuamente aplicada o de una fuerza que actúa a distancia de modo que empuje o tire de un cuerpo hacia un centro.”¹⁷

As restantes definições são dedicadas à força centrípeta. Newton sente necessidade de dedicar as restantes definições a este termo, pois era um termo novo que estava a ser introduzido e o autor queria que ficasse bem esclarecido.

¹⁷ COHEN, Bernard, *La Revolución Newtoniana y la transformación de las ideas científicas*, trad. Carlos Solís Santos, Madrid, Alianza Editorial, 1983, p. 279-280.

Assim, na Definição V Newton define força centrípeta.¹⁸, terceiro e último tipo de força, que é um caso especial da força impressa. Nas palavras de Newton, a força centrípeta “é aquela, pela qual os corpos são puxados de todas as partes, impelidos, ou de alguma forma tendem na direcção de algum ponto, como para um centro”. Para explicar o seu conceito Newton diz-nos três exemplos: a gravidade “pela qual os corpos tendem para o centro da terra”, a força magnética “pela qual o ferro se dirige para o íman” e a força “qualquer que seja, pela qual os planetas se afastam continuamente dos movimentos rectilíneos, e são forçados a girar em linhas curvas”.

Afirma Eloy Rada (2004) que Newton foi bastante atrevido ao definir a gravidade como uma força que puxa todos os corpos para o centro da Terra e também ao dar por certo que existe uma força que justifica o movimento dos planetas, e que essa força, independentemente do que ela seja, é uma força centrípeta. O restante da definição são exemplos descritivos: uma pedra numa funda, o movimento de um projectil, a lua. Como já foi anteriormente referido, a novidade deste conceito obriga a que Newton se desdobre em exemplos, para um melhor esclarecimento dos leitores. Esclarece Cohen (1999) que apesar de todos os exemplos dados por Newton serem do domínio da física, a sua preocupação é puramente matemática, ou seja, Newton quer desenvolver as propriedades matemáticas das forças centrípetas e não investigar a natureza física, o modo de acção ou as propriedades físicas da força centrípeta. Assim sendo, diz Newton que “pertence aos matemáticos encontrar a força, pela qual um corpo possa ser exactamente retido numa dada órbita, qualquer que seja, com uma dada velocidade; e, por sua vez, encontrar a trajectória curvilínea, para a qual um corpo saindo de um dado lugar qualquer que seja com uma dada velocidade seja deflectido por uma dada força”.

A frase final desta Definição V lança o mote das três últimas definições. Newton diz que a força centrípeta pode ser medida em três quantidades: absoluta, aceleratriz e motriz. Nas restantes definições é indicado, como se estimam as respectivas grandezas da força centrípeta: a quantidade absoluta, a quantidade aceleratriz e a quantidade motriz. E é com a explicação de cada uma das quantidades que Newton termina as suas definições.

¹⁸ Segundo Bernard Cohen (1999), o termo força centrípeta foi inventado por Newton, com base na noção de força centrífuga de Huygens.

Das definições segue-se, portanto, que há dois tipos de força: a ínsita e a impressa. Estes dois tipos de força vão ser fundamentais nas leis do movimento, como veremos.

A rubrica Definições encerra com o primeiro escólio, no qual Newton nos expõe alguns dos seus conceitos metafísicos, tais como espaço e tempo absolutos. Começa Newton por esclarecer o leitor, justificando as definições anteriores da seguinte forma: “até aqui, pareceu necessário explicar em que sentido devem ser tomadas, no que se segue, palavras menos conhecidas”. Seguidamente afirma o autor que “tempo, espaço, lugar e movimento são bem conhecidos de todos”. Ou seja, Newton não vai explicar estes conceitos. O que Newton vai fazer no Escólio é, apenas, clarificar, dividindo “estas quantidades em absolutas e relativas, verdadeiras e aparentes, matemáticas e vulgares”, para eliminar conceitos errados, pois “vulgarmente não se concebem estas quantidades a não ser em relação àquilo que é sensível”. Isto é, são medidas que se identificam relativamente a objectos de percepção sensível, pois só assim conseguimos identificá-las e quantificá-las. O escólio baseia-se nisso mesmo, em mostrar as diferenças entre essas quantidades. Newton no Escólio explica-nos o que entende por espaço absoluto e relativo, tempo absoluto e relativo, lugar, movimento absoluto e movimento relativo, e como se diferenciam entre si estes conceitos. Para Newton, “o tempo absoluto, verdadeiro e matemático, em si e por sua natureza, sem relação com nada do que for externo, flui de modo uniforme, e com outro nome chama-se duração.” Como explica Maria do Rosário Branco (1999:), “o tempo absoluto verdadeiro, pura e eterna duração, sem relação com as coisas existentes, é matemático porque é uma quantidade”. O tempo absoluto opõe-se ao tempo relativo que é “aparente e vulgar é uma medida qualquer, sensível e externa, (quer exacta quer aproximada) da duração pelo movimento”. O tempo relativo está relacionado com as coisas sensíveis, ou seja, “é parte da duração absoluta e subdivide-se em horas, dias e meses.” (BRANCO, 1999:) Seguidamente, Newton faz a distinção entre espaço absoluto e espaço relativo. O espaço absoluto é como o tempo absoluto, “pela sua natureza, sem relação com nada daquilo que lhe é externo, permanece sempre similar e imóvel”. Diz Maria do Rosário Branco (1999:), “não tem relação com as coisas, é uma quantidade”. E também se opõe ao espaço relativo. Para Newton o espaço relativo “é qualquer medida ou dimensão móvel” do espaço absoluto, “a qual é definida pelos nossos sentidos pela sua posição em relação aos corpos e é vulgarmente confundida com o espaço imóvel”. Newton acredita no tempo e espaços absolutos, no entanto, como esclarece Bernard Cohen (1999), Newton

sabe que na prática nós utilizamos o espaço relativo ao invés do espaço absoluto. Como explica Eloy Rada (2004), estes conceitos definidos por Newton não funcionam para o autor como um simples sistema de referência, mas sim como absolutamente independentes e como invariáveis absolutas. Logo a seguir, Newton começa por definir o que entende por lugar. Afirma Newton, “lugar é a parte do espaço que o corpo ocupa e, em função do espaço, é ou absoluto ou relativo”, mas ressalva, “digo a parte do espaço; não a posição do corpo ou a superfície externa”.

No ponto seguinte, Newton detém-se na distinção entre movimento absoluto e movimento relativo. Para o autor o movimento absoluto é “a translação de um corpo de um lugar absoluto para um lugar absoluto”. O movimento relativo é “a translação de um lugar relativo para um lugar relativo”. Como explica Maria do Rosário Branco (1999), “é uma mudança de posição de um corpo em relação a outros que estejam próximos”. Para que o leitor compreenda as distinções, Newton exemplifica da seguinte forma: “na nau que é levada pelas velas desfraldadas, o lugar relativo do corpo é aquele sítio da nau no qual o corpo se encontra”. Aproveitando o exemplo dado, Newton explica o conceito de repouso relativo, que é “a permanência do corpo no mesmo sítio da nau”, e o conceito de repouso verdadeiro, que é “a permanência do corpo na mesma parte daquele espaço imóvel”.

No parágrafo seguinte, explica que “em Astronomia, o tempo absoluto distingue-se do tempo relativo pela equação do tempo vulgar”.

De seguida, Newton fala acerca do uso comum das quantidades e que problemas acarreta o seu uso. É no discorrer destes problemas que o autor faz a distinção entre as quantidades mensuráveis e as quantidades sensíveis.

Ainda no Escólio, Newton explica dois exemplos: “pendurar um balde de um fio muito longo”, com água no interior, e o segundo, o de duas “esferas, com uma dada distância entre si, ligadas por um fio intercedente”. Explica Cohen (1999), que as duas experiências tratam dos efeitos centrífugos da rotação. Defende Cohen (1999) que a experiência com as duas bolas é uma “experiência conceptual”, uma vez que Newton não faz qualquer referência à sua elaboração ou testemunho, ao contrário da experiência com o balde, acerca da qual Newton refere “como eu próprio experimentei”.

No último parágrafo do Escólio, Newton diz-nos qual a intenção de ter escrito o tratado seguinte, “inferir os movimentos verdadeiros a partir das suas causas, efeitos e

diferenças aparentes, e pelo contrário dos movimentos quer verdadeiros quer aparentes inferir as suas causas e efeitos”.¹⁹

Seguidamente, surge a rubrica Axiomas ou Leis de Movimento, na qual Newton nos apresenta as leis que regem e são fundamento de toda a mecânica clássica. São apenas três as leis que compõem e organizam a filosofia natural newtoniana. De acordo com Bernard Cohen (1999), Newton com as suas Leis de Movimento faz um aperfeiçoamento das leis de Descartes que surgem nos seus *Principia*, as quais Descartes apresenta como “Regulae quaedam sive Leges Naturae”.

A primeira lei é, comumente, designada lei de inércia, pelo princípio que lhe está inerente²⁰. Este primeiro axioma diz como se comporta um corpo quando não sujeito a forças impressas. Assim sendo, quando não está sujeito a forças exteriores, resta ao corpo a força ínsita. Segue-se, então, que, unicamente com a força de inércia, o corpo se mantém em repouso ou em movimento rectilíneo e uniforme. É este o cerne do axioma. Diz também Cohen (1999) que é interessante que Newton sinta a necessidade de postular a primeira lei, uma vez que a mesma já tinha sido antecipada nas definições III e IV. No entanto, o mesmo autor afirma que “it would seem that Newton’s first law was not so much intended as a simple restatement of the principle previously embodied in def. 3 as it was a condition for the existence of certain insensible forces, not otherwise known to us.”²¹

Sobre esta primeira lei, afirma Newton no seu prefácio à segunda edição que “es esta una ley de la naturaleza aceptada por todos los filósofos”.²²

Depois de postulado o primeiro axioma, Newton dá-nos três exemplos onde se pode verificar a veracidade da lei anteriormente estabelecida: os projecteis, um pião e os planetas e cometas.

O segundo axioma estabelece o efeito da força impressa, ou seja, o repouso ou o movimento são alterados. Nas palavras de Newton “a mudança de movimento”, isto é, a mudança na quantidade de movimento, como esclarece Bernard Cohen (1999), “é

¹⁹ Cf. COHEN, 1999: 108 e RYNASIEWICZ, Robert, “By Their Properties, Causes and Effects: Newton’s Scholium on Time, Space, Place and Motion”, *Studies in History and Philosophy of Science* 26, 1995, 133-153, 295-321.

²⁰ Cf. adiante 1.6 Newton.

²¹ Acerca da importância da Primeira Lei nos *Principia* cf. 2.6 - Newton.

²² NEWTON, Isaac, *Princípios Matemáticos de la Filosofia Natural*, trad. Eloy Rada, Madrid, Alianza Editorial, 2004, p. 104.

proporcional à força motriz impressa”.²³ Como clarifica Newton seguidamente, “uma força dupla gerará um movimento duplo, uma força tripla um movimento triplo, quer essa força seja impressa ao mesmo tempo e de uma só vez, quer gradual e sucessivamente”. Ou seja, a segunda lei postula que as mudanças no movimento são proporcionais à força impressa e à direcção dessa força impressa.

O terceiro, e último axioma, estabelece o princípio da acção-reacção, tem, desta forma, uma função diferente dos axiomas anteriores. A lei primeira baseia-se na definição 3. O segundo axioma baseia-se na definição 4. A terceira lei estatui que “o que quer que prima ou puxe outra coisa, outro tanto será por ela premido ou puxado”. Diz Bernard Cohen (1999) que esta lei é, muitas vezes, citada como “the most important achievement of Newton’s with respect to the principles [of dynamics].” Esta é uma conclusão nova e muito importante. Como afirma Roger Cotes²⁴, no prefácio da segunda edição dos *Principia*, “todos los cuerpos gravitan hacia la Tierra, del mismo modo la Tierra gravita igualmente hacia todos los cuerpos”. (RADA, 2004: 103) No entanto, salienta Bernard Cohen (1999), é um erro comum assumir que duas forças, iguais em magnitude, mas em direcções opostas, podem produzir uma situação de equilíbrio.

Sucedem-se às leis do movimento, seis corolários, que descrevem as propriedades dos movimentos dos corpos. Como esclarece Eloy Rada (2004), os corolários são necessários para especificar os diferentes casos de composição, decomposição, soma, subtracção, etc, em que se produzem as mudanças e as acções das forças impressas. O corolário I apresenta-nos o paralelogramo das forças, que diz respeito à composição das forças, baseia-se no postulado da independência do efeito das forças. O corolário II demonstra a composição e decomposição das forças. O corolário III tem como objecto a soma da quantidade de movimento na acção de dois corpos, que não sofre qualquer alteração pela acção dos corpos um no outro. Para justificar esta conservação, Newton invoca a sua Lei III. O corolário IV estatui que “o centro de gravidade comum a dois ou mais corpos não muda o seu estado ou de movimento ou de repouso pelas acções dos corpos entre si”. O Corolário V estabelece o princípio da relatividade, pois segundo Newton, num dado espaço, “todos os movimentos se comportam entre si da mesma maneira, quer ele esteja em repouso, quer se mova uniformemente em linha recta.” Para terminar, o último corolário, o Corolário VI

²³ Cf. COHEN, 1999: 111-117.

²⁴ Editor da primeira e segunda edições dos *Principia*.

postula que os corpos de um sistema, cada um impelido por forças de aceleração iguais, continuarão a mover-se entre si, como se não estivessem impelidos por essas forças.

Tal como aconteceu com a rubrica anterior, também esta encerrará com um escólio. Neste escólio, Newton homenageia importantes figuras da época, que muito contribuíram para as suas conclusões. O autor começa por referir que “até agora, eu transmiti os princípios aceites pelos matemáticos e confirmados por inúmeras experiências”. Seguidamente, atribui os dois primeiros axiomas e dois primeiros corolários a Galileu.²⁵, pois foram estes que permitiram que Galileu estabelecesse a lei da queda dos graves e demonstrasse o movimento em parábola dos projecteis.

Como afirma Wallace Hooper²⁶, “Newton built his universal mechanics on a small, rigorous logical structure”. As oito definições e as três leis de movimento surgem em apenas quarenta páginas nos *Principia*. Segundo as definições existem dois tipos de forças: a força ínsita, que como o nome indica, é inerente aos corpos; e a força impressa, que provém do exterior. Do primeiro tipo existe apenas uma força, dita força de inércia; choque, pressão ou atracção são exemplos de forças impressas. Os 3 axiomas estão relacionados com os dois tipos de forças. Como os movimentos ou são rectilíneos e uniformes ou não são – e estes dizem-se acelerados -, os dois tipos de força justificam todos os movimentos.

²⁵ Como mais adiante veremos, o princípio da inércia em Galileu é bastante diferente do conceito de inércia em Newton. No entanto, não pretendemos discutir aqui o porquê da atribuição a Galileu de um princípio enunciado primeiramente desta forma por Newton.

²⁶ HOOPER, Wallace, “Inertial problems in Galileo’s preinertial framework”, in *Cambridge Companion to Galileo*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 146-174.

CAPÍTULO 1 - PRINCÍPIOS MATEMÁTICOS DA FILOSOFIA NATURAL

Introdução ao Aparato Crítico

A obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* conheceu três edições, todas elaboradas e corrigidas pelo próprio Newton. A primeira edição data de 1687 e foi publicada em Londres. A segunda foi publicada em 1713, em Cambridge. A terceira em 1726, em Londres.

Newton tardou cerca de quatro décadas a aperfeiçoar o seu *magnum opus* e muitas foram as alterações a elas introduzidas durante o tempo da sua feitura. Assim, consideramos pertinente a elaboração de um aparato crítico desta obra porque permite evidenciar a evolução do pensamento de Newton, esclarecendo muitas dúvidas sobre o mesmo.

Ao contrário de muitas edições de textos clássicos, em que as variantes textuais derivam de diversos manuscritos, de diferentes épocas, logo de diferentes copistas, sem muitas vezes se ter acesso ao manuscrito original, e onde, neste contexto é impreterível o ter em consideração a versão mais antiga, que, geralmente, se encontra mais fiel ao original, ou a versão que pareça ser mais autêntica, pois o manuscrito original não está disponível, nos textos de carácter científico, principalmente de carácter matemático, a última versão, normalmente, é a que está mais correcta, pois as versões mais antigas representam fases preliminares do pensamento do autor. Visto que os *Principia* são um tratado científico, e não uma obra literária ou filosófica, e tendo em conta que as várias edições publicadas representam as mudanças introduzidas por Newton e a evolução da sua linha de pensamento, a elaboração de um aparato crítico a partir da sua primeira edição seria como se agíssemos contra a vontade do seu autor. Assim, faremos o nosso aparato crítico com base na terceira e última edição dos *Principia*, uma vez que esta é a versão final aprovada pelo seu autor, representando as últimas revisões autorizadas e publicadas antes da sua morte.

Basta simplesmente olhar para o aparato crítico para que se torne evidente que nenhuma página está na terceira edição como surgiu nas versões anteriores. Em todas as páginas, Newton introduziu alguma mudança, por menor que seja. Isto denota, desde logo, o esforço que o autor empreendeu na tentativa de melhorar e de tornar mais claro a sua obra, até à sua versão final. Como refere, Bernard Cohen, são poucos os tratados científicos que foram submetidos a tantas revisões pelo seu autor.

Deste modo, o objectivo primordial do nosso aparato crítico, é a partir da reprodução do texto definitivo, legado por Newton, mostrar as alterações textuais que as versões anteriores conheceram, mostrando que os *Principia* não foram uma obra estática ao longo das três edições, mas sim um documento vivo.

Guia do Aparato Crítico

Para o nosso aparato crítico considerámos os 3 textos publicados, que são aí representados, seguindo a designação que Bernard Cohen e Alexandre Koyré usaram no seu aparato crítico, da seguinte forma:

E_1 = 1.^a Edição (1687);

E_2 = 2.^a Edição (1713);

E_3 = 3.^a Edição (1726).”²⁷

O aparato crítico constará da comparação, linha por linha, palavra por palavra da terceira com as duas primeiras edições publicadas, onde apresentaremos todas as alterações e adições encontradas de edição para edição, acompanhando o texto.

Cada página da nossa edição encontra-se dividida em duas partes: a primeira parte corresponde à reprodução do texto original, de acordo com a terceira edição; a segunda parte compõe-se das sucessivas alterações de edição para edição.

O aparato crítico, propriamente dito, deve ser consultado da seguinte forma: os números seguidos de] correspondem aos números das linhas que surgem no lado esquerdo no texto. Quando, em vez de apenas um número surgirem dois, separados por um hífen, deve entender-se desde a linha “x” até à linha “y”. Surge também, uma só vez, no aparato {3. 20}, interprete-se como página três, linha 20.

As variantes de leitura no aparato crítico seguem a forma generalizada de citação. A leitura da terceira edição surge em tipo romano, separado pela leitura das variantes, também em tipo romano, por dois pontos. A referência à edição onde surge essa variante de leitura surge em tipo itálico, uma vez que é uma intervenção nossa e não de autor. No nosso aparato crítico apenas surge a seguinte abreviatura:

om. – (também em tipo itálico), que significa que a palavra, frase ou expressão, não se encontra na referida edição.

²⁷ NEWTON, Isaac, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, the third edition (1726) with variant readings, assembled and edited by Koyré, Alexandre & I. Bernard Cohen with the assistance of Anne Whitman, vol. I, Cambridge, University Press, 1972.

Aparato Crítico e Tradução

Princípios Matemáticos da Filosofia Natural

Definições

Definição I.

A quantidade de matéria é a medida da mesma, que resulta da sua densidade e volume em conjunto

O ar, sendo duplicada a sua densidade, num espaço também duplicado, torna-se quádruplo, e num espaço triplicado sêxtuplo. Entenda-se o mesmo acerca da neve e do pó condensados por compressão ou liquefacção. E igual é a explicação para todos os corpos, que por quaisquer causas de diversas formas se condensam. Por outro lado, eu não tenho aqui em conta um meio, se é que existe algum, que penetre livremente os interstícios das partes dos corpos. E entendo, no que se segue, esta quantidade sob o nome de corpo ou massa, indistintamente. Ela é conhecida pelo peso de qualquer corpo. Na verdade, descobri, por meio de experiências cuidadosamente realizadas com pêndulos, que é proporcional ao peso, como a seguir se mostrará.

Definição II.

A quantidade de movimento é a medida do mesmo, que resulta da velocidade e da quantidade de matéria em conjunto.

O movimento do todo é a soma dos movimentos de cada uma das partes, e por este motivo, num corpo duplamente maior, com igual velocidade, o movimento é duplo, e com o dobro da velocidade, é o quádruplo.

Definição III.

A força ínsita da matéria é o poder de resistir, pelo qual cada corpo, tanto quanto dele depende, persevera no seu estado de repouso ou de movimento uniforme ao longo de uma linha recta.

Esta força é sempre proporcional ao seu corpo, e não difere em nada da inércia da massa, a não ser no modo de a conceber. Por causa da inércia da matéria sucede que todo o corpo, dificilmente, é alterado do seu estado de repouso ou de movimento. Sob esse ponto de vista, a força ínsita pode também chamar-se, com um termo mais significativo, força da inércia. Na verdade, um corpo exerce esta força apenas na mudança do seu estado causada por outra força impressa em si; e este exercício é, sob diferentes perspectivas, resistência e impulso. É resistência na medida em que o corpo,

para conservar o seu estado, resiste à força impressa; é impulso na medida em que o mesmo corpo, cedendo com dificuldade à força do obstáculo resistente, tenta mudar o estado daquele obstáculo. Atribui-se vulgarmente a resistência aos corpos que estão em repouso e o impulso aos corpos que se movem, mas o movimento e o repouso, tal como são vulgarmente concebidos, só se distinguem relativamente, e nem sempre estão realmente em repouso os corpos que vulgarmente se observam como tal.

Definição IV.

A força impressa é a acção exercida num corpo, para mudar o seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha recta.

Esta força consiste apenas na acção, e não permanece num corpo depois da acção. Um corpo persevera em todo o novo estado somente pela força da inércia. A força impressa provém de diferentes origens, como do choque, da pressão ou da força centrípeta.

Definição V.

A força centrípeta é aquela, pela qual os corpos são atraídos, impelidos, ou de alguma forma tendem na direcção de algum ponto, como para um centro.

A este género pertence a gravidade, pela qual os corpos tendem para o centro da terra; a força magnética, pela qual o ferro se dirige para o íman; e aquela força, qualquer que seja, pela qual os planetas são continuamente afastados dos movimentos rectilíneos, e são forçados a girar em linhas curvas. Uma pedra girada numa funda tenta afastar-se da mão que a faz girar; e pelo seu esforço distende a funda, com tanto mais força, quanto mais rápido gira e assim que é largada, sai disparada. À força contrária àquele esforço, pela qual a funda puxa continuamente a pedra para a mão e a retém na sua órbita, porque é dirigida para a mão como para o centro de uma órbita, eu chamo-lhe força centrípeta. E igual é a explicação para todos os corpos, que são movidos em círculo. Todos estes corpos tentam afastar-se dos centros das suas órbitas; e a não ser que alguma força contrária àquele esforço esteja presente, pela qual sejam impedidos e retidos nas órbitas, à qual por isso chamo força centrípeta, afastar-se-iam em linha recta com movimento uniforme. Um projectil, se fosse abandonado pela força da gravidade, não se desviaria para a terra, mas afastar-se-ia para os céus em linha recta; e isto com movimento uniforme apenas se fosse suprimida a resistência do ar. Um projectil pela

sua gravidade é continuamente desviado da direcção rectilínea e inflectido para terra, e isto mais ou menos, em função da sua gravidade e da velocidade do movimento. Quanto menor for a sua gravidade, em função da quantidade de matéria, ou maior a velocidade com a qual é lançado, tanto menos se afastará da direcção rectilínea e mais longe chegará. Se uma esfera de chumbo for lançada, com uma dada velocidade, em linha horizontal, do cume de algum monte pela força da pólvora de um canhão continuaria em linha curva até à distância de duas milhas antes de cair na terra; então com o dobro da velocidade chegaria quase duas vezes mais longe, e com dez vezes mais velocidade chegaria quase dez vezes mais longe, contanto que a resistência do ar fosse suprimida. E aumentando a velocidade, poderia ser aumentada, à vontade, a distância para a qual fosse lançada, e poderia ser diminuída a curvatura da linha que descreveria, até que finalmente caísse a uma distância de dez, trinta ou noventa graus; ou mesmo até que percorresse toda a terra ou, por fim, se afastasse para os céus, e continuasse indefinidamente no seu movimento de afastamento. E pela mesma razão, pela qual um projectil, com a força da gravidade, poderia ser deflectido para uma órbita e percorrer toda a terra, poderia também a lua pela força da gravidade, se é grave, ou por qualquer outra força, pela qual seja impelida para a terra, poderia ser continuamente desviada da trajectória rectilínea em direcção à terra, e ser dirigida para a sua órbita; e sem a tal força a lua não pode ser retida na sua órbita. Se esta força fosse menor do que a medida certa não seria suficiente para deflectir a lua da direcção rectilínea, se fosse maior do que a medida certa afastá-la-ia demasiado fazendo-a sair da sua órbita em direcção à terra. Na verdade, requer-se que seja de intensidade exacta: e pertence aos matemáticos encontrar a força, pela qual um corpo possa ser exactamente retido numa dada órbita, qualquer que seja, com uma dada velocidade; e, por sua vez, encontrar a trajectória curvilínea, para a qual um corpo saindo de um dado lugar, qualquer que seja, com uma dada velocidade seja deflectido por uma dada força. Mas a quantidade desta força centrípeta é de três géneros: absoluta, aceleratriz e motriz.

Definição VI.

A quantidade absoluta de uma força centrípeta é a medida da mesma, maior ou menor, em função da eficácia da causa que a propaga do centro através das regiões circundantes.

Como a força magnética, que é maior num íman e menor no outro, em função da grandeza do íman ou grau da intensidade.

Definição VII.

A quantidade aceleratriz de uma força centrípeta é a medida da mesma, proporcional à velocidade que produz num dado tempo.

Como a força do mesmo íman que é maior numa distância menor, e menor numa distância maior; ou a força da gravidade que é maior nos vales e menor nos cumes dos montes elevados, e ainda menor (como adiante se verá) a grandes distâncias do globo da terra; mas em distâncias iguais é a mesma em todas as partes, porque ela acelera igualmente todos os corpos que caem (sejam pesados ou leves, grandes ou pequenos), suprimida a resistência do ar.

Definição VIII.

A quantidade motriz de uma força centrípeta é a medida da mesma, proporcional ao movimento que produz num dado tempo.

Como o peso que é maior num corpo maior, e menor num corpo menor; e no mesmo corpo é maior perto de terra, e menor nos céus. Esta quantidade é a centripetência ou propensão de todo o corpo para um centro e, por assim dizer, o seu peso; e é sempre conhecida por meio de uma força contrária igual a ela, com a qual se pode impedir a queda do corpo.

Estas quantidades das forças, para abreviar, podem chamar-se forças motrizes, aceleratrizes e absolutas, e, para as distinguir, referem-se aos corpos que se dirigem para um centro, aos lugares dos corpos e ao centro das forças. A saber, a força motriz refere-se ao corpo, como um esforço do todo para um centro, composto pelo esforço de todas as partes; a força aceleratriz, ao lugar do corpo, como alguma eficácia difundida do centro através de cada lugar circundante, para mover os corpos que aí estejam. E a força absoluta refere-se ao centro, como dotado de alguma causa, sem a qual as forças motrizes não se propagariam pelas regiões circundantes, quer essa causa seja algum corpo central (tal como um íman no centro de uma força magnética, ou a terra no centro da força que produz gravidade), quer alguma outra que não seja visível. Esta concepção é, sobretudo, matemática: com efeito, eu não pondero, por agora, as causas e sedes físicas das forças.

Portanto, a força aceleratriz está para a força motriz como a celeridade para o movimento. Na verdade, a quantidade de movimento provém da celeridade e da quantidade de matéria, e a força motriz provém da força aceleratriz e da quantidade da mesma matéria em conjunto. Na verdade, a soma das acções da força aceleratriz em cada partícula de um corpo é a força motriz do todo. Por isso, perto da superfície da terra, onde a gravidade aceleratriz ou a força que produz gravidade é a mesma em todos os corpos, a gravidade motriz, ou o peso, é como o corpo: mas se subir para regiões onde a gravidade aceleratriz se torna menor, o peso diminuirá igualmente, e será sempre como o corpo e a gravidade aceleratriz em conjunto. Assim, nas regiões onde a gravidade aceleratriz é metade, o peso de um corpo duplamente ou triplamente menor, será quatro ou seis vezes menor.

Continuando, chamo no mesmo sentido aceleratrizes e motrizes às atracções e aos impulsos. Porém, eu uso as palavras atracção, impulso ou qualquer propensão para um centro, indistinta e indiscriminadamente, considerando estas forças não física mas apenas matematicamente. Acautele-se pois o leitor para que não pense que eu, por palavras deste tipo, defini a espécie ou modo da acção, a causa ou a razão física, em qualquer parte, ou que eu atribuí forças, verdadeira e fisicamente a centros (que são pontos matemáticos) se é que alguma vez disse que os centros atraem, ou que os centros têm forças.

Escólio

Até aqui, pareceu necessário explicar em que sentido devem ser tomadas, no que se segue, palavras menos conhecidas. Tempo, espaço, lugar e movimento são termos de todos bem conhecidos. Porém, deve notar-se que vulgarmente não se concebem estas quantidades a não ser em relação àquilo que é sensível. E como daí provêm alguns conceitos errados convém, para os eliminar, dividir estas quantidades em absolutas e relativas, verdadeiras e aparentes, matemáticas e vulgares.

I. O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, em si e por sua natureza, sem relação com nada de externo, flui de modo uniforme, e com outro nome chama-se duração. O tempo relativo, aparente e vulgar é uma medida qualquer, sensível e externa, (quer exacta quer aproximada) da duração pelo movimento, a qual é vulgarmente usada em vez do tempo verdadeiro; como a hora, o dia, o mês e o ano.

II. O espaço absoluto, por sua natureza, sem relação com nada daquilo que lhe é externo, permanece sempre igual e imóvel: o espaço relativo é qualquer medida ou dimensão móvel deste espaço, a qual é definida pelos nossos sentidos pela sua posição em relação aos corpos, e é vulgarmente usado como espaço imóvel: como a dimensão do espaço subterrâneo, aéreo ou celeste que é determinada pela sua posição em relação à terra. O espaço absoluto e o espaço relativo são a mesma coisa, em espécie e em grandeza; mas não permanecem sempre o mesmo em número. Por exemplo, se a terra se mover, o espaço do nosso ar, que, relativamente e em relação à terra, permanece sempre o mesmo, será ora uma parte do espaço absoluto para a qual o ar passa, ora outra parte dele; e assim, de modo absoluto, será perpetuamente mudado.

III. Lugar é a parte do espaço que o corpo ocupa, e, em função do espaço, é ou absoluto ou relativo. Digo a parte do espaço; não a situação do corpo, ou a superfície externa. Na verdade, os lugares de sólidos iguais são sempre iguais; as superfícies, porém, são muitas vezes desiguais, por causa da dissemelhança das formas; na verdade, propriamente falando, as posições não têm quantidade, nem são tanto lugares quanto afecções dos lugares. O movimento de um todo é o mesmo que a soma dos movimentos das partes; isto é, a translação de um todo do seu lugar é a mesma que a soma das translações das partes dos seus lugares; e, por este motivo, o lugar de um todo é o mesmo que a soma dos lugares das partes e por isso é interno e está no corpo todo.

IV. Movimento absoluto é a translação de um corpo de um lugar absoluto para outro lugar absoluto, movimento relativo é a translação de um lugar relativo para outro lugar relativo. Assim, na nau que é levada pelas velas desfraldadas, o lugar relativo do corpo é aquele sítio da nau no qual o corpo se encontra, ou é aquela parte de toda a concavidade

que o corpo enche, e que portanto se move juntamente com a nau: e repouso relativo é a permanência do corpo no mesmo sítio da nau ou parte da sua concavidade. Mas o repouso verdadeiro é a permanência do corpo na mesma parte daquele espaço imóvel, na qual a própria nau se move juntamente com a sua concavidade e com tudo o que contém. Por isso, se a terra está verdadeiramente em repouso, o corpo, que relativamente repousa na nau, mover-se-á verdadeira e absolutamente com a velocidade, com a qual a nau se move na terra. Se, pelo contrário, também a terra se move, o movimento verdadeiro e absoluto do corpo resultará, em parte, do movimento verdadeiro da terra no espaço imóvel e, em parte, do movimento relativo da nau na terra. E se o corpo também se move relativamente na nau, o seu movimento verdadeiro resultará, em parte, do movimento verdadeiro da terra no espaço imóvel e, em parte, dos movimentos relativos, tanto da nau na terra, como do corpo na nau: e destes movimentos relativos resultará o movimento relativo do corpo na terra. Se aquela parte da terra, onde se encontra a nau, se move verdadeiramente para oriente com uma velocidade de 10010 partes; e a nau for levada pelas velas e pelo vento para ocidente com uma velocidade de dez partes; e um marinheiro andar na nau para oriente com uma parte da velocidade: então, o marinheiro mover-se-á verdadeira e absolutamente no espaço imóvel com 10001 partes da velocidade para oriente, e mover-se-á relativamente na terra para ocidente com nove partes da velocidade.

Em Astronomia, o tempo absoluto distingue-se do tempo relativo pela equação do tempo vulgar. Na verdade, os dias naturais, que vulgarmente são considerados como iguais para a medida do tempo, são desiguais. Os astrónomos corrigem esta desigualdade, para medir os movimentos celestes, a partir de um tempo mais verdadeiro. É possível que não haja nenhum movimento igual, pelo qual o tempo possa ser rigorosamente medido. Todos os movimentos podem ser acelerados ou retardados, mas o fluxo do tempo absoluto não pode ser alterado. A duração ou a perseverança da existência das coisas é a mesma, quer os movimentos sejam rápidos, lentos ou nulos: por isso, ela distingue-se perfeitamente pelas suas medidas sensíveis, e depreende-se das mesmas por uma equação astronómica. Mas a necessidade desta equação para determinar os fenómenos obtém-se tanto por meio de experiência do relógio oscilatório, como também por meio dos eclipses dos satélites de Júpiter.

Assim como a ordem das partes do tempo é imutável, assim também o é a ordem das partes do espaço. Se estas se movessem dos seus lugares, mover-se-iam, por assim dizer, de si próprias. Na verdade, tempos e espaços são, por assim dizer, os lugares de si

próprios e de todas as coisas. Todas as coisas estão colocadas no tempo quanto à ordem de sucessão, no espaço quanto à ordem de posição. Faz parte da sua essência serem lugares: e é absurdo que se movam os lugares primordiais. Portanto, estes são lugares absolutos; e apenas as translações destes lugares são movimentos absolutos.

Mas porque estas partes do espaço não podem ser vistas, nem podem ser distinguidas umas das outras pelos nossos sentidos, recorreremos, em vez delas, a medidas sensíveis. Na verdade, definimos todos os lugares a partir das posições e das distâncias das coisas em relação a algum corpo, que observamos como imóvel: depois também calculamos todos os movimentos pela sua relação com os lugares já referidos, na medida em que concebemos que os corpos são deslocados desses mesmos lugares. Assim, em vez de lugares e de movimentos absolutos usamos os relativos; e não de modo inadequado nas coisas humanas: porém, nas filosóficas deve abstrair-se dos sentidos. Pois é possível que não esteja realmente em repouso um corpo ao qual são referidos lugares e movimentos.

Mas repouso e movimento absolutos e relativos distinguem-se um do outro pelas suas propriedades, causas e efeitos. É uma propriedade do repouso que os corpos, que estão verdadeiramente em repouso, estejam em repouso entre si. E por este motivo, visto que é possível que algum corpo esteja absolutamente em repouso nas regiões das estrelas fixas, ou mais longe; mas como não se pode saber, a partir da posição mútua dos corpos nas nossas regiões, se algum destes mantém ou não uma dada posição em relação àquele longínquo; não se pode definir o repouso verdadeiro a partir da posição destes entre si.

É uma propriedade do movimento que as partes que conservam dadas posições em relação a todos, participem dos movimentos desses mesmos todos. Na verdade, todas as partes dos corpos que giram tendem a afastar-se do eixo do movimento e o impulso dos corpos que avançam provém do impulso conjunto de cada uma das partes. Portanto, ao moverem-se os corpos à volta, movem-se aqueles que estão relativamente em repouso dentro deles. E por isso, o movimento verdadeiro e absoluto não pode ser definido pela translação a partir da proximidade dos corpos, que se consideram como em repouso. Na verdade, os corpos externos devem ser considerados não só como estando em repouso, mas também devem estar verdadeiramente em repouso. Por seu lado, todos os corpos incluídos, além da translação pela proximidade dos corpos à volta, também participarão dos seus movimentos verdadeiros; e suprimida aquela translação não estão verdadeiramente em repouso, mas apenas serão observados como estando em

repouso. Na verdade, os corpos circundantes estão para os que encerra, como a parte exterior do todo está para a parte interior, ou como a casca está para o núcleo. Quando a casca se move, também o núcleo se move, sem translação da proximidade da casca, como parte de um todo.

Afim à propriedade precedente é mover-se juntamente com o lugar aquilo que nele está colocado quando o lugar se move: por este motivo, um corpo, que se move de um lugar movido, participa também do movimento do seu lugar. Portanto, todos os movimentos, que se fazem a partir de lugares movidos, são apenas partes dos movimentos inteiros e absolutos: e todo o movimento inteiro é composto do movimento do corpo do seu primeiro lugar e do movimento deste lugar a partir do seu lugar, e assim sucessivamente; sem interrupção até que alcance um lugar imóvel, como no exemplo do marinheiro supra mencionado. Donde se segue que os movimentos inteiros e absolutos não podem ser definidos a não ser por meio de lugares imóveis; e por isso referi anteriormente estes movimentos aos lugares imóveis, e os movimentos relativos aos lugares móveis. Porém, lugares imóveis não são senão todos aqueles que conservam entre si as posições dadas do infinito até ao infinito; e permanecem sempre imóveis e constituem o espaço ao qual eu chamo imóvel.

As causas, pelas quais se distinguem entre si os movimentos verdadeiros e os relativos, são as forças impressas nos corpos para produzir movimento. O movimento verdadeiro não se produz nem se muda, a não ser por forças impressas no próprio corpo movido: mas o movimento relativo pode ser gerado e mudado sem as forças impressas neste corpo, pois é suficiente que somente se imprimam noutros corpos com os quais estejam em relação, de modo que ao cederem estes, se mude aquela relação, na qual consiste o repouso ou o movimento relativo deste corpo. Mais uma vez, um movimento verdadeiro é sempre mudado pelas forças impressas no corpo movido; pelo contrário, o movimento relativo não é necessariamente mudado por estas forças. Na verdade, se as mesmas forças também se imprimirem noutros corpos com os quais se estabelece a relação, de forma que se conserve a posição relativa, conservar-se-á a relação na qual consiste o movimento relativo. Portanto, todo o movimento relativo pode mudar-se, quando se conserve o verdadeiro, e pode conservar-se quando se muda o verdadeiro; e, por isso, o movimento verdadeiro não consiste em relações deste género.

Os efeitos, pelos quais se distinguem entre si os movimentos absolutos e os relativos, são as forças de afastamento do eixo do movimento circular. Na verdade, no movimento circular puramente relativo estas forças não existem, porém, no verdadeiro e

absoluto são maiores ou menores em função da quantidade de movimento. Se se pendurar um balde de um fio muito longo, e for continuamente movido em círculo, até que o fio fique muito rijo devido à contorção, e a seguir se encher de água e juntamente com a água ficar em repouso; naquele momento, com alguma força repentina for movido em círculo com movimento contrário, e ao relaxar-se o fio, se mantiver durante muito tempo neste movimento; no início, a superfície da água será plana, como antes do movimento do balde: mas depois, ao imprimir-se a pouco e pouco uma força na água, o balde fará com que esta comece também sensivelmente a girar; ela própria afastar-se-á, a pouco e pouco, do centro, e subirá para os lados do balde, revestindo uma forma côncava (como eu próprio experimentei) e, com um movimento cada vez mais acelerado, subirá mais e mais até que, completando revoluções com o balde, em tempos iguais, nele repouse relativamente. Esta subida revela o esforço de afastamento em relação ao eixo do movimento e, por tal esforço, se manifesta e se mede o movimento circular verdadeiro e absoluto da água, e este é totalmente contrário ao movimento relativo. No início, quando o movimento relativo da água no balde era máximo, aquele movimento não produzia nenhum esforço de afastamento em relação ao eixo: a água não se dirigia para a circunferência subindo para os lados do balde, mas permanecia plana, e por isso, o seu movimento circular verdadeiro ainda não tinha começado. Mas depois, quando o movimento relativo da água decresceu, a sua subida para os lados do balde mostrava o esforço de afastamento em relação ao eixo; e este esforço mostrava o seu movimento circular verdadeiro sempre crescente e, finalmente, atingindo o máximo, quando a água repousava relativamente no balde. Porque este esforço não depende da translação da água relativamente aos corpos à volta e, por isso, o movimento circular verdadeiro não pode ser definido por tais translações. O movimento verdadeiramente circular de qualquer corpo que gira é único, e corresponde a um esforço único como efeito próprio e adequado: porém, os movimentos relativos são inúmeros de acordo com as várias relações com os corpos exteriores; e tal como as relações, são totalmente destituídos de efeitos verdadeiros, a não ser na medida em que participam daquele movimento verdadeiro e único. Donde, no sistema daqueles que sustentam que os nossos céus giram debaixo dos céus das estrelas fixas e que arrastam os planetas consigo; cada parte dos céus e os planetas que, de facto estão relativamente em repouso nos seus céus próximos, movem-se verdadeiramente. Com efeito, mudam as suas posições mutuamente (diferente do que acontece nos que estão verdadeiramente em repouso) e,

levados juntamente com os céus, participam dos seus movimentos e, como partes de todos os que giram, tendem a afastar-se dos eixos destes.

As quantidades relativas não são, portanto, aquelas mesmas as quantidades, que os seus nomes indicam, mas são as suas medidas sensíveis, (verdadeiras ou erradas) que vulgarmente se usam em vez das quantidades mensuradas. Mas se o significado das palavras deve ser determinado pelo uso, estas medidas sensíveis deverão ser propriamente entendidas por aqueles nomes de tempo, espaço, lugar e movimento; e a linguagem será insólita e puramente matemática, se as entendermos aqui como quantidades mensuradas. Por isso, aqueles que interpretam estas palavras como quantidades mensuradas violam as escrituras sagradas. E não menos corrompe a matemática e a filosofia quem confunde as quantidades verdadeiras com as suas relações e medidas vulgares.

Na verdade, é muito difícil conhecer os movimentos verdadeiros de cada um dos corpos e distingui-los efectivamente dos aparentes; porque as partes daquele espaço imóvel, no qual os corpos verdadeiramente se movem não caem sob o domínio dos sentidos. Todavia, a causa não está completamente perdida. Na verdade, os argumentos podem ser escolhidos; em parte, dos movimentos aparentes que são as diferenças dos movimentos verdadeiros, em parte das forças que são as causas e os efeitos dos movimentos verdadeiros. Como se duas esferas, com uma dada distância entre si, ligadas por um fio intercedente, fossem giradas ao redor de um centro de gravidade comum; a partir da tensão do fio conhecer-se-ia o esforço das esferas em afastarem-se do eixo do movimento, e com isso poder-se-ia calcular a quantidade de movimento circular. Em seguida, se se imprimissem simultaneamente quaisquer forças iguais nas faces alternadas das esferas para aumentar ou diminuir o movimento circular, o aumento ou a diminuição do movimento conhecer-se-ia pelo aumento ou diminuição da tensão do fio; e daí poder-se-iam finalmente descobrir as faces das esferas em que se deviam imprimir as forças para aumentar ao máximo o movimento, isto é, as faces posteriores, ou aquelas que num movimento circular se seguem. Assim, conhecidas as faces que se seguem e as faces opostas que precedem, conhecer-se-ia a orientação do movimento. E deste modo, poder-se-ia encontrar a quantidade e a orientação deste movimento circular em qualquer vazio imenso, onde não existe nada externo e sensível subsistisse com o qual as esferas pudessem ser comparadas. Se agora se colocassem naquele espaço alguns corpos longínquos que conservassem uma dada posição entre si, tal como as estrelas fixas nas regiões dos céus, não se poderia decerto conhecer, a partir da

translação relativa das esferas entre os corpos, se o movimento se deve atribuir a estes ou àquelas. Mas se se olhasse para o fio, e se se depreendesse que a sua tensão é a mesma que o movimento das esferas requer; seria lícito concluir que o movimento era das esferas e que os corpos estavam em repouso; e depois, por fim, a partir da translação das esferas entre os corpos obter a orientação deste movimento. Porém, inferir os movimentos verdadeiros a partir das suas causas, efeitos e diferenças aparentes, e pelo contrário dos movimentos quer verdadeiros quer aparentes inferir as suas causas e efeitos, é o que será seguidamente mais longamente demonstrado. Pois para este fim compus este tratado.

Axiomas ou Leis de Movimento

Lei I

Todo o corpo persevera no seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha recta, a não ser na medida em que é obrigado a mudar o seu estado pelas forças que lhe são impressas.

Os projecteis perseveram nos seus movimentos a não ser na medida em que são retardados pela resistência do ar e impelidos para baixo pela força da gravidade. Um pião, cujas partes, devido à sua coesão, continuamente se retraem dos movimentos rectilíneos, não cessa de rodar a não ser na medida em que é retardado pelo ar. Porém, os corpos maiores dos planetas e dos cometas conservam, por mais tempo, os seus movimentos progressivos e circulares feitos em espaços menos resistentes.

Lei II

A mudança de movimento é proporcional à força motriz impressa, e dá-se ao longo da linha recta em que aquela força é impressa.

Se alguma força gerar qualquer movimento; uma força dupla gerará um movimento duplo, uma (força) tripla (gerará um movimento) um triplo, quer (essa força) seja impressa ao mesmo tempo e de uma só vez, quer gradual e sucessivamente. E este movimento (visto que é sempre orientado para a mesma direcção que a força geratriz), se o corpo já se movia antes, acrescenta-se ao seu movimento quando vai na mesma direcção, ou subtrai-se quando vai na direcção contrária, ou acrescenta-se obliquamente quando vai em direcção oblíqua, e combina-se com o movimento do corpo segundo a determinação de ambos.

Lei III

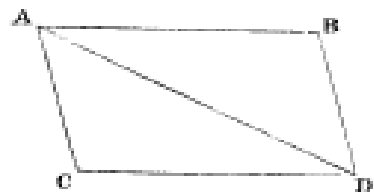
A uma acção corresponde sempre uma reacção contrária e igual: ou seja, as acções de dois corpos entre si são sempre iguais e vão em direcções contrárias.

O que quer que prima ou puxe outra coisa, outro tanto será por ela premido ou puxado. Se alguém premir uma pedra com o dedo, o seu dedo também é premido pela pedra. Se um cavalo puxa uma pedra atada a uma corda, também o cavalo será igualmente (por assim dizer) repuxado para a pedra: na verdade a corda distendida de ambos os lados impelirá, pelo mesmo esforço de se relaxar, o cavalo para a pedra e a pedra para o cavalo; e impedirá tanto o avanço de um quanto favorece o avanço do outro. Se algum corpo embatendo contra outro corpo, mudar com a sua força o movimento deste de qualquer maneira que seja, ele mesmo, por sua vez, sofrerá com a força do outro a mesma mudança no seu próprio movimento em direcção contrária, (por causa da igualdade da pressão mútua). Estas acções provocam mudanças iguais, não das velocidades mas dos movimentos; entenda-se, nos corpos não impedidos por outra causa. Na verdade, as mudanças de velocidades feitas do mesmo modo em direcções contrárias são inversamente proporcionais aos corpos, porque os movimentos são igualmente mudados. Esta lei também se mantém nas atracções, como será provado no próximo escólio.

Corolário I

Um corpo com as forças conjuntas descreve a diagonal de um paralelogramo no mesmo tempo em que com as forças separadas descreve os lados.

Se um corpo num dado tempo, só com a força M impressa no ponto A, fosse levado com movimento uniforme de A para B; também só com a força N impressa no mesmo ponto, seria levado de A para C:

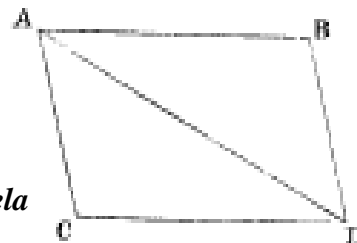


complete-se o paralelogramo ABCD, e com ambas as forças, ao mesmo tempo, aquele corpo será levado na diagonal de A para D. Na verdade, porque a força N age ao longo da linha AC paralela à linha BD, esta força, pela lei II, não mudará em nada a velocidade de acesso àquela linha BD gerada por outra força. Portanto, o corpo chegará à linha BD no mesmo tempo, quer a força N seja impressa, quer não; e, por este motivo, no fim desse tempo será encontrado em algum ponto naquela linha BD. Pelo mesmo argumento, encontrar-se-á no fim do mesmo tempo em algum ponto na linha CD, e por

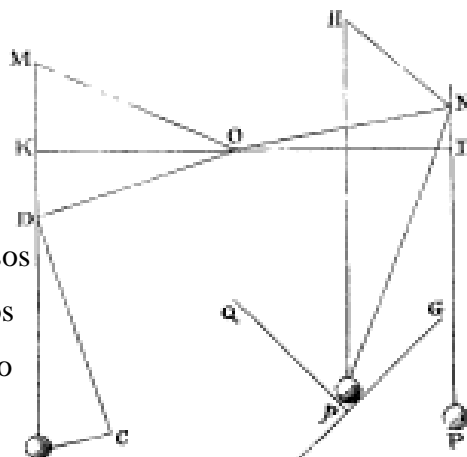
esta razão encontrar-se-á necessariamente na confluência D de ambas as linhas. Porém, pela Lei I, prosseguirá com movimento rectilíneo de A para D.

Corolário II

E daqui se vê claramente que a composição de uma força directa AD é formada pelas forças oblíquas AB e BD, quaisquer que sejam, e, por sua vez, a decomposição de qualquer força directa AD resulta nas oblíquas AB e BD, quaisquer que sejam. E estas composição e decomposição serão, na verdade, abundantemente confirmadas pela mecânica.

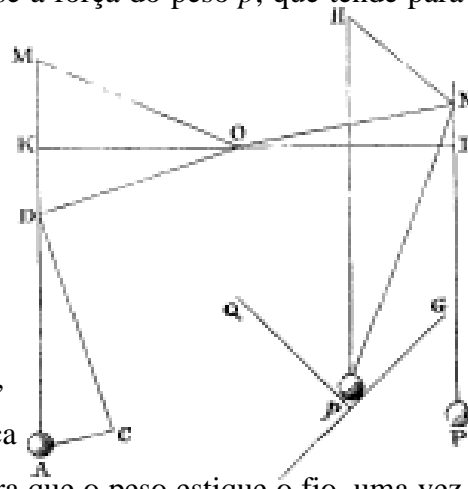


Suponhamos que os raios desiguais OM e ON, saindo do centro O de alguma roda, sustêm os pesos A e P por meio dos fios MA e NP; e que se procura achar quais são as forças dos pesos para mover a roda. Pelo centro O, faça-se passar a recta KOL que encontra perpendicularmente os fios em K e em L; com o centro em O, sendo OL o maior dos intervalos OK e OL, descreva-se um círculo que encontra o fio MA em D; e seja AC paralela à recta traçada OD, e DC perpendicular.



Visto que nada importa se os pontos K, L e D dos fios estão fixos ou não no plano da roda, os pesos terão o mesmo efeito se forem suspensos dos pontos K e L ou D e L. Porém, considere-se toda a força do peso A expressa mediante a linha AD, e esta decompor-se-á nas forças AC e CD, das quais AC, puxando o raio OD directamente do centro, não consegue mover a roda; porém, a outra força DC, puxando o raio DO perpendicularmente, consegue o mesmo efeito, que conseguiria se puxasse perpendicularmente o raio OL igual ao raio OD, isto é, o mesmo que o peso P, contanto que aquele peso esteja para o peso A como a força DC para a força DA, ou seja, (em virtude da semelhança dos triângulos ADC e DOK), como OK está para OD ou para OL. Portanto, os pesos A e P, que estão em proporção inversa como os raios OK e OL que estão colocados em linha recta, terão a mesma força e assim manter-se-ão em equilíbrio: esta é a bem conhecida propriedade da balança, da alavanca e do eixo na polé. Se pelo contrário, um dos pesos for maior do que é nesta razão, a sua força para mover a roda será proporcionalmente maior.

Ora se o peso p , igual ao peso P , em parte estiver suspenso pelo fio Np , e em parte se apoiar no plano oblíquo pG : tracem-se pH , NH , a primeira perpendicular ao horizonte, a segunda perpendicular ao plano pG ; e se a força do peso p , que tende para baixo for representada pela linha pH , esta força pode decompor-se nas forças pN e HN . Se um plano pQ fosse perpendicular ao fio pN , cortando o outro plano pG numa linha paralela ao horizonte; e o peso p se apoiasse apenas nestes planos pQ e pG ; esse peso empurraria estes planos perpendicularmente com as forças pN e HN , ou seja, o plano pQ com a força pN , e o plano pG com a força HN . Por este motivo, se o plano pQ for retirado, para que o peso estique o fio, uma vez que o fio, ao sustentar o peso, ocupa agora a função do plano retirado, será esticado pela mesma força pN , que antes empurrava o plano. Donde, a tensão deste fio oblíquo estará para a tensão do outro fio perpendicular PN , como pN está para pH . Por este motivo, se o peso p estiver para o peso A na razão que é composta pela razão inversa das distâncias mínimas dos seus fios pN e AM a partir do centro da roda e pela razão directa de pH para pN ; os pesos terão a mesma força para mover a roda, e por este motivo sustem-se-ão mutuamente, como qualquer pessoa pode experimentar.



Mas o peso p , apoiando-se naqueles dois planos oblíquos, tem a natureza de uma cunha entre as faces internas de um corpo fendido: e daí se conhecem as forças da cunha e do martelo: porque a força com a qual o peso p empurra o plano pQ está para a força, com a qual o mesmo peso é impelido ao longo da linha pH para os planos, quer pela sua gravidade, quer pela pancada do martelo, assim como pN está para pH ; e está para a força com que empurra o outro plano pG , assim como pN está para NH . Mas também a força de um parafuso se deduz por idêntica divisão das forças; visto que tal força é uma cunha impelida por uma alavanca. Por conseguinte, o uso deste corolário tem larguíssima aplicação, e tendo larga aplicação prova a sua verdade; visto que toda a mecânica, demonstrada de diversas formas pelos diferentes autores, depende do que já foi dito. Na verdade, a partir destes princípios facilmente se derivam as forças das máquinas que costumam ser compostas por rodas, tambores, roldanas, alavancas, cordas esticadas e pesos, que sobem vertical ou obliquamente, e por outras energias mecânicas, como as forças dos tendões para mover os ossos dos animais.

Corolário III

A quantidade de movimento que se obtém tomando a soma dos movimentos feitos na mesma direcção, e a diferença dos movimentos feitos na direcção contrária, não é mudada pela acção dos corpos entre si.

Com efeito, a acção e a reacção contrária são iguais pela Lei III, e por tal motivo pela Lei II produzem mudanças iguais nos movimentos e em direcções contrárias. Portanto, se os movimentos se fazem na mesma direcção; o que quer que seja acrescentado ao movimento do corpo que se afasta, será subtraído do movimento do corpo que o segue, de tal modo que a soma permanece a mesma que antes. Mas se os corpos forem ao encontro um do outro; a subtracção do movimento de um e de outro será igual, e por este motivo a diferença dos movimentos feitos em direcções contrárias permanecerá a mesma.

Seja um corpo esférico A três vezes maior do que um corpo esférico B, e tenha duas partes de velocidade; e B siga-o na mesma recta com dez partes de velocidade, e por esta razão o movimento do corpo A esteja para o movimento do corpo B, como seis está para dez: supondo-se que os seus movimentos são seis partes e dez partes, então a soma será de dezasseis partes. Portanto, no choque dos corpos, se o corpo A ganhar três, quatro ou cinco partes do movimento, o corpo B perderá exactamente outras tantas partes, e por este motivo o corpo A depois da reflexão prosseguirá com nove, dez ou onze partes, e o corpo B com sete, seis ou cinco, resultando sempre a soma de dezasseis partes como antes do choque. Se o corpo A ganhar nove, dez, onze ou doze partes e, por isso, depois do choque, avançar com quinze, dezasseis, dezassete ou dezoito partes; o corpo B, ao perder tantas partes quantas o corpo A ganhou, ou avança com uma só parte tendo perdido nove, ou fica em repouso tendo perdido o seu movimento progressivo de dez partes, ou retrocede com uma parte tendo perdido o seu movimento e (por assim dizer) ainda mais uma parte, ou retrocede duas partes por ter sido subtraído o movimento progressivo de doze partes. E assim, as somas dos movimentos conspirantes $15+1$ ou $16+0$ e as diferenças dos movimentos contrários $17-1$ e $18-2$, serão sempre dezasseis partes, como antes do choque e da reflexão. Mas sendo conhecidos os movimentos com os quais os corpos prosseguirão depois da reflexão, achar-se-á a velocidade de cada um, supondo que esta está para a velocidade antes da reflexão assim como o movimento depois está para o movimento antes. Como, no último caso, em que

o movimento do corpo A era de seis partes antes da reflexão e de dezoito partes depois, e a velocidade era de duas partes antes da reflexão; será achada a sua velocidade de seis partes após a reflexão, dizendo, assim como as seis partes do movimento antes da reflexão estão para as dezoito partes do movimento depois, assim também as duas partes da velocidade antes da reflexão estão para as seis partes da velocidade depois da reflexão.

Mas se os corpos, que não são esféricos ou que se movem em rectas diversas chocarem um contra o outro obliquamente, e se procurar achar os seus movimentos depois da reflexão; é preciso conhecer a posição do plano em que os corpos concorrentes se tocam no ponto do encontro: depois é preciso distinguir em duas espécies (por meio do Corolário II), o movimento de cada um dos corpos, um perpendicular a este plano, o outro paralelo ao mesmo: porém, os movimentos paralelos, porque os corpos agem entre si mutuamente segundo uma linha perpendicular a este plano, devem manter-se os mesmos depois e antes da reflexão; e aos movimentos perpendiculares devem ser atribuídas mudanças iguais em direcções contrárias de tal modo que a soma dos movimentos conspirantes e a diferença dos movimentos contrários permaneça a mesma que antes. A partir de tais reflexões costumam também originar-se os movimentos circulares dos corpos em redor dos próprios centros. Mas não considero estes casos no que se segue, e seria demasiado longo demonstrar todos os aspectos que dizem respeito a esta matéria.

Corolário IV

O centro comum de gravidade a dois ou mais corpos não muda o seu estado ou de movimento ou de repouso pelas acções dos corpos entre si; e, por isso, o centro comum de gravidade a todos os corpos que agem entre si (excluídas as acções e os impedimentos exteriores) ou está em repouso ou é movido uniformemente em linha recta.

Na verdade, se dois pontos progridem com movimento uniforme em linhas rectas e a sua distância for dividida numa dada razão, o ponto que divide, ou está em repouso ou progride uniformemente em linha recta. Isto é a seguir demonstrado no Lema XXIII e no seu corolário, se os movimentos dos pontos se realizarem no mesmo plano; e pode ser demonstrado pela mesma razão se esses movimentos não se

realizarem no mesmo plano. Por conseguinte, se os corpos, seja qual for o seu número, se movem uniformemente em linhas rectas, o centro comum de gravidade a quaisquer dois deles, ou está em repouso ou progride uniformemente em linha recta; porque a linha que une os centros destes corpos que progridem uniformemente em linha recta, é dividida por este centro comum numa dada razão. De igual forma, também o centro comum a estes dois e a um terceiro corpo, qualquer que seja, ou está em repouso ou progride uniformemente em linha recta; porque por ele é dividida a distância do centro comum aos dois corpos e a do centro do terceiro corpo numa dada razão. Do mesmo modo, ainda o centro comum a estes três corpos e a um quarto corpo, qualquer que seja, ou está em repouso ou progride uniformemente em linha recta; porque por ele é dividida a distância entre o centro comum a estes três e o centro do quarto corpo numa dada razão, e assim até ao infinito. Portanto, num sistema de corpos que está completamente isento de acções entre si e de todas as outras acções impressas em si do exterior, e, por isso, cada um se move uniformemente na sua recta, o centro comum de gravidade a todos ou está em repouso ou move-se uniformemente em linha recta.

Além disso, num sistema de dois corpos que agem entre si, uma vez que as distâncias de cada centro em relação ao centro comum de gravidade estão em proporção inversa tal como os corpos; os movimentos relativos dos mesmos corpos, quer de aproximação quer de afastamento desse centro, serão iguais entre si. Por isso, aquele centro nem é propulsionado, nem retardado pelas mudanças iguais dos movimentos feitas em direcções contrárias e, portanto, pelas acções destes corpos entre si, nem sofre mudança no seu estado de movimento ou de repouso. Porém, num sistema de vários corpos, visto que o centro comum de gravidade a quaisquer dois que agem mutuamente, de forma alguma muda o seu estado por causa daquela acção; e o centro comum de gravidade aos restantes corpos, com os quais aquela acção não interfere, não sofre nada com isso; no entanto, a distância destes dois centros é dividida a partir do centro comum de todos os corpos em partes inversamente proporcionais às somas totais dos corpos de que são centros; e, por este motivo, quando aqueles dois centros conservam o seu estado de movimento ou de repouso, o centro comum a todos conserva também o seu estado: é evidente que aquele centro comum a todos nunca muda o seu estado de movimento e de repouso por causa das acções dos dois corpos entre si. Porém, num tal sistema todas as acções dos corpos entre si ou são acções entre os dois corpos ou são compostas pelas acções entre os dois; e por causa disso, nunca provocam, no centro comum a todos, mudança no estado do seu movimento ou do seu repouso. É por isso que, quando aquele

centro onde os corpos não agem uns contra os outros está em repouso ou progride uniformemente nalguma recta, continua ele mesmo, não obstante as acções dos corpos entre si, a estar sempre em repouso, ou a progredir sempre uniformemente em linha recta; a não ser que forças do exterior impressas no sistema o façam sair deste estado. Portanto, a lei de um sistema de vários corpos, é a mesma que a de um corpo solitário, quanto à perseverança no estado de movimento ou de repouso. Na verdade, o movimento progressivo, quer de um corpo solitário, quer de um sistema de corpos deve sempre ser calculado a partir do movimento do centro de gravidade.

Corolário V

Os movimentos entre si de corpos incluídos num dado espaço são os mesmos, quer aquele espaço esteja em repouso, quer se mova uniformemente em linha recta sem movimento circular.

Na verdade, as diferenças dos movimentos que tendem para a mesma direcção e as somas dos que tendem para direcções contrárias, são as mesmas no início num e noutro caso (por hipótese), e a partir destas somas ou das diferenças provêm os choques e os impulsos com os quais os corpos chocam uns com os outros. Portanto, pela Lei II, os efeitos dos choques serão iguais em ambos os casos; e, por isso, os movimentos entre si, num caso, permanecerão iguais aos movimentos entre si no outro. O mesmo será comprovado com uma experiência claríssima. Numa nau, todos os movimentos se comportam entre si da mesma maneira, quer ele esteja em repouso, quer se mova uniformemente em linha recta.

Corolário VI

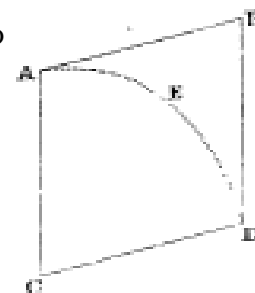
Se os corpos se moverem entre si, seja de que maneira for, e forem impelidos por forças aceleratrizes iguais segundo linhas paralelas; todos continuarão a ser movidos entre si do mesmo modo que se não estivessem impelidos por aquelas forças.

Na verdade, ao agirem aquelas forças de igual modo (em função das quantidades dos movimentos dos corpos) e segundo linhas paralelas, todos os corpos se moverão de igual forma (quanto à velocidade) pela Lei II. Por este motivo, nunca mudarão as suas posições e os movimentos entre si.

Escólio

Até agora, eu transmiti os princípios aceites pelos matemáticos e confirmados por inúmeras experiências. Galileu, por meio das duas primeiras leis e dos dois primeiros corolários, descobriu que a queda dos graves está na razão duplicada do tempo, e que o movimento dos projecteis se faz em parábola; sendo a experiência concordante, a não ser na medida em que esses movimentos são um pouco retardados pela resistência do ar. Quando um corpo está em queda, a gravidade uniforme, ao agir de igual modo em cada partícula igual de tempo, imprime naquele corpo forças iguais e gera velocidades iguais: e no tempo total imprime toda a força e gera toda a velocidade proporcional ao tempo. E os espaços descritos em tempos proporcionais são como as velocidades e os tempos em conjunto; isto é, na razão duplicada dos tempos. E quando um corpo é lançado para cima, a gravidade uniforme imprime forças e retira velocidades proporcionais aos tempos; e os tempos da subida para as alturas mais elevadas são como as velocidades que devem ser retiradas, e essas alturas são como as velocidades e os tempos em conjunto, ou na razão duplicada das velocidades. E o movimento oriundo da projecção de um corpo lançado segundo uma recta qualquer é composto com o movimento oriundo da gravidade. Como se o corpo A apenas com o

movimento de projecção pudesse descrever num dado tempo a recta AB e apenas com o movimento de queda pudesse descrever a altura AC no mesmo tempo: complete-se o paralelogramo ABDC, e aquele corpo com movimento composto será encontrado no lugar

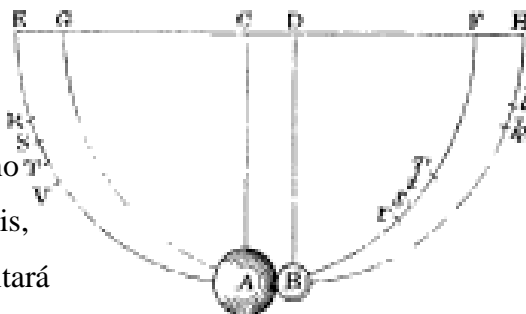


D no fim do tempo; e a linha curva AED, que aquele corpo descreverá, será uma parábola que a recta AB tocará em A, e cuja ordenada BD é como AB^2 . A partir destas mesmas leis e corolários dependem as coisas demonstradas acerca dos tempos dos pêndulos oscilatórios, sendo caucionadas pela experiência quotidiana dos relógios. A partir destes mesmos e da Lei III, Sir Christopher Wren, o Dr. John Wallis S. e Christiaan Huygens, sem dúvida os mais importantes dos géometras dos tempos precendentes, descobriram separadamente as regras dos choques e reflexões dos corpos duros, e quase ao mesmo tempo comunicaram-nas à Royal Society, concordando inteiramente entre si (quanto a estas leis): na verdade, o primeiro a apresentar a sua descoberta foi Wallis, seguido de Wren e Huygens. Mas a verdade foi comprovada por Wren perante a Royal Society por meio de experiências com pêndulos: a qual também o ilustríssimo Mariotte, pouco tempo depois, achou conveniente expor num livro inteiro.

Mas, para que esta experiência concorde exactamente com as teorias, devem ser tidas em conta, tanto a resistência do ar, como também as forças elásticas dos corpos que chocam. Suspendam-se os corpos esféricos A e B, com fios paralelos e iguais AC e BD, dos centros C e D. Com estes centros e distâncias descrevam-se os semicírculos EAF e GBH, bissectados pelos raios CA e DB. Puxe-se o corpo A para qualquer ponto R do arco EAF, e (retirado o corpo B) daí deixe-se cair,

e depois de uma oscilação regresse ao ponto V.

RV é o retardamento que resulta da resistência do ar. Torne-se ST a quarta parte deste RV, situada no meio, isto é, de tal modo que RS e TV sejam iguais, e RS esteja para ST como 3 para 2. E ST representará muito aproximadamente o retardamento na queda de S



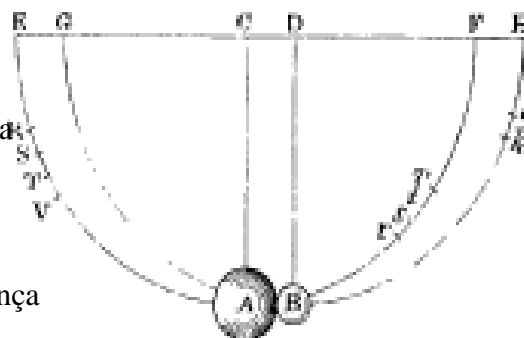
para A. Restitua-se o corpo B ao seu lugar. Deixe-se cair o corpo A do ponto S, e a sua velocidade no lugar da reflexão A, sem erro sensível, será tão grande como se caísse no vácuo a partir do lugar T. Represente-se, portanto, esta velocidade pela corda do arco TA. Na verdade, é uma proposição bem conhecida pelos géometras que a velocidade do pêndulo no ponto mais baixo é como a corda do arco que descreveu ao cair. Depois da reflexão, o corpo A alcance o lugar s, e o corpo B o lugar k. Retire-se o corpo B e ache-se o lugar v; se a partir deste se deixar cair o corpo A, e se depois de uma oscilação ele regressar ao lugar r, seja st a quarta parte de rv situada no meio, isto é, de tal modo que rs e tv sejam iguais; e pela corda do arco tA represente-se a velocidade, que o corpo A tinha no lugar A imediatamente após a reflexão. Na verdade, t será aquele lugar verdadeiro e correcto ao qual o corpo A, suprimida a resistência do ar, deveria ascender. Com método semelhante deverá ser corrigido o lugar k, ao qual o corpo B sobe, e deverá ser encontrado o lugar l, ao qual aquele corpo deverá subir no vácuo. Desta forma, pode experimentar-se tudo como se tivéssemos sido colocados no vácuo. Finalmente, o corpo A deverá ser multiplicado (por assim dizer) pela corda do arco TA, a qual exhibe a sua velocidade, para se obter o seu movimento no lugar A imediatamente antes da reflexão; depois para a corda do arco tA, para se obter o seu movimento no lugar A imediatamente após a reflexão. E assim o corpo B deverá ser multiplicado pela corda do arco Bl, para se obter o seu movimento imediatamente depois da reflexão. E com método semelhante, quando dois corpos são largados, ao mesmo tempo, de lugares opostos, os movimentos de ambos devem ser achados tanto antes, como após a reflexão; e somente então se devem comparar os movimentos entre si e se devem concluir os

efeitos da reflexão. Deste modo, ao tentá-lo em pêndulos de dez pés, e isto tanto em corpos diferentes, como em iguais, e ao fazer com que os corpos chocassem a partir de intervalos amplíssimos, por exemplo, de oito, doze ou dezasseis pés, descobri sempre, com um erro de menos de três polegadas nas medições, que, quando os corpos chocavam entre si, directamente, as mudanças dos movimentos nos corpos dirigidas para direcções contrárias eram iguais, e que, por isso, a acção e a reacção eram sempre iguais. Por exemplo, se o corpo A ia contra o corpo B, que está em repouso, com nove partes do movimento e, perdidas sete partes, prosseguia depois da reflexão com duas; o corpo B recuava com essas sete partes. Se os corpos vão um contra o outro, A com doze partes e B com seis partes; e A recuava com duas partes; o corpo B recuava com oito partes, feita a supressão de catorze partes de cada lado. Do movimento de A subtraíam-se doze partes e não restará nada: subtraíam-se outras duas partes, e dar-se-á um movimento de duas partes em direcção contrária: e assim, ao subtrair-se catorze partes ao movimento do corpo B de seis partes, originar-se-ão oito partes em direcção contrária. Ora se os corpos fossem na mesma direcção, A mais rápido com catorze partes, e B mais lento com cinco partes, e depois

da reflexão A prosseguisse com cinco partes; B prosseguia com catorze partes, feita a transferência de nove partes de A para B. E assim nos restantes.

A quantidade de movimento, que é obtida a partir da soma dos movimentos conspirantes e da diferença dos movimentos contrários, nunca é mudada pelo

encontro e colisão dos corpos. Na verdade, eu atribuiria o erro de uma ou duas polegadas nas medições, à dificuldade de realizar cada coisa com todo o rigor. O difícil era, não só deixar cair os pêndulos ao mesmo tempo, de modo que os corpos batessem um contra o outro no lugar mais baixo AB; mas também marcar os lugares *s* e *k*, aos quais os corpos subiam depois do choque. Mas até nos próprios corpos, a densidade desigual das partes nos pêndulos e a textura irregular, por diferentes razões, induziam erros.

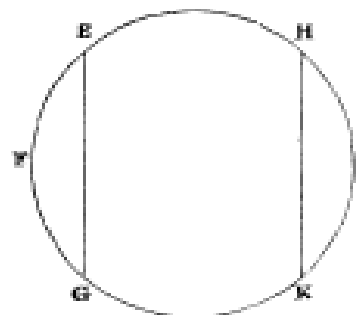


Continuando, para que ninguém objecte que a regra, para cuja demonstração foi criada esta experiência, pressupõe que os corpos ou são absolutamente duros, ou pelo menos perfeitamente elásticos, do género que não se encontra em composições naturais; eu acrescento que as experiências já descritas sucedem igualmente nos corpos moles e nos duros, seguramente, sem que dependam, de modo algum, da condição de dureza. Na verdade, se aquela regra deve ser posta à prova nos corpos que não são perfeitamente duros, somente deverá ser diminuída a reflexão numa certa proporção em função da quantidade da força elástica. Na teoria de Wren e de Huygens, os corpos totalmente duros afastam-se um do outro com a velocidade do choque. Isto afirmar-se-á com mais certeza em relação aos corpos perfeitamente elásticos. Nos corpos imperfeitamente elásticos, a velocidade do recuo deve ser diminuída juntamente com a força elástica, porque aquela força (a não ser quando as partes dos corpos são danificadas por causa do choque, ou sofrem alguma extensão como sob a acção de um martelo), é certa e determinada (tanto quanto eu percebo) e faz com que os corpos se afastem um do outro com uma velocidade relativa, que está numa dada razão para a velocidade relativa do choque. Eu tentei isto assim em bolas de lã estreitamente aglomerada e fortemente apertada. Primeiramente, ao deixar cair os pêndulos e medindo a reflexão, eu descobri a quantidade da força elástica; depois por meio desta força determinei as reflexões em outros casos de choques, e as experiências responderam. As bolas afastavam-se sempre umas das outras com uma velocidade relativa, que estava para a velocidade relativa do choque como cinco para cerca de nove. Quase com a mesma velocidade recuavam as bolas de aço: as outras de cortiça com pouco menos: nas de vidro, porém a proporção era de, aproximadamente, 15 para 16. E desta forma, a Lei III foi comprovada quanto aos choques e às reflexões pela teoria, que está claramente de acordo com a experiência.

Nas atracções, mostro isto de forma breve como se segue. Em quaisquer dois corpos A e B que se atraem mutuamente, imagine-se que qualquer obstáculo se interpõe, impedindo o seu encontro. Se dos dois corpos um A for mais atraído na direcção do outro corpo B do que aquele outro B para o primeiro A, o obstáculo será mais empurrado pela pressão do corpo A do que pela pressão do corpo B; e por isso não permanecerá em equilíbrio. Prevalecerá a pressão mais forte; e fará com que o sistema dos dois corpos e do obstáculo se mova em linha recta em direcção às partes de B, e que, com movimento sempre acelerado, em espaços livres, se afaste para o infinito. O que é absurdo e contrário à Lei I. Na verdade, pela Lei I, o sistema deverá perseverar no seu

estado de repouso ou de movimento uniforme em linha recta, e por isso os corpos empurrarão igualmente o obstáculo e, por esta razão, atrair-se-ão igualmente um ao outro. Eu tentei isto no íman e no ferro. Se estes, colocados, separadamente, em vasos próprios, contíguos entre si, flutuarem muito perto em água parada; nenhum dos dois repelirá o outro, mas por causa da igualdade de atracção de ambas as partes, sustentarão o esforço mútuo entre si e, por fim, postos em equilíbrio, repousarão.

Assim também é mútua a gravidade entre a terra e as suas partes. Divida-se a terra FI com qualquer plano EG em duas partes EGF e EGI: e o peso de cada uma dessas partes será igual à outra. Na verdade, se com outro plano HK, paralelo ao primeiro EG, se dividir a maior parte EGI em duas partes EGKH e HKI, das quais HKI seja igual à parte EFG antes separada: é evidente que a parte intermédia EGKH pelo seu próprio peso não propenderá para nenhuma das partes extremas, mas ficará, por assim dizer, suspensa em equilíbrio entre uma e outra, e em repouso. Porém, a parte extrema HKI com todo o seu peso cairá sobre a parte média e empurra-la-á para a outra parte extrema EGF; e, por este motivo, a força com a qual EGI, soma das partes HKI e EGKH, tenderá para a terceira parte EGF, é igual ao peso da parte HKI; isto é, ao peso da terceira parte EGF. E, por causa disto, os pesos de cada uma das partes EGI e EGF, um em direcção ao outro, são iguais entre si, como eu quis demonstrar. E se esses pesos não fossem iguais, toda a terra, flutuando no éter livre, cederia ao peso maior e ao fugir dele afastar-se-ia para o infinito.



Assim como os corpos têm a mesma força no choque e reflexão, cujas velocidades estão na relação inversa das forças ínsitas: assim também nos instrumentos mecânicos, os agentes têm a mesma força e sustentam-se mutuamente graças aos esforços contrários, cujas velocidades, estimadas segundo a determinação das forças, estão na relação inversa das forças. Assim, os pesos são equipolentes para mover os braços da balança, os quais, quando a balança oscila estão na relação inversa das suas velocidades para cima e para baixo: isto é, os pesos, se sobem e descem em linha recta, são equivalentes, os quais estão na relação inversa das distâncias dos pontos pelos quais estão suspensos do eixo da balança; mas se, desviados por planos oblíquos ou por outros obstáculos interpostos, sobem ou descem obliquamente, são equipolentes, os quais estão na relação inversa da subida e da descida, na medida em que são feitos segundo uma perpendicular: e isto por causa da determinação da gravidade para baixo. De forma

semelhante, na roldana ou num conjunto de roldanas, a força da mão, que puxa a corda em linha recta, sustera o peso, a qual está para o peso que sobe em linha recta ou obliquamente, como a velocidade da subida perpendicular para a velocidade da mão que puxa a corda. Nos relógios e instrumentos semelhantes, que foram construídos a partir de uma combinação de rodas, as forças contrárias para promover ou impedir o movimento das rodas, sustera-se-ão mutuamente, se são inversamente proporcionais às velocidades das partes das rodas nas quais são impressas. A força do parafuso para apertar um corpo está para a força da mão que gira o cabo, como a velocidade circular do cabo, na mesma parte onde é impelida pela mão, está para a velocidade progressiva do parafuso em direcção ao corpo pressionado. As forças com as quais a cunha impele as duas partes fendidas da madeira estão para a força do martelo na cunha, como o progresso da cunha, segundo a determinação da força impressa nela própria pelo martelo, está para a velocidade com a qual as partes da madeira cedem à cunha, segundo linhas perpendiculares às faces da cunha. E igual é a explicação para todas as máquinas.

A sua eficácia e utilidade consistem somente em, diminuindo a velocidade, aumentarmos a força, e vice-versa: donde se resolve o problema, em todo o género de instrumentos próprios, *de mover um dado peso com uma dada força*, ou de ultrapassar com uma dada força outra dada resistência. Na verdade, se as máquinas fossem de tal modo construídas que as velocidades do agente e do resistente fossem inversamente proporcionais às forças; o agente aguentaria a resistência: e, com maior disparidade de velocidades, a superaria. Certamente se a disparidade de velocidades for tão grande que seja também ultrapassada toda a resistência que costuma tanto provir da fricção dos corpos contíguos e dos que deslizam entre si, como a partir da coesão dos corpos contínuos, que se devem separar um do outro, e dos corpos que devem ser elevados pelos pesos, sendo superada toda a resistência, a força em excesso produzirá uma aceleração do movimento, proporcional a si mesma, quer nas partes da máquina, quer no corpo resistente. De resto, não é meu objectivo tratar aqui da mecânica. Com isto, eu quis apenas mostrar o quão está amplamente patente e quão certa é a Lei III do movimento. Na verdade, se a acção de um agente é estimada a partir da sua força e da velocidade em conjunto; e, de modo semelhante, se a reacção do resistente é estimada em conjunto pelas velocidades de cada uma das suas partes e pelas forças de resistência oriundas da sua fricção, coesão, peso e aceleração; a acção e a reacção serão, no uso de todo o tipo de instrumentos, sempre iguais entre si. E na medida em que a acção se

propaga através do instrumento e, por último, é impressa em todo o corpo resistente, a sua última determinação será sempre contrária à orientação da reacção.

CAPÍTULO 2 - INÉRCIA: GÉNESE E EVOLUÇÃO DE UM CONCEITO

2.1 - Inércia

Quando pensamos na palavra inércia, imediatamente pensamos em algo sem movimento, algo estático. Como refere Ricardo Coelho (2004: 248), “se o leitor admitir que a matéria é inerte e observar um corpo em actividade, será naturalmente levado a pensar que algo actua sobre o corpo, pois ele por si não teria tal actividade, justamente porque é inerte. Este tipo de raciocínio pertence aos fundamentos da física desde o séc. XVII.”

Vejamos, então, se a palavra inércia assume na física o mesmo significado que possui na linguagem comum. Procurando a definição do conceito de inércia nos livros de física clássica, aí a inércia surge-nos como a tendência de um corpo em permanecer no estado de repouso, se estiver em repouso, ou permanecer no estado de movimento rectilíneo uniforme, se estiver em movimento. Dividamos a definição encontrada em duas partes para uma melhor análise da mesma: a primeira parte está relacionada com o repouso e a segunda com o movimento. Se tivermos em conta a primeira parte do conceito, concluiremos que a definição vai ao encontro do sentido comum do termo, pois se inércia significa algo sem movimento, um corpo morto, então é perfeitamente adequado. Os problemas surgem quando analisamos a segunda parte da definição que se encontra ligada ao movimento, implicando o movimento de um corpo. Numa primeira abordagem, esta segunda parte parece antagónica ao significado comum do termo. Somos, então, levados a questionar sobre como se pode ligar um corpo em movimento à ideia de inércia? Ou, indo mais longe, como podem estar dois termos tão diferentes, repouso e movimento, unidos dentro do mesmo conceito? E porquê o movimento rectilíneo e uniforme e não outro tipo de movimento? Dar resposta a estas questões é o nosso primordial objectivo.

A noção de inércia, hoje tão familiar, só foi pela primeira vez explicitada, embora de forma diferente, no século XVII, e sofreu a sua maior evolução ainda durante esse mesmo século. Será a génese e a evolução do conceito de inércia que abordaremos primeiramente.

2.2 Aristóteles

Antes de adentrarmos na história do conceito de inércia propriamente dita, olhemos para Aristóteles, uma vez que aí encontramos o gérmen da física do movimento.

A física aristotélica, a física antiga, acreditava que a Terra estava em repouso absoluto no centro do universo, que era considerado finito, e que todos os outros corpos celestes giravam em torno de si, ou seja, era um sistema geocêntrico²⁸. Com base neste pressuposto foi pensada e construída toda uma física para explicar o movimento dos corpos numa Terra em repouso no centro do Universo, e uma física para explicar o movimento dos corpos celestes, que se moviam de forma diferente dos corpos terrestres.

Para Aristóteles, tudo o que existia na Terra era constituído por quatro elementos, ar, terra, fogo e água, isto é, cada corpo resultava de uma combinação destes elementos. Assim, de acordo com a proporção dos seus elementos constituintes, cada corpo seria mais leve ou mais pesado, e consoante a sua natureza possuía um lugar adequado e teria também o seu movimento natural que o conduziria, dessa forma, ao seu lugar, onde uma vez aí chegado, aí permaneceria em repouso. Como explica Herbert Butterfield²⁹, a terra e a água possuem gravidade, têm tendência para cair e só ficam em repouso no centro do Universo, já o fogo e o ar não têm gravidade, caracterizam-se pela leveza, têm, assim, tendência para subir. Desta forma, quando os corpos são pesados o seu movimento natural é para baixo, em linha recta, se são leves o seu movimento natural é para cima também em linha recta. E, como já foi referido, o movimento natural cessa quando o corpo atinge o seu lugar. Desta forma, explica Alexandre Koyré³⁰, na física aristotélica cada coisa possui, no universo, um lugar próprio, conforme à sua natureza, assim, estar num sítio ou nouro não lhes é indiferente. Porém, nem todos os objectos que existem na Terra se movem desta forma, como tal, Aristóteles teve de justificar também os restantes movimentos que os corpos, por vezes, descreviam, como por exemplo, “uma seta desfechada por um arco desloca-se, no início, aparentemente numa direcção perpendicular à vertical; uma bola na extremidade de uma corda pode girar em círculo;

²⁸ A teoria da Terra no centro do Universo só seria revogada no século XVI, com Nicolau Copérnico, que dá origem à teoria do heliocentrismo.

²⁹ BUTTERFIELD, Herbert, *As origens da ciência moderna*, trad. Teresa Martinho, Lisboa, Edições 70, 2003.

³⁰ KOYRÉ, Alexandre, *Estudos Galilaicos*, trad. Nuno da Fonseca, Publicações Dom Quixote, Lisboa, 1992.

uma pedra pode ser atirada verticalmente para cima.”³¹ Na física aristotélica, todos os movimentos contrários aos movimentos naturais dos corpos são movimentos violentos, e só acontecem quando uma força causa e mantém tal movimento. Este sistema de movimentos que acabámos de ver aplicava-se apenas aos corpos terrestres, pois o movimento dos corpos celestes justificava-se de outra forma.

Aristóteles acreditava que os corpos celestes eram compostos por outro elemento, um quinto elemento, diferente dos quatro elementos que constituíam os corpos terrestres. Esse elemento constituinte era chamado por Aristóteles o quinto elemento, o éter. Ao serem formados de éter, os corpos celestes tinham, por conseguinte, outra natureza. Ao terem outra natureza, teriam também de ter outro movimento natural, distinto do movimento descrito pelos corpos terrestres. Aristóteles defendia que o movimento natural de um corpo composto de éter era o movimento circular, que não cessava nunca, era um movimento infinito. Ao ser um movimento natural, o movimento circular não precisava de um motor, de algo que mantivesse ou justificasse o movimento.

Para Aristóteles o universo era algo hierarquizado³², que se organizava da seguinte maneira, no centro estava a Terra, a seguir a água, depois o ar, depois o fogo e, por último, o éter. Como vimos anteriormente, os corpos apenas têm movimento natural até encontrarem o seu lugar, pois uma vez aí encontrados, cessariam o seu movimento. Era desta forma que Aristóteles justificava o repouso da Terra no centro do Universo, ou seja, a Terra já estava no seu lugar natural. Assim, Aristóteles não só defendia que a Terra não tinha translação, como dizia, inclusive, que não tinha rotação, era algo absolutamente estático. De acordo com Cohen, a principal razão física para isto, segundo o velho sistema, era não ser “natural” que a Terra tivesse um movimento circular, pois uma translação da Terra em torno do Sol ou uma rotação diária seriam contrárias à sua natureza.³³ Ao ser distinta dos corpos celestes, quer nas suas características físicas, quer na sua composição e propriedades essenciais, não necessita de estar em constante movimento, ou seja, em movimento circular, como aqueles.

³¹ COHEN, I. Bernard, *O Nascimento de uma Nova Física*, trad. Maria Alice Gomes da Costa, rev., adapt. e notas José Félix Gomes da Costa ; préf. João Andrade e Silva ; rev. de texto Miguel Pereira, Lisboa, Gradiva, 1988, p. 32.

³² Segundo Butterfield, na física aristotélica os elementos encontravam-se hierarquizados de acordo com a sua virtude e nobreza.

³³ Cf. Cohen, *op. cit.*, pp. 42-43, para os argumentos de Aristóteles sobre a impossibilidade de movimento da Terra.

Direccionemos, agora, a nossa atenção para o movimento dos corpos terrestres. Como já referimos, para Aristóteles existiam dois tipos de movimentos nos corpos terrestres, o movimento natural, que era linear ascendente ou linear descendente, e o movimento violento, que seriam todos os outros movimentos que se verificavam nos corpos. O movimento natural é um movimento que está ligado à natureza do corpo, é a sua natureza que o justifica e, como tal, não precisa de uma razão externa para que aconteça. Como explica Koyré (1992: 26), “essa causa, esse motor é a própria natureza do corpo, a sua forma, que procura reconduzi-lo ao seu lugar; é ela que conserva o movimento.” No movimento violento, o que se verifica é exactamente o contrário, pois para que o movimento se realize, é preciso algo que faça o corpo mover-se dessa forma, existe sempre uma causa exterior ao corpo que provoca esse movimento, pois o corpo por si só não se moveria assim. Marshall Clagett, citado por Michael Matthews, resume a convicção de Aristóteles da seguinte forma: “for Aristotle motion is a process arising from the continuous action of a source of motion or ‘motor’ and a ‘thing moved’. The source of motion or motor is a force— either internal as in natural motion or external as in unnatural [violent] motion— which during motion must be in contact with the thing moved.”³⁴ Neste sentido afirma Calvin Kalman: “Aristotelian physics held that ... a body cannot move unless there is a mechanical cause that is responsible for the body’s motion.”³⁵ Ou seja, pode dizer-se, tal como Matthews (2009) sintetiza, que a física aristotélica tinha como alicerces os seguintes princípios medievais: *omne quod movetur ab alio movetur*, tudo o que é movido é movido por outra coisa, e o seu inverso, *cessante causa cessat et effectus*, cessando a causa, cessa também o efeito. Isto é, “suprima-se o motor, e o movimento parará. Separe-se o motor do móvel, e o movimento igualmente parará.” (KOYRÉ, 1992: 26)

Analisando a primeira citação, há um outro aspecto importantíssimo da física aristotélica que devemos também salientar, que é a noção do movimento enquanto processo. Para Aristóteles, o movimento, quer o natural, quer o violento, era considerado um processo, processo esse que tinha por fim o repouso. Como esclarece Koyré, na dinâmica aristotélica “todo movimiento es cambio (actualización o corrupción) y, por consiguiente, un cuerpo en movimiento no sólo cambia com relación

³⁴ MATTHEWS, Michael R., «Teaching the Philosophical and Worldviews Components of Science», *Science & Education*, 18, 2009, pp. 697-728, p. 705.

³⁵ KALMAN, Calvin, «A Role for Experiment in Using the Law of Inertia to Explain the Nature of Science: A Comment on Lopes Coelho», *Science and Education*, 18, 2009, pp. 25-31, p. 26.

a los otros cuerpos, sino que al mismo tiempo está sometido a un proceso de cambio. Por eso el movimiento afecta siempre al cuerpo que se mueve.”³⁶ Como refere Augusto Santos Fitas (1996: 15-16), “nesta concepção o movimento era entendido como um desenvolvimento, que alterava as características inerentes ao corpo, opondo-se ao repouso que correspondia à ausência desse processo.” Isto implicava que qualquer movimento tinha a necessidade de um motor que o causasse e que, se ele persistisse, o conservasse, pois nada se move por si mesmo. O movimento, com efeito, não persiste sozinho, desta forma compreende-se que seja entendido como algo passageiro, pois movimento natural pára naturalmente quando o seu fim é atingido, quanto ao movimento violento, “Aristóteles é demasiado optimista para poder admitir que possa perdurar”. (KOYRÉ 1992: 24). Só o repouso era, para Aristóteles, o estado natural de um corpo. Neste sentido, era o único estado do corpo considerado como tendente a prolongar-se indefinidamente. Explica Dudley Shapere, “it did not constitute a change requiring a causal explanation.”³⁷ O repouso não precisa de uma causa que explique a sua persistência, já o movimento, sendo um processo, não pode passar sem ela. Assim, se o corpo estivesse em repouso, continuaria em repouso, se estivesse no seu movimento natural continuaria no seu movimento natural, até encontrar o seu lugar natural, onde uma vez aí, pararia. Como refere Butterfield (2003:15), “a doutrina aristotélica da inércia era uma doutrina de repouso.” O movimento, e não o repouso, é que necessitava sempre de uma explicação. Onde quer que esse movimento existisse e qualquer que fosse a sua duração, algo tinha de ser responsável por ele. Uma vez que o motor cessasse a sua acção, o movimento cessaria. O corpo cairia no sentido do centro da Terra ou entraria imediatamente em repouso. Porém, este último princípio pode ser objectado da seguinte forma. Nos exemplos supra mencionados de movimentos violentos, como, por exemplo, uma seta atirada, o que se verifica é que a seta, quando abandona o arco que a dispara, não cai imediatamente ao chão, ou seja, o seu movimento não cessa bruscamente mas prolonga-se por algum tempo. Como justificava, então, Aristóteles este facto? Refere Walter Araújo que “com toda a sua genialidade, Aristóteles explicava que quando o móvel se deslocava, o meio era também deslocado, o ar sucedia o móvel empurrando-o de tal maneira que a sucessão era um processo

³⁶ KOYRÉ, Alexandre, *Estudios de Historia del pensamiento científico*, trad. Encarnación Pérez Sedño et Eduardo Busto, 10.^a ed., México, Siglo Veintiuno, 1990, p. 185.

³⁷ SHAPER, Dudley, «The Philosophical Significance of Newton’s Science», in *The Texas Quarterly*, Vol. X, n.º 3, Autumn, 1967, pp. 201-215, p. 208.

contínuo que se desenvolvia até ao fim do movimento.”³⁸ Isto é, Aristóteles explicava esse movimento pela acção do meio que continuava a actuar sobre o corpo da mesma forma que antes actuava o motor. Se é o meio que promove o movimento a partir do momento em que o corpo abandona o motor que o lançou, este facto levou Aristóteles a concluir que no vácuo o movimento nunca se propagaria, pois ao não haver nada que mantivesse o corpo em movimento, uma vez que o vazio não constitui um meio, nada haveria que transmitisse e conservasse o movimento, que, imediatamente, impeliria o corpo para baixo na vertical. Quanto ao movimento natural, a impossibilidade de existência do vazio continua a manter-se, todavia as razões invocadas são diferentes. Poderíamos pensar que a negação do vazio e do movimento no vazio apenas se aplicava aos movimentos violentos, visto que o meio ambiente seria o seu motor. Todavia, no movimento natural, apesar de não necessitar de nenhum meio que o prolongasse, tal também não é possível. Como vimos, os movimentos naturais são a manifesta tendência que cada corpo tem para atingir o seu lugar respectivo e esse movimento terminaria quando o corpo ocupasse o seu lugar natural. No entanto, como clarifica Araújo (2008: 27), “no vazio não existem lugares nem direcções privilegiadas, assim não podem existir lugares naturais com estas características: um corpo no vazio não saberia para onde ir e não teria razão para mover-se numa direcção preferencial, portanto, não se moveria.” Aristóteles na sua obra *Física*, livro IV, refere acerca da impossibilidade do vácuo que: “No one could say why a thing once set in motion should stop anywhere; for why should it stop *here* rather than *here*? So that a thing will either be at rest or must be moved ad infinitum, unless something more powerful gets in its way.”³⁹ Diz Allan Franklin que esta afirmação de Aristóteles, é do ponto de vista de um físico moderno, a sua mais interessante declaração sobre o movimento no vácuo pois “Aristotle has [...] given a clear statement of the inertial principle [...] He has, however, turned the argument around and regards it rather as a proof of the impossibility of motion in a void. The inertial consequences of this motion would be the unacceptable (to Aristotle) result of motion that is infinite in extent.”⁴⁰

³⁸ ARAÚJO, Walter D., *Génese do Pensamento Galileano*, São Paulo, Livraria da Física Editora, 2008, p. 27.

³⁹ BRAKENRIDGE, Bruce, *The Key to Newton's Dynamics: the Kepler problem and the Principia*, California, University of California Press, 1995, p. 17.

⁴⁰ FRANKLIN, Allan, «Principle of inertia in the Middle Ages», *American Journal of Physics*, vol. 44, n.º 6, Jun., 1976, pp. 529-545, p. 530.

É na sua obra intitulada *Física*, escrita no século IV a.C., que Aristóteles explica em que residem os princípios da sua filosofia natural. As asserções de Aristóteles sobre o movimento dos corpos não só lançaram as bases da filosofia natural, como, durante mais de dois mil anos, influenciaram toda a ciência física que se lhe seguiu, afectando o pensamento científico da Idade Média, Renascimento, sendo só mais tarde, no século XVI, postas em causa.

No século XVI, Nicolau Copérnico descobre que a Terra não se encontrava em repouso no centro do Universo, mas sim em constante movimento à volta do Sol e, logo, com a Terra movia-se tudo o que ela continha. Ao admitir-se que a Terra tinha movimento, a divisão aristotélica entre movimentos naturais terrestres e movimentos naturais celestiais tornou-se cada vez mais problemática, sendo imperioso criar uma nova física do movimento, a física de uma terra em movimento, mais adequada às necessidades que se impunham. Havia, pois, muitas perguntas às quais teria de se dar resposta, visto que a velha física de Aristóteles não se coadunava com a física de uma Terra em movimento.

Apesar de a descoberta de Copérnico ter posto em causa um dos princípios basilares da física de Aristóteles, o geocentrismo, algumas das asserções de Aristóteles sobre o movimento dos corpos terrestres ainda persistiram no pensamento científico durante muito tempo, pois era algo que se encontrava muito arraigado, não sendo fácil fazer a cisão total com a velha física. E, como veremos, alguns dos princípios instituídos por Aristóteles funcionaram como entraves ao desenvolvimento científico de Kepler e Galileu não lhes permitindo ver mais além.

2.3 Johannes Kepler (1571-1630)

São vários os autores que afirmam que foi Kepler quem introduziu o termo “inércia” na física, na sua obra *Epitome Astronomiae Copernicanae* (1618-1621), sendo o primeiro autor a utilizar essa palavra e a atribuir-lhe um conceito. Que significava, então, inércia para Kepler e como a ligava à sua teoria sobre o movimento dos corpos?

O significado de inércia para Kepler estava unido ao seu sentido literal, que em latim significava ociosidade, inactividade, indolência. Como refere Cohen, “for him inertia was only a tendency of all bodies whatsoever to come to rest, a fundamental

laziness of bodies.”⁴¹ Kepler ligava assim o termo inércia ao repouso do corpo ou à tendência de um corpo para o repouso, à propensão para o seu estado natural, seguindo o princípio instituído por Aristóteles de que o repouso era um estado. Acrescenta o mesmo autor (*ibidem*) que “the Keplerian concept of inertia, however, did introduce at least two fundamental departures from the traditional physics: it implied that all kinds of bodies, terrestrial and celestial, tended to come to rest and to stay at rest and so needed the same forces to keep them moving.” Kepler baseava esta presunção no facto de o repouso ser um estado do corpo, e ao ser um estado não requeria uma explicação ou uma causa, pois fazia parte da natureza do corpo. Nesta concepção, movimento e repouso opõem-se. Enquanto tem necessidade de uma causa para explicar a existência e a persistência do movimento, não precisa dela para explicar o repouso, nem a paragem do movimento. O repouso e a paragem justificam-se pela inércia natural dos corpos.

Na citação de Cohen, é referido algo que importa destacar. Como anteriormente aludimos, Aristóteles fazia a distinção entre corpos celestes e corpos terrestres, o que implicava que tivessem naturezas distintas e diferentes comportamentos. No entanto, com Kepler perde-se essa diferença. Esclarece Koyré (1992: 231) que, “a inércia é, para Kepler, uma propriedade absolutamente geral da matéria, consequência da sua impotência. E assim, sendo a matéria una no universo, atribui essa inércia aos corpos celestes, que, como tudo o mais, devem ser movidos por uma força activa (que Kepler faz emanar do Sol) e que parariam se deixassem de o ser.” Para Kepler todos os corpos têm a mesma natureza e comportam-se de igual forma, ou seja, todos tendem ao repouso, devido à sua inércia. Então, se um corpo está em movimento é porque algo o faz mover, pois por si só não se moveria. Segundo Cohen, “for him a planet [...] or a stone is lifeless; it is without any internal or active force of its own. As a result of this property of inertness (which Kepler called ‘inertia’), such a body cannot put itself into motion, nor can it keep itself moving.”⁴² Nas palavras de Kepler, “Every celestial sphere, because of its materiality (*ratione suae materiae*) has a natural inability to move from

⁴¹ COHEN, I. Bernard, «*Quantum in Se Est: Newton’s Concept of Inertia in Relation to Descartes*», *Notes and Records of the Royal Society of London*, Vol. 19, N.º 2, Dez., 1964, pp., p. 132.

⁴² COHEN, I. Bernard, Bernard, *Revolution in science*, Cambridge, MA: The Belknap Press of Harvard University Press, 1985, p. 129.

place to place, a natural inertia or rest whereby it remains in every place where it is set by itself.”⁴³

Kepler, tal como Aristóteles, fazia a distinção entre movimento e estado⁴⁴, porém, distancia-se deste quando não faz a diferença entre movimento natural e movimento violento. Para Kepler só existe um tipo de movimento, e sempre que um movimento se verifica, existe uma causa externa ao corpo responsável por ele, pois na sua física não existem movimentos naturais, nem lugares naturais. Com Kepler perdem-se as noções de movimentos e lugares naturais, porque, como já referimos, por um lado só existe movimento se algo o faz acontecer pois um corpo pela sua inércia, não se começa a mover sozinho, e por outro lado, um corpo em movimento pára de se mover quando abandona o motor que impele o seu movimento e não porque tenha atingido o seu lugar natural. Assim, “[...] it followed from the Keplerian concept of inertia that since all bodies have a natural tendency to come to rest, they would do so anywhere at all.” (COHEN, 1964: 132-133)

No entanto, Kepler aproxima-se de Aristóteles quando refere que todo o movimento tinha de ter uma causa, teria de haver algo que o provocasse, algo que fizesse o corpo sair do seu estado natural de repouso e o fizesse entrar em movimento. Aristóteles instituiu o princípio de que tudo o que é movido é movido por algo, como já foi mencionado, e este foi um princípio que ficou enraizado no pensamento científico, e Kepler acabou preso ao peso científico que aquela asserção constituía, ficando vinculado a ela, de tal forma que a teoria do movimento de Kepler é construída com base nesse pressuposto aristotélico. Como refere Koyré (1992), graças à inércia, todo o movimento implica um motor, e privado deste, acaba por se consumir e por desaparecer. A persistência eterna de um movimento, qualquer que seja, é inconcebível para Kepler.

⁴³ JAMER, Max, *Concepts of mass in Classical and Modern Physics*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1961, p. 55.

KEPLERI, Joannis, *Astronomi opera omnia*, Christian Frisch (ed.), Frankfurt, Heyder & Zimmer, 8 vols., 1858-1871, vol. VI, p. 341: “Globus aliquid coelestis habet tamen ratione suae materiae naturalem adinamiam transeundi de loco in locum, habet naturalem inertiam seu quietem qua quiescit in omni loco, ubi solitariae collocatur.”

⁴⁴ Mais adiante veremos que só com Galileu se unirá na mesma natureza do corpo, o movimento e o repouso como estados.

Segundo Igal Galili, “he conceived of matter (of a planet) as having a faculty of impotence, an inherent ‘laziness’, with respect to motion [...]”.⁴⁵ Kepler, tal como Aristóteles, defendia que a matéria era uma coisa inerte, sem vida, que possuía uma tendência natural para o repouso, uma impotência natural para o movimento. E como tal, não podia começar a mover-se por si mesma, sem nenhuma causa que o provocasse, nem podia permanecer em movimento indefinidamente, pois precisaria de um motor que mantivesse esse movimento. Assim que o motor parasse, o movimento cessaria também e o corpo voltaria ao estado de repouso. Nas palavras de Koyré (1990: 191), Kepler “lo mismo que Aristóteles y los físicos de la Edad Media, necesita una causa o fuerza para explicar el movimiento, y no la necesita para explicar el reposo; cree como ellos que los cuerpos en movimiento, separados del móvil o privados de la influencia de la propiedad o potencia motriz, no continuarán su movimiento, sino que, al contrario, se detendrán.”

Analisemos, agora, as seguintes palavras de Kepler sobre a inércia: “76. Not entirely by will. Strength, too, is needed. For each body in proportion to its matter possesses a certain inertial resistance to motion. This inertia provides a state of rest for the body in any place in which it is located beyond the reach of forces of attraction. This power or inertia must be overcome by anyone who is going to move that body from its place.”⁴⁶ Acerca da citação importa destacar que “Kepler correctly related the measure of inertia to the quantity of matter [...] Preventing spontaneous motion, inertia returns the body to the state of rest when the mover ceases to act”. (GALILI, 2003: 59) Assim, como clarifica Max Jammer (1961: 56), “inertia is thus not only the inability of matter to transport itself from place to place, but also has, so to say, an active aspect, to be ‘repugnant’ to motion imparted from without. And this resistance or repugnance stands in direct proportion to the quantity of matter”. Nas palavras de Kepler, “inertia or opposition to motion is a characteristic of matter; it is stronger, the greater the quantity of matter in a given volume.”⁴⁷ Sobre o conceito de inércia kepleriana também importa

⁴⁵ GALILI, Igal and Michael Tseitlin, «Newton’s First Law: Text, Translations, Interpretations and Physics Education», *Science & Education*, 12, 2003, pp. 45-73, p. 58.

⁴⁶ KEPLER, Johannes *Kepler's somnium: the dream, or posthumous work on lunar astronomy*, trad. Edward Rosen, Wisconsin, University of Wisconsin Press, 1967, pág. 73.

⁴⁷ JAMMER, Max, *Concepts of mass in Classical and Modern Physics*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1961, p. 56. “Materiae enim ... propria est inertia, repugnans motui, eaque tanto fortior, quanto major est copia materiae in angustum coacta spatium.” (*Op. Cit.*: 174-175)

esclarecer que é, como veremos, diferente do conceito de inércia de Newton. Elucida Koyré (1992: 231) que “a “inércia” kepleriana exprime a resistência do corpo grave ao “movimento” (e não ao seu pôr-se em movimento ou aceleração), a sua tendência natural para o repouso.” A inércia é a resistência interna do corpo ao movimento, assim, Kepler estima que se os corpos não fossem dotados de inércia o movimento seria instantâneo. Segundo Max Jammer (1961: 57), “with Kepler the concept of inertia refers exclusively to the impossibility of spontaneous motion or the resistance to a transition from rest to motion (acceleration).”

O corte que existe entre a teoria do movimento de Aristóteles e a teoria do movimento de Kepler tem a ver com a perda de noção de lugar natural que Aristóteles defendia. Para Kepler não existem lugares naturais que os corpos procurem, como acreditava Aristóteles. Como afirma Koyré (1992: 232), “o corpo ... é, para Kepler, inerte e privado de tendências naturais.” Segundo Cohen (1988: 265-266), “esta conclusão radical era necessária para Kepler, uma vez que, no universo copernicano, a Terra está em constante movimento e assim não pode haver lugar fixo ou natural para os corpos terrestres.” E continua Cohen dizendo que “[...] a body’s ‘inertia’ will cause it to come to rest wherever it happens to be when the force stops acting, and hence that there can be no ‘natural places’ as held by the Peripatetic and Scholastic philosophers.”⁴⁸

Mas o corte de Kepler com a teoria dos lugares naturais defendida por Aristóteles não se resume apenas ao facto de a Terra estar em constante movimento. Uma vez que a Terra se encontrava em movimento, não fazia sentido continuar a acreditar-se na divisão entre o movimento dos corpos terrestres e o movimento dos corpos celestes, e muito menos ainda acreditar que os corpos terrestres eram constituídos pelos quatro elementos e os corpos celestes compostos de éter.

Como vimos, um corpo para estar em movimento necessita sempre de um motor, pois um corpo, devido à sua inércia, pára de se mover quando e onde a força motriz cessa de agir sobre si, ou deixa de existir. E apesar de “this may not seem a very radical conclusion to a twentieth-century reader, but it went directly against two millenia of scientific and philosophical thinking, dominated by Aristotelian ideas, according to which a body would come to rest only after it had come to its ‘natural place’.”⁴⁹ No que

⁴⁸ COHEN, I. Bernard, *Introduction to Newton’s ‘Principia’*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1978, p. 53.

⁴⁹ COHEN, I. Bernard, *Revolution in science*, Cambridge, MA: The Belknap Press of Harvard University Press, 1985, p. 129.

diz respeito ao repouso, Kepler é um bom aristotélico, não precisa de explicá-lo. Por outro lado, o movimento precisa, sempre, de uma explicação e de uma força. Por este motivo, defende Koyré (1990: 47), “Kepler no puede llegar a concebir la ley de la inercia.” No entanto, assevera Cohen (1978: 53), “Kepler’s concept is revolutionary as a half-way stage toward Newtonian inertia”.

2.4 Galileu Galilei (1564-1642)

Como seguidamente veremos, o conceito de inércia que Galileu desenvolveu não tinha o mesmo sentido que o conceito de inércia detinha na física de Kepler. Vejamos que significava, então, a inércia em Galileu.

Afirma Ernst Mach que Galileu descobriu a sua lei de inércia acidentalmente e que esta lei nunca desempenhou um papel preponderante no seu pensamento. No entanto, opinião diferente tem Alexandre Koyré que afirma que, apesar de Galileu não ter formulado explicitamente o princípio de inércia, toda a sua mecânica está baseada nele.

Galileu enunciou a sua lei da inércia durante os primeiros anos do século XVII, mas não a entendeu como Newton mais tarde a conceberá, apesar de Newton, no seu *Escólio às Leis de Movimento*, lhe atribuir a descoberta da sua primeira lei. Refere Alexandre Koyré que, e como veremos mais adiante, realmente foi Descartes e não Galileu quem pela primeira vez entendeu na totalidade o alcance e o sentido da lei de inércia.

Após a constatação de que a Terra, de facto, se encontrava em movimento, e que a física do movimento de Aristóteles não se adequava ao movimento dos corpos numa Terra em movimento, tornou-se fundamental dar resposta a questões que se impunham com esta descoberta. Segundo Bernard Cohen (1988), foi Galileu que, ao tentar explicar o comportamento dos graves na Terra móvel, que parecem cair exactamente como cairiam se a Terra estivesse em repouso e ao estabelecer novos princípios para o movimento dos graves em geral, lançou as bases da moderna ciência do movimento.

Como anteriormente referimos, Aristóteles construiu toda uma física do movimento que funcionava numa terra estacionária no centro do universo e, como tal, isso explicaria o porquê da queda dos corpos pesados para baixo em vertical, pois o seu lugar natural era o centro do universo, e era para lá que eles se dirigiam. Esta teoria funcionava muito bem e, de facto, era verificável pela experiência. Outro argumento

que ajudou, e muito, a suportar a teoria do geostatismo tem a ver com o facto de que se a terra se movesse os corpos que caíssem não poderiam cair exactamente no sítio de onde tinham sido lançados, mas sim teriam de cair mais à frente na Terra, uma vez que a Terra tinha “andado”. Assim, como explicar que numa terra em movimento isto continuasse a suceder? Foi a questões como esta que a nova ciência do movimento procurou responder. É, precisamente, neste contexto que Galileu desenvolve o seu conceito de inércia.

Até agora referimo-nos ao conceito de inércia em Galileu, no entanto é importante ter presente, antes de continuarmos, que Galileu nunca utilizou o conceito inércia, nem formulou nenhuma lei com este nome, o que acontece é que, e como Richard Westfall explicita, “Galileo redefined the concept of motion in such a manner that we recognize in it the essential aspect of our principle of inertia.”⁵⁰

Como vimos até aqui, o movimento era considerado um processo, algo que requeria a acção de um motor, de algo de externo que iniciasse e mantivesse o movimento. Ao ser visto como um processo, o movimento era algo que afectava o corpo e o modificava. Já pelo contrário, o repouso era visto não como um processo mas como um estado, um estado no qual os corpos podiam permanecer indefinidamente, sem necessidade de algo exterior ao corpo que o mantivesse. E, “one of the first to attempt to break away from this traditional view was Galileo in the early seventeenth century.”⁵¹ Vejamos como.

Segundo Rupert Hall, a primeira referência concreta que temos a um tipo de inércia em Galileu surge em Abril de 1607, numa carta de Benedetto Castelli que menciona que “[...] Galileo has a ‘doctrine’ of motion that he taught to his pupils of which Castelly specifically mentions an inertial principle: ‘a mover is necessary to commence a motion, but to continue it absence of resistance is enough.’”⁵² Ao examinarmos o princípio citado na referida carta, verificamos que a primeira parte do mesmo se enquadra com o princípio que conhecemos desde Aristóteles, de que para haver movimento tem de existir algo que o provoque. No entanto, na segunda parte do princípio entrevemos, desde logo, um corte com o que Aristóteles defendia, pois, e

⁵⁰ WESTFALL, Richard, *Never at rest: a biography of Isaac Newton*, Cambridge, Cambridge University Press, 1983, pp. 7-8.

⁵¹ GJERTSEN, Derek, *The Newton handbook*, London, Routledge & Kegan Paul, 1986, p. 269.

⁵² HALL, Alfred Rupert, «Galileo and the Science of Motion», in *The British Journal for the History of Science*, vol. 2, n.º 3 (Jun.), 1965, pp. 185-199, p. 192.

tendo em conta a missiva, Galileu defendia que para que o movimento se propagasse não seria necessária a acção de uma força motriz contínua para promover o movimento. Para Galileu bastava que não houvesse nada que obstruísse o movimento, que o movimento se prolongaria. Estamos, assim, perante a primeira evolução relativamente ao que Aristóteles defendia e ao conceito de inércia de Kepler. Seguidamente, veremos que consequências terá este progresso no desenvolvimento do termo inércia, na história da sua evolução.

Analisemos, agora, algumas citações das obras de Galileu onde se pode depreender um princípio da inércia. De acordo com Cohen, a primeira menção publicada de Galileu a uma espécie de inércia aparece na sua obra *História e Demonstrações Referentes às Manchas Solares e Seus Fenómenos*, publicada em 1613. Atentemos, então nas palavras de Galileu.

“Parece-me ter observado que os corpos físicos têm uma inclinação física para algum movimento (os corpos pesados para baixo, por exemplo), movimento esse que é exercido por esses corpos através de uma propriedade intrínseca sem a necessidade de uma força motora particular e externa, sempre que não sejam impedidos por algum obstáculo. E a qualquer outro movimento têm repugnância (como os corpos pesados ao movimento para cima) e, portanto, nunca se movem dessa maneira, a menos que lançados violentamente por uma força motora externa. Finalmente, são indiferentes a alguns movimentos, como é o caso desses corpos pesados ao movimento horizontal, relativamente ao qual não têm inclinação (uma vez que não é para o centro da Terra) nem repugnância (uma vez que não os afasta do centro).

Além do mais, removidos todos os impedimentos externos, um corpo pesado numa superfície esférica concêntrica com a Terra será indiferente ao repouso ou a movimentos em direcção a qualquer parte do horizonte. E manter-se-á nesse estado que inicialmente lhe foi comunicado; isto é, se for colocado numa situação de imobilidade, mantê-la-á; se colocado em movimento para oeste (por exemplo), manterá esse movimento. Assim, um barco, por exemplo, tendo recebido inicialmente um impulso, mover-se-á através do mar calmo, continuamente em redor do nosso globo, sem parar; e, colocado em imobilidade, assim permanecerá para sempre, se no primeiro caso

pudessem ser removidos todos os impedimentos extrínsecos e se no segundo caso nenhuma causa externa de movimento actuar.”⁵³ (COHEN, 1988: 155-156)

Tendo em conta o excerto citado são vários os aspectos que devemos salientar. Começamos por comentar a primeira frase. Nela, Galileu fala sobre a “inclinação física” que os “corpos físicos” têm para alguns movimentos, “os corpos pesados para baixo, por exemplo”, devido a “uma propriedade intrínseca” que exerce esse movimento “sem a necessidade de uma força motora particular e externa”, sempre que algum obstáculo não surja. Galileu considera que todos os corpos são “graves”, isto é, estão dotados de gravidade, e essa é a sua única “propriedade intrínseca”. E, como tal, explicita Alexandre Koyré, os corpos galilaicos, que são graves, não podem mover-se em linha recta em qualquer direcção, pois eles são necessariamente, e naturalmente, arrastados para baixo, ou seja, movem-se dessa forma, exactamente, porque são graves. E, acrescenta René Dugas que, para Galileu, “the heaviness of a body was a ‘natural inclination of the body to take itself to the centre of the Earth.’”⁵⁴ Observemos agora a segunda frase da citação. Aí, Galileu fala da “repugnância” que os “corpos pesados” têm ao “movimento para cima”, assim, nunca se moverão dessa forma, a menos que, na origem desse movimento, esteja “uma força motora externa”. Aqui pode parecer que Galileu ainda partilha da noção de movimentos naturais e movimentos violentos que

⁵³ “Impero che mi par di osservare che i corpi naturali abbino naturale inclinazione a qualche moto, come i gravi al basso, il qual movimento vien da loro, per intrínseco principio e senza bisogno di particular motore esterno, esercitato, qual volta non restino da qualche ostacolo impediti; a qualche altro movimento hanno repugnanza, come i medesimi gravi al moto in su, e però già mai non si moveranno in cotal guisa, se non cacciati violentemente da motore esterno; finalmente, ad alcuni movimenti si trovano indifferenti, come pur gl’ istessi gravi al movimento orizzontale, al quale non hanno inclinazione, poi che ei non è verso il centro della Terra, nè repugnanza, non si allontanando dal medesimo centro: e però, rimossi tutti gl’impedimenti esterni, un grave nella superficie sferica e concentrica alla Terra sarà indifferente alla quiete ed a i movimenti verso qualunque parte dell’ orizzonte, ed in quello stato si conserverà nel qual una volta sarà stato posto; cioè se sarà messo in stato di quiete, quello conserverà, e se sarà posto in movimento, v. g. verso occidente, nell’ istesso si manterrà: e così una nave, per essemplio, avendo una sol volta ricevuto qualche ímpeto per il mar tranquillo, si moverebbe continuamente intorno al nostro globo senza cessar mai, e postavi com quiete, perpetuamente quieterebbe, se nel primo caso si potessero rimuovere tutti gl’ impedimenti estrinseci, e nel secondo qualche causa motrice esterna non gli sopraggiugnesse.” – FAVARO, Antonio (ed.), *Le opere di Galileo Galilei*, ristampa della edizione nazionale Sotto l’alto patronato di S. M. il Re d’Italia e di S. E. Benito Mussolini, vol. V. Firenze, Barbèra, 1929-1939, p. 134.

⁵⁴ DUGAS, René, *A history of mechanics*, trad. into english J. R. Maddox, New York, Dover, 1988, p. 129.

Aristóteles defendia, no entanto, não é verdade, pois Galileu era contra esta classificação. Aristóteles distinguia vários movimentos naturais, que exprimiam as diferentes naturezas dos corpos. No entanto, para Galileu, os corpos só têm uma natureza, serem graves, é assim uma física dos corpos que caem, que vão para baixo. É esse o único movimento natural dos corpos, que é comum a todos. Contudo, há outro aspecto que convém destacar. Além do que já foi exposto, o termo “movimento natural” não tem, para Galileu o mesmo sentido que tinha para Aristóteles, porque na física galilaica, o movimento não faz parte da natureza do corpo, é algo exterior a ele, que não o afecta, nem o modifica. Assim sendo, e como esclarece Alexandre Koyré (1992: 297-298), o movimento nunca revela nem exprime a natureza do móvel. Para Galileu, os termos “natural” e “violento” designam simplesmente a distinção entre os movimentos que se fazem por si mesmos (a queda, o movimento para baixo) e os que um corpo só executa em virtude de uma acção exterior (o arremesso, o movimento para cima).

Por fim, na terceira frase do excerto, Galileu fala sobre a indiferença que os “corpos pesados” têm em relação ao movimento horizontal, “relativamente ao qual não têm inclinação (uma vez que não é para o centro da Terra) nem repugnância (uma vez que não os afasta do centro).” Assim, Galileu conclui que, “removidos todos os impedimentos externos, um corpo pesado numa superfície esférica com a Terra será indiferente ao repouso ou a movimentos em direcção a qualquer parte do horizonte. E manter-se-á nesse estado que inicialmente lhe foi comunicado”. De acordo com Richard Westfall, “to the consideration of horizontal motion he added the concept that bodies are indifferent to such motions, thus virtually stating the principle of inertia”.⁵⁵ Assim, é importante destacar a noção de inércia para Galileu neste passo em concreto: indiferente ao movimento e ao repouso. Ou seja, um corpo por si só não tem uma inclinação natural quer para o repouso, como defendia Kepler, quer para o movimento horizontal, uma vez que não há nada no corpo que o incline para qualquer um desses estados. E, segundo Bernard Cohen (1988: 155-156), deve salientar-se também, neste ponto, a introdução de Galileu do conceito de um “estado”, quer de movimento, quer de repouso, que, como veremos mais adiante, tornar-se-á um conceito fundamental na nova física inercial de Descartes e Newton. A inovação de Galileu consiste, pois, em considerar o movimento também um estado do corpo, tal como o repouso. À primeira vista esta mudança pode

⁵⁵ WESTFALL, Richard, *Force in Newton's physics: the science of dynamics in the seventeenth century*, London, Macdonald, 1971, p. 187.

não parecer muito importante, mas era-o, porque a consequência que esta alteração na designação do conceito de movimento trará, de facto, será fundamental para o desenvolvimento de inércia. Pois, quando Aristóteles designava o movimento como um processo, isso acarretaria que fosse algo não permanente, algo que não poderia permanecer no corpo se não houvesse uma acção externa que o originasse e mantivesse. Apenas o repouso, que era um estado do corpo, se poderia manter indefinidamente sem nenhuma acção externa. Nada seria mais diferente do que repouso e movimento. No entanto, com esta afirmação de Galileu, repouso e movimento têm ambos o mesmo estatuto dentro da sua concepção física. E o que esta alteração de Galileu vai acarretar é que ao atribuir-se, também, o conceito de estado ao movimento, um corpo, também, poderá permanecer indeterminadamente no estado de movimento, sem necessidade de nenhuma acção contínua. Assim sendo, um corpo, uma vez colocado num desses estados, manter-se-á nele indefinidamente, sem a necessidade de nada externo, uma vez que lhe é indiferente. E isto, sim, foi uma grande evolução no pensamento científico da época, pois terminou com a distinção aristotélica de estado e processo. Devemos, também, acrescentar que, ao juntar na noção de estado, movimento e repouso, Galileu separou o movimento da natureza dos corpos. O movimento é meramente um estado no qual o corpo se encontra e, por isso, o corpo pode ser indiferente ao seu estado de movimento ou de repouso. Esta conclusão levou Galileu a estabelecer que, se somos indiferentes ao movimento, podemos estar a mover-nos a uma enorme velocidade sem nos darmos conta. Como esclarece Alexandre Koyré, se o movimento é absolutamente imperceptível para quem dele participa, segue-se que o movimento da Terra não terá qualquer influência sobre os fenómenos que ao cimo desta se passem. Além disso, devido à sua indiferença ao movimento, um corpo pode participar em mais de um movimento ao mesmo tempo, já que nenhum impede o outro de acontecer, podendo combinar-se os movimentos entre si. Nas palavras de Galileu: “o movimento é movimento e age como movimento só enquanto está em relação com as coisas que dele estão privadas; mas no que respeita a todas as que nele igualmente participam, é sem efeito; é como se não fosse”. (KOYRÉ, 1992: 275-276) É exactamente esta noção que permite que movimento e repouso sejam considerados como iguais.

Olhemos, agora, para o exemplo dado por Galileu para ilustrar o que pretendia demonstrar. Segundo Cohen, “devemos observar que o movimento contínuo discutido por Galileu não é circular com toda a generalidade, mas apenas circular pelo facto de ser um círculo máximo na superfície do globo. [...] Galileu não considera que um pequeno

arco de círculo terrestre seja notavelmente diferente de uma linha recta.” (1988: 155-156) Mais adiante, abordaremos novamente este tópico.

A noção de Galileu daquilo que comumente é chamado inércia foi mudando ao longo da sua vida. Segundo Igal Galili (2003: 57), citando Dijksterhuis, “his original view was very similar to Aristotle’s in that it did not distinguish between inertia and gravity, considering heaviness (weight) the factor impeding motion under the external force [‘violent motion’] and causing the body to return to its ‘natural’ place.” De acordo com Drake (1978), em 1624, numa carta a Francesco Ingali, Galileu escreveu: “Heaviness to me (and I believe to Nature) is that innate tendency by which a body resists being moved from its natural place and by which when forcibly removed therefrom, it spontaneously returns there.” (*Ibidem*)

Como se pode verificar, houve uma evolução desde a primeira noção de inércia, que segundo Igal Galili se ligava ao peso do corpo. Pois como vimos anteriormente, na obra *História e Demonstrações Referentes às Manchas Solares e Seus Fenómenos*, o conceito é muito diferente, aí o conceito ligava-se à indiferença do corpo relativamente ao repouso e ao movimento horizontal. E só a partir desta obra é que os conceitos de repouso e movimento passam a estar unidos na mesma concepção ontológica de estado.

Continuemos a nossa breve reflexão sobre a evolução do conceito de inércia em Galileu. De acordo com Igal Galili (*Ibidem*), a seguinte etapa surge na obra *Diálogo sobre os Principais Sistemas do Mundo* (1632) onde com uma brilhante “experiência conceptual”, Galileu “arrived at the necessity of the inertial motion on the horizontal (along the spherical surface of the Earth!) plane. This was, in our terminology, the discovery of Galileo’s principle for inertial (spontaneous) movement.” Vejamos em que consistia essa “experiência conceptual”.

“Salviati pergunta a Simplicio o que aconteceria a uma bola colocada num plano inclinado descendente. Simplicio concorda que se aceleraria espontaneamente. De modo semelhante, num declive ascendente seria necessária uma força para «impeli-la ou mesmo para sustê-la». Que aconteceria se um tal corpo fosse «colocado sobre uma superfície sem inclinação ascendente ou descendente»? Simplicio diz que não haveria nem «uma tendência natural para o movimento» nem «uma resistência ao movimento». Então, o objecto permaneceria estacionário, em repouso. Salviati concorda que isto é o que aconteceria se a bola fosse pousada suavemente, mas, se lhe fosse dado um impulso em qualquer direcção, que aconteceria? Simplicio replica que se moveria nessa direcção e que não haveria «causa para uma aceleração ou desaceleração, não havendo inclinação

ascendente ou descendente». Não há motivo para a «retardação da bola» nem «para que ela se detenha». Salviati pergunta então até onde continuará a bola a mover-se nestas circunstâncias. A resposta é «tão longe quanto a extensão da superfície continuar sem declive». Seguidamente, Salviati afirma: «Então, se um tal espaço fosse ilimitado, o movimento nele seria igualmente ilimitado? Isto é, perpétuo?» Simplício concorda.⁵⁶ (COHEN, 1988: 152-153)

Analisemos as palavras de Simplício quando refere que não haveria nem «uma tendência natural para o movimento» nem «uma resistência ao movimento». Já precedentemente vimos que Galileu tinha estabelecido a indiferença de um corpo quer ao repouso, quer ao movimento. No entanto, agora, Galileu acrescenta algo. Para

⁵⁶ SALV. Parmi dunque sin qui che voi mi abbiate esplicati gli accidenti d'un mobile sopra due diversi piani; e che nel piano inclinato il mobile grave spontaneamente scende e va continuamente accelerandosi, e che a ritenerlo in quiete bisogna usarvi forza; ma sul piano ascendente ci vuol forza a spignervelo ed a fermarlo, e che'l moto impressogli va continuamente scemando, sì che finalmente si annichila. Dite ancora di più che nell' un caso e nell' altro nasce diversità dall' esser la declività o acclività del piano, maggiore o minore; sì che alla maggiore inclinazione segue maggior velocità, e, per l' opposto, sopra'l piano acclive il medesimo mobile cacciato dalla medesima forza in maggior distanza si muove quanto l' elevazione è minore. Ora ditemi quel che accaderebbe del medesimo mobile sopra una superficie che non fusse nè acclive nè declive.

SIMP. [...] Non vi essendo declività, non vi può essere inclinazione naturale al moto, e non vi essendo acclività, non vi può esser resistenza all' esser mosso, talchè verrebbe ad essere indifferente tra la propensione e la resistenza al moto: parmi dunque che e' dovrebbe restarvi naturalmente fermo. [...]

SALV. Così credo, quando altri ve lo posasse fermo; ma se gli fusse dato impeto verso qualche parte, che seguirebbe?

SIMP. Seguirebbe il muoversi verso quella parte.

SALV. Ma di che sorte di movimento? di continuamente accelerato, come ne' piani declivi, o di successivamente ritardato, come negli acclivi?

SIMP. Io non ci so scorgere causa di accelerazione nè di ritardamento, non vi essendo nè declività nè acclività.

SALV. Sì. Ma se non vi fusse causa di ritardamento, molto meno vi dovrebbe esser di quiete: quanto dunque vorreste voi che il mobile durasse a muoversi?

SIMP. Tanto quanto durasse la lunghezza di quella superficie nè erta nè china.

SALV. Adunque se tale spazio fusse interminato, il moto in esso sarebbe parimente senza termine, cioè perpetuo?

SIMP. Parmi di sì...” - FAVARO, Antonio (ed.), *Le opere di Galileo Galilei*, ristampa della edizione nazionale Sotto l'alto patronato di S. M. il Re d'Italia e di S. E. Benito Mussolini, vol. VII. Firenze, Barbèra, 1929-1939, p. 173.

Galileu os corpos não possuem nenhuma propriedade que os impelisse ao movimento, nem nenhuma que os fizesse resistir ao movimento. E este último aspecto é, para Christian Boudri, a diferença mais importante, ou seja, a ausência de resistência na concepção de inércia para Galileu.⁵⁷ Pois para Galileu, inércia significa que no plano horizontal o corpo é indiferente ao movimento e ao repouso e ele mesmo não tem qualquer inclinação para se mover em qualquer direcção, nem mostra nenhuma resistência a ser movido, como Kepler defendia.

Tendo em conta o passo citado, diz Bernard Cohen (1988) que pode parecer que Galileu tenha postulado a moderna forma do princípio da inércia, segundo o qual um corpo projectado num plano infinito continuaria a mover-se uniformemente para sempre. Todavia, esclarece Rupert Hall (1965: 193), “Galileo introduces no equivalent to Newton’s First Law”: he simply deals with uniformly moved bodies without saying where the uniform motion comes from. Inertia appears in the negative sense of indifference to motion or rest.” Porém, vejamos a segunda parte do referido diálogo: “Simplicio replica que «a tendência dos corpos pesados é moverem-se em direcção ao centro da Terra e para cima da sua circunferência apenas quando actuados por forças», sendo neste caso sujeitos a um movimento violento. Salviati diz seguidamente: «Então, para uma superfície não ser [inclinada] nem para baixo nem para cima, todas as suas partes devem distar igualmente do centro. Há tais superfícies no mundo?» Simplicio responde: «Muitas; assim seria a superfície do nosso globo, se fosse lisa e não irregular e montanhosa como é. Mas há a superfície da água, quando calma e tranquila.» Salviati diz seguidamente que, nestes termos: «[...] um barco, quando se move no mar calmo, é um desses móveis sobre uma superfície que não é inclinada nem para cima nem para baixo, e, se todos os obstáculos externos e acidentais forem removidos, aconteceria mover-se incessante e uniformemente por um impulso uma vez recebido?» Simplicio concorda: «Parece que tem de ser [assim].»⁵⁸ (COHEN, 1988: 152-153)

⁵⁷ BOUDRI, J. Christiaan, *What was mechanical about mechanics: the concept of force between metaphysics and mechanics from Newton to Lagrange*, trad. Sen McGlinn, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2002, pp. 54-55.

⁵⁸ SIMP. Perchè l’ inclinazione de’ corpi gravi è di muoversi verso’ l centro della Terra, e solo per violenza in su verso la circonferenza; e la superficie inclinata è quella che acquisita vicinità al centro, e l’ acclive discostamento.

SALV. Adunque una superficie che dovesse esser non declive e non acclive, bisognerebbe che in tutte le sue parti fusse egualmente distante dal centro. Ma di tali superficie ve n’ è egli alcuna al mondo?

Desta citação, deve ter-se em consideração o seguinte aspecto, que qualquer velocidade uma vez aplicada ao corpo, ela será mantida, desde que causas, que possam causar aceleração ou desaceleração, sejam removidas, condições que só se satisfazem num plano horizontal. Pois, como salienta Russel Hanson, “in the cases of planes which slope downwards there is already present a cause of acceleration, while on planes sloping upwards there is retardation; from this it follows that motion along a horizontal plane is perpetual; for, if the velocity be uniform, it cannot be diminished or slackened, much less destroyed.”⁵⁹ Como explica Koyré (1992: 388), para Galileu, “os corpos, que são “graves”, uma vez postos em movimento, conservam o movimento que lhes é conferido, e movem-se com um movimento constante e uniforme e, portanto, perpétuo, desde que se movam em círculo “à volta de um centro”, ou, mais exactamente, à volta do centro da Terra, ou do das coisas graves em geral.” Por isso, destaca Cohen (1988: 154) o seguinte: “o que inicialmente pareceu ser um plano infinito restringiu-se ao longo da discussão a um segmento da superfície do globo. É que o movimento que era dito «perpétuo» e parecia ser um movimento uniforme ao longo de um plano infinito acabou por ser um barco movendo-se no mar calmo ou qualquer outro objecto que se move na circunferência de uma esfera lisa como a Terra.” Como refere Alexandre Koyré, citando Galileu, “é impossível que qualquer móvel se mova eternamente em linha recta”⁶⁰, “Com efeito, o movimento rectilíneo é infinito pela sua própria natureza, e porque a linha recta é infinita e indeterminada, é impossível que um qualquer

SIMP. Non ve ne mancano: ècci quella del nostro globo terrestre, se però ella fusse ben pulita, e non, qualle ella è, scabrosa e montuosa; ma vi è quella dell' acqua, mentre è plácida e tranquilla.

SALV. Adunque una nave che vadia movendosi per la bonaccia del mare, è un di quei mobili che scorrono per una di quelle superficie che non sono nè declivi nè acclivi, e però disposta, quando le fusser rimossi tutti gli ostacoli accidentarii ed esterni, a muoversi, con l' impulso concepito una volta, incessabilmente e uniformemente.

SIMP. Par che deva esser così.” - FAVARO, Antonio (ed.), *Le opere di Galileo Galilei*, ristampa della edizione nazionale Sotto l'alto patronato di S. M. il Re d'Italia e di S. E. Benito Mussolini, vol. VII. Firenze, Barbèra, 1929-1939, p. 174.

⁵⁹ HANSON, Norwood Russel, “Newton's First Law: A Philosopher's Door into Natural Philosophy”, in Robert Garland Colodny *et al.*, *Beyond the Edge of Certainty: Essays in Contemporary Science and Philosophy*, New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1965, p. 9-10.

⁶⁰ KOYRÉ, 1992: 261. “SALV. [...] esser' impossibile che mobile alcuno si muova eternamente di moto retto [...]” - FAVARO, Antonio (ed.), *Le opere di Galileo Galilei*, ristampa della edizione nazionale Sotto l'alto patronato di S. M. il Re d'Italia e di S. E. Benito Mussolini, vol. VII. Firenze, Barbèra, 1929-1939, p. 166.

movimento tenha, por natureza, o princípio de se mover em linha recta, isto é, para onde é impossível chegar, pois não há termo no infinito”, “e a natureza, como o próprio Aristóteles diz, não empreende fazer algo que não possa ser feito, e não empreende mover para onde é impossível vir a chegar.”⁶¹ Assim, afirma Bernard Cohen (1988: 154-155), uma das razões por que Galileu teria achado o princípio da inércia, na sua forma newtoniana, objectável é que ele implica um universo infinito. Desta forma, quando Galileu fala em movimento rectilíneo, pretende referir-se ao movimento ao longo de uma porção limitada de linha recta, pois para Galileu o movimento significa uma translação de um lugar para outro, um movimento que meramente continua nalguma direcção específica. Segundo Gjertsen (1986: 353-354), “on the basis of experiments conducted by rolling balls down inclined planes, Galileo argued that once a body had been put into motion, it would continue forever unless it was affected by an external resistance of some kind. Such motion, however, Galileo insisted, was always circular motion. Balls moving horizontally would move in the same plane forever; but, in so doing on the earth, they would inevitably be moving in a plane which is at all points equidistant from the centre, or, in fact, in a circle.” Assim sendo, como refere Allan Franklin, isto não pode ser visto como um princípio de inércia uma vez que “the motion takes place on a spherical surface concentric with the earth and again illustrates Galileo’s view on the persistence of circular motion and his inability to neglect the effects of gravity.”⁶² Contudo, não deixa de ser um importante passo na direcção do estabelecimento correcto do princípio de inércia.

Na sua obra *Duas Novas Ciências*, publicada em 1638, existe também um passo que nos permite vislumbrar a noção de inércia para Galileu, que, como veremos, não trará mudanças significativas relativamente à obra *Diálogo*.

O próximo passo, que iremos analisar, ajudar-nos-á a compreender melhor por que Galileu tem, para além do que já vimos, a necessidade de “transformar” um plano infinito num plano circular.

⁶¹ KOYRÉ, 1992: 260. “SALV. In oltre essendo il moto retto di sua natura infinito, perche infinita, e indeterminata è la linea retta, è impossibile, che mobile alcuno habbia da natura principio di muoversi per linea retta, cioè verso dove è impossibile di arrivare, non vi essendo termine prefinito; e la natura, come bem dice Aristotile medesimo, no intraprende a fare quello, che non può esser fatto, ne intraprende a muovere dove è impossibile a pervenire.” – *Op. Cit.*, p. 43

⁶² FRANKLIN, Allan, “Principle of inertia in the Middle Ages”, p. 542.

“Concebi mentalmente alguns móveis projectados num plano horizontal, sendo removidos todos os impedimentos. [...] o movimento igual [isto é, uniforme] neste plano seria perpétuo se o plano fosse de dimensão infinita.⁶³ [...] Ao discutir o movimento num plano, Galileu admite as dificuldades levantadas por Simplício:

“Uma [dessas dificuldades] é que assumimos o plano [inicial] como horizontal, sem subir nem descer, e como uma linha recta – como se todas as partes de uma tal linha pudessem estar à mesma distância do centro, o que não é verdade. Quando nos movemos do seu ponto médio para as extremidades, esta [linha] afasta-se sempre do centro [da Terra], pelo que está sempre subindo.”⁶⁴ (COHEN, 1988: 149-150)

Analisando o passo citado verificamos que, se admitirmos que o corpo está a subir, não podemos continuar a considerar que o seu movimento é uniforme. Pois como vimos anteriormente, se um corpo sobe perde velocidade, logo não mantém um movimento uniforme. Assim, Galileu explica que não considera um tal plano como uma tangente à terra, mas sim que considera antes um arco da Terra como uma linha recta. Ou seja, para Galileu este movimento, apesar de ser circular porque acontece à volta da Terra, é considerado rectilíneo, porque estamos a falar de pequenas distâncias na Terra. Como esclarece Koyré, “para os movimentos reais, os movimentos dos corpos graves ao cimo da Terra, o plano horizontal, tal como dissemos mais atrás, é e continua a ser uma circunferência.” (KOYRÉ, 1992: 339)

Ao examinarmos as “experiências conceptuais” citadas comprovamos que em ambos existe a referência a um plano que suporta os corpos. A existência desse plano é fundamental para Galileu pois o movimento dos corpos só acontece em linha recta exactamente porque eles se movem sobre o plano horizontal. Sobre este facto, explica o mesmo autor (*Op. Cit.*: 370) que Galileu “tinha necessidade de os sustentar com um plano imaginário, a fim de com isso neutralizar a acção inevitável do peso”. Galileu

⁶³ “Mobile quoddam super horizontale proiectum mente concipio, omni secluso impedimento: iam constat, ex his quae fusius alibi dicta sunt, illius motum aequabilem et perpetuum super ipso plano futurum esse, si planum in infinitum extendatur [...]” - FAVARO, Antonio (ed.), *Le opere di Galileo Galilei*, ristampa della edizione nazionale Sotto l’alto patronato di S. M. il Re d’Italia e di S. E. Benito Mussolini, vol. VIII. Firenze, Barbèra, 1929-1939, p. 268.

⁶⁴ SIMP. Io a queste difficoltà ne aggiungo dell’altre: una delle quali è, che noi supponghiamo che il piano orizzontale, il quale non sia né acclive né declive, sia una línea retta, quasi che una simil linea sia in tutte le sue parti egualmente distante dal centro, il che non è vero; perchè, partendosi dal suo mezo, va verso le estremità sempre più e più allontanandosi dal centro, e però ascendendo sempre [...]” – *Op. Cit.*, p. 271.

sabia perfeitamente que se o plano não sustivesse os corpos a sua gravidade impeliria-os para baixo. Assim, segundo Wallace Hooper, “Galileo’s analysis of motion on the terrestrial horizontal plane is actually a composition of two component motions. The first component of a terrestrial motion is the downward, center-seeking... The second component is a horizontal motion, usually uniform, and tending in the direction that its impetus or impressed form impels. That composition of motion is at the heart of Galileo’s inertialike thinking.”⁶⁵ Desta forma, sobre um plano horizontal, eliminado o efeito da gravidade, estes haveriam de se mover, indefinidamente até, seguindo uma linha recta. No entanto, tal não acontece nem pode acontecer. Pois como explica Koyré (1992: 319-320), “com efeito, para poder afirmar a persistência do movimento em linha recta, para poder representar-se um corpo, entregue a si próprio e privado de qualquer suporte, como permanecendo em repouso ou continuando a mover-se em linha recta e não em linha curva, teria sido preciso que Galileu chegasse a excluir a gravidade da constituição essencial do corpo.” E isto não poderia acontecer porque para Galileu os corpos não graves deixariam de ser corpos e não se poderiam mover de maneira nenhuma, ou seja, “se nenhum corpo se pode mover em linha recta, é por si próprio que ele se recusa ao movimento rectilíneo. O seu peso arrasta-o para baixo. E se, por impossível, se suprimisse esse peso, o seu movimento não seria recuperado; desapareceria com o ser físico do corpo.” (KOYRÉ, 1992: 343)

Para terminar, pode dizer-se que, e de acordo com Alexandre Koyré (1968), o grande mérito de Galileu reside no facto de ter destruído a concepção aristotélica de movimento enquanto processo, estabelecendo a sua conservação perpétua, ou seja, estabelecendo que um corpo, uma vez posto em movimento, continuará para sempre a mover-se por si, e nunca abrandará nem regressará ao repouso, desde que, não encontre nenhum obstáculo, nem sobre ele actuem forças externas.

Quanto ao movimento rectilíneo de um corpo, é necessário ressaltar que Galileu nunca se referiu a ele como acontecendo em linha recta, ele falou sim sobre o movimento num plano horizontal. Assim, Galileu não formulou o princípio de inércia, pois, como afirma Christiann Boudri (2002: 54-55), “Galileo’s inertia principle is *circular* [...] To Galileo, the inertial notion was the ‘natural’ motion, i.e., a path in a circle around the center of the earth.”

⁶⁵ HOOPER, Wallace, “Inertial problems in Galileo’s preinertial framework”, in *Cambridge Companion to Galileo*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 146-174, p. 153-154.

Não obstante a limitação que a inércia circular impôs a Galileu e a sua incapacidade de conceber os corpos como não graves, não lhe permitindo formular a lei tal como hoje a conhecemos, foi um passo crucial na evolução do conceito de inércia como Descartes, e depois Newton, a irão conceber.

2.5 René Descartes (1596-1650)

De acordo com Koyré (1992: 199), “o mais belo título de glória do Descartes físico é, sem dúvida, o de ter dado uma fórmula “clara e distinta” do princípio de inércia; e de o ter colocado no seu lugar.” Assim, é a Descartes que devemos a introdução na física do movimento retilíneo e uniforme como o movimento próprio dos corpos, o movimento que é chamado inercial. Pois, como vimos anteriormente, para Galileu o movimento inercial não era o retilíneo, mas sim o circular. No entanto, o princípio físico instituído por Descartes, não será a lei de inércia postulada por Newton.

Segundo René Dugas (1988: 160), a primeira referência de Descartes a uma espécie de lei da inércia surge numa carta sua, datada de 1629, a Mersenne, acerca da indestrutibilidade do movimento: “I suppose that the motion that is once impressed on a body remains there forever if it is not destroyed by some other means. In other words, that something which has started to move in the vacuum will move indefinitely and with the same velocity.” Tendo em conta a referida citação, podemos pensar que Descartes postula a sua lei da mesma forma que anteriormente Galileu formulara, pois, numa primeira análise, não se divisa nenhuma diferença. Tal como Galileu, Descartes assume que uma vez que se imprima movimento num corpo, ele assim continuará, se nenhum impedimento externo lhe surgir. No entanto, e em seguida veremos, as leis que Descartes acabará por formular têm uma concepção muito diferente.

Esta noção de inércia, surge numa carta pessoal de Descartes, no entanto, a sua primeira versão oficial, e segundo Bernard Cohen, a mais antiga formulação conhecida deste princípio foi feita num livro que não publicou, intitulado *Le Monde* ou *Traité de la Lumière*⁶⁶. A obra foi escrita entre 1629-33, mas só foi publicada postumamente em 1664, e contém as ideias de Descartes sobre o movimento.

⁶⁶ Segundo Bernard Cohen, Descartes optou por não publicar o seu trabalho, que tinha uma base copernicana, quando soube da condenação de Galileu pela Inquisição Romana. Assim sendo, só mais tarde publicou a sua lei de inércia, em 1644, mas entretanto a referida lei já havia sido publicada por

Na referida obra, são a primeira e terceira regras que, em conjunto, constituem a primeira formulação da lei de inércia em Descartes. Diz a primeira regra: “chaque partie de la matière, en particulier, continue toujours d’être en un même état, pendant que la rencontre des autres ne la contraint point de le changer. C’est-à-dire que: [...] si elle est arrêtée en quelque lieu, elle n’en partira jamais que les autres ne l’en chassent; et si elle a une fois comencé à se mouvoir, elle continuera toujours avec une égale force jusques à ce que les autres l’arrêtent ou la retardent.” (parág. 38) (BLAY, 2002: 74)

Tendo em conta a primeira regra instituída por Descartes, cada corpo permanece, e permanecerá sempre, no estado em que se encontra, se nada lhe provocar uma alteração. Pois um corpo por si só, não pode alterar o seu estado. Como clarifica Koyré (1992: 404), “nenhum corpo pode mudar e modificar-se por si próprio, espontaneamente. E não pode espontaneamente modificar o seu estado. Não pode, em particular, pôr-se em movimento. Não pode parar por si próprio.” Assim sendo, essa alteração, ou melhor dizendo, a causa dessa alteração é sempre um factor externo, que nada tem a ver com o corpo.

Como vimos anteriormente em Galileu, um corpo colocado num plano horizontal mantinha o estado em que era posto, uma vez que não oferecia nenhuma resistência nem tendência ao movimento, era totalmente indiferente a ele. Com Descartes, um corpo também mantém o seu estado, quer o movimento, quer o repouso. Mas porquê? Será que a explicação de Galileu também é assumida por Descartes?

Na física cartesiana, a razão da conservação dos estados dos corpos assenta numa lei geral, num princípio metafísico. Esclarece Koyré (1992: 400) que, “a lei suprema do universo cartesiano é a lei da persistência. Aquilo que é, perdura. O que Deus criou mantém-no no ser.” Isto é, segundo Descartes, a manutenção dos estados dos corpos deve-se a Deus, que “opera como um princípio de conservação da matéria e do movimento.”⁶⁷ Assim, o movimento, uma vez criado, perdura eternamente, pois o movimento não muda, isto é, não pode aumentar nem diminuir, mantendo-se sempre constante. Como tal, acrescenta Koyré (1992: 345), “isto implica que o movimento, no mundo cartesiano, possua uma realidade própria. Ele é criado por Deus, e criado até

Pierre Gassendi. Como tal, comumente atribui-se a Pierre Gassendi a primeira publicação do princípio de inércia, mas não a primeira elaboração.

⁶⁷ BRANCO, Maria do Rosário, *Principia - Sobre os Elementos da Filosofia de Newton*, Cascais, Principia Publicações Universitárias e Científicas, 2001, p. 16.

antes das coisas. Pois é graças ao movimento que as coisas existem.” É a partir desta lei geral que Descartes deduz as suas regras da natureza.

Vejamos, agora, o que diz a terceira regra: “lorsqu’un corps se meut, encore que son mouvement se fasse le plus | souvent en ligne courbe et qu’il ne s’en puisse jamais faire aucun, qui ne soit en quelque façon circulaire, ainsi qu’il a été dit ci-dessus, toutefois chacune de ses parties en particulier tend toujours à continuer le sien en ligne droite. Et ainsi leur action, c’est-à-dire l’inclination qu’elles ont à se mouvoir, est différente de leur mouvement.” (parág. 44) (BLAY, 2002: 75)

Ao analisarmos a terceira regra, verificamos que é apenas aqui que Descartes nos diz que o movimento que um corpo descreve, naturalmente, é o movimento em linha recta. Ou seja, quando um corpo em movimento é deixado a si, só se moverá em linha recta. Mesmo quando um corpo é forçado a mover-se de outra forma, como num movimento circular, o que acontece é que quando o corpo é deixado a si mesmo, o que se verifica é que a direcção que o corpo enceta é a direcção rectilínea. Diz Stephen Gaukroger que, “it is left to the third law to tell us about direction, and according to this law, because a body’s tendency to move is instantaneous, this tendency to move can only be rectilinear, because only rectilinear motion can be determined in an instant”.⁶⁸ A justificação desta afirmação é o próprio Descartes quem no-la dá: “Or est-il que, de tous les mouvements, il n’y a que | le droit qui soit entièrement simple et dont toute la nature soit comprise en un instant.” (parág. 45) (BLAY, 2002: 77)

De acordo com Michel Blay (2002: 61-63), apesar de na obra *Le Monde*, Descartes precisar de duas regras, regras 1 e 3, para introduzir o princípio de inércia, numa carta a Huygens, datada de 18 ou 19 de Fevereiro de 1643, o mesmo não acontece. Nesta missiva, Descartes associa as duas noções numa só frase: “Sur quoi je considère que la nature du mouvement est telle que, lorsqu’un corps a commencé à se mouvoir, cela suffit pour faire qu’il continue toujours après avec une même vitesse et en même ligne droite, jusqu’à ce qu’il soit arrêté ou détourné par quelqu’autre cause.”

Olhemos, agora, para a formulação da mesma lei na obra *Principia Philosophiae*, publicada em 1644.

Nos *Principia Philosophiae*, voltando ao esquema introduzido no *Le Monde*, são as duas primeiras leis que, em conjunto, formam a última formulação da lei de inércia

⁶⁸ GAUKROGER, Stephen, *Descartes’ system of natural philosophy*, Cambridge, Cambridge University Press, 2002, p. 13.

de Descartes. A primeira estabelece a lei da conservação do movimento, a segunda precisa que se trata de movimento rectilíneo. Diz a primeira lei da natureza o seguinte: “que cada coisa em particular [...] continua a estar no mesmo estado tanto quanto é possível, e que nunca o muda senão através do encontro com outras. [...] e que, se está em repouso, [...] de modo algum se começa a mover por si mesma. Mas desde que tenha começado a mover-se, também não temos qualquer razão para pensar que ela alguma vez tenha de deixar de se mover com a mesma força [...] enquanto não encontrar nada que retarde ou que faça parar o seu movimento. De maneira que, se um corpo se começou a mover, temos de concluir que ele depois disso se continua a mover, e que nunca pára por si próprio.”⁶⁹

Em traços gerais, na lei é dito que um corpo, dependendo de si, se está em repouso, continuará em repouso, pois não poderá começar a mover-se só por si. Se está em movimento, continuará em movimento, pois não é possível que um corpo, só por si, cesse o seu movimento, e entre em paragem. Neste sentido, assevera Descartes, “o repouso é contrário ao movimento, e nada é conduzido pelo instinto da sua natureza ao seu contrário, nem à destruição de si mesmo.”⁷⁰

Debrucemo-nos, então, atentamente, sobre o que está implícito no postulado desta primeira lei. Esta lei dita que os estados dos corpos, quer o repouso, quer o movimento, permanecerão sempre inalterados, a menos que uma colisão com outro corpo os faça sair do seu estado. De acordo com Richard Blackwell, “a body perseveres in its state of motion or rest for Descartes because this is demanded by the immutability of God. (...) the reason is external.”⁷¹ Descartes defendia que no momento da criação, Deus transmite uma determinada quantidade de movimento aos corpos e esse movimento perseverará sempre nos corpos. Assim, na ausência de forças externas agindo sobre si, um corpo permanecerá indefinidamente no seu estado de movimento ou

⁶⁹ KOYRÉ, 1992: 417. No original: “Harum prima est, unamquaque rem, quatenus est simplex & indivisa, manere quantum in se est in eodem semper statu, nec unquam mutari nisi a causis externis (...) Si quiescat non credimus illam unquam inceptura moveri, nisi ab aliqua causa ad id impellatur; Nec ulla major ratio est si moveatur, cur putemus ipsam unquam sua sponte, & a nullo alio impeditam, motum illum suum esse intermissuram. Atque ideo concludendum est id quod movetur, quantum in se est semper moveri.”, *Principia Philosophiae*, II, 37.

⁷⁰ KOYRÉ, 1992: 418. No original: “(...) quies enim motui est contraria, nihilque ad suum contrarium, sive ad destructionem sui ipsius, ex propria natura ferri potest.”, *Principia Philosophiae*, II, 37.

⁷¹ BLACKWELL, Richard, “Descartes’ Laws of Motion”, *Isis*, vol. 57, 2, n.º 188, 1966, pp. 220-234, p. 234.

de repouso, sem alteração. Caso isto não acontecesse, a conservação de Deus não seria imutável. Assim, e à semelhança do que acontece no *Le Monde*, a primeira lei da natureza também se apoia no princípio geral da conservação, isto é, a quantidade de movimento no universo nunca se altera. Como explica René Dugas, “Descartes held that in nature motion is neither created nor destroyed. ... It is in this sense that God, according to Descartes, is the first cause of motion.”⁷²

Na segunda lei, que completará a ideia da primeira lei, é referido que: “(...) cada parte da matéria, em particular, nunca tende para se continuar a mover segundo linhas curvas, mas sim segundo linhas rectas, ainda que muitas dessas partes sejam obrigadas a desviar-se (...).”⁷³

Tal como aconteceu com a primeira e terceira regras, também neste caso, na primeira lei da natureza nada nos é dito sobre a direcção do movimento. Temos de esperar pela segunda lei para saber que orientação o corpo tomará, pois é apenas a segunda lei da natureza que postula a rectilindade do movimento. Afirma Frederick Suppe que “Descartes had to insist (in an “*altera lex naturae*”) that for motion to be a ‘state’, it must necessarily be not only uniform but also rectilinear.”⁷⁴ Porque, explica Gabbey (1980: 255), “motion *per se* is not directional – which is precisely why Descartes needs two laws of nature to state the descriptive equivalent of Newton’s First Law”.

Examinemos a segunda lei. Descartes diz que os corpos, por si, só têm tendência ao movimento ao longo de linhas rectas. Este é o movimento natural dos corpos, onde não actuam forças externas. E já, anteriormente, vimos porquê. Como tal, todos os corpos que sejam girados em círculos, tendem a fugir do centro do círculo que estão a descrever⁷⁵, pois esse não é o seu movimento natural. Neste sentido, esclarece Rupert Hall que “a restrição universal do movimento de inércia a uma linha recta foi efectuada

⁷² DUGAS, René, *Mechanics in the seventh century: from the scholastic antecedents to classical thought*, trad. Freda Jasquot, Neuchâtel, Switzerland, Eds. Du Griffon, 1958, p. 179.

⁷³ KOYRÉ, 1992: 418. No original: “*Altera lex naturae est; unamquamque partem materiae sersim spectatam, non tendere unquam, ut secundum ulla líneas obliquas pergat moveri, sed tantummodo secundum rectas; etsi multae saepe cogantur deflectere (...)*”, *Principia Philosophiae*, II, 39.

⁷⁴ SUPPE, Frederick, *The structure of scientific theories*, Urbana, University of Illinois Press, 1977, pp. 324-325.

⁷⁵ Será Huygens quem atribuirá a esta tendência dos corpos fugirem do círculo onde são girados o nome de força centrífuga.

por Descartes, que compreendeu que um movimento perfeitamente imperturbado deve ser recto, e que conseqüentemente uma curva de qualquer espécie implica uma influência (força) que actue sobre o movimento.”⁷⁶

Tendo em conta o princípio de inércia estabelecido nos *Principia Philosophiae*, verifica-se que, relativamente ao *Le Monde*, há algumas mudanças, quer na estrutura, quer no conteúdo. Quanto à estrutura, a alteração surge na ordem pela qual as regras da natureza que regem o movimento são apresentadas e, no facto de, agora, serem chamadas leis, enquanto antes eram chamadas regras. Quanto ao conteúdo, a alteração introduzida é, no entender de Gabbey (1980), a noção da força de um corpo para permanecer em repouso, que é uma consequência directa da primeira lei, e que não estava presente na primeira regra, nem há qualquer menção a esta força antes de 1640. Como esclarece o mesmo autor (*Op. Cit.*: 260), “for Descartes, a body does not exert forces only when it is in motion”. Nas palavras de Descartes, numa carta escrita a Mersenne, datada de 28 de Outubro de 1640, “[...] it is certain that from the sole fact that a body has begun to move, it has in it the force to continue motion; and also, from the sole fact that it has stopped in a certain place, it has the force to continue to remain there [...]”. (*Op. Cit.*: 266)

Analisemos, agora, o parágrafo que sucede as leis da natureza, que Descartes acrescentou para as clarificar, e onde se torna evidente esta ideia da força de repouso: “Now here it must be carefully noted that the force of each body to act on another, or to resist the action of another, rests on this alone: that each single thing, by its own nature, tends as far as possible to remain in the same state in which it is, in conformity with the law placed number one... a body at rest has a force to persevere in its rest [*in sua quiete*], and consequently to resist all those bodies that are able to change it; a body in motion has a force to persevere in its motion, that is, in a motion of the same speed and in the same direction [*versus eandem partem*].”⁷⁷ Como explica, ainda Gabbey (*ibidem*),

⁷⁶ HALL, Rupert, *A Revolução na Ciência: 1500-1750*, trad. M^a Teresa Louro Pérez, Lisboa, Edições 70, 1988, p. 160.

⁷⁷ Gabbey, *op. cit.*, p. 267. “Hic vero diligenter advertendum est, in quo consistat vis cujusque corporis ad agendum in aliud, vel ad actioni alterius resistendum: nempe in hoc uno quod unaquaeque res tendat, quantum in se est, ad permanendum in eodem statu in quo est, juxta legem primo loco positam... id quod quiescit, ad perseverandum in sua quiete, atque ex consequenti ad resistendum iis omnibus quae illam possunt mutare; id quod movetur, ad perseverandum in suo motu, hoc est, in motu ejusdem celeritatis, & versus eandem partem.” Fonte: <http://echo.mpiwg->

para Descartes, “rest is a state, a mode, on the same ontological level as motion and therefore (because of the First Law) it can give rise to forces, just as is the case with motion. A quiescent body ‘perseveres in its rest’, meaning that there is a force continually maintaining the existence of the body in its state of rest”.

Ao lermos as últimas palavras de Descartes somos levados a pensar que Descartes concebia que os corpos estivessem dotados de uma força interior que lhes permitia manter o seu repouso ou o seu movimento uniforme em linha recta. No entanto, diz Igal Galili (2003: 59-60), “although addressing inertial motion as the ‘power to remain in a state’, Descartes explicitly rejected the concept of inertia as an inherent faculty of the matter.” Numa carta a Mersenne, escrita em Dezembro de 1630, Descartes declara: “I do not recognize any inertia or natural tardity in bodies”. (KOYRÉ, 1968: 69; n. 3) Neste sentido, esclarece Gabbey (1980: 289), Descartes “does not accept natural inertia as an intrinsic property of body serving as an explanatory principle, or as a defining attribute of body.” Ou seja, os corpos cartesianos são destituídos de qualquer força interna. Porque, e nas palavras de Descartes, “I maintain that there is in all created matter a certain quantity of motion which never increases or diminishes [...]”. (*Op. Cit.*: 288-289) Como explica Cohen (1983: 208), “Descartes había creído que el principio de inercia era una regla o ley universal de la naturaleza derivada de un principio divino superior de conservación; en esencia, lo que decía era que la inercia era un resultado del hecho de que el movimiento que Dios había creado al comienzo del mundo nunca podría destruirse por sí mismo ni agotarse, por lo que habría de preservarse por siempre.”

Analisando o citado parágrafo, cada corpo permanece no estado em que se encontra, se nada o fizer mudar, segundo a primeira lei. E neste sentido, a preservação do corpo no estado em que se encontra significa que ele oferece resistência à mudança de estado devido a uma força. Então, como explica Ricardo Lopes Coelho, “ora se tanto se mantém o estado de movimento como o de repouso, como o afirma a primeira lei, e a manutenção dos estados se deve às respectivas forças, então nenhuma delas deve ser superior à outra, pelo que a força de repouso é igual à de movimento. O movimento e o repouso das leis de Descartes representam forças equivalentes: um corpo em repouso

nao tem nem mais nem menos força que um corpo em movimento.”⁷⁸ Isto traduz a igualdade de estado.

Segundo Cohen (1988: 263), foi Descartes quem introduziu a noção de que o movimento uniforme e rectilíneo é um estado, tal como o repouso o é. E ao considerar que um corpo pode manter-se a si mesmo em qualquer estado, sem acção de uma força externa, Descartes estava no fundo a fazer uma equivalência dinâmica entre o estado de repouso e o estado de movimento uniforme e rectilíneo. Importa neste ponto salientar que, anteriorente, referimos que fora Galileu o primeiro autor a considerar o movimento e o repouso como estados nos quais os corpos poderiam permanecer se nenhum obstáculo surgisse. Todavia, para Galileu essa persistência do movimento devia-se à indiferença do corpo quer ao repouso quer ao movimento. Afirma Daniel Garber que, “the persistence of motion for Galileo is thus closely connected with the physical indistinguishability of motion and rest. But Descartes never contemplated any such thing”.⁷⁹ Neste sentido afirma Paul Mouy⁸⁰, “il se peut que Descartes ait trouvé le principe d’inertie indépendamment de Galilée.”⁸¹ Também desta opinião é Brian Ellis que defende que “it seems far more likely that he arrived at it via his general metaphysical position and his principle of conservation of motion.”⁸²

⁷⁸ COELHO, Ricardo Lopes, «Da mecânica Cartesiana», in *Seminário sobre o Cartesianismo*, Actas do 4.º Encontro de Évora sobre História e Filosofia da Ciência, Évora, Universidade de Évora, 2000, pp. 201-222, p. 211.

⁷⁹ GARBER, Daniel, *Descartes’ metaphysical physics*, Chicago, University of Chicago Press, 1992, p. 230.

⁸⁰ MOUY, Paul, *Le Developpement de la physique cartésienne*, New York, Arno Press, 1981.

⁸¹ MEYERSON, Émile Meyerson, *Identité et Réalité*, 3.ª ed., Paris, Félix Alcan, 1926, p. 126.

⁸² ELLIS, Brian, “The Origin and Nature of Newton’s Laws of Motion”, in Robert Garland Colodny *et al.*, *Beyond the Edge of Certainty: Essays in Contemporary Science and Philosophy*, New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1965, pp. 35-68.

“Hic vero diligenter advertendum est, in quo consistat vis cujusque corporis ad agendum in aliud, vel ad actioni alterius resistendum: nempe in hoc uno quod unaquaeque res tendat, quantum in se est, ad permanendum in eodem statu in quo est, juxta legem primo loco positam. Hinc enim id quod alteri conjunctum est, vim habet nonnullam, ad impediendum ne disjungatur; id quod disjunctum est, ad manendum disjunctum; id quod quiescit, ad perseverandum in sua quiete, atque ex consequenti ad resistendum iis omnibus quae illam possunt mutare; id quod movetur, ad perseverandum in suo motu, hoc est, in motu ejusdem celeritatis, & versus eandem partem.” Fonte: http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHOdocuView?url=/mpiwg/online/permanent/archimedes_repository/large/desca_princ_081_la_1644/index.meta&viewMode=images&pn=83&mode=txttool

Juntando, então, o enunciado de cada uma das leis, podemos resumi-las da seguinte maneira: um corpo em repouso permanecerá em repouso na ausência de influências externas, um corpo em movimento continuará em movimento em linha recta na ausência de influências externas. Um corpo, por si só, não se moverá numa trajetória curva, a menos que ele seja constantemente influenciado por uma causa externa. Afirma Maria do Rosário Branco (1996: 240) que “na concepção cartesiana, o repouso e o movimento são a “qualidade” da matéria, já que qualquer parte da matéria tem tendência a conservar o seu estado de repouso ou de movimento. Mas para isso é preciso que nenhuma outra parte venha impedir essa tendência para a conservação.” Nas palavras de Descartes: «Et moi [Descartes] je conçois que le repos est aussi bien une qualité qui doit être attribuée à la matière pendant qu’elle demeure en une place, comme le mouvement en est une qui lui est attribuée, pendant qu’elle en change.» (AT., XI, p. 40) (BLAY, 2002: 61)

Desta forma, e uma vez que a primeira e a segunda lei afirmam a manutenção do estado de repouso ou de movimento do corpo e a retilidade do movimento, “... the first two laws from the *Principles*, are most often grouped together and called his law of inertia, in recognition of the similarities between Descartes’ laws and the Newtonian principle of inertia.”⁸³ Assim sendo, compreende-se que formulação da lei de inércia seja atribuída a Descartes. Mas defende Allan Gabbey (1980: 288-289) que, “to designate as ‘the principle of inertia’ the First and Second Laws in *Principia Philosophiae* is therefore not only anachronistic, but also constitutes an implicit misrepresentation of what these laws mean.” Porque, como refere Butterfield, Descartes tinha chegado à formulação moderna da lei da inércia através de uma dedução natural a partir da sua teoria da conservação de movimento, teoria que afirmava que a quantidade de movimento no universo é constante. Neste sentido defende Richard Blackwell (1966: 224) que, “Descartes’ main concern is to argue that the immutability of God guarantees that a moving body will continue its motion in a straight line.” Explica Richard Westfall que, “é óbvio que a matéria não pode ser a causa do próprio movimento, uma vez que é por definição uma coisa inerte expurgada de princípios activos. No século XVII, todos concordavam que Deus era a origem do movimento. No princípio, Ele criou a matéria e pô-la em movimento. A própria insistência com que a concepção mecanicista da

⁸³ GARBER, Daniel, *Descartes’ Metaphysical physics*, GARBER, Daniel, *Descartes’ metaphysical physics*, Chicago, University of Chicago Press, 1992, p. 203.

natureza repudiava os princípios activos significava que a sua viabilidade como filosofia da natureza dependia do princípio da inércia. Não é necessário que alguma coisa mantenha a matéria em movimento: o movimento é um estado que, como qualquer outro estado em que a matéria se encontre, permanecerá até que algo exterior interfira provocando uma mudança. Com o impacto, o movimento pode ser transferido de um corpo para outro, mas o movimento em si mesmo permanece indestrutível.”⁸⁴

Para concluir, pode dizer-se que da primeira e segunda leis cartesianas pode retirar-se que o corpo se mantém no seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha recta, tal como nos diz a lei da inércia. Segundo Richard Blackwell (1966: 221), “let us call this the descriptive meaning of the principle of inertia. At this level Descartes has a legitimate claim to priority in the formulation of the principle of inertia.” Assim sendo, e tendo em conta o que, numa primeira abordagem, a lei diz, teríamos de concordar. No entanto, para compreendermos a verdadeira extensão de uma lei física, temos de olhar para além do seu carácter descritivo, temos de considerar também o que está implícito na lei e na concepção de cada termo utilizado, pois é aí que reside o seu verdadeiro sentido. E, embora o teor das proposições de Descartes e da lei de inércia sejam conformes, os conceitos implicados na lei e na formulação cartesianas são diferentes, pelo que as leis não coincidem, a equivalência é apenas formal. Como refere Ricardo Lopes Coelho (2000: 216-217), “esta coincidência formal induziu porém os autores a tomarem as expressões como equivalentes.” Descartes formulou duas proposições que teriam levado à lei, mas não formulou a lei. Como veremos, Newton conceberia o princípio de inércia de forma ontologicamente diferente.

2.6 Christiaan Huygens (1629-1697)

É na obra *De motu corporum ex percussione*, publicada postumamente em 1703, mas escrita em 1656, que Christiaan Huygens escreve a sua primeira formulação da lei de inércia, no contexto das suas investigações sobre o choque. Na referida obra, o princípio surge sob o título “Hypothesis 1” e estabelece o seguinte: “A body in motion, when it does not encounter any obstacle, tends to move perpetually with the same speed

⁸⁴ WESTFALL, Richard, *A construção da ciência moderna: mecanismos e mecânica*, trad. Sérgio Duarte Silva ; coord. colec. e rev. cient. Ana Simões e Henrique Leitão, Porto, Porto Editora, 2003, p. 31.

and in a straight line”.⁸⁵ Explica Meli que este postulado corresponde às duas leis da natureza de Descartes, “but it is devoid of the theological justifications one finds in Descartes. In fact, Huygens provided no justification, suggesting that the matter appeared unproblematic in his eyes.”⁸⁶ Como refere René Dugas (1988: 182), “he clearly stated the principle of inertia”, mas sem um princípio interno de movimento, já que “chaque corps ne modifiant son état de mouvement que dans l’instant du choc”.⁸⁷

O seu postulado seguinte da referida lei surge em 1673, no *Horologium oscillatorium*, como “Hypothesis I” que estabelece: “if there were no gravity, and the air did not oppose the motion of bodies, any body, having once started its motion, would continue it with a uniform speed in a straight line.”⁸⁸ (KOYRÉ, 1968: 188-191) De acordo com Richard Blackwell, “Huygens says (*Oeuvres*, Vol. XVI, p. 140) that this notion is found in Galileo (which is incorrect), Descartes, and many others. The main source for Huygens no doubt was Descartes, whom he met frequently in his father’s house during his formative years in the 1640s [...]”.⁸⁹ No entanto, de opinião diferente é Fabien Chareix (2006: 54) é que defende que “à une logique interne de synthèse des éléments empruntés aux mécanique de Galilée et de Descartes”.

Analisando a sua lei, o que desde logo se verifica é que Huygens, na formulação da sua «Hipótese», apenas contempla o movimento do corpo. Nela, somente é referido que se factores externos não obstruíssem o movimento do corpo, o mesmo seria rectilíneo e uniforme. Não há qualquer referência ao estado dos corpos, ou seja, ao estado de movimento e ao estado de repouso. Tal como, também, não há qualquer menção, como refere Blay (2002: 64), à inclinação ou à tendência de um corpo para se mover.

⁸⁵ “Corpus quodlibet semel motum, si nihil obstet, pergere moveri eadem perpetuo celeritate & secundum lineam rectam.” <http://astronomie-rara.ethbib.ethz.ch/zut/content/pageview/1274393>

⁸⁶ MELI, Domenico Bertoloni, «The Axiomatic Tradition in Seventeenth-Century Mechanics», in Mary Domski *et al.*, *Discourse on a New Method: Reinvigorating the Marriage of History and Philosophy of Science*, 2010, pp. 23-41, p. 34.

⁸⁷ CHAREIX, Fabien, *La philosophie naturelle de Christiaan Huygens*, Paris, Librairie Philosophique J. Vrin, 2006, p. 38.

⁸⁸ “Si gravitas non esset, neque aër motui corporum officeret, unumquodque eorum, acceptum semel motum continuaturum velocitate æquabili, secundum lineam rectam.” Christiaan Huygens, *Horologium Oscillatorium*, pars secunda, *De descensum Gravium & motu eorum in Cycloide*.

⁸⁹ BLACKWELL, J. Richard, «Christiaan Huygens’ The Motion of Colliding Bodies», in *Isis*, Vol. 68, N.º 4 (Dec. 1977), pp. 574-597, p. 574, n. 2.

Segundo Richard Blackwell (1977: 574), “it is significant that this quite straightforward statement of what has come to be known as the principle of inertial motion is asserted here as axiomatic, indicating its active acceptance by the mid-1650s.”

2.7 Isaac Newton

Vejam, agora, como surge o conceito de inércia em Newton, e qual foi o desenvolvimento que o termo teve ao longo das suas obras. E, o mais importante de tudo, vamos tentar compreender qual a importância que o conceito da inércia assume nos *Principia*.⁹⁰

Segundo Derek Gjertsen, a primeira vez que Newton estabelece o seu princípio da inércia é no *Waste Book*, do qual não se sabe ao certo a data da sua elaboração, mas muitos autores indicam o período entre 1665-6 como o mais provável. (GJERTSEN, 1986: 270) São dois os axiomas que, em conjunto, compõem no *Waste Book* o primeiro postulado da lei da inércia em Newton. No Axioma 1 Newton escreve: “If a quantity once move it will never rest unlesse hindered by some externall cause.” No Axioma 2 é referido o seguinte: “A quantity will always move on in the same streight line (not changing the determination nor celerity of its motion) unlesse some externall cause divert it.” (GJERTSEN, 1986: 270) Afirma Koyré que neste axioma, Newton segue Descartes ao estabelecer que “everything perseveres in its actual state unless disturbed by some external cause.” (KOYRÉ, 1968: 189) E também como Descartes, no *Waste Book*, Newton tem, duas leis, uma para a continuidade e outra para a retilneidade do movimento. John Herivel, citado por Ricardo Lopes Coelho, defendendo a influência de Descartes refere que “I conclude [...] that Newton took his first known enunciation of the principle of inertie in Axioms 1 and 2 of MS. II directly from the Articles 37 and 39 of Part II of Descartes’ *Principia*”.

Como se pode verificar, o primeiro axioma diz respeito ao movimento dos corpos. Nada é dito acerca do repouso. Nesta fase, Newton postula que um corpo, uma vez que esteja em movimento, continuará nesse movimento, a não ser que seja impedido de continuar por alguma causa externa, isto é, para Newton um corpo não pode parar por si só. Apenas uma causa externa pode impedir o corpo de continuar no seu movimento. Como tal, se nenhuma causa surgir, o corpo continuará assim

⁹⁰ Não esquecer que a designação lei da inércia é uma designação posterior não é algo que Newton lhe tenha atribuído, Newton apenas lhe chamou primeira lei.

indefinidamente. Mas, devemos também salientar que, neste primeiro postulado, Newton não esclarece qual o tipo de movimento que está a considerar, dizendo apenas que um corpo em movimento permanecerá em movimento se nada o impedir. Só parará se algum obstáculo surgir. À semelhança de Descartes, Newton numa primeira fase também necessitará de dois axiomas para postular o seu princípio. Assim, no seu primeiro axioma somente faz referência ao movimento, não especificando qual o tipo de movimento que está a considerar. Temos de esperar pelo Axioma 2 para saber a que tipo de movimento se refere, concretamente, Newton. O tipo de movimento é, então, o movimento em linha recta, e Newton especifica ainda que o corpo continuará na direcção em que inicialmente se encontra, sempre com a mesma velocidade, sem acelerar nem retardar a sua velocidade inicial, se nenhuma causa externa surgir. Porém, e seguidamente veremos, estes dois postulados ainda se encontram longe da primeira lei de Newton, como se conhece na sua versão final.

Segundo Derek Gjertsen, o termo inércia surge pela primeira vez em Newton, pelo menos de que se tenha conhecimento, na sua obra *De gravitatione*⁹¹, como Definição 8. Nesta definição, Newton descreve a inércia da seguinte forma: “Def 8. Inertia est vis interna corporis ne status ejus externa vi illata facile mutetur”⁹², ou seja, inércia é a força interna do corpo para que o estado do corpo não seja facilmente alterado por uma força externa. Como afirma Hall, citado por Derek Gjertsen, a inércia é “the internal force of a body’ (*vis interna corporis*) which resists change.” (GJERTSEN, 1986: 270) Ao lermos esta definição, somos levados a pensar que Newton, já na sua fase inicial, definia a inércia da mesma forma que mais tarde irá instituir nos *Principia*. No entanto, atentemos no significado que a inércia assume para Newton nesta fase. Analisando as palavras de Newton, a inércia era uma força que o corpo possuía, uma força interna, que o fazia resistir à alteração do seu estado. É importante salientar que nesta época, a noção de estado que Newton tinha não é a mesma que

⁹¹ O título desta obra é *De Gravitatione et Aequipondio Fluidorum* e segundo Mario Barbatti está “datado da virada da década de 1660 para a de 1670.” BARBATTI, Mario, “Conceitos Físicos e Metafísicos no Jovem Newton: Uma Leitura do *De Gravitatione*” in *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, 17, 59, (1997), p. 2. Refere Bernard Cohen, citando os Halls, que esta obra é “[...] an essay written by a young student who had recently been introduced [...] to Descartes’ *Principia Philosophiae* [...]”. (COHEN, 1964: 137)

⁹² Fonte: <http://www.newtonproject.sussex.ac.uk/view/texts/normalized/THEM00093>

assumirá mais tarde no seu tratado *De motu corporum*. Nesta fase, para Newton o repouso e o movimento ainda não eram estados equivalentes.

Todavia, para uma melhor compreensão do significado da inércia na obra *De Gravitatione* é necessário considerar também a Definição V que se refere ao conceito de força. Diz a referida definição o seguinte: “Def. V. Vis est motus et quietis causale principium. Estque vel externum quod in aliquod corpus impressum motum ejus vel generat vel destruit, vel aliquot saltem modo mutat, vel est internum principium quo motus vel quies corpori indita conservatur, et quodlibet ens in suo statu perseverare conatur & impeditum reluctatur [...]”⁹³ Diz Alexandre Koyré que no tratado em causa “Newton uses the Cartesian formula in his definition of force (*vis*) and *inertia*.” (KOYRÉ, 1968: 189)

Afirma Mário Barbatti (1997: 9) que “o fato da inércia ser quantificada tal como uma força indica que Newton não a está pensando como a compreendemos modernamente, como o estado natural do corpo na ausência de forças. A inércia é posta como uma força, como uma *força inata*. O fundamental desta concepção é que nela o movimento não goza de naturalidade, ao contrário, continua a ser engendrado por uma acção, que no caso inercial, é uma acção interna (*insita*), própria e característica dos corpos com massa [...]”. A seguinte citação da obra *De Gravitatione* justifica a afirmação de Mário Barbatti: “Sic vis, conatus, impetus, et inertia intensior est quæ est in eodem vel æquali corpore major; extensior est quæ est in majori corpore; et ejus quantitas absoluta [...]”⁹⁴

A obra de Newton que teremos, seguidamente, em consideração é o tratado *De Motu*⁹⁵.

⁹³ A. R. Hall and M. B. Hall, editors, *A Selection from the Unpublished Scientific Papers of Sir Isaac Newton in the Portsmouth Collection*, Cambridge University Library (Cambridge, England; Cambridge University Press, 1962), p. 114. “Def. 5. Force is the causal principle of motion and rest. And it is either an external principle, which generates or destroys or in some way changes the motion impressed on any body, or its an internal principle by which the existing motion or rest is conserved in a body, and by which any being endeavours to persevere in its state and opposed resistance...” (KOYRÉ, 1968: 189)

⁹⁴ Fonte: <http://www.newtonproject.sussex.ac.uk/view/texts/normalized/THEM00093> - “So force, conatus, impetus or inertia are more intense as they are greater in the same or an equivalent body: they have more extension when the body is larger, their absolute quantity arises from both”. *De Gravitatione et Aequipondio Fluidorum* tradução de W. B. Allen.

⁹⁵ Segundo Bernard Cohen, este tratado foi enviado por Newton para a Royal Society, entre 10 de Dezembro e 23 de Fevereiro de 1684/5. Existem quatro cópias ou versões deste tratado, das quais não se

Afirma Derek Gjertsen, e como vimos anteriormente, que a “lei da inércia” no *Waste Book* “was incomplete, dealing only with the case of moving bodies. A similar incompleteness can be seen in the version of the law adopted in the early version of *De motu* (B) where it appears as hypothesis II [...]”. Pode ler-se na Hipótese 2: “Corpus omne sola vi insita uniformiter secundum rectam lineam in infinitum progredi nisi aliquid extrinsecus impediatur.”⁹⁶ Segundo o mesmo autor (1986: 298), esta Hipótese surge na versão B, porém, na última versão do referido tratado a “Hypothesis 2” passa a “Lex 1”, no entanto, “Nor had it changed much in the final version of *De motu* (D). Vejamos, então o que diz a Lei I: “Sola vi insita corpus uniformiter in linea recta semper pergere si nil impediatur.”⁹⁷

É notória a evolução que houve desde os axiomas 1 e 2 que surgem na obra *Waste Book*, para a obra *De Motu*. Naquele tratado, o postulado da lei da inércia consistia em dois axiomas, que juntos formavam a lei da inércia. Neste tratado, o princípio surge unicamente na primeira lei. Newton, aqui, opta por definir imediatamente o movimento natural do corpo, que se deve ter em consideração para que a Lei I seja válida. Contudo, o autor continua a não contemplar o repouso no seu princípio de inércia. À semelhança do que acontecerá nos *Principia*, o *De Motu* também contém uma série de *Definitiones*, nas quais consta a expressão *vis insita*. Vejamos o que diz a definição onde surge o termo: “Def. 2 Et vim corporis seu corpori insitam [appello] qua id conatur perseverare in motu suo secundum lineam rectam.” (COHEN, 1978: 66) Como se pode verificar, existe uma mudança significativa da Definição 8 do tratado *De Gravitatione* para esta Definição 2 do *De Motu*. No primeiro, a força da inércia era uma força interna que resistia à alteração do estado do corpo. Na Definição 2 é visível um aperfeiçoamento do conceito. Agora a força da inércia já não é uma força de resistência à alteração do estado do corpo, mas sim uma força que mantém os corpos no estado de movimento em linha recta. Segundo Richard Westfall (1983: 411), “the combined statement of the definition and the hypothesis is a startling assertion to find in the first draft of the work that established the principle of inertia as the foundation of

sabe a data exacta de composição, contudo uma sequência pode ser estabelecida. E os textos, apesar de possuírem algumas variações, são substancialmente os mesmos. (COHEN, 1978: 56-57)

⁹⁶ “Hypothesis 2. Every body by its inherent force alone progresses uniformly along a right line infinitely unless something external impedes it.” (COHEN, 1978: 63)

⁹⁷ “Law 1. That by its inherent force (*vis insita*) alone, a body always proceeds uniformly along a right line if nothing impedes it.” (COHEN, 1978: 63)

modern science.” Afirma Bernard Cohen (1978: 61) que o “*De Motu* is only one small step toward Newton’s *magnum opus*”, pois este tratado “[...] does not yet bear the mark of genius.”

Algum tempo depois de escrever a obra *De Motu*, Newton começou a escrever *De motu corporum in mediis regulariter cedentibus*. No entanto, afirma Cohen que “[...] the tract *De Motu* and the fragment *De motu corporum in mediis regulariter cedentibus* are of a different sort, representing earlier conceptions of the definitions and axioms on which the Newtonian system of dynamics was to be erected. [...] A contrast in the systems of axiomatization will reveal at once the differences between these two works and show how far both are removed from the *Principia*.” (COHEN, 1978: 59)

Também de acordo com Bernard Cohen, apesar de no tratado *De motu corporum*, as primeiras três ‘Leges Motus’ serem substancialmente as três leis de movimento que conhecemos nos *Principia*, a ‘Lex I’ que aparece na obra *De Motu* é transformada no tratado *De motu corporum*, sofrendo ainda uma revisão posterior antes de se tornar na Lei I dos *Principia*, antes de se tornar “an acceptable primary law”. (COHEN, 1978: 63) Ainda sobre a Lei I afirma Derek Gjertsen (1986: 298) que “It is not until the appearance of *De motu corporum in mediis regulariter cedentibus* that a recognisable draft of the final version of the law is seen [...]”

Segundo Bernard Cohen, na obra *De motu corporum*, o amanuense de Newton escreve como Lei I o seguinte: ‘Lex 1. Vi insita corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in linea recta nisi quatenus viribus impressis [et impedimentis [*changed from et impredientibus*] *del.*] cogitur statum illum mutare.’. (COHEN, 1978: 64) Como se verifica, esta nova “Lex 1”, difere significativamente das formas anteriores. Analisemos a lei formulada, destacando as diferenças relativamente ao seu postulado anterior. No primeiro tratado, no *De Motu*, Newton afirma que apenas com a sua força ínsita (*sola vis insita*), ou seja, a força da inércia, um corpo continuará no seu movimento sempre uniforme em linha recta (*uniformiter in linea recta semper pergere*). Porém, no tratado seguinte, todo o corpo (*corpus omne*) já não persistirá mas sim perseverará no seu estado, (*perseverare in statu suo*), quer esse estado seja o repouso, quer seja o movimento uniforme em linha recta, (*quiescendi vel movendi uniformiter in linea recta*). Dividamos o primeiro axioma dos *Principia* em duas partes para melhor análise do mesmo. Como já foi referido, apenas no *De motu corporum* Newton tem em consideração o conceito de repouso como estado natural de um corpo, tal como o movimento uniforme em linha recta. E é esta mesma a alteração mais

significativa do *De Motu* para o tratado seguinte. Pois, com esta alteração Newton, acrescenta um novo conceito à sua física, o conceito de um corpo estar em repouso. Afirma Bernard Cohen que “Hence Newton has added a new concept, the state of a body being at rest, and has thus extended the law to embrace the two states in which a body may continue without an external force: rest and rectilinear motion.” (COHEN, 1978: 62-64) Nesta primeira parte, gostaríamos também de salientar o seguinte, que apesar de, à primeira vista, a mudança do verbo *pergere* para o verbo *perseverare*, não parecer muito indicativa, visto que os verbos são sinónimos, porém, nos conceitos que acarretam dentro da física newtoniana, a mudança é muito importante e bastante significativa. Enquanto o verbo *pergere* contém a ideia de continuação, e apenas essa ideia, pois o que Newton pretendia significar é que uma vez um corpo está ou é posto em movimento prosseguirá nesse movimento, se nenhum factor externo o impedir de prosseguir. Todavia, ao utilizar o verbo *perseverare*, Newton introduz uma nova ideia, e esta sim inovadora. Newton ao modificar o verbo *pergere* para *perseverare* introduz a ideia de que o corpo, por si só, devido à força de inércia, mantém o seu estado. E como é que mantém o seu estado, quer este seja o movimento, quer seja o repouso? Apenas com a força da inércia que o faz resistir ao movimento, que faz o corpo resistir aos factores externos que sobre ele actuem, na tentativa de alterar o seu estado.

Olhemos, agora, para a segunda parte do princípio da inércia, destacando também as diferenças entre os dois tratados em questão. No *De Motu*, o movimento de um corpo continuaria se nada o impedisse, se nenhum obstáculo ou causa externa surgisse. Apenas um factor extrínseco ao corpo o poderia levar a parar, pois o corpo pela sua natureza, uma vez em movimento, não possuiria nada que o fizesse deter-se. Do mesmo modo, que estando inicialmente em repouso, não haveria nada no corpo que o impelisse ao movimento. Nas palavras de Newton, “uniformiter in linea recta semper pergere si nil impediatur”, contudo no *De motu corporum* outra importante alteração é introduzida. Nesse tratado, Newton afirma que todo o corpo perseverará no seu estado “nisi quatenus viribus impressis cogitur statum illum mutare”, isto é, a não ser na medida em que forças impressas o obriguem a mudar o seu estado. Diz Bernard Cohen que “Newton is here using the Cartesian expression of ‘state’ (‘status’), as he was [...] in all the editions of the *Principia*.” (COHEN, 1978: 64)

Abordemos agora a definição de inércia que Newton faz no *De motu corporum*, para determinarmos quais as alterações sofridas nesta definição de um tratado para o outro. Neste tratado a expressão *vis insita* surge na Definição 12, que diz o seguinte:

“Vis corporis seu corpori insita et innata est potentia qua id conatur perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in linea recta, estque corporis quantitati proportionalis.” (COHEN, 1978: 67)

Comparemos ambas as definições, a Definição 2 do *De Motu* e a Definição 12 do *De motu corporum*. Numa primeira leitura, as duas definições parecem semelhantes, porém, se as analisarmos atentamente verificamos que Newton procede à introdução de novos conceitos na Definição 12. Como afirma Cohen, salientando as principais diferenças entre as duas definições, “[...] this ‘vis’ is no longer merely ‘qua id conatur perseverare in motu suo’ but has become ‘potentia qua id conatur’; furthermore, ‘conatur perseverare in motu suo’ has become ‘conatur perseverare in statu suo’ and, in fact, ‘in statu suo quiescendi vel movendi’.” (COHEN, 1978: 67-68) Estas alterações são muito importantes pois expressam a mudança do pensamento de Newton. Estas mudanças acarretam consigo uma nova concepção da força da inércia. A força da inércia surge, agora, não só como uma força interna que os corpos possuem, que é ínsita e inata, mas é também um poder que os corpos têm que lhes permite perservar no seu estado. E é aqui que se assiste a uma nova introdução bastante significativa. No *De Motu*, a força da inércia permitia que o corpo perseverasse no seu movimento em linha recta. Pois, como já foi referido anteriormente, na época da elaboração do *De Motu*, Newton apenas considerava o movimento em linha recta como um estado no qual um corpo poderia manter-se, se sobre ele não agissem factores externos. Contudo, no *De motu corporum*, Newton introduz a noção de que o estado natural do corpo é, não só o movimento em linha recta, mas que também o repouso o é. Assim sendo, a força da inércia faz com que os corpos permaneçam não só em movimento uniforme em linha recta mas também em repouso. Outra mudança que Newton também faz no *De Motu*, relativamente ao *De motu corporum*, é a alteração de movimento em linha recta, para movimento uniforme em linha recta. Todas estas alterações que tivemos em conta serão fundamentais nos *Principia*, como veremos. Todavia, creio que a alteração mais importante, e que será essencial nos *Principia*, é a introdução do novo conceito na definição 12. Nesta definição, Newton acrescenta a noção de que a força ínsita e inata de um corpo é proporcional à quantidade do corpo, “corporis quantitati proportionalis”. Esta noção vai ser muito importante nos *Principia*.

As obras de Newton que tivemos em consideração são importantes pois representam as fases que a lei da inércia e que a força da inércia conheceram até à sua versão final nos *Principia*. Vejamos como surgem ambas nessa obra. Teremos,

primeiramente, em consideração o postulado da lei da inércia que, tal como no *De motu corporum*, e como Descartes o faz, surge como a primeira lei do movimento.

Nos *Principia*, o princípio da inércia é estabelecido da seguinte maneira: “Lex I. Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare.”⁹⁸

Como é notório, a Lei I do tratado anterior é igual à Lei I apresentada nos *Principia*. São pequenas as alterações introduzidas de uma obra para outra, e não implicam mudanças de significado, apenas tornam a lei mais clara. Bernard Cohen sintetiza as alterações sofridas pela lei da seguinte forma: “[...] in *De motu corporum*, ‘Lex I’ has all but attained the form encountered in [...] E_1 , and continued unchanged in E_2 . In the final version, the further alterations made by Newton have been to drop the opening phrase ‘Vi insita’, to substitute ‘in directum’ for ‘in linea recta’, and to add ‘a’ before ‘viribus impressis’. In E_3 , Newton altered ‘nisi quatenus a viribus impressis’ to ‘nisi quatenus illud a viribus impressis’ and also replaced the concluding ‘statum illum mutare’ by ‘statum suum mutare’. (COHEN, 1978: 64)

Debrucemo-nos, agora, sobre a Definição III⁹⁹ dos *Principia*, onde surge a definição de inércia. A inércia é então definida da seguinte forma: “Materiae vis insita est potentia resistendi, qua corpus unumquodque, quantum in se est, perseverat in statu suo vel quiescendi vel movendi uniformiter in directum.”¹⁰⁰

Tal como aconteceu com os tratados considerados anteriormente, a expressão *vis insita* também surge nas *Definitiones* dos *Principia*. Comparemos, agora, as alterações feitas por Newton nos *Principia* relativamente ao tratado *De motu corporum*. A principal mudança feita por Newton é muito importante, porque vai marcar a diferença entre a antiga noção de inércia e a nova noção de inércia. Anteriormente, a inércia era apenas uma força que mantinha os corpos no seu estado, fosse o repouso ou o movimento uniforme em linha recta, mas agora é um poder que os corpos possuem, que os faz resistir à mudança, fazendo-os perseverar no seu estado. Nas palavras de Newton, “vis insita est potentia resistendi”. Desta forma, afirma Boudri (2002: 59), “On the one hand he made it clear why a body can be in any state of motion, and is in that sense indifferent to motion (as Galileo and Descartes had posited), while on the other hand he

⁹⁸ Esta é a versão da lei que surge na 3.^a edição e última edição.

⁹⁹ A Definição III permanece inalterada ao longo das três edições publicadas dos *Principia*.

¹⁰⁰ A força ínsita da matéria é o poder de resistir, pelo qual cada corpo, tanto quanto dele depende, persevera no seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha recta.

showed how matter can offer resistance to a change of speed. He united indifference to the quantity of motion, and resistance to change in motion, in his concept of innate force.”

Afirma Augusto Fitas (1996: 15-16) que “a Definição III preparou o caminho para esta lei. A inércia deixou de ser, pura e simplesmente, a resistência ao movimento; a inércia passa a ser a resistência à mudança do estado de movimento. A permanência do movimento deixou de implicar a acção contínua de uma força, tal como assinalámos no comentário à Definição III, o corpo pode estar em movimento sem ser sob a acção de uma força.” Entenda-se a expressão “sob a acção de uma força”, como sob a acção de uma força impressa. É, de facto, uma alteração muito significativa e importante. Na explicação que segue a Definição III, Newton afirma: “Por causa da inércia da matéria sucede que todo o corpo, dificilmente, é alterado do seu estado de repouso ou de movimento.” Esta frase vem reforçar o que tinha sido dito por Newton anteriormente. Não podemos deixar de evidenciar o seguinte: “Koyré argued that despite Newton’s extremely rare use of the term ‘state’, the change of its meaning should be considered one of his most fundamental conceptual innovations.” (GALILI, 2003: 53-54) De facto, apesar da sua extrema importância, na física newtoniana, Newton apenas usa o termo “estado” duas vezes na parte axiomática da sua obra. Surgem essas referências, unicamente, nas Definições III e IV. Como refere Allan Gabbey (1980: 277), “... The principle of ontological equivalence between motion and rest implies the dynamical equivalence between a change from rest to motion (or *vice versa*) and a change from motion to motion. Thus for Newton a new force would have been required (the *vis inertiae*) to express the resistance of bodies to any change of state.”

Vimos na Definição 12 do tratado *De motu corporum* que Newton, no fim, acrescenta a noção de que a força ínsita de um corpo é sempre proporcional ao corpo. Essa ideia vai manter-se nos *Principia*, pois Newton refere na explicação da Definição III: “Esta força é sempre proporcional ao seu corpo, e não difere em nada da inércia da massa, a não ser no modo de a conceber.” Newton acrescenta ainda uma ideia fundamental, devemos destacar. Refere Newton que “Na verdade, um corpo exerce esta força apenas na mudança do seu estado causada por outra força impressa em si; e esta acção é, sob diferentes perspectivas, resistência e ímpeto. É resistência na medida em que o corpo, para conservar o seu estado, resiste à força impressa; é ímpeto na medida em que o mesmo corpo, cedendo com dificuldade à força do obstáculo resistente, tenta mudar o estado daquele obstáculo.” Vejamos, então, o que Newton pretende dizer. A

força está sempre no corpo, é uma força ínsita, explica os estados do corpo não actuado por forças impressas, ou seja, o repouso e o movimento rectilíneo e uniforme. No caso de acção de força impressa, oferece resistência à mudança, porque tende a manter o próprio movimento. Como esclarece Max Jammer, “[...] The inert nature of matter is here conceived as a force that is inherent (*insita*) in matter and latent as long as no other force, impressed upon the body, “endeavors to change its condition.”¹⁰¹ E que “puede ser también un impulso (como ocurre al cambiar el estado de un cuerpo que choca con el cuerpo dado, ya que éste trata de cambiar el estado de aquel cuerpo que choca, ejerciendo una fuerza sobre él).” (COHEN, 1983: 359)

Segundo os princípios na física newtoniana, apenas uma força externa pode produzir uma mudança no estado de um corpo. Explica Gabbey (1980: 278) que, “[...] The *vis inertiae* is exerted by the body *only* at the moment it is acted upon by a *vis impressa*, yet *after* the action, when the *vis impressa* no longer exists, the body maintains its new state *by its vis inertiae alone*.” Nas palavras de Newton, “esta força consiste apenas na acção, e não permanece num corpo depois da acção”, pois “um corpo persevera em todo o novo estado somente pela força da inércia.” O mesmo autor (*Op. Cit.*: 274) defende que, “Newton’s final decision seems to be that the force expressing the passivity of matter with respect to state, the *vis insita* of the third definition in both manuscript and *Principia*, and the associated change of state, are co-existent.” Refere Gabbey (*Op. Cit.*: 279) citando Maclaurin: ‘Body not only never changes its state of itself, in consequence of its passive nature or *inertia* [...]’ Aqui reside a originalidade de Newton, é neste ponto que se afasta dos seus predecessores, indo mais além. Segundo Igal Galili, “Newton’s priority is clear in *simultaneously* addressing the faculty of inertia in its *two* facets, the body’s resistance to being set in motion (or, as often interpreted, *resistence* to motion) and *maintaining* the motion. These two concepts are contradictory at a first glance, and usually discerned as such by ‘everyone’. In fact, both concepts existed prior to Newton as resistance and impetus.” (GALILI, 2003: 59-60) Antes de Newton eram necessários dois conceitos, um para explicar a resistência ao movimento, e outro para explicar a manutenção do movimento dum corpo. Com Newton, a força de inércia explica a resistência ao movimento, que é resistência à força

¹⁰¹ JAMMER, Max, *Concepts of force: a study in the foundations of dynamics*, Cambridge, Harvard University Press, 1957, pág. 119.

impressa para iniciar o movimento, e explica a manutenção do movimento, sem acção da força impressa o corpo mover-se-ia graças à força de inércia.

Na obra *Óptica*, na edição de 1717, Newton faz a seguinte observação sobre a força da inércia: “[...] the vis inertiae by itself does not add to motion but rather acts to conserve motion or rest:

The Vis inertiae is a passive Principle by which Bodies persist in their Motion or Rest, receive Motion in proportion to the Force impressing it, and resist as much as they are resisted. By this principle alone there never could have been any Motion in the World.” (HOOPER, 1998: 151) Se se parte do princípio de que apenas a força impressa cria movimento, então, se ela não existisse, não haveria movimento. Ora a expressão “receive Motion in proportion to the Force impressing it” sugere que se possa partir daquele princípio”. Muito diferente de Descartes. Na física cartesiana apenas Deus podia criar movimento, que era criado antes de todas as coisas. E a quantidade de movimento manter-se-ia sempre igual, não podia aumentar nem diminuir. Isto com base no princípio da imutabilidade divina. Assim sendo, a Lei I de Newton é muito mais do que a simples união das duas leis da natureza de Descartes. As suas formulações têm concepções muito diferentes, pois como vimos a manutenção do corpo no estado em que se encontra tem significados díspares. O contexto conceptual da Primeira e Segunda Lei de Descartes não é o contexto da Lei I de Newton, pois como esclarece Gabbey (1980: 294), “the function of Descartes’ First Law is two-fold: to provide the grounds for saying that for a body at rest, or in motion, there is: (a) a constant force maintaining it in that state; and *therefore* (b) a force (the same force in the case of motion, though not in the case of rest) causing the body to resist and act on other bodies.”

Como já, anteriormente, referimos, a palavra inércia foi utilizada pela primeira vez por Kepler no contexto da física e significava para Kepler a tendência que os corpos tinham para o repouso. Se tivermos em conta apenas as três edições dos *Principia*, desde logo se destaca a ausência de qualquer referência a Kepler, no que diz respeito ao conceito de inércia. Então, como poderemos saber se Newton conheceu o conceito inércia de Kepler? É graças a Bernard Cohen que podemos afirmar que Newton conhecia o conceito kepleriano de inércia, pois foi este autor que encontrou nas “interleaved copies” da segunda edição dos *Principia* uma referência de Newton sobre a inércia de Kepler: “Non intelligo vim inertiae Kepleri qua corpora ad quietem tendunt

sed vim manendi in eodem seu quiescendi seu movendi statu¹⁰² *add. E2i and on a small piece of paper pasted in (not the regular interleaf) Newton has written Ad pag. 2 lin. 9.*”

Esta descoberta foi muito importante, pois demonstrou que Newton conhecia e estava familiarizado com o termo de Kepler¹⁰³, e que apesar de usar o mesmo termo, o significado para Newton era bem diferente. Bernard Cohen (1978: 28) defende que Newton talvez não fizesse nenhuma referência a Kepler, pois os conceitos eram distintos. Para Kepler, inércia era a resistência que os corpos ofereciam ao movimento.

Antes de prosseguirmos, atentemos na expressão *quantum in se est*, que surge na Definição III. Esta expressão é importante porque afirma Bernard Cohen, “such a phrase [...] displaying to us in a novel and dramatic way the hidden roots of one of Isaac Newton’s major concepts [...] occur in the *Principia* when Newton seeks to specify and clarify what he means by inertia, the major concept that characterizes the whole revolution in mathematico-experimental physical science.” (COHEN, 1964: 131) Afirma o mesmo autor que a referida expressão “[...] stressing the fact that Newton’s Law of Inertia derives directly from Descartes’ *Principia Philosophiae*, Book II, section xxxvii[...]”, a primeira lei da natureza de Descartes. Nos *Principia*, não existe nenhuma referência quer a Descartes, quer à sua obra. Contudo, não são poucas as semelhanças entre a “lei da inércia” formulada por Descartes e a Lei I de Newton. Diz ainda Bernard Cohen que “Professor Koyré called attention especially to the fact that ‘persevering in the same state’ was a revolutionary new concept that Newton learned from Descartes and repeated in his own Law of Inertia when he wrote ‘perseverat in statu suo’.” (COHEN, 1964: 135) “[...] Descartes has used the phrase *quantum in se est* in the statement of the *prima lex naturae* in his *Principia*, the very *prima lex* stating the Law of Inertia. Newton, in turn, in his own Law of Inertia is likewise a *prima lex*, although a *prima lex motus* rather than a *prima lex naturae*.” (COHEN, *ibidem*) Cohen afirma

¹⁰² “I do not mean Kepler’s force of inertia, by which bodies tend toward rest, but a force of remaining in the same state either of resting or of moving.” (COHEN, 1999: 404)

¹⁰³ Segundo, Gjertsen, o termo inércia “had been picked up by Jeremiah Horrox and was recorded by him in the *Opera posthuma* (1678), a copy of which had been presented to Newton by Collins.” (GJERTSEN, 1986: 269)

Opinião diferente tem Wallace Hopper que refere “Kepler had previously published the term inertia as a principle of inactivity, but mentions of it also appeared in Descartes’s *Correspondence*, where Newton probably learned it. Newton did, however, change its meaning when he employed the term himself.” (HOOPER, 1998: 151)

mesmo que Newton para com Descartes “he certainly was indebted for the Law of Inertia.”¹⁰⁴ No entanto, apesar de, inicialmente partir de Descartes, Newton “went on to transform the principle in a quite radical way. Linguistically he changed the innate force (*vis insita*) of the definition into inertia (*vis inertiae*); conceptually, he made it ‘always proportional’ to the mass of the body. In this way inertia became something more than an element in some philosophical analysis of motion. By making it proportional to mass, Newton had shown at a stroke how to incorporate the concept into any equations and calculations arising out of the motions of bodies.” (GJERTSEN, 1986: 269-270)

Na primeira lei do movimento nos *Principia*, como já vimos, escreve Newton: “Todo o corpo persevera no seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha recta, a não ser na medida em que é obrigado a mudar o seu estado pelas forças que lhe são impressas.” Este primeiro axioma é conhecido como a Lei da Inércia. “Esta lei é o culminar de um ponto de ruptura muito importante com a física pré-galilaica ou aristotélica” (FITAS, 1996: 15-16) Já vimos o porquê. Segundo Russel Hanson, “This is not axiomatic, in the ancient sense of “self-evident”. [...] From observing horses pulling carts the Greeks concluded, on the contrary, that a steady force was continually necessary to keep the cart moving. This Law of Inertia however, says that once moving, the cart (ideally) will continue to move...”¹⁰⁵ Aristóteles e a velha física estariam totalmente contra este princípio. Para Aristóteles nada era mais diferente entre si do que o repouso e o movimento. O movimento era um processo, e apenas o repouso era um estado natural, que não requeria nenhuma causa ou explicação. Já o movimento só aconteceria se algo actuasse sobre o corpo e o fizesse mover. E uma vez em movimento, seria necessária uma força motriz constante para manter o corpo em movimento. Pois uma vez que essa força motora cessasse o movimento cessaria também. Todavia na nova física, repouso e movimento uniforme em linha recta são ambos estados do corpo. Para Newton, na ausência de uma força, os corpos não estariam necessariamente em repouso, como Aristóteles supunha, mas poderiam mover-se com velocidade constante. Não é preciso uma justificação para estes estados, pois os corpos por si, pela força da inércia, permanecem no estado em que se encontram. Diz Cohen que uma consequência

¹⁰⁴ (COHEN, 1978: 28) Cf. COHEN, Bernard, “‘Quantum in Se Est’: Newton’s Concept of Inertia in Relation to Descartes and Lucretius”, in *Notes and Records of the Royal Society of London*, vol. 19, n. 2 (Dez. 1964), pp. 131-155.

¹⁰⁵ HANSON, Norwood Russell, “The Law of Inertia: A Philosopher’s Touchstone” in *Philosophy of Science*, Vol. 30, N.º 2 (Abril 1963), pp. 107-121, p. 107.

“of the Law of Inertia was to establish a level of equivalence between motion and rest. [...] motion – at least uniform rectilinear motion – was not a process at all but a state, and as such ontologically equivalent to a state of rest. And like rest requiring no outside force.” (COHEN, 1964: 132-133) Pois como afirma Richard Westfall, “Uma consequência imediata de os corpos possuírem inércia será esta: se um corpo se encontra em repouso deverá permanecer *eternamente* em repouso, a não ser que alguma força exercida sobre ele o obrigue a mover-se. [...] nem seria de esperar que o corpo começasse a mover-se por si mesmo. A sua inércia não permite que isso aconteça.” (WESTFALL, 2003: 20) Com o estado de movimento uniforme em linha recta, a eterna permanência nesse estado tem a mesma justificação que o repouso. Pela força da inércia, os corpos permaneceriam em movimento uniforme em linha recta para sempre se nenhuma força os impelisse a mudar o seu estado. Ou seja, a manutenção do estado de repouso ou do movimento uniforme em linha recta “ [...] é simplesmente consequência de o corpo possuir inércia.” (*ibidem*)

Atentemos, agora, na introdução de um novo conceito muito importante na física de Newton. “No universo newtoniano, esta lei associa a alteração do movimento de um corpo, enquanto estado, ao aparecimento de uma grandeza denominada *força aplicada*.” (FITAS, 1996: 15-16) Ou seja, conforme a primeira lei do movimento, sempre que se verificar uma alteração do estado do corpo no qual ele se encontra, uma força está a ser aplicada no corpo. Só forças externas podem obrigar o corpo a mudar o seu estado, caso contrário, só pela força da inércia, o corpo manteria o seu estado. No prefácio dos *Principia*, refere Newton que os movimentos são a explicar por forças. Assim, os movimentos acelerados resultam de forças impressas, e o movimento rectilíneo e uniforme do corpo não actuado por força impressa seria explicado pela força ínsita. Gjertsen assinala o mesmo, “Bodies left to themselves, Newton saw, would continue in their state, whether it be of rest or of uniform motion in a right line, indefinitely. So much Newton had learnt from Descartes. Any variation from this state, however, whether of acceleration, deceleration or a change of direction, could not be explained so readily in Cartesian terms. Newton’s great insight, stated clearly in the first law, was simply that whenever such a change of state did take place, a force was both present and responsible for the change.” (GJERTSEN, 1986: 353-354)

Não seria apenas Aristóteles quem não aceitaria a lei da inércia. Também Galileu não estaria de acordo com a Lei I formulada por Newton. Como vimos, uma das razões, invocadas por alguns autores, pela qual Galileu não postulou o princípio da

inércia como o conhecemos hoje prendia-se com a concepção de universo finito que Galileu defendia. Como já anteriormente foi referido, a inércia em Galileu era mais uma inercia circular, pois o matemático apenas aceitava o movimento perpétuo ao longo de um círculo. A lei da inércia de Newton funcionava perfeitamente num universo infinito, pois Newton diz que um corpo em movimento uniforme em linha recta permanecerá nesse estado indeterminadamente, se sobre ele não actuarem forças externas. Sobre isto, acrescenta Cohen o seguinte: “[...] um corpo em movimento, se sobre ele não actuar qualquer força líquida, continuará a mover-se indefinidamente em linha recta com velocidade constante, e, se se move eternamente com velocidade constante, há a potencialidade de se mover através de um espaço que é infinito e ilimitado.” (COHEN, 1988: 154-155) E ao fazê-lo estabeleceu a fundação da ciência moderna, tal como defendem vários autores.

Afirma Galili (2003: 67) citando Koyré que “while Galileo established laws for an idealized world, Newton showed an extraordinary sensitivity to always remain in his considerations within real situations. Inertia presented for Newton a very real entity conflicting with applied forces.”

No prefácio ao leitor da 1.^a edição dos *Principia*, Newton afirma, “Porque toda a dificuldade da filosofia parece consistir nisto: descobrir as forças da natureza a partir dos fenómenos dos movimentos e depois demonstrar os restantes fenómenos a partir destas forças.”¹⁰⁶ Assim sendo, todos os movimentos para Newton são explicáveis por forças. O movimento rectilíneo e uniforme de um corpo é explicado pela força de inércia, todos os outros tipos de movimentos implicam forças impressas. A lei de inércia diz então que um corpo livre, isto é, quando não actuado por forças externas, tem um movimento rectilíneo e uniforme. E isto é consistente com a proposição inicial. Para conseguir esta generalidade, Newton tem, porém, de admitir uma força ínsita, que Newton, no Livro III, esclarece “Per vim insita intelligo solam vim inertiae”. Deste modo, todos os outros movimentos que se verificassem tinham uma justificação, e essa justificação era uma força aplicada. E é precisamente essa a função da primeira lei do movimento, que é dizer-nos que apenas os desvios ao movimento rectilíneo e uniforme, ou ao repouso, precisam de ser explicados em termos de uma causa, na forma de uma agência externa. Sempre que um corpo não tenha um movimento rectilíneo e uniforme,

¹⁰⁶ “Omnis enim Philosophiae difficultas in eo versari videtur, ut a Phaenomenis motuum investigemus vires Naturae, deinde ab his viribus demonstramus phaenomena reliqua.”

isto é, não rectilíneo ou não uniforme, uma força actua sobre o corpo, então o corpo não é livre, e tem-se o contrário da lei de inércia. Se uma força actua e faz com que o seu movimento seja nao-rectilíneo, entao essa força terá curvar a trajectória do corpo. Newton necessitava, por razões lógicas, duma força que curvasse a trajectória da corpo.

Diz, então, Bernard Cohen (1964: 132), “one consequence of the new inertial physics was that since planets do not move uniformly along right lines but move in circles (or very nearly do so) about the sun, a force is required to produce their motion, a force that presumably is similar in kind (if not identical) to the force that makes our moon also move in a kind of circle about the earth. Hence, this law was the first step towards a dynamical view of the solar system and constituted the first stage toward Newton’s grand concept of a universal force of gravitation.” Uma vez que, segundo a lei de inércia, os movimentos são rectilíneos e uniformes, o movimento dos planetas exige uma força impressa, obriga a existência de uma força externa para explicar o seu movimento. O movimento dos planetas não é rectilíneo, logo uma força seria necessária. Isto vale naturalmente para qualquer outro movimento. Isto significa que a lei de inércia cria uma estrutura conceptual. Ela determina onde tem de existir força. Neste sentido ela é fundamental.

Para concluir pode dizer-se que Newton concretizou o desejo de grande parte dos filósofos naturais de sua época, unificar as físicas celeste e terrestre. As leis utilizadas para explicar os movimentos observados no céu, explicavam também os movimentos observados na Terra. Assim, com Newton, os movimentos celestes tiveram uma explicação tão racional quanto os dos corpos da Terra. “Many before Newton had tried to break away from the traditional mechanics of antiquity, but none before had achieved the scope and simplicity of his proposals. Some like Galileo had, for example, failed to see that the principles of mechanics apply just as readily to celestial bodies as they did to terrestrial projectiles. Against this there is the opening of Newton’s first law with its simple yet immensely significant reference to ‘Every body’.” (GJERTSEN, 1986: 353-354) Esta simples expressão, *corpus omne*, assume assim uma enorme importância. Newton quer, então, significar que a primeira lei do movimento se aplica, não só aos corpos terrestres, como a todos os corpos do universo. É nesta conclusão que se encontra a genialidade de Newton.

CONCLUSÃO

Ao longo desta dissertação, reflectimos sobre vários aspectos que se revelam essenciais para a total compreensão da lei de inércia que nos propusemos estudar. Um deles teve a ver com a importância que a lei de inércia assume nos *Principia*.

Os *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* de Isaac Newton, publicados em 1687, foram o primeiro trabalho moderno a revelar as relações entre movimentos celestes e causas físicas. A obra de Newton representa, assim, o culminar de milhares de anos de esforço na tentativa de compreender o funcionamento do mundo e a sua primeira lei estabelece uma nova compreensão do movimento.

O conceito de inércia e o sistema físico que se construiu com base nele foram uma das novidades da ciência do século XVII. A nova dinâmica a que se chegou era diferente de todas as considerações acerca do movimento que tiveram lugar desde Aristóteles até Newton, apenas, e graças a este princípio. Enquanto a física de Aristóteles se baseava no princípio *omne quod movetur ab alio movetur*, muito teve de ser repensado para se chegar ao postulado de Newton, *corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare*. Esta mudança de mentalidade, requereu um diferente tipo de raciocínio.

Como começámos por ver, na física aristotélica o movimento era concebido como um processo, e enquanto tal, o movimento era efémero, dependia de uma força que o mantivesse, pois assim que a força deixasse de actuar o movimento cessaria. Para Aristóteles, apenas o repouso era considerado um estado no qual o corpo podia permanecer indefinidamente. Assim sendo, Aristóteles, ao assumir que o repouso era o estado natural dos corpos, e que os corpos tendiam a este estado quando entregues a si próprios, confrontou-se com a difícil tarefa de encontrar um motor que deveria actuar enquanto o corpo estivesse em movimento, de forma a mantê-lo.

Quanto a Kepler, acreditava que um corpo, porque era inerte, só tendia ao repouso, *inclinatio ad quietem*. Desta forma, tal como Aristóteles, defendia que uma força era necessária para produzir e manter o movimento.

Só mais tarde, já com Galileu se desenvolverá uma espécie de princípio de inércia. Galileu sustentava que, dadas algumas circunstâncias, um movimento uma vez impresso num corpo, poderia manter-se sem necessidade de intervenção de qualquer

força externa a agir constantemente. Disse, assim, Galileu que o movimento podia ser um estado equivalente ao estado de repouso. A nova física conceberia, então, que há um tipo de movimento que é também um estado. Contudo, o conceito de estado de movimento viria, apenas, a ser desenvolvido por Descartes, só na física cartesiana ele será formulado em termos de lei.

Quando Descartes assume o movimento rectilíneo como um estado, está, assim, a assumir, que os corpos, por si só, sem necessidade de um agente externo, podiam permanecer indefinidamente naquele estado. No entanto, para Descartes essa conservação devia-se à imutabilidade de Deus.

Desta forma, apesar de não ser da autoria de Newton a concepção do movimento rectilíneo de um corpo, foi Newton o primeiro autor a considerar que a manutenção de um corpo em movimento rectilíneo e uniforme se deve, apenas e só, à sua inércia, à sua força ínsita. Para Newton, a razão da conservação do movimento era interna, em Descartes, a razão é externa. Ambos postularam leis para a manutenção dos corpos no estado de movimento rectilíneo e, embora, numa primeira análise pareçam iguais, a nível teórico o significado das leis não é o mesmo, as leis são diferentes.

Como, também, vimos, Newton usou o termo inércia, que tinha sido, originalmente, criado por Kepler, mas atribuiu-lhe um sentido completamente diferente. Foi, exactamente, essa transformação que introduziu no conceito que lhe permitiu formular a lei de inércia.

O princípio de inércia assegura-nos a persistência apenas do movimento uniforme em linha recta. Para que tal pudesse ser admitido, teve de partir-se do seguinte princípio: presume-se a tendência dos corpos para continuarem o seu movimento ao longo de uma linha recta, como a sua forma mais simples de movimento e só depois se examina aquilo que pode parar ou alterar este movimento. Assim sendo, enquanto a física antiga opunha o movimento circular, natural, ao movimento em linha recta, violento, a física clássica inverte a relação. Para ela, é o movimento rectilíneo que se tornou natural; e é o movimento circular que, doravante, faz figura de violento, no sentido e que sempre que ele se verifica, uma força actua sobre o corpo. Os mesmos princípios aplicam-se à terra e aos céus. Ao submeter a uma mesma lei os movimentos celestes e terrestres, Newton unifica a física.

Assim demo-nos conta de que as alterações ocorridas, tanto na física celeste, como na terrestre surgiram, principalmente, da mudança de mentalidade dos próprios cientistas e que para postular a lei de inércia, foi necessário pressupor o movimento e o

repouso como estados, colocando-os no mesmo nível ontológico. Só a partir destas premissas o princípio de inércia parece evidente e admissível. Como tal, não é de estranhar que estas concepções fossem difíceis de admitir para os predecessores de Galileu.

Esta breve incursão pela génese da inércia teve como principais objectivos mostrar o conhecimento disponível para Newton, que lhe permitiu chegar onde chegou, e também testemunhar a novidade da ideia de inércia em Newton. Porque, apesar da dívida que tem para com os seus antecessores, de modo nenhum, deve ser diminuída a grandeza do que alcançou.

BIBLIOGRAFIA

Edições

FAVARO, Antonio (ed.), *Le opere di Galileo Galilei*, ristampa della edizione nazionale Sotto l'alto patronato di S. M. il Re d'Italia e di S. E. Benito Mussolini, 8 vols., Firenze, Barbèra, 1929-1939, p. 134.

KEPLERI, Joannis, *Astronomi opera omnia*, Christian Frisch (ed.), Frankofurti, Heyder & Zimmer, 8 vols., 1858-1871.

NEWTONO, Isaaco, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Dawson & Sons, London, 1st ed., 1687.

NEWTONO, Isaaco, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Sumptibus Societatis, Amstaelodami, 2nd ed., 1713.

NEWTONO, Isaaco, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Dawson & Sons, London, 3rd ed., 1726.

NEWTON, Isaac, in A. Koyré & I. B. Cohen (eds.) *Isaac Newton's Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, 3rd edn, Harvard Univ. Press, 1972.

Traduções

ADAM, Charles et Tannery (eds.), *Oeuvres de Descartes*, vol. XII, Paris, Cerf, 1897-1913.

CAJORI, Florian, *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His system of the World*, University of California Press, Berkeley, California, 1947.

KEPLER, Johannes *Kepler's somnium: the dream, or posthumous work on lunar astronomy*, trad. Edward Rosen, Wisconsin, University of Wisconsin Press, 1967.

NEWTON, Isaac, *Princípios Matemáticos de la Filosofia Natural*, trad. Eloy Rada, Madrid, Alianza Editorial, 2004.

NEWTON, Isaac, *The Principia – Mathematical Principles of Natural Philosophy*, A new translation by I. Bernard Cohen & Anne Whitman, preceded by a A Guide to Newton's Principia by I. Bernard Cohen, University of California Press, 1999.

NEWTON, Isaac, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, traduction de la Marquise du Chastellet; augmentée des commentaires de Clairaut, Paris, Albert Blanchard, vol. I, 1966.

NEWTON, Isaac, *The Mathematical Principles of Natural Philosophy*, trad. Andrew Motte, London, Benjamin Motte, 1729.

Artigos

BARBATTI, Mario, «Conceitos Físicos e Metafísicos no Jovem Newton: Uma Leitura do *De Gravitatione*», *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, 17, 59, 1997, pp.

BLACKWELL, J. Richard, «Descartes' Laws of Motion», in *Isis*, vol. 57, 2, n.º 188, 1966, pp. 220-234.

BLACKWELL, J. Richard, «Christiaan Huygens' The Motion of Colliding Bodies», in *Isis*, Vol. 68, N.º 4 (Dec. 1977), pp. 574-597.

COHEN, I. Bernard, «*Quantum in Se Est*: Newton's Concept of Inertia in Relation to Descartes», *Notes and Records of the Royal Society of London*, Vol. 19, N.º 2, Dez., 1964, pp. 131-155.

COHEN, I. Bernard, «Newton's Third Law and Universal Gravity», *Journal of the History of Ideas*, Vol. 48, n.º 4, Oct. – Dec., 1987, pp. 590.

COELHO, Ricardo Lopes, «The Law of Inertia: How Understanding its History can Improve Physics Teaching», *Science and Education*, 16, 2007, pp. 955 – 974.

COELHO, Ricardo Lopes, «Da mecânica Cartesiana», in *Seminário sobre o Cartesianismo*, Actas do 4.º Encontro de Évora sobre História e Filosofia da Ciência, Évora, Universidade de Évora, 2000, pp. 201-222.

COELHO, Ricardo Lopes, «Filosofia e Mecânica: Matéria inerte e força activa», *Revista Portuguesa de Filosofia*, 60, 2004, pp. 247-280.

DUTTON, Blake D., “Physicis and Metaphysics in Descartes and Galileo”, in *Journal of the History of Philosophy*, vol. 37, n.1 (January), 1999, pp. 49-71.

ELLIS, Brian, “The Origin and Nature of Newton’s Laws of Motion”, in Robert Garland Colodny et al., *Beyond the Edge of Certainty: Essays in Contemporary Science and Philosophy*, New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1965, pp. 35-68.

FITAS, Augusto J. Santos, “Os Principia de Newton, alguns comentários (Primeira Parte, a Axiomática)”, *Vértice*, 72, 1996, 61-68.

FRANKLIN, Allan, «Principle of inertia in the Middle Ages», *American Journal of Physics*, vol. 44, n.º 6, Jun., 1976, pp. 529-545.

GABBEY, Allan, «Force and Inertia in the Seventeenth Century: Descartes and Newton», in Stephen Gaukroger [ed.], *Descartes: Philosophy Mathematics & Physics*, Totowa, New Jersey, 1980, pp. 230- 320.

GALILI, Igal and Michael Tseitlin, «Newton’s First Law: Text, Translations, Interpretations and Physics Education», *Science & Education*, 12, 2003, pp. 45-73.

GARDELLI, Daniel, «A Origem da Inércia», in *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. 16, n.º 1, Abril, 1999, pp. 43-53.

HALL, Alfred Rupert, «Galileo and the Science of Motion», in *The British Journal for the History of Science*, vol. 2, n.º 3 (Jun.), 1965, pp. 185-199.

HANSON, Norwood Russell, «The Law of Inertia: A Philosopher’s Touchstone», *Philosophy of Science*, 30, 1963, pp. 107-121.

HANSON, Norwood Russel, “Newton’s First Law: A Philosopher’s Door into Natural Philosophy”, in Robert Garland Colodny *et al.*, *Beyond the Edge of Certainty: Essays in Contemporary Science and Philosophy*, New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1965, pp. 6-28.

HAY, William H., «On the Nature of Newton’s First Law of Motion», in *The Philosophical Review*, Vol. 65, N. ° 1, 1956, pp. 95.

HOOVER, Wallace, “Inertial problems in Galileo’s preinertial framework”, in *Cambridge Companion to Galileo*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 146-174.

KALMAN, Calvin, «A Role for Experiment in Using the Law of Inertia to Explain the Nature of Science: A Comment on Lopes Coelho», *Science and Education*, 18, 2009, pp. 25-31.

KRAJEWSKI, Wladyslaw, «Idealization and factualization in science», *Erkenntnis*, 11, 1977, pp. 323-339.

LUDWIG, Bernd, «What’s Is Newton’s Law of Inertia About? Philosophical Reasoning and Explanation in Newton’s *Principia*», *Science in Context* 5, 1, 1992, pp. 139- 164.

MACHAMER, Peter, ed., *The Cambridge companion to Galileo*, Cambridge, Cambridge University, 1999, pp.

MATTHEWS, Michael R., «Teaching the Philosophical and Worldviews Components of Science», *Science & Education*, 18, 2009, pp. 697- 728.

MELI, Domenico Bertoloni, «Inherent and Centrifugal Forces in Newton», in *Arch. Hist. Exact Sci.*, 60, 2006, pp. 322-323.

MELI, Domenico Bertoloni, «The Axiomatic Tradition in Seventeenth-Century Mechanics», in Mary Domski *et al.*, *Discourse on a New Method: Reinvigorating the Marriage of History and Philosophy of Science*, 2010, pp. 23-41.

SHAPER, Dudley, «The Philosophical Significance of Newton’s Science», in *The Texas Quarterly*, Vol. X, n.º 3, Autumn, 1967, pp. 201-215.

SEKER, Hayati & Laura C. Welsh, «The Use of History of Mechanics in Teaching Motion and Force Units», in *Science & Education*, 15, 2006, pp.

Seminário sobre Newton, org. Centro de Estudos de História e Filosofia da Ciência da Universidade de Évora]

Obras

ARAÚJO, Walter D., *Génesis do Pensamento Galileano*, São Paulo, Livraria da Física Editora, 2008.

BALL, Walter W. R., *An Essay on Newton's Principia*, BiblioBazaar, LLC, 2008.

BECHLER, Zev, «Newton's Ontology of the force of inertia» in *The Investigation of Difficult Things: Essays on Newton and the history of exact sciences*.

BLAY, Michel, *La science du mouvement, De Galilée à Lagrange*, Paris, Éditions Belin, 2002.

BOUDRI, J. Christiaan, *What was mechanical about mechanics : the concept of force between metaphysics and mechanics from Newton to Lagrange*, trad. Sen McGlinn, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2002.

BRAKENRIDGE, Bruce, *The Key to Newton's Dynamics: the Kepler problem and the Principia*, California, University of California Press, 1995.

BRANCO, Maria do Rosário, *Principia - Sobre os Elementos da Filosofia de Newton*, Cascais, Principia Publicações Universitárias e Científicas, 2001.

BUTTERFIELD, Herbert, *As origens da ciência moderna*, trad. Teresa Martinho, Lisboa, Edições 70, 2003.

CHANDRASEKHAR, Subrahmanyam, *Newton's Principia for the common reader*, Oxford, Oxford University Press, 1995.

CHAREIX, Fabien, *La philosophie naturelle de Christiaan Huygens*, Paris, Librairie Philosophique J. Vrin, 2006.

COHEN, I. Bernard, *Introduction to Newton's 'Principia'*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1978.

COHEN, I. Bernard, *O Nascimento de uma Nova Física*, trad. Maria Alice Gomes da Costa, rev., adapt. e notas José Félix Gomes da Costa ; préf. João Andrade e Silva ; rev. de texto Miguel Pereira, Lisboa, Gradiva, 1988.

COHEN, Bernard, *La Revolución Newtoniana y la transformación de las ideas científicas*, trad. Carlos Solís Santos, Madrid, Alianza Editorial, 1983.

COHEN, I. Bernard, *Revolution in science*, Cambridge, MA: The Belknap Press of Harvard University Press, 1985.

DUGAS, René, *A history of mechanics*, trad. into english by J. R. Maddox. - New York : Dover, 1988.

DUGAS, René, *Mechanics in the seventh century: from the scholastic antecedents to classical thought*, trad. Freda Jasquot, Neuchâtel, Switzerland, Eds. Du Griffon, 1958.

FRENCH, A. P., *Newtonian Mechanics*, New York, W. W. Norton, 1971.

GARBER, Daniel, *Descartes' metaphysical physics*, Chicago, University of Chicago Press, 1992.

GAUKROGER, Stephen, *Descartes' system of natural philosophy*, Cambridge, Cambridge University Press, 2002.

GJERTSEN, Derek, *The Newton handbook*, London, Routledge & Kegan Paul, 1986.

HALL, Alfred Rupert, *Isaac Newton: adventurer in thought*, Cambridge, Cambridge University Press, 1996.

HALL, Alfred Rupert & Marie Boas Hall, edit., *A Selection from the Unpublished Scientific Papers of Sir Isaac Newton in the Portsmouth Collection in the University Library*, Cambridge, Cambridge University Press, 1962.

HALL, Rupert, *A Revolução na Ciência: 1500-1750*, trad. M^a Teresa Louro Pérez, Lisboa, Edições 70, 1988.

HAWKING, Stephen, *On the Shoulders of Giants: The Great Works of Physics and Astronomy*, Philadelphia, Running Press, 2002.

HICKEY, Thomas J., *History of Twentieth-Century Philosophy of Science*, <http://evans-experientialism.freewebspace.com/hickey001.htm>.

JAMMER, Max, *Concepts of force: a study in the foundations of dynamics*, Cambridge, Harvard University Press, 1957.

JAMMER, Max, *Concepts of mass : in classical and modern physics*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1961.

KOYRÉ, Alexandre, *Do mundo fechado ao universo infinito*, tradução de Jorge Pires, Lisboa, Gradiva, 2^a ed., 2001.

KOYRÉ, Alexandre, *Estudos Galilaicos*, trad. Nuno da Fonseca, Publicações Dom Quixote, Lisboa, 1992.

KOYRÉ, Alexandre, *Estudios de Historia del pensamiento científico*, trad. Encarnación Pérez Sedño et Eduardo Busto, 10.^a ed., México, Siglo Veintiuno, 1990.

KOYRÉ, Alexandre, *Newtonian Studies*, Chicago, University of Chicago Press, 1968.

LOSEE, John, *Introdução Histórica à Filosofia da Ciência*, trad. Carlos Lains, Lisboa, Terramar, 1998.

MACHAMER, Peter, *Cambridge Companion to Galileo*, Cambridge, Cambridge University Press, 1998.

MEYERSON, Émile Meyerson, *Identité et Réalité*, 3.^a ed., Paris, Félix Alcan, 1926.

MOUY, Paul, *Le Developpement de la physique cartesienne*, New York, Arno Press, 1981.

PARK, Katharine & Lorraine Daston, *The Cambridge History of Science: Early Modern Science*, Cambridge, Cambridge University Press, 2006.

SHAPIN, Steve, *A revolução científica*, trad. Ricardo Afonso Roque, Algés, Difel, 1999.

SUPPE, Frederick, *The structure of scientific theories*, Urbana, University of Illinois Press, 1977.

WESTFALL, Richard, *A Construção da Ciência Moderna: mecanismos e mecânica*, trad. Sérgio Duarte Silva ; coord. colec. e rev. cient. Ana Simões e Henrique Leitão, Porto, Porto Editora, 2003.

WESTFALL, Richard, *Never at Rest: A Biography of Isaac Newton*, Cambridge, London, New York: Cambridge University Press, 1980.

WESTFALL, Richard, *Force in Newton's physics: the science of dynamics in the seventeenth century*, London, Macdonald, 1971.

Teses

BRANCO, Maria do Rosário, *A física de Descartes e a física de Newton: os temas controversos*, Lisboa, 1996, tese de doutoramento Filosofia e História da Ciência, Universidade Nova de Lisboa.