



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ  
FACULDADE DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIAS E LETRAS DE IGUATU  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE FÍSICA**

**Durval Araújo de Mendonça**

---

**Os *Principia* de Newton: uma Leitura de seus  
Conceitos e Princípios Fundamentais**

---

**IGUATU-CE  
2015**

Durval Araújo de Mendonça

**Os *Principia* de Newton: uma Leitura de seus Conceitos e Princípios Fundamentais**

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura Plena em Física da Faculdade de Educação, Ciências e Letras de Iguatu - FECLI como requisito parcial para obtenção do Título de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Me. Leonardo Tavares de Oliveira

Iguatu-CE  
Setembro de 2015

M539p

Mendonça, Durval Araújo de.

Os Principia de Newton: uma leitura de seus conceitos e princípios fundamentais. / Durval Araújo de Mendonça. [Orientado por] Ms. Leonardo Tavares de Oliveira. – Iguatu, 2015.

54 p.

Monografia (Graduação) – Universidade Estadual do Ceará, Coordenação do Curso de Licenciatura Plena em Física, Iguatu, 2015.

1. Método Indutivo-Dedutivo 2. Principia 3. Ernst Mach  
4. Axiomas ou Leis do Movimento

I. Oliveira, Leonardo Tavares de. (Orient.) II. Universidade Estadual do Ceará – Graduação em Física III. Título

CDD: 531

DURVAL ARAÚJO DE MENDONÇA

OS PRINCÍPIOS DE NEWTON: UMA LEITURA DE SEUS CONCEITOS E  
PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

Monografia submetida à coordenação do curso  
de licenciatura em Física da Universidade  
Estadual do Ceará – Faculdade de Educação,  
Ciências e Letras do Igatu, como requisito  
parcial para a obtenção do grau de Licenciado  
em Física.

Aprovado em 28/09/15

AVALIAÇÃO

Leonardo Tavares de Oliveira

Prof. Msc. Leonardo Tavares de Oliveira (Orientador)  
Universidade Estadual do Ceará – UECE  
Faculdade de Educação, Ciências e Letras de Igatu – FECLI

Célio Rodrigues Muniz

Prof. Dr. Célio Rodrigues Muniz  
Universidade Estadual do Ceará – UECE  
Faculdade de Educação, Ciências e Letras de Igatu – FECLI

Lázara Silveira Castrillo

Prof. Dr. Lázara Silveira Castrillo  
Universidade Estadual do Ceará – UECE  
Faculdade de Educação, Ciências e Letras de Igatu – FECLI

# *Resumo*

Os Princípios Matemáticos da Filosofia Natural (*Principia*) de Isaac Newton, é uma das obras na ciência que mais mudaram a nossa maneira de olhar para o Universo. Com ela, a compreensão do mundo que era fragmentada em uma física terrestre e uma física celeste, seria formada pelos ensinamentos de uma nova e única física, construída a partir dos conceitos e axiomas apresentados pela referida obra. Aprendemos sobre eles por meio dos livros que tratam da mecânica newtoniana em uma linguagem moderna e mais inteligível em que o formalismo do cálculo diferencial e integral substitui a geometria de Euclides, o conceito de referencial inercial, o de espaço e tempo absolutos e o conceito de massa se desliga da sua associação com o de força (uma força inata à matéria). Apesar desta atual abordagem feita sobre os conceitos e axiomas de Newton, é útil conhecer como eles se apresentam na forma como o próprio Newton fez, a fim de entender o desenvolvimento metodológico pelo qual passaram e então, melhor compreendê-los. Para isso, realiza-se neste trabalho, uma leitura crítica dos *Principia* iniciada pelas definições (onde são explicados os conceitos), continuada, de uma forma não condizente com os *Principia*, com a leitura sobre um conjunto de quatro regras que Newton intitula de Regras para o Estudo da Filosofia Natural, e concluída com os axiomas ou as leis do movimento. No ínterim dessas leituras, trechos importantes extraídos dos Escólios da obra são também evocados e discutidos. Ao final, o leitor certamente estará bem mais esclarecido quanto aos fundamentos da mecânica newtoniana, bem mais do que podia se fazer, se só lesse os livros atuais, ainda que haja muitos bons entre eles.

**Palavras-chaves:** Método Indutivo-Dedutivo, Principia, Ernst Mach, Axiomas ou Leis do Movimento.

# *Abstract*

The Mathematical Principles of Natural Philosophy (Principia) Isaac Newton, is one of the works in science that most changed our way of looking at the universe. With it the understanding of the world was fragmented into a terrestrial physics and celestial physics, would be formed by the teachings of a new and unique physics, built from the concepts and axioms presented by that work. We learn about them through books dealing with Newtonian mechanics in a modern, more understandable language in which the formalism of differential and integral calculus replaces Euclidean geometry, the concept of inertial frame, the absolute space and time and the concept of mass separates from its association with the force (an innate strength to matter). Despite this current approach made on the concepts and axioms of Newton, it is useful to know how they present themselves in the way Newton himself did, in order to understand the methodical development through which they passed and then better understand them. For this, we carried out this work, a critical reading of Principia initiated by the definitions (where the concepts are explained), continued in a non-conformity with the Principia, with the reading of a set of four rules that Newton entitled Rules for the Study of Natural Philosophy, and completed the axioms or laws of motion. In the meantime these readings, important passages extracted from the scholia of the work are also raised and discussed. In the end, the reader will certainly be far more savvy about the fundamentals of Newtonian mechanics, far more than could be done, if you only read the books today, although there are many good among them.

**Keywords:** Inductive-Deductive Method, Principia, Ernst Mach, Axioms or Laws of Motion.

## *Lista de Figuras*

1	<i>Capa dos Principia</i> . . . . .	p. 8
2	<i>O Método de Aristóteles</i> . . . . .	p. 14
3	<i>Comparação entre o Métodos de Aristóteles e de Galileu</i> . . . . .	p. 17
4	<i>Ilustração de Newton para o Lançamento de um Projétil</i> . . . . .	p. 26
5	<i>Diagrama das Definições</i> . . . . .	p. 29
6	<i>Interpretação de Lesage para a Gravitação</i> . . . . .	p. 38
7	<i>Experimento Imaginário para a Lei da Inércia</i> . . . . .	p. 41
8	<i>O Princípio de Superposição de Forças</i> . . . . .	p. 45
9	<i>Experimento para Verificação da Terceira Lei nas Atrações</i> . . . . .	p. 47
10	<i>Representação do Planeta Terra por Newton</i> . . . . .	p. 48
11	<i>Terra-maçã 1</i> . . . . .	p. 49
12	<i>Terra-maçã 2</i> . . . . .	p. 49
13	<i>Terra-maçã 3</i> . . . . .	p. 50
14	<i>Terra-maçã 4</i> . . . . .	p. 50
15	<i>Terra-maçã 5</i> . . . . .	p. 51

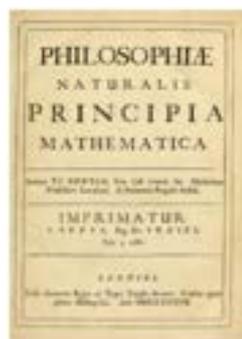
# *Sumário*

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	p. 8
<b>2</b>	<b>A BASE METODOLÓGICA DOS PRINCIPIA</b>	p. 10
2.1	Como estão escritos os Principia? . . . . .	p. 10
2.2	O método indutivo-dedutivo de Aristóteles . . . . .	p. 12
2.2.1	A Dedução . . . . .	p. 12
2.2.2	A Indução . . . . .	p. 13
2.3	O Método indutivo-dedutivo de Galileu . . . . .	p. 14
<b>3</b>	<b>OS PRINCIPIA</b>	p. 18
3.1	Como estão divididos os Principia? . . . . .	p. 18
3.2	As Definições . . . . .	p. 19
3.3	As noções de Espaço e Tempo Absolutos . . . . .	p. 30
3.4	As Regras para o Estudo da Filosofia Natural . . . . .	p. 30
3.4.1	Uma Regra a mais . . . . .	p. 36
3.4.2	Quanto a <i>não Invento Hipóteses</i> . . . . .	p. 36
3.5	Os Axiomas ou Leis do Movimento . . . . .	p. 39
<b>4</b>	<b>Considerações Finais</b>	p. 52
	<b>Referências</b>	p. 55

# 1 INTRODUÇÃO

Isaac Newton, nascido em Woolsthorpe, Inglaterra, no Natal de 1642, foi o autor de uma das maiores obras primas da ciência: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Princípios Matemáticos da Filosofia Natural), simplificadamente citado como *Principia*. A obra "*foi um dos acontecimentos mais importantes de toda a história da física (...) o ponto culminante de milhares de anos de esforços para compreender a dinâmica do universo*" (COHZN, citado por REALE; ANTISERI, 1990). Publicada no ano de 1687, teve segunda edição revista em 1713 e uma terceira em 1726 (um ano antes da morte de seu autor).

Seu título se justifica pelo fato de que naquele tempo, era usual chamar *Filosofia Natural* ou *Filosofia da Natureza* ao conjunto de conhecimentos básicos sobre a natureza que hoje chamamos de *Ciências da Natureza*. A distinção entre o que passou a ser Ciência e o que passou a ser Filosofia surgiu quando a primeira, ainda considerada uma parte da filosofia, buscou compreender o mundo a partir de *Princípios matemáticos*. No prefácio da obra Newton afirma: "*os filósofos têm até aqui julgado em vão a natureza. Mas tenho a esperança de que os princípios aqui propostos lançarão alguma luz sobre este modo de filosofar ou sobre algum outro mais verdadeiro.*" (NEWTON, 2010).



**Figura 1:** *Capa dos Principia*

Por meio deste breve perfil que traçamos a respeito da obra, buscamos dar, ao menos um vislumbre do seu enorme valor para a consolidação da ciência física, e, harmonicamente, para a consolidação de uma cultura científica em nós estudantes e professores de física,

pois considerar as fontes onde pela primeira vez apareceram de forma articulada importantes conceitos e axiomas, significa tê-los em maior profundidade:

*"A tentativa de se compreender os artigos originais dos grandes físicos (...) são os verdadeiros meios para aflorar a criatividade. Infelizmente, é notório notarmos recém-formados, e mesmo professores, sem ter lido e compreendido os artigos e livros onde jaz a verdadeira Física" (BOLIVAR, 2003).*

É intenção deste trabalho iniciar esta leitura para os *Principia*. Em tal leitura apresentamos enunciados e fragmentos da obra entremeados por comentários que refletem sobre seus significados. Ante algumas coisas expressas na obra, consideramos o contexto histórico do autor, para melhor a entendermos. A nossa leitura, apoia-se também, no parecer de outros autores que fizeram significativas leituras dos *Principia*. O mais presente deles é Ernst Mach, no séc. XIX, que se propôs a uma atarefada revisão dos conceitos fundamentais da mecânica newtoniana em *"A Mecânica como Ciência: o relato crítico e histórico do seu desenvolvimento"* conforme as recomendações do próprio Newton aos seus leitores contemporâneos e futuros: *"peço instantemente que tudo seja lido com espírito aberto e que as lacunas num assunto tão difícil sejam menos censuradas que investigadas e generosamente completada pelos novos esforços dos meus leitores"* (NEWTON, 2010). Nossa atenção porém está voltada a leitura dos conceitos e princípios básicos que constituem os *Principia*. Mas antes de nos depararmos com eles em definições, leis, escólios e certas regras que serviram de orientação ao pensamento de Newton, abordamos a base metodológica sobre a qual foi possível Newton erigir a sua mecânica.

## 2 *A BASE METODOLÓGICA DOS PRINCÍPIA*

### 2.1 Como estão escritos os Principia?

---

Os *Principia* estão escritos em linguagem geométrica, segundo o método hipotético-dedutivo, que se utiliza basicamente de definições, axiomas e teoremas. As hipóteses neste método são alcançadas por indução, podendo por isso se chamar também método indutivo-dedutivo, fundamentado no raciocínio e na observação. Antes que possamos abordar o método indutivo-dedutivo, convém entender a forma que ele adquire no discurso científico.

Para Aristóteles (384-322 a.C.), nascido em Estagira na Grécia do Norte e considerado o primeiro filósofo da ciência, cada ciência formula definições e princípios próprios conhecidos como axiomas e teoremas. Antes de tudo, assume a existência do objeto em torno do qual verterão todas as suas determinações (a aritmética assume a existência da unidade e do número). Feito isso, somos levados em seu estudo pelas definições, onde encontramos o significado de uma série de termos que lhe pertence (a aritmética define o número par: todo número que é divisível por dois); e pelos axiomas, proposições necessariamente verdadeiras. Os axiomas são os princípios por meio dos quais se dá a demonstração dos teoremas, novas proposições mas não novas verdades que ressaltam o que está subentendido dos axiomas. Um exemplo de axioma, ainda tirado da aritmética é: Se de iguais tiram-se iguais, restam iguais (este na verdade, um axioma comum a todas as ciências) (REALE; ANTISERI, 1990).

Usemos como exemplo agora a geometria: o ângulo é um objeto característico desta ciência, no entanto, só podemos formar uma ideia deste objeto por meio da definição do termo que o designa, assim, ângulo "é um par de semirretas com origem em um mesmo ponto<sup>1</sup> (GARBI, 2010).

Vemos como muitos princípios da geometria ficam resumidos por esta e outras

---

<sup>1</sup>a semirreta é definida a partir do conceito primitivo, e por isso indefinível, dos objetos reta e ponto

definições, assim, temos o axioma: "*Todos os ângulos retos são iguais*" (GARBI, 2010), que juntamente a outros, nos levam por meio do raciocínio dedutivo aos teoremas: "*em um triângulo isósceles, os ângulos da base são iguais*" (GARBI, 2010).

Guiada pela doutrina de Aristóteles a ciência estruturou seu discurso sobre um conjunto de declarações: as definições, declarações convenientes, visto que só esclarecem o discurso e o torna sucinto; os axiomas e os teoremas, declarações factuais, visto que são o próprio discurso. As declarações factuais seguem os preceitos abaixo (LOSEE, 2000):

1. Os axiomas são verdades auto-evidentes;
2. Os teoremas são demonstrados a partir dos axiomas;
3. Os teoremas concordam com as observações.

Os exemplos de definições, axiomas e teoremas aqui apresentados são encontrados no matemático grego Euclides (Ca. 300 a. C) em um dos mais importantes livros de Matemática de todos os tempos, os *Elementos*, onde são rigorosamente estudadas 465 proposições da Geometria e da Aritmética. Seu autor reuniu nessa obra, todo o conhecimento matemático até então produzido por ele e outros.

Os *Elementos* são ainda o mais antigo texto matemático que lemos, começando pelas definições dos objetos de que trata até sermos levados a uma série de demonstrações dos teoremas a partir dos axiomas e/ou de teoremas anteriormente demonstrados, encerrando sempre cada demonstração com a abreviatura **q.e.d** para a expressão em latim **Quod erat demonstrandum** e que significa: o que se queria demonstrar. A exposição metódica seguida pelos *Elementos* recebe o nome de silogismo científico ou demonstrativo, que para Aristóteles, é a forma mais importante que pode assumir um silogismo.

É, segundo a exposição metódica dos *Elementos* que Newton desenvolveu seus *Principia*. Como declara seu autor, a mecânica ali abordada é "*expressa em proposições exatas e demonstrações dos movimentos que resultam de quaisquer forças e das forças que são requeridas para quaisquer movimentos*" (NEWTON, 2010).

Mas antes que o leitor dos *Principia* comece a estudar essas demonstrações, teoremas da mecânica, ele é apresentado às 8 definições e os 3 axiomas do movimento, juntamente a 4 escólios (reflexões e relatos de experimentos ao longo da obra), 25 corolários, e ainda a um total de 11 lemas (ferramentas de cálculo utilizadas na demonstração dos teoremas). Após abordagem dos primeiros teoremas, seguem muitos outros corolários, lemas e escólios.

Os *Principia* são também considerados a primeira exposição dedutiva sistemática da mecânica clássica. Foi, pelo método indutivo-dedutivo, que Newton fundamentou e organizou os princípios ali expostos. Trataremos do método em duas abordagens, a primeira pertencente a Aristóteles, e que serviu de base, posteriormente, para a segunda: a abordagem moderna comumente atribuída ao físico italiano Galileu Galilei (1564-1642).

## 2.2 O método indutivo-dedutivo de Aristóteles

### 2.2.1 A Dedução

De acordo com os ensinamentos do *Organon*<sup>2</sup> de Aristóteles, todo silogismo se cumpre no raciocínio dedutivo, aquele raciocínio em que a conclusão a que se chega é, pois, a consequência lógica que provém da combinação de certos pressupostos. Basicamente em um raciocínio dedutivo deve haver três proposições, das quais duas são pressupostas (premissas), e a terceira é consequência (conclusão). Eis um modelo tradicional de silogismo:

$$\begin{array}{l} \text{Premissas} \left\{ \begin{array}{l} \text{todos os homens são mortais;} \\ \text{os gregos são homens;} \end{array} \right. \\ \\ \text{Conclusão} \left\{ \begin{array}{l} \text{logo, os gregos são mortais.} \end{array} \right. \end{array}$$

Como podemos ver, o fato de os gregos serem mortais é consequência que provém necessariamente do fato de se ter pressuposto que todo homem é mortal e que os gregos são homens. O silogismo em si expõe tão somente a ação de raciocinar logicamente, isto é, de inferir novas proposições a partir das premissas, sem se preocupar com o valor de verdade das mesmas. Já "*o silogismo científico ou demonstrativo, se diferencia do silogismo em geral precisamente porque além da correção formal da inferência, também diz respeito ao valor de verdade das premissas (e das consequências)*" (REALE; ANTISERI, 1990). No silogismo científico as premissas têm de ser verdadeiras e ainda primeiras, quer dizer, dispensar demonstrações, sob pena de entrarmos num processo demonstrativo *ad infinitum*, apresentando-se como verdades auto-evidentes, e é aí que recebem o nome de axiomas, sendo suas conclusões os teoremas.

Portanto, o postulado<sup>3</sup> científico

<sup>2</sup>O trabalho em ciência, que Aristóteles define como um saber racional, se encontra em uma série de tratados posteriormente reunidos sob um mesmo título: *Organon*, onde se discute como pensar em ciência, a sua estrutura e ordenação.

<sup>3</sup>Com relação aos postulados da geometria há o questionamento se são eles sucedidos pela experiência ou

*"não é uma hipótese precária, mas uma realidade primária, um fato básico, original, imediatamente evidente, tão insuperavelmente claro que não necessita de prova alguma senão a sua própria existência, e por isso mesmo não pode jamais ser demonstrado analítica e indubitavelmente"* (ROHDEN, 2008).

Esta sua auto-evidência é como um fato que "salta à vista", faz-se perceber, e então o percebemos pela experiência, pela observação voltada a ele na natureza.

## 2.2.2 A Indução

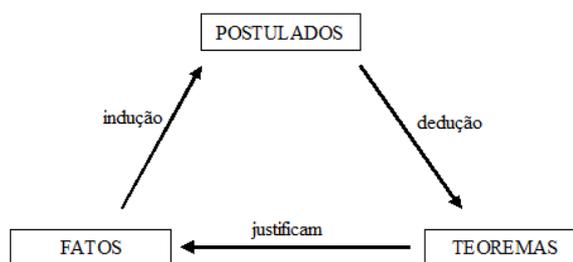
O que concluímos em particular da observação adquire valor universal pela indução. Por meio dela, fundamentado no que é conhecido da experiência, fundamos uma hipótese cuja extensão em que a consideramos legítima a experiência não pode abarcar. Destarte, quando fazemos uma experiência sobre dado fenômeno, e após, nova experiência sobre outro de mesma espécie, dando seguimento com uma série de experiências sobre os demais, muitas vezes constatamos uma regra comum a qual a quantidade comensurável dos eventos observados obedecem, supomos a partir daí, por indução, que tal regra vale para uma quantidade incomensurável destes eventos, uma vez que a apuração nunca poderá envolver a infinidade deles. Eis uma ilustração:

$$\text{Casos Apurados} \left\{ \begin{array}{l} E_1 \text{ apresenta a propriedade P,} \\ E_2 \quad " \quad " \quad P, \\ E_3 \quad " \quad " \quad P. \end{array} \right.$$

$$\text{Generalização} \left\{ \dots \text{ todos os E's apresentam a propriedade P.} \right.$$

Em resumo, enquanto que a dedução é um tipo de argumento racional, onde o que sei de todos (todos os homens são mortais) me leva ao conhecimento de alguns (Sócrates é homem, logo mortal) e isto será necessariamente verdade; a indução, não constitui argumento lógico, o que sei de alguns, não é garantia que irá valer para todos. A dedução particulariza, a indução generaliza. A dedução não nos permite chegar a novas verdades, mas explora o conjunto das verdades fundamentais apresentando suas diversas combinações em resultados conhecidos como teoremas, até que eles esgotem. A indução permite que estabeleçamos novos não. Cientistas como Newton e Carl Friedrich Gauss, defendem que os axiomas da geometria constatarem fatos experimentais.

princípios através dos axiomas, ampliando o nosso conhecimento da natureza. A dedução tem por base a razão. A indução, a observação. A indução e a dedução estão inseridas no método de Aristóteles segundo o esquema do triângulo abaixo:



**Figura 2:** O Método de Aristóteles

O que notamos do processo é uma passagem do conhecimento de um fato ao conhecimento das razões para o fato, isto é, suas causas (além de ser demonstrativa, a ciência deve apontar as causas dos fenômenos). Nisso consiste a explicação científica, alcançada somente quando as afirmativas sobre os fenômenos ou propriedades são deduzidas a partir dos postulados (LOSEE,2000).

## 2.3 O Método indutivo-dedutivo de Galileu

O padrão indutivo-dedutivo de Aristóteles passou a ser adotado por todos os homens de ciência, ainda que com variações nos termos que o designa e acompanhado de reexames nos estágios que o compõem. Não obstante tais revisões, a ciência até hoje possui o substrato da metodologia Aristotélica. Segundo Galileu, comumente apontado como o primeiro cientista, no sentido moderno da palavra, o método científico consiste inteiramente no que ele chamou de "*experiências sensatas*" (que se dão através de nossas observações) e em "*demonstrações necessárias*" (argumentações nas quais, partindo-se de um postulado se deduzem as consequências). É isso o que nos ensina o empirismo e a lógica de Aristóteles.

Ainda conforme Galileu, a física está escrita em linguagem matemática, sem cujo domínio "vagamos inutilmente por escuro labirinto"(REALI; ANTISERI, 2010). Ainda que distante da ideia da física matemática, característica da ciência moderna, Aristóteles também submete ao estudo matemático alguns conceitos físicos<sup>4</sup>.

Aristóteles e Galileu são personagens históricos que protagonizaram diálogos cruciais sobre a maneira de ver o universo, tais como os dois personagens fictícios Simplício e

<sup>4</sup>no livro VII da Física, o filósofo coloca sua noção de força dentro de uma análise quantitativa.

Salviati nas obras de Galileu. Apesar de suas visões de mundo ser diferentes, suas metodologias, utilizam-se dos mesmos componentes base: experiências e demonstrações. Mas ainda que fundamentalmente semelhantes, elas divergem em um quesito: a observação.

Podemos dizer que em Aristóteles a observação não tinha como alvo verificar ou refutar hipóteses (o que impedia uma revisão de princípios). Em Galileu; ela cumpre com essa tarefa além de ser o ponto de partida do conhecimento. De um, temos a simples e pura observação da natureza, de outro, a observação metódica e instrumentalizada, esta última, garantindo maior objetividade contra os sentidos e os seus testemunhos. A observação metódica está presente nos experimentos das quedas dos corpos de Galileu, com ela se percebe a correlação existente entre grandezas como espaço e tempo que atesta a independência da massa no problema em questão, que para Aristóteles deveria influir no quão rápido um corpo cai. A observação instrumentalizada está presente nas observações de Galileu feitas ao telescópio, com ela se percebe as manchas no sol, os relevos na lua, e as fases de Vênus, onde segundo Aristóteles, nos céus prevalecia as esferas perfeitas e os corpos sem máculas ou transições. As observações que Galileu faz se encerram no que ele chama de "*experiência sensata*", diferenciando-se do significado da experiência comum. A experiência (conhecimento pela pura e simples observação) aprofunda-se pelo experimento (conhecimento pela observação ativa, meticulosa e ponderada), tornando-se sensata. Por isso, diz-se que na ciência moderna, a experiência é o experimento.

O experimento objetiva a fundação de uma hipótese firme ou, de outro modo, a validação ou refutação de uma hipótese. A hipótese enquanto tal é conhecimento provisório e provável, por isso, soa à pergunta, à busca de uma resolução. O experimento, como bem comparado por Rubem Alves "*é a tortura a que submetemos a natureza para obrigá-la a manifestar-se sobre a pergunta*" (ALVES, 2013) até que tenhamos alguma resposta. No experimento, forçamos a natureza a responder, pois o experimento viabiliza a reprodução do fenômeno sob circunstâncias ideais, quantas vezes necessário for, assegurando a observação atenta aos detalhes e tomadora de notas. Com o experimento, se põe a teste seja uma hipótese ou a sua conclusão, afirmando ser ela verdadeira ou falsa, ou reconhecendo seus limites enquanto verdade.

Dentro da prática experimental, auxiliada por instrumentos de medição mais precisos na época de Galileu, a máxima "*O livro da Natureza está escrito em linguagem matemática*", cuja essência já era conhecida pelos pitagóricos, se estabelece como nunca. O instrumento, no seu ato de medir, atribuindo números aos componentes do mundo físico, aproxima a matemática da física de tal forma que a física passa a ter a sua subsistência na matemática. O título *Princípios matemáticos...* revela este "*modo de filosofar*" sobre

a natureza apoiado na matemática, sendo portanto os *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*. A linguagem matemática é mais um diferencial na ciência moderna que está incluso na experimentação.

A diferença primordial entre Aristóteles e Galileu, detentores de uma mesma metodologia, em sua essência, parece ser portanto o modo como a natureza era observada. Todos os detalhes que apontam discordâncias entre os dois nascem no jeito de observar a natureza. Não basta observar o que se passa, o que se apresenta espontaneamente aos nossos olhos, é necessário saber para onde olhar e ser metódico no olhar, i.e., efetuar o experimento. Não nos esqueçamos das distinções que aqui fizemos entre experiências e experimentos. Koyré em um de seus ensaios ao falar de Galileu cuida em frisar tal diferença:

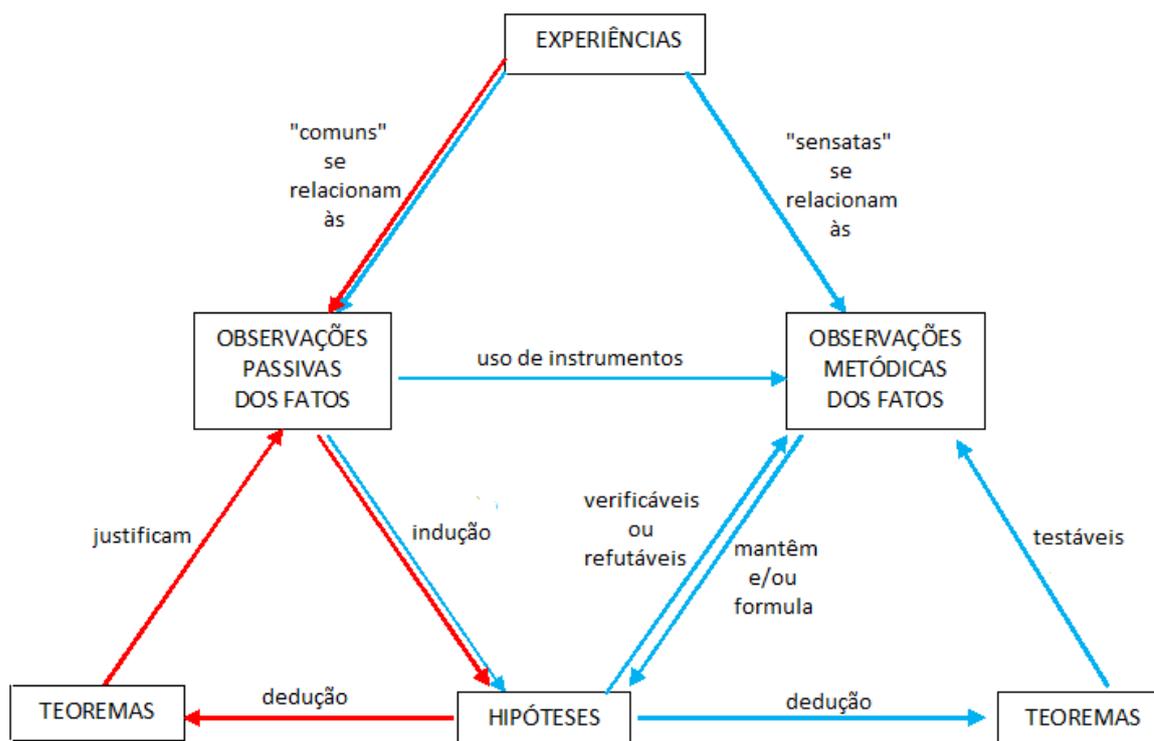
*"Galileu sabe que a experiência - ou se me posso permitir o emprego da palavra latina "experimentum", para justamente situá-la em oposição à experiência comum, à experiência que não passa de observação passiva (adjetivo nosso) - que o "experimentum" é preparado (...) é uma pergunta feita à natureza" (KOYRÉ, 2011).*

E esta pergunta se formula na linguagem matemática.

Cabe dizer que, diante das opiniões divididas de historiadores e filósofos da ciência quanto às práticas científicas de Galileu bem como de Aristóteles, utilizamos estes personagens mais para figurá-los como os representantes da ciência antiga e da ciência moderna (expostas em suas versões mais difundidas e didáticas) que para retratar como eles realmente pensavam em seus pormenores a complexa estrutura da ciência. Na ciência moderna, do método experimental, que tem como nosso representante Galileu Galilei, para que o saber seja validado, é necessário o contínuo controle da experiência feita experimento, sempre que oportuno. As *"experiências sensatas"* e as *"demonstrações necessárias"* de Galileu, se integram e se corrigem mutuamente, armando a ciência moderna.

Abaixo, expomos por meio de um mapa conceitual um comparativo entre as metodologias científicas aqui abordadas, onde os estágios envolvidos criam a estrutura de triângulos pequenos que se encaixam formando um maior. As setas coloridas em azul indicam as possíveis trajetórias de serem descritas pela ciência moderna. A importância que o experimento aí desempenha é notada pelo fato de que no mapa há um maior número de setas voltadas ao quadro das *"observações metódicas"*. As setas coloridas em vermelho apontam os únicos caminhos admissíveis pela metodologia Aristotélica. Ressaltamos que na seta com a legenda *"mantêm e/ou formula"* deve ficar entendido que o sentido de formular é precisamente redigir como fórmula matemática, visto que esta é a linguagem que a nova

física exige. As conjunções "e" e "ou" devem funcionar como opções para: "mantêm e formula" (caso em que a hipótese for confirmada) ou simplesmente "formula" (caso em que a hipótese original é refutada devendo ser substituída). Acreditamos que no mais, o mapa é perfeitamente inteligível. Observamos ainda que as conclusões no método de Aristóteles devem concordar com as observações; em Galileu, só podemos falar em concordância, após uma prova experimental.



**Figura 3:** Comparação entre o Métodos de Aristóteles e de Galileu

## 3 OS PRINCIPIA

### 3.1 Como estão divididos os Principia?

---

As quase mil páginas dos *Principia* estão divididas em três livros e estão escritas, como já dizemos, conforme o sistema incorporado pelas ciências desde as lições de Aristóteles e os Elementos de Euclides, que se constitui de declarações como definições, axiomas e teoremas. Os teoremas começam a ser apresentados a partir do primeiro livro. O primeiro e o segundo livro têm por objetivo "*descobrir as forças da natureza a partir dos fenômenos dos movimentos e depois demonstrar os outros fenômenos a partir destas forças*" (NEWTON, 2010). O terceiro livro *O Sistema do Mundo*, a partir das proposições matematicamente demonstradas nos dois primeiros, tem por objetivo deduzir "*dos fenômenos celestes as forças gravitacionais pelas quais os corpos tendem para o Sol e para os vários planetas*" (NEWTON, 2010) e, então, destas forças, deduzir o movimento dos planetas, dos cometas, da lua e do mar. É onde Newton desenvolve a sua cosmologia. Basicamente a obra assim se divide:

- DEFINIÇÕES;
- AXIOMAS OU LEIS DO MOVIMENTO;
- LIVRO I: O MOVIMENTO DOS CORPOS (NO VÁCUO);
- LIVRO II: O MOVIMENTO DOS CORPOS (EM MEIOS RESISTENTES);
- LIVRO III: O SISTEMA DO MUNDO.

Nosso interesse é estudar o prelúdio da obra, formado pelas definições e axiomas mais partes dos escólios com que conclui este prelúdio, juntamente às Regras para o Estudo da Filosofia Natural mais partes do Escólio Geral, que correspondem respectivamente ao prelúdio e ao epílogo do terceiro livro. Os momentos no qual discorreremos sobre partes destes escólios, ocorrem dentro de vários tópicos além daqueles onde estas partes são especialmente discutidas. Começemos pelo exame das definições.

## 3.2 As Definições

---

As definições são utilizadas para deixar bem claro o sentido que se deve apreender de certos termos expressos nos axiomas e nos teoremas, e também para que se possa resumir a exposição de ideias apresentadas por estas proposições. Para que uma definição tenha sua utilidade, ela precisa ser formulada cuidadosamente para que não gere equívocos<sup>1</sup>.

Ao ato da definição, em geral, consideram-se os pontos:

- não designar pelo mesmo termo duas coisas diferentes, caso esta atitude venha a confundir a interpretação correta de um conceito;
- não cometer o absurdo de explicar um termo pelo próprio termo, como ao definir pretendemos dar ou melhorar o significado de um termo desconhecido ou mal interpretado, seu significado jamais será entendido se for expresso pelo termo que já se pretende entender;
- "*não definir as coisas claras e entendidas por todos os homens*" (PASCAL), mas definir todas as outras, assim como não se prova o que é auto-evidente, mas prova-se todo o resto. Os conceitos, ditos primitivos, para os quais uma definição seria incabível e que na verdade, uma tentativa de esclarecimento só "*traria mais obscuridades que clareza*" (PASCAL) são: Tempo, Espaço, Movimento etc; os demais conceitos, formados pela combinação de primitivos, são conceitos derivados, ocupando lugar semelhante aos teoremas.
- ao ser definida, uma dada grandeza deve apresentar na sua definição especificações de como determiná-la quantitativamente, pois levando em conta que as leis da física são expressas em linguagem matemática, os conceitos dentro da lei devem ser desenvolvidos tendo-se em vista a sua mensurabilidade. Apenas definições qualitativas não possibilitam a construção de uma teoria científica.

Newton apresenta um total de oito definições. Detalhemos cada uma delas apresentando-as da maneira como Newton o fez.

### DEFINIÇÃO I

---

<sup>1</sup>O matemático francês Blaise Pascal (1623-1662), orienta perfeitamente neste sentido em sua abordagem "Do Espírito Geométrico".

A **quantidade de matéria** é a medida da mesma, proveniente em conjunto da sua densidade e volume.

Esta é notavelmente uma definição como dita o último dos pontos acima considerados. Newton afirma que o conceito em questão é uma medida, um valor que se determina fazendo-se o produto<sup>2</sup>, da densidade pelo volume. Este produto é bastante conhecido nosso e sabemos o que dá: a massa de um corpo.

Newton identifica portanto a **massa** como **quantidade de matéria**. Isto é compreensível, pois sabemos, por exemplo, que a massa atômica de um elemento químico corresponde ao total do número de prótons e nêutrons no seu núcleo. A massa, neste caso em especial, é literalmente a quantidade de matéria. O átomo cuja massa atômica é igual a 12 (Carbono) contém 12 partículas elementares, sendo 6 prótons e 6 nêutrons. Esta observação, porém, data de dois séculos posteriores a Newton.

A identificação estabelecida por Newton entre massa e quantidade de matéria pode ter tido por base outras partículas elementares, como as que constituem um gás. Isto podemos supor pelos comentários do próprio autor à definição ao citar um gás: *"um ar de densidade dupla e em volume duplo tem uma quantidade quádrupla (de matéria); em volume triplo teria uma quantidade sêxtupla"* (NEWTON, 2010); seguindo com o raciocínio para uma densidade constante, a quantidade de matéria acompanharia o volume na mesma proporção. Isto seria como apanhar mostras cada vez maiores e uniformes de uma substância, independente de sua natureza e estado. A massa está sempre a dizer, de alguma forma, quanta *"matéria"* há.

Newton inscreveu o termo quantidade de matéria em lugar de massa na sua definição, certamente visando ser mais intuitivo na apresentação de um conceito que passou a ser significativo na mecânica. Mas em seus comentários finais, evoca o termo relegado: *"é a esta quantidade (de matéria) que me refiro, daqui por diante e em toda a parte, sob o nome de "corpo" ou de massa"* (NEWTON, 2010). Felizmente o termo corpo foi abandonado, do contrário estaríamos falando no 'corpo de um corpo' quando quiséssemos dizer 'a massa de um corpo'.

Fazemos observar que Newton, ao definir quantidade de matéria, ou seja, ao definir massa como sendo o produto da densidade pelo volume, não forneceu um modo de saber qual a densidade de um corpo sem recorrer a sua massa, pois densidade é o quociente da massa pelo volume, implicando em uma explicação de um termo pelo próprio termo. É como se Newton nos orientasse a proceder do seguinte modo: meça a massa e o volume de um corpo, divida um pelo outro e depois multiplique pelo volume e ache a massa. Tudo isto, quando a massa já era

---

<sup>2</sup>"em conjunto" quer dizer o produto

conhecida desde o ato da medição.

O fato é que massa é um conceito fundamental enquanto que a densidade, um conceito derivado que envolve a massa e o espaço. Quanto aos conceitos fundamentais, é normal cair em uma certa imprecisão ao se querer defini-los. A eles, para os quais dizemos que uma definição seria incabível, por ser "*bem conhecidos de todos*" como chega a dizer Newton a respeito do espaço e do tempo no seu primeiro escólio logo após as definições, há ao menos a necessidade de dar uma definição operacional para que a determinação quantitativa seja possível. Isto significa, em nosso caso, dizer como medir de forma precisa e direta a massa de um corpo, o que pode evitar um círculo vicioso na busca da sua determinação. Achar uma forma adequada de medir uma certa grandeza, é defini-la operacionalmente. Assim por exemplo, do ponto de vista operacional, a definição de tempo está baseada na repetição de algum tipo de evento que avaliamos como periódico.

Na sua revisão crítica dos princípios da mecânica (FITAS, 1998), o físico e filósofo austríaco Ernst Mach (1836-1916), fornece uma definição operacional de massa visando colocá-la em lugar da definição dada por Newton, que reconhece como sendo "*circular*". Sua definição diz que a razão entre as massas de dois corpos é igual à razão inversa das acelerações que adquirem ao interagirem (ao aplicarem uma força um sobre o outro de acordo com a terceira lei de Newton). Em termos matemáticos:

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

Sendo  $m_1$  e  $m_2$  as massas dos corpos 1 e 2,  $\alpha_2$  a aceleração adquirida pelo corpo 2 sob ação da força aplicada por 1, e  $\alpha_1$  a aceleração adquirida pelo corpo 1 sob ação da força aplicada pelo corpo 2. Isto dá um processo para comparar as massas de dois corpos. Escolhendo uma massa padrão (igual a 1) pode-se determinar todas as outras. Destarte, sabemos como ter o valor da massa sem grandes imprecisões. Na sua definição, Mach trata os corpos em interação em um sistema fechado e isolado. Daí surgiu também o *princípio de Mach*, que afirma que a massa de um corpo deriva da interação de todos os outros corpos, assim, um corpo que se achasse num universo vazio não possuiria massa.

## DEFINIÇÃO II

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

Esta é outra definição quantitativa, o conceito em questão é uma medida, um valor que se determina fazendo-se o produto da massa pela velocidade. A massa é uma grandeza escalar, e a velocidade, uma grandeza vetorial, o que torna esta nova quantidade definida por Newton, uma grandeza vetorial. Newton comenta: "*O movimento do todo é a soma dos movimentos de todas as suas partes*" (NEWTON, 2010), onde se deve entender esta soma como a soma vetorial. O conceito de quantidade de movimento, mais tarde referido como simplesmente *momentum*, foi primordial na definição de força.

### DEFINIÇÃO III

*A vis insita, ou força inata da matéria é um poder de resistir, pelo qual cada corpo, tanto quanto em si caiba, continua no seu estado presente, seja de repouso, seja de movimento uniforme segundo uma reta.*

Esta definição serve como um preparo para o conteúdo das duas primeiras leis do movimento. Trata-se da primeira definição qualitativa e na qual aparece o termo força. O significado de força nela empregado não é no entanto o que estamos habituados a saber, como a razão do movimento ou da sua mudança, mas como a razão da imobilidade ou da estabilidade do movimento. O uso do termo *força*, podendo aparecer com este ou aquele significado não chega a causar confusão, por conta do uso dos adjetivos *inata* (utilizado nesta definição) e *impressa* (para referir ao significado de força na definição seguinte).

Comenta Newton que a força inata da matéria só se manifesta para "*competir*" com a força que sobre a matéria se imprime. A experiência cotidiana de não conseguirmos sem qualquer dificuldade fazer algo sair do repouso com uma força de nossos braços demonstra a força inata da matéria. Enquanto que ela insiste em manter um corpo em repouso ou em movimento uniforme, a força impressa quer tirar-lhe da monotonia dinâmica. Interpreta-se por isso a força na presente definição como uma resistência que o corpo apresenta à tentativa de acelerá-lo. Esta relutância do corpo em sair do seu repouso ou em ir mais rapidamente decorre da 'preguiça' que possui, e é daí que surge o termo 'inércia' podendo ser utilizado em lugar do termo que vem na definição, *vis insita*: "*esta vis insita pode tomar um nome mais significativo, pode chamar-se 'força de inércia' ou 'força de inatividade'*" (NEWTON, 2010).

Hoje, este conceito de força de inércia aparece com um outro significado, para falarmos de forças fictícias em referenciais não inerciais. Mas quando Newton o usa, está se referindo tão-só a uma grandeza que chama de inércia de um corpo, e para qual percebe que é proporcional à sua massa, sendo enfim ela própria, abordada em uma acepção diferente: "*esta*

*força (de inércia)... é sempre proporcional à massa do corpo em que existe, e em nada difere da inatividade ou inércia da massa, senão na nossa maneira de a conceber." (NEWTON, 2010).*

A presente definição identifica a **massa** como **inércia**, reconhecendo-lhe um poder de resistir à mudança de movimento. Dentro deste contexto, a formulação machiana para definição de massa se sugere. Basta ver na definição operacional de massa que, se permanecidos os valores associados ao corpo 1, aumentando  $m_2$ , necessariamente  $\alpha_2$ , deve diminuir no mesmo fator. O caráter da massa que se evidencia nesta definição de Newton se acha também na definição de Mach, pois quanto maior a massa do corpo em questão, mais resistência apresenta à força sobre ele impressa, e menor aceleração adquire. Visto isto, podemos nos perguntar: porque Newton não deu a mesma definição de Mach para a massa, se ela se sugeria? É interessante notar que Newton utiliza o conceito de força inata da matéria, portanto, está a considerar a inércia ou a massa como uma propriedade intrínseca, essencial da matéria, nascida com ela, o que não é compatível com o princípio de Mach, conseqüente de sua definição, que diz que um corpo sozinho não possui massa, e que esta propriedade surge somente quando da interação dele com outros corpos no Universo.

Avaliamos até aqui, que Newton, em lugar de usar termos como *quantidade de matéria* ou *força inata da matéria* que surgem em mais de uma definição (I e III), se fosse sucinto, teria utilizado tão-somente o termo massa, e em uma única definição precisa, ressaltado o seu caráter aditivo e inercial.

Rodrigues, J. R. (2010) autor da tradução dos *Principia* sobre o qual nos baseamos afirma em nota de comentário que "*as definições de Newton, são um discurso um tanto vago e palavroso, pelo qual, Newton tenta explicar aos seus contemporâneos do final do séc XVII, na linguagem então corrente, qual é o conteúdo intuitivo dos seus conceitos e das suas leis.*"

#### DEFINIÇÃO IV

*Uma **força impressa** é uma ação exercida sobre um corpo para lhe mudar o estado quer de repouso quer de movimento retilíneo uniforme.*

Esta definição, também qualitativa, traz o conceito de força que se opõe ao da definição III. Enquanto que a força impressa intuitivamente falando, é um puxão ou um empurrão que visa tirar um corpo do repouso, portanto, ação que vem de fora do corpo; força inata é uma resistência que o corpo fornece a tais ações para se manter em repouso ou movimento retilíneo uniforme, portanto, ação que vem de dentro do corpo, é a preguiça (inércia)

do mesmo para se mover.

Hoje em física clássica, não falamos mais em *força inata* ou *força impressa*, utilizando tais termos. Falamos simplesmente em força, com o significado da presente definição. O termo **força** chegou a causar muita confusão entre os pensadores dos séc. XV, XVI e XVII, e uma das contribuições de Newton neste sentido, foi fornecer uma ideia de força que se estabeleceu solidamente pela história da ciência.

E é como a causa do movimento que ela se estabelece, mais exatamente, como a causa da mudança de movimento. A força se revela como a causa cujo efeito é a aceleração. É seguido aqui o antigo princípio da causalidade na ciência, o de que o estudo de um fenômeno deve exibir a sua causa.

Diz Newton em seu breve comentário sobre a definição: "*Esta força consiste apenas na ação e não permanece no corpo quando a ação termina*", o que faz lembrar o ditado *cessante causa cessat effectus* que resumia a ideia Aristótelica de que um corpo só se mantém em movimento enquanto uma força age sobre ele. A diferença é que Newton reconhece que "*um corpo mantém unicamente por inércia o estado de movimento que adquire*" (NEWTON, 2010).

A noção newtoniana de força "*tem origem, como o nome indica, na sensação muscular (...)* Mas essa noção foi generalizada e estendida às mudanças que ocorrem num movimento qualquer, mesmo aquelas que não podem ser obtidas pelo esforço muscular humano" (PLANCK, 2012), ou que não envolvem o contato direto entre os corpos que se interagem, podendo ser elas originadas das forças de atração à distância, como a gravidade e o magnetismo.

Newton classifica a força impressa em três espécies de acordo com a forma como acontecem: percussão, pressão, força centrípeta. E vai, na definição seguinte, se deter sobre uma dessas formas.

#### DEFINIÇÃO V

*Uma força centrípeta é aquela pela qual os corpos são atraídos ou impelidos ou de algum modo tendem para um ponto como centro.*

Esta definição, também qualitativa, introduz as definições restantes VI, VII, VIII.

Perguntamo-nos, como fez Max Jammer ao abordar sobre o conceito newtoniano

de força: *"Por que Newton forneceu uma definição especial de força centrípeta se ela devia ser considerada junto com a percussão ou a pressão, de acordo com as observações finais da definição IV? Por que não encontramos nenhuma definição de força de percussão ou de força de pressão?"* (JAMMER, 2011).

Acontece que a gravidade foi a grande questão científica na época de Newton, isto significava demonstrar a lei de atração gravitacional que dava origem às órbitas elípticas dos planetas. Questão que, como se conta, fez Halley solicitar a Newton uma resposta. O inquirido disse já possuí-la, mas não lembrar onde a guardara. Sob o incentivo de Halley, Newton refez seus cálculos e os papéis com a resolução do problema acabaram por se desdobrar nos Principia: *"foi ele que me colocou no caminho desta publicação. Pois, assim que obtive a minha demonstração da forma das órbitas celestes, não cessou de insistir para que eu a comunicasse à Royal Society"* (NEWTON, 2010).

Pela importância que o tema da gravidade ocupou em seu trabalho, no modo como estimulou seu processo de criação, entendemos aqui o motivo pelo qual Newton em detrimento das outras forças que designa define a força centrípeta, pois *"a este tipo de força pertence a gravidade, pela qual os corpos tendem para o centro da Terra (...) pela qual os planetas são constantemente afastados dos movimentos retilíneos e uniformes em que, sem ela, prosseguiriam, mas são obrigados a mover-se em órbitas curvilíneas"* (NEWTON, 2010).

É nesta definição que Newton deixa claro que a queda de objetos próximos à superfície da Terra e a órbita da Lua ao redor da Terra seguem a mesma lei física, graças a qual passamos a entender a órbita da Lua não como um movimento especial das coisas do céu, mas como um movimento de queda, tal como acontece aos objetos que cá soltamos ou lançamos de algum modo.

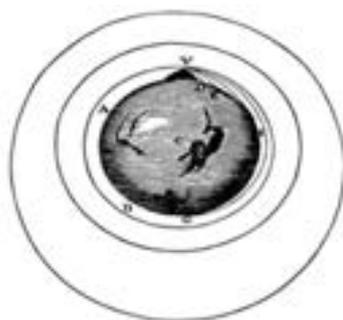
Para explicar isso, Newton imagina uma bala de chumbo lançada por um canhão que se encontra no cimo de um monte. A bala é lançada com uma velocidade na direção horizontal (paralela ao horizonte). O peso da bala através do qual a Terra lhe puxa, atrai-a para o seu centro, e a bala se desvia em um certo tanto do movimento em linha reta e uniforme que por inércia deveria seguir afastando-se da Terra. Duas quantidades são decisivas no desvio sofrido pela bala, uma aponta para o centro, na direção do peso, a outra, perpendicularmente, na direção da velocidade. Podemos discuti-las a partir de um caso simples: Supondo a força peso ( $mg$ ) constante, e  $h$  a altura do nosso monte, o quão longe a bala vai é dado por  $v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}$ . Como se vê, este alcance é diretamente proporcional à velocidade inicial  $v_0$  e inversamente proporcional a  $\sqrt{g}$ . Escreve Newton que quanto menor for o peso em proporção à massa (isto quer dizer  $\frac{P}{m} = \frac{mg}{m} = g$ ), ou maior a velocidade com que foi lançado, tanto menos se desviará

da sua trajetória retilínea e mais longe irá, e continua: *"aumentando a velocidade, podemos a nosso gosto aumentar a distância a que vai cair e diminuir o desvio da trajetória retilínea (...)"* (NEWTON, 2010). Por fim, quando a velocidade inicial chega a um valor preciso, a bala cai seguindo um desvio paralelo ao da superfície terrestre e não consegue mais aterrisar. É quando dizemos que entra em órbita em torno da Terra e se torna, assim, um satélite. Esse é o momento em que Newton revela que a Lua cai, mas cai no sentido de que se desvia sempre da linha reta que percorreria se não atuasse sobre ela a força da gravidade:

*"E da mesma maneira que um projétil, pela força da gravidade, pode mover-se em órbita e dar volta à Terra, da mesma maneira a Lua, pela força da gravidade, (...) pode perpetuamente mover-se em torno desta, fora da trajetória retilínea que, pela sua força inata (isto é, pela sua inércia), deveria seguir"* (NEWTON, 2010).

A explicação há pouco dada sobre a bala de chumbo teve a ilustração abaixo feita por Newton.

Mas é claro, Newton não dá como único exemplo de força centrípeta a gravidade, ela só é a mais importante, e cita também o caso de uma pedra amarrada por um cordel através do qual uma mão lhe puxa de modo a dar voltas: *"À força (...) pela qual o cordel continuamente atrai a pedra para a mão e a mantém na sua órbita, porque é dirigida para a mão como o centro da sua órbita, chamo força centrípeta. E o mesmo se deve entender de todos os corpos em movimento em qualquer órbita"* (NEWTON, 2010).



**Figura 4:** Ilustração de Newton para o Lançamento de um Projétil

Newton conclui os comentários da presente definição citando três pontos de vistas, através dos quais, diz ele, se pode considerar a quantidade de qualquer força centrípeta. Trata-se das três definições finais.

*A quantidade absoluta de uma força centrípeta é a medida da mesma, proporcional à eficácia da causa que a propaga, a partir do centro, pelo espaço em volta.*

#### DEFINIÇÃO VII

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

#### DEFINIÇÃO VIII

*A quantidade motora de uma força centrípeta é a medida da mesma, proporcional à quantidade de movimento que gera num dado tempo.*

Embora a definição VI fale em quantidade, não é compreensível como se determina tal quantidade. Retomemos a definição II por exemplo, a quantidade de movimento é a medida da mesma, obtida do produto da velocidade pela massa, coloquemos isso ao lado do que dizem as VII e VIII. O que observamos? Em II, VII e VIII é bastante compreensível como se determina cada grandeza definida como medida, respectivamente temos  $\vec{p} = m\vec{v}$ ;  $a \propto \Delta v$ ;  $F \propto \Delta p$ , onde pelo comentário à definição VIII: "*a quantidade de movimento obtém-se da velocidade multiplicada pela quantidade de matéria, e a força motora da quantidade aceleradora multiplicada pela mesma quantidade de matéria*" (NEWTON, 2010), e outros comentários, sabemos com exatidão que as quantidades referidas em VII e VIII são respectivamente:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}; \vec{F} = m\vec{a} = \frac{d\vec{p}}{dt}.$$

No entanto, que grandeza é a eficácia da causa referida na definição VI para que se entenda a relação de proporcionalidade entre ela e a quantidade absoluta de uma força centrípeta? No comentário de duas linhas a esta definição Newton tenta explicar: "*Assim, a força magnética é maior num imã e menor noutra, consoante o seu tamanho e magnetização*" (NEWTON, 2010). Com este exemplo, não está claro como determinar esta eficácia e conseqüentemente, determinar a quantidade absoluta de uma força centrípeta. Porém, se considerarmos que a força centrípeta é a gravidade, poderemos entender senão esta quantidade referida na definição VI como a massa gravitacional através do seguinte comentário dado por Newton:

*"Relaciono a quantidade absoluta com o centro, dotado de alguma causa sem a qual as forças não se propagariam pelos espaços ao redor, quer essa causa seja um corpo central (como o ímã no centro da força magnética ou a Terra no centro da força gravitacional), quer seja alguma coisa que ainda não se evidenciou"* (NEWTON, 2010).

A grandeza que faz com que a Terra crie um campo gravitacional ao seu redor, noção sugerida pela definição VI logo no final, é a massa gravitacional da Terra, assim como a carga elétrica é a grandeza que cria o campo eletrostático à sua volta.

Finalmente, a quantidade aceleradora de uma força centrípeta, no caso da gravidade é, como Newton diz, a gravidade aceleradora e se determina por

$$g = G \frac{M}{r^2}.$$

Newton comenta que tal quantidade é maior nos vales do que no cimo das altas montanhas, e tanto menor quanto maior a distância do corpo à Terra.

A quantidade motora de uma força centrípeta, no caso da gravidade é, como Newton diz, o peso e se determina por:

$$F = \frac{GMm}{r^2} = mg.$$

Newton comenta que tal quantidade é maior em um corpo maior e menor em um corpo menor, maior perto da Terra e menor a grandes distâncias. Apresentadas as definições, observa-se que:

As definições que obedecem precisamente ao ultimo dos pontos sobre o ato de definir são as definições: I, II, VII e VIII, note que todas começam pelo termo quantidade; as demais são definições qualitativas. Quanto à definição VI que contém o termo quantidade, vimos que está mais para alguma noção puramente qualitativa, visto que Newton não nos dá nada de concreto quando diz que a quantidade definida é *"proporcional à eficácia da causa."*

As definições de número VI, VII e VIII são de certa forma, subdefinições da definição V (definição de **força centrípeta**), a definição V por sua vez é uma subdefinição da definição IV (definição de **força impressa**), pois é a força centrípeta nada mais que um tipo de força impressa apontada para o centro de uma curva descrita por uma partícula.

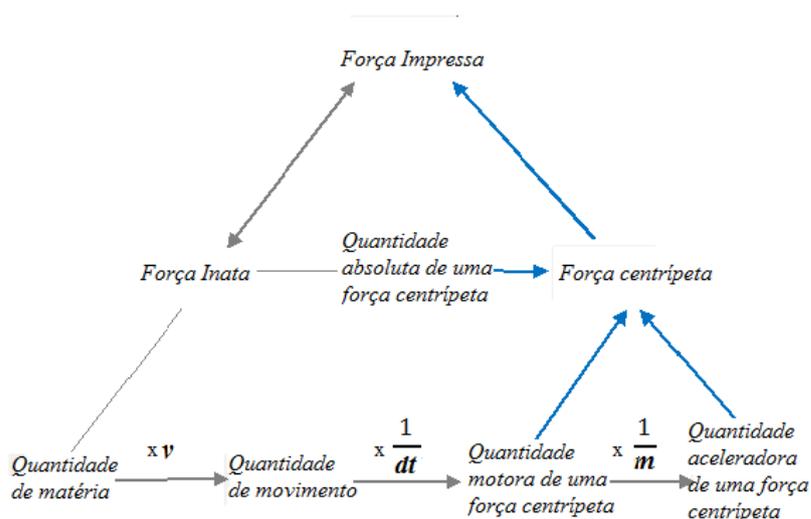
A definição VIII corresponde à definição quantitativa de força impressa, ilustrada no contexto da gravidade.

As definições III, IV e V são definições que se iniciam com o termo força, no entanto o significado desse termo na definição III se opõe ao das outras, ele tem a ver com a inércia da

massa<sup>3</sup>.

As definições I, III e VI estão a evocar o conceito de massa nos seus variados aspectos: como **quantidade de matéria**, por ser proporcional ao volume, como **força inata da matéria** por ser proporcional a inércia e como **quantidade absoluta de uma força centrípeta**, por ser proporcional à "carga" gravitacional.

A forma como acima discriminamos os conceitos definidos seguem a estrutura do mapa triangular abaixo. As definições quantitativas compõem a base do triângulo, no sentido de que são estas definições o alicerce da construção de uma teoria científica, já que são formas matemáticas pelas quais se poderão expressar as leis. O conceito da definição IV ocupa o topo, dada sua importância. A seta com dupla indicação é opositora de conceitos, ela se posiciona entre as definições dos conceitos de força impressa e de força inata, como já frisado. As setas azuis, com indicações únicas, esquematizam quais os conceitos que entram como espécie de subdefinições de outros. Assim, por exemplo, a seta que se origina em IV e termina em V diz que a definição do conceito de força centrípeta é uma espécie de subdefinição do conceito de força impressa. Os quadros dos conceitos das definições I, III e VI, estão unidos por linhas porque todos resumem o conceito uno de massa. Cada seta que se acha entre os conceitos da base leva à definição do conceito à sua direita mediante operação matemática que a sublinha realizada sobre o conceito à sua esquerda. Assim, a quantidade de movimento se obtém da multiplicação da quantidade de matéria pela velocidade.



**Figura 5:** Diagrama das Definições

<sup>3</sup>Newton distingue as noções de massa inercial e massa gravitacional de um corpo, experimentalmente observa que ambas as massas apesar de qualitativamente distintas são quantitativamente idênticas e diretamente proporcionais ao volume do corpo.

### 3.3 As noções de Espaço e Tempo Absolutos

---

Após a apresentação das definições, Newton discorre no seu primeiro escólio, sobre a natureza absoluta do espaço e do tempo, e faz a distinção com o espaço e tempo relativos. O espaço absoluto, *"de sua própria natureza, permanece sempre semelhante e imóvel sem relação com qualquer coisa de externo"* (NEWTON, 2010). O tempo absoluto, *"por sua própria natureza flui uniforme e homoganeamente, sem relação a qualquer coisa de externo"* (NEWTON, 2010). O significado de relativo atribuído por Newton a estas grandezas não têm nada a ver com aquele que Einstein lhes dá em sua teoria da relatividade restrita. Para Newton espaço e tempo relativos são apenas as medidas sensíveis (corretas ou incorretas) do espaço e tempo absolutos. Newton põe as quantidades absolutas como *"verdadeiras e matemáticas"*, portanto, inapreensíveis aos nossos sentidos; e as relativas como *"aparentes e comuns"*, portanto, sensíveis; chega também a colocar as quantidades relativas em *"assuntos de menor importância"*, e observa que em *"assuntos filosóficos é preciso abstrair dos sentidos e considerar as coisas em si mesmas, distintas daquilo que apenas são as suas medidas sensíveis"* (NEWTON, 2010).

Mach, o reformulador dos princípios da mecânica adota a seguinte posição nesse quesito: *"Em relação às concepções monstruosas de espaço absoluto e tempo absoluto não posso retratar-me em nada. Newton de fato falou muito sobre estas coisas, mas por toda a parte não fez aplicações sérias delas"*, e se tais quantidades absolutas, não correspondem às suas medidas *"não têm valor prático ou científico"* (FITAS, 1998).

### 3.4 As Regras para o Estudo da Filosofia Natural

---

*"Métodos contêm sempre uma metafísica; inconscientemente, eles revelam conclusões que, frequentemente, afirmam ainda não conhecer."*

Albert Camus

Como Newton chega aos axiomas ou leis do movimento? Como já discutimos, os axiomas não podem ser obtidos de um processo dedutivo, pois se tratam das proposições primeiras de um discurso científico, só sendo obtidas da observação dos fenômenos e tornadas gerais pelo processo indutivo. No fim do livro III, no Escólio Geral, Newton relata que esse foi seu método: *"Na filosofia experimental, proposições particulares são deduzidas dos fenômenos e são tornadas gerais pela indução. Foi por este método que se descobriu a impenetrabilidade, a mobilidade e o ímpeto dos corpos, as leis de movimento e da gravitação"* (NEWTON, 2010).

Mas a indução não é o único método (do grego méta, 'em companhia', e hodós, 'caminho'), "*caminho seguido*" por Newton para a descoberta das leis da natureza e de certas propriedades de seus corpos. Newton apresenta quatro Regras para o estudo da filosofia natural no início de seu terceiro livro intitulado *O sistema do mundo*. São elas os princípios norteadores da investigação à natureza.

O argumento da indução está presente na Regra III e recebe uma observação na regra IV. Estas Regras "*pressupõem e se relacionam com questões de ordem metafísica sobre a natureza e sobre a estrutura do universo*" (REALE; ANTISERI, 1990), pois dizem respeito à essência de nosso mundo. Tomemos a indução como exemplo, por seu argumento, as conclusões derivadas da observação, incidem sobre o que ainda não se observou ou nunca se observará. Fazemos isto, simplesmente porque pressupomos padrões na natureza que tanto podem quanto não podem existir. Isto é, conjecturamos sobre a sua essência.

O padrão de que a indução pressupõe, é o '*princípio da uniformidade da natureza*' (regra II) que dita, por exemplo, que as leis válidas em algum lugar do Universo, são válidas para todo o Universo, pois uma vez que a natureza é uniforme, cada parte dela deve apresentar a mesma estrutura física e por isso seguir as mesmas leis da física. Tal é como se dá com a lei da Gravitação. Feynman, em suas lições de física relata que esta lei é uma das generalizações de mais longo alcance da mente humana, e que enquanto admiramos o gênio que a concebeu, "*devemos reservar algum tempo para nos assombrarmos com uma natureza que foi capaz de seguir com tamanha abrangência e generalidade um princípio tão elegantemente simples como a lei da gravitação*" (FEYNMAN, 2008). Princípio elegantemente simples, diz Feynman. Temos, portanto, uma natureza simples (regra II) além de uniforme.

A simplicidade e uniformidade da natureza constituem as duas primeiras regras para o estudo da filosofia natural, admitidas por todos ou quase todos os representantes da ciência da natureza ao longo da história desde Aristóteles. As regras estão estreitamente relacionadas umas com as outras. Detalhemos agora, cada uma delas.

#### REGRA I

*Não se devem admitir para as coisas da Natureza mais causas do que aquelas que simultaneamente são verdadeiras e suficientes para explicar os seus fenômenos.*

Esta primeira regra é um princípio de parcimônia, *lex parsimoniae*, no uso das hipóteses. Ela requer que seja mínima a quantidade de hipóteses utilizadas para explicar um determinado fenômeno. Podemos voltar a confrontar, a título de ilustração para esta regra, os dois principais modelos do Universo: o Geocentrismo, segundo a visão de Claudio Ptolomeu

(c.100 - c.178) e o Heliocentrismo, segundo Copérnico (1473-1543). O modelo de Ptolomeu, que fixa a Terra no centro, permitia descrever e prever as posições dos planetas com considerável precisão para a época. O modelo de Copérnico, que fixa o Sol no centro, de igual modo justificava e predizia fenômenos celestes com certa exatidão. Ambos os modelos funcionavam e concordavam, cada qual a seu modo, com as observações astronômicas sobre estrelas e planetas.

Nesse caso, não se pode apontar a visão que seja a certa e a que seja a errada. Então porque se colocou a visão heliocêntrica do Universo sobre a Geocêntrica? A vantagem do sistema copernicano é que ele leva um número menor de hipóteses para explicar os fatos do céu, tornando-se muito mais simples. Já o sistema Ptolomaico apresenta uma grande quantidade de hipóteses *ad hoc*<sup>4</sup> que foram construídas ao longo do tempo unicamente para acomodar o modelo aos fenômenos quando se observava alguma anomalia, tornando-se ao fim, um modelo complicado repleto de emendas.

Segundo uma corrente de pensamento denominada *realismo dependente do modelo* (HAWKING; MLODINOW, 2011) não há como dizer qual dos dois sistemas corresponde à realidade. Os dois são capazes de descrevê-la, não importando com que grau de praticidade. Mas se levarmos em conta a presente regra, diremos que o Heliocentrismo corresponde à verdadeira imagem do Universo, pois a Natureza é simples, e como tal, deve ser descrita por um princípio igualmente simples.

Newton baseará as suas três leis do movimento em referenciais, que hoje designamos como inerciais. O referencial inercial é o referencial das estrelas fixas, como o Sol. É do ponto de vista desse referencial que se coloca o Sol em repouso no centro do qual os planetas giram em torno. A escolha desses referenciais, não é só porque as equações de movimento são muito mais simples neles, mas também porque nos fornecem a imagem fidedigna de uma natureza simples.

Newton comenta: *"Como dizem os filósofos: A Natureza não faz nada em vão, ao passo que, com muitas coisas, faz-se em vão o que se pode fazer com poucas. Com efeito, a Natureza ama a simplicidade e não superabunda em causas supérfluas."* (REALE; ANTISERI, 1990). Dessa regra, decorre imediatamente a segunda:

## REGRA II

*Por isso, as causas atribuídas a efeitos naturais da mesma espécie devem ser, tanto quanto possível, as mesmas.* Para economizar princípios explicativos, Newton dá exemplos de

---

<sup>4</sup>expressão latina cuja tradução literal é "*para isto*" ou "*para esta finalidade*", trata-se de uma hipótese criada para justificar uma dada situação, especialmente se põe em risco uma teoria.

causas comuns que devem ter fenômenos semelhantes, são elas *"as causas da respiração nos homens e nos bichos, ou da queda das pedras na Europa e na América, ou da luz do fogo da cozinha e da luz do Sol, ou a reflexão da luz na nossa Terra e nos planetas"* (NEWTON, 2010).

Em todos esses exemplos é fácil perceber a ideia de uniformidade da natureza. Ela não apresenta variações significativas em sua estrutura, ou em sua essência, de modo que a descrição de uma parte serve também de descrição das outras partes semelhantes. É como pegar uma amostra fiel que nos dá a ideia do todo. Por exemplo, uma parte descrita poderia ser o tipo de reação sofrida por camundongos em relação a um dado medicamento que visa curar um câncer em um órgão *x*, presente no camundongo e no homem. Isto levaria à descrição da outra parte: como reagiria um ser humano àquele medicamento. Porém, isso só é possível porque estas partes constituem objetos de estudo semelhantes: *o órgão x*, que pela regra acima, se comporta de forma similar em cada um dos seres vivos citados.

Assim também, a descrição de uma parte como a queda dos objetos próximos à superfície da Terra, serve também de descrição para outra: a queda perpétua da Lua em torno da Terra. Pois as partes consideradas constituem objetos de estudo semelhantes: corpos que de algum modo são atraídos para a Terra, que por sua vez, como dita a segunda regra, exigem a mesma explicação.

Na proposição IV (Teorema IV) do mesmo livro, Newton observa com a ajuda de dados como distâncias e períodos extraídos dos trabalhos dos grandes astrônomos que *"a força pela qual a Lua é mantida na sua órbita torna-se, à superfície da Terra, igual à força da gravidade aqui na Terra (...)"* e conclui não poder se tratar de forças diferentes que em dado ponto assumem um mesmo valor como que por pura coincidência, mas se tratar de uma só força/causa<sup>5</sup>: *"e assim (pela Regra 1 e 2) a força pela qual a Lua é mantida na sua órbita é a mesma força que comumente designamos de gravidade que puxa os objetos à superfície da Terra"* (NEWTON, 2010); e Newton vai mais além na proposição seguinte

*"as revoluções dos satélites de Júpiter em torno de Júpiter, dos satélites de Saturno em torno de Saturno, de Mercúrio, Vênus e os outros planetas em torno do Sol, são fenômenos da mesma natureza que a revolução da Lua em torno da Terra, e, portanto, (pela Regra 2) dependem de causas do mesmo tipo, especialmente visto termos mostrado que as forças de que estes fenômenos dependem estão dirigidas para os centros de Júpiter, de Saturno e do Sol, e diminuem segundo a mesma razão"*

---

<sup>5</sup>Do mesmo modo, quando se descobriu das equações de Maxwell o valor da velocidade das ondas eletromagnéticas, não se pensou que por coincidência, estas ondas apresentassem a mesma velocidade que a da luz, concluiu-se portanto, que deveríamos estar diante de uma mesma causa, um só ente, e compreendeu-se daí que a luz é uma onda eletromagnética.

*e lei (ao afastarem-se de Júpiter, de Saturno e do Sol) que a força da gravidade (ao afastar-se da Terra)" (NEWTON, 2010).*

Todas as partes descritas por Newton, formam um todo: a gravitação universal, assunto explorado pelo físico neste terceiro livro dos *Principia*, onde explicará uma diversidade de fenômenos gravitacionais, incluindo as marés.

Esta extensão, poder de alcance que Newton vê na gravidade, leva à terceira regra.

### REGRA III

*Aquelas qualidades dos corpos que não podem ser aumentadas nem diminuídas e que se verificam em todos os corpos sujeitos à experiência devem ser consideradas como qualidades de todos os corpos universalmente.*

Esta regra é o argumento da indução. Newton comenta que as qualidades dos corpos só podem ser conhecidas através de experiências, e afirma que as qualidades verificadas por estas experiências têm de ser tomadas como qualidades universais. Adiante, Newton cita exemplos de algumas qualidades dos corpos. A primeira qualidade citada é a extensão: "*Não conhecemos a extensão dos corpos senão pelos nossos sentidos, e existem certamente corpos para além do alcance dos nossos sentidos*" e logo aplica o argumento indutivo: "*mas, como se encontra extensão em todos os corpos sensíveis, atribuímo-la universalmente a todos os corpos*" (NEWTON, 2010). As outras qualidades que Newton submete exatamente ao mesmo argumento são: a dureza, a impenetrabilidade, a mobilidade, a inércia.

Newton vai colocar a gravidade ao lado de tais qualidades, que são características intrínsecas aos corpos, e por isso dependem somente deles mesmos, mas observa não estar de maneira nenhuma a afirmar que a gravidade é essencial aos corpos, que ela depende também da distância que os separa, o que não o impede em nada, de fazer como fez às demais qualidades que cita: usar a presente regra para discorrer sobre a sua universalidade:

*"Finalmente, se for estabelecido pela experiência e pelas observações astronômicas, que todos os corpos sobre a Terra ou perto da Terra gravitam para a Terra, (...) e que a Lua gravita para a Terra (...), e que por sua vez o nosso mar gravita para a Lua, e que todos os planetas gravitam uns para os outros, e que existe uma semelhante gravidade dos cometas para o Sol, dever-se-ia concluir por esta terceira regra que todos os corpos gravitam uns para os outros" (NEWTON, 2010).*

Newton foi bastante feliz na concepção da universalidade da força gravitacional, de que tudo atrai todo o resto. Para além de nosso sistema solar, em nossa exploração do cosmos, vemos a ação dessa força entre as estrelas de sistemas binários, entre as estrelas de um aglomerado estelar e entre as galáxias de um aglomerado delas. Até onde se sabe, a gravidade parece estender-se para sempre na mesma forma da lei simples que a expressa. A Natureza "*costuma ser simples e sempre conforme a si própria*" diz Newton.

É ainda pela presente regra, que podemos afirmar que a gravidade, que vemos atuar entre os objetos celestes, cujas grandes dimensões permitem que melhor se evidenciem seus efeitos, também deve atuar entre os nossos próprios objetos. Mas isto claramente não observamos porque a gravidade é a mais fraca das quatro forças básicas da natureza, e entre os objetos que nos cercam a atração é praticamente desprezível. Porém, através de seu experimento bastante sutil, Henry Cavendish, em 1797 (exatamente 110 anos após a primeira publicação dos *Principia*) conseguiu captar esta atração e determinar o valor que faltava na Lei desde que foi enunciada por Newton, que é o valor da constante gravitacional  $G : 6,670 \times 10^{-11} N.m^2/Kg^2$ . O experimento de Cavendish ficou conhecido como "*pesagem da Terra*", pois com o valor de  $G$ , foi possível calcular a massa de nosso planeta.

Esta terceira regra, tem como observação a seguinte:

#### REGRA IV

*Em filosofia experimental, as proposições extraídas dos fenômenos por indução devem ser consideradas exatamente ou muito aproximadamente verdadeiras não obstante quaisquer hipóteses em contrário, até que outros fenômenos tornem estas proposições ou mais exatas ou passíveis de exceções.*

Newton chega a confiar muito na indução, para Newton, como bem podemos ler, as proposições deduzidas dos fenômenos e tornadas gerais por indução são consideradas verdades, ou algo muito próximo delas, e mais: novos casos apurados, quando não tornam a proposição apenas passível de exceção, torna-a mais exata. Na visão da ciência de Karl Popper, do início do século XX, uma proposição formulada pelo argumento da indução não têm a característica de ser verdadeira, mas de ser refutável, isto quer dizer, que pode ser só uma questão de tempo para prová-la como falsa.

### 3.4.1 Uma Regra a mais

Uma regra a mais poderia se juntar com as acima citadas por Newton, é aquela que afirma "*Natura non facit saltus*" (a natureza não dá saltos). Seu princípio é da mesma espécie do que diz: "*a natureza é simples e uniforme*". Ambos os princípios discursam sobre a natureza fundamental da realidade, e portanto implicam questões de ordem metafísica. Embora Newton não tenha colocado este princípio a mais ao lado de suas Regras, com certeza o adota. Aliás, a ideia de continuidade das grandezas físicas constitui um das ideias mais arraigadas da física clássica ao lado da ideia de determinismo.

Como prova de que semelhantes Regras ou princípios, como já dizemos, pressupõem padrões na natureza que tanto podem quanto não podem existir, está o confronto da ideia de continuidade com a própria experiência, de onde se deu o surgimento da mecânica quântica. A referida experiência versava sobre a intensidade da radiação emitida por um corpo aquecido, e a predição da física clássica concordava com seus resultados até certo ponto, depois do qual se obtinha absurdos. Max Planck (1858-1947), tentou por longo tempo, conciliar o princípio clássico de que a natureza não dá saltos, com os resultados experimentais, mas em vão. Foi quando "*num ato de desespero*", introduziu em algum lugar a descontinuidade, obtendo com isso uma Lei que concordava inteiramente com a experiência. Esta descontinuidade recaiu, a princípio, sobre o conceito de energia. Mas logo, com a difusão da teoria quântica, outras grandezas físicas seriam quantizadas. A natureza, revelara afinal, seus discretos saltos.

### 3.4.2 Quanto a *não Invento Hipóteses*

As regras para o estudo da filosofia natural coexistem com e se opõem a uma famosa expressão de Newton: "*hypotheses non fingo*", que quer dizer "*não invento hipóteses*". Newton faz esta afirmação no escólio geral, que na verdade, antecede as primeiras palavras citadas de Newton neste capítulo, sobre como descobriu as leis do movimento. Porém, o que Newton tomava por "*hipóteses*" quando dizia que não inventava hipóteses? Ele explica: "*(...) aquilo que não se deduzir dos fenômenos deve ser chamado uma hipótese; e hipóteses, metafísicas ou físicas, ou baseadas em qualidades ocultas, ou mecânicas, não têm lugar na filosofia experimental*" (NEWTON, 2010).

Lembrando que as quatro regras que Newton listou são conjecturas que ultrapassam a experiência, como é o caso da indução, elas claramente não condizem com sua sentença: "*não invento hipóteses*". Somos por isso levados a entender que ele considera as quatro regras como únicas hipóteses, no sentido que dá ao termo, admissíveis na sua teoria. De fato, na primeira

edição dos Principia, as quatro regras são referidas como "*hipóteses*".

Mas não à toa Newton desfere a frase "*não invento hipóteses*". Há uma boa razão que o leva a afirmação tão contundente dentro da ciência que é sempre feita com hipóteses de algum tipo. Esta razão nos fornecerá um melhor entendimento do significado desta sentença metodológica, emitida em meio às últimas reflexões do último escólio da obra. Pouco antes disso, Newton explicava uma vasta gama de fenômenos gravitacionais, mas agora revela não conhecer a fundo a gravidade, o mecanismo pelo qual os corpos comunicam à distância as acelerações que adquirem. Prudente, prefere não se arriscar em conjecturas, em hipóteses, como fizeram alguns de seus importantes contemporâneos e muitos dos que vieram depois dele.

René Descartes (1596-1650) o filósofo francês criador da geometria analítica, em seu livro *Princípios de Filosofia* (1644); traz a sua teoria dos vórtices etéreos a fim de explicar a causa da gravitação. Para Descartes, os planetas tinham suas órbitas porque eram carregados por um rodamoinho em cujo centro estava o Sol. Algumas das hipóteses de Descartes que sustentavam sua teoria eram (DESCARTES):

*"Os céus são líquidos"*

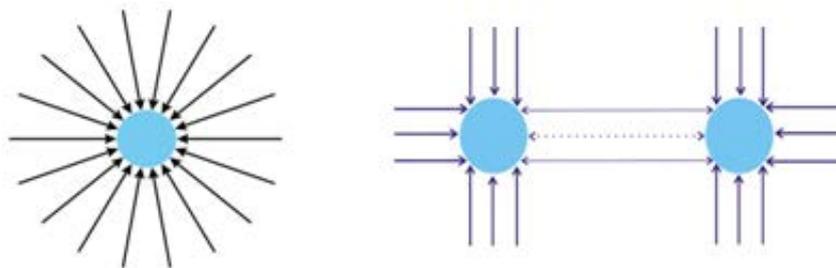
*"Os planetas são transportados à volta do Sol pelo céu que os contém"*

*"Os céus estão divididos em vários turbilhões"*

Logo no começo do escólio geral, Newton expõe argumentos que derrubam a hipótese dos vórtices. Embora Newton não chegasse a tomar conhecimento, há uma outra interessante visão mecanicista da gravitação, esta da autoria de Georges Louis Lesage (1724-1803), apresentada num ensaio intitulado *Sobre a origem das forças mortas* (1749).

Em sua teoria, Lesage supôs que um número infinito de "*partículas ultramundanas*" muitíssimo pequenas e rápidas cruzavam o espaço em todas as direções em movimentos retilíneos. Um corpo isolado, manteria o repouso como dita o princípio da inércia, porque seria igualmente pressionado por todos os lados pelas supostas partículas. (Figura 6 à esquerda). Assim que um segundo corpo fosse posto à sua vizinhança o que aconteceria? Haveria um bloqueio à ação das partículas em uma dada direção, permitindo às partículas na direção oposta empurrar o primeiro corpo de encontro ao segundo. É notável que existe aí uma reciprocidade de efeitos (figura 6 à direita). Desta forma, ambos os corpos gravitariam um para o outro, de acordo com a lei de Newton.

No entanto, assim como a teoria de Descartes, a de Lesage falhou perante os muitos desacordos com a lei da gravitação em situações mais elaboradas. Tentativas de mantê-las só a tornaram mais complicadas e repletas de emendas como um modelo Geocêntrico do Universo.



**Figura 6:** *Interpretação de Lesage para a Gravitação*

*"O traço comum dessas teorias, quase sem exceção, foi a introdução de hipóteses ad hoc sobre a estrutura da matéria e do éter (...). Essas teorias, ademais, além de terem sido explicações do ignotum per ignotius (desconhecido pelo mais desconhecido) e de terem violado o princípio da simplicidade, propuseram muitas concepções que desafiavam desde o começo qualquer verificação experimental, pois eram desprovidas de correlações epistemológicas" (JAMMER, 2011).*

É, pois, como uma resposta às teorias mecanicistas da gravitação de Descartes ou de outros contemporâneos seus, que lemos estas palavras de Newton:

*"até aqui expliquei os fenômenos do céu e do nosso mar pela força da gravidade, mas não indiquei uma causa para a gravidade (...) até aqui não fui capaz de deduzir dos fenômenos a razão para estas propriedades da gravidade e não invento hipóteses." E Newton afinal, se contenta: "basta que a gravidade exista realmente, atue segundo as leis que expusemos e seja suficiente para explicar todos os movimentos dos corpos celestes e do nosso mar" (NEWTON, 2010).*

Apesar de afirmar contundentemente não inventar hipóteses, é no mesmo escólio que Newton lança a hipótese descartada por Laplace (1749-1827) para explicar a ordem presente no sistema solar. Segundo Newton *"este mui belo sistema de Sol, planetas e cometas só poderia provir do desígnio e domínio de um Ser inteligente e poderoso (...) este ser governa todas as coisas (...) e por causa deste domínio tem de ser chamado Senhor Deus"* (NEWTON, 2010). Por outro lado, Napoleão teria perguntado a Laplace como Deus se encaixava em seu esquema do sistema solar. Laplace respondeu: *"Senhor, não precisei dessa hipótese."*

Embora apresentadas posteriormente às leis, as regras que discutimos constituem o método pelo qual Newton chega às suas leis ou axiomas do movimento.

## 3.5 Os Axiomas ou Leis do Movimento

As leis abordadas a seguir, só são válidas em relação a uma certa classe de sistema de referência, embora no enunciado das leis não seja feita qualquer alusão a estes sistemas de referência nem às suas características. Isto porque o autor dos *Principia*, antes de enunciar os axiomas, já tinha postulado a existência de um espaço e tempo absolutos: o referencial em relação ao qual as suas leis seriam aplicáveis, e que entendemos por referencial inercial.

Concretamente, tais referenciais são as estrelas fixas, referenciais inerciais 'supremos' em relação aos quais os demais são estabelecidos. Em média, uma distância entre uma estrela e sua vizinha mais próxima é  $\sim 10^{18}cm$ , o que faz com que a força de atração gravitacional entre elas seja muito fraca, aproximando-se da situação de um corpo livre da ação de forças sobre o qual se concebe a primeira lei e com ela o referencial inercial.

### LEI I

*Todo corpo mantém o seu estado de repouso ou de movimento uniforme segundo uma linha reta, se não for compelido a mudar o seu estado por forças nele impressas.*

Esta lei, como podemos bem entender, fala do comportamento dos corpos quando não há forças atuando sobre eles. Diante disso, questionamos se o relato de Newton sobre a sua formulação corresponde perfeitamente com a metodologia que diz ter adotado, a de que tais leis foram inferidas dos fenômenos e generalizadas por indução. Isso porque na natureza é impossível se ter um corpo fora da atuação de suas quatro forças básicas, daí não pode ser a lei da inércia diretamente inferida da experiência, dos fenômenos, mas em se imaginar uma experiência idealizada, isto é, pensada como um caso limite a partir de experiências reais nas quais se minimiza as interações deste corpo com o seu meio<sup>6</sup>. Uma experiência cujo objeto de observação fosse um corpo que não interage com nenhum outro na natureza, é totalmente impraticável, até mesmo porque a observação de um corpo requer a presença de um observador (um segundo corpo). Como cada corpo do Universo atrai outro, por meio da força gravitacional, um corpo observado jamais poderia estar isento de forças sobre ele impressas.

Consequentemente, ao contrário do que Newton relata, a lei da inércia não seria uma generalização dos movimentos observados de certos corpos em específico. Newton não poderia estar enunciando um fato empírico, que ocorre na natureza, mas na verdade, imaginando o que

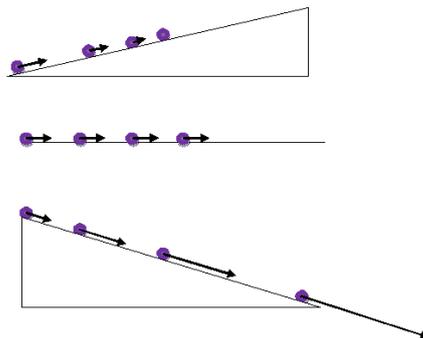
<sup>6</sup>assim são os experimentos em que se reduz as forças de atrito fazendo-se discos de base bem polida deslizarem sobre uma camada de ar.

ocorreria em uma situação ideal. Estaria então inventando hipóteses ao extrapolar o âmbito da observação e do experimento, escapando do campo da "filosofia experimental"?

Nossa experiência diária diz que a tendência de um corpo é o repouso quando todas as forças deixam de agir sobre ele. Voltamos aqui a citar aquele ditado *cessante causa cessat effectus* que está de acordo com o pensamento de Aristóteles, o de que um corpo só se mantém em movimento enquanto há forças agindo, cessada as forças, cessa também o movimento e o corpo entra em repouso. Galileu, antes de Newton, já vislumbrava o princípio da inércia, e podia concluir que a tendência de um corpo quando todas as forças deixam de agir sobre ele, é continuar indefinidamente em movimento.

Galileu discute o princípio em questão por meio de uma experiência imaginária onde um argumento matemático é muito importante. Vejamos como procede. Abaixo temos três planos. No primeiro deles, a bola impulsionada sobe e sua velocidade vai reduzindo até o valor zero na altura máxima. No terceiro, temos o caso oposto, a bola impulsionada desce e aumenta sua velocidade até onde pode. No primeiro caso, a aceleração é negativa. No segundo, positiva. Em meio a esses dois casos, temos uma situação intermediária: um plano que não é inclinado. Para entender como a bola lançada segue sobre ele, usamos um raciocínio matemático: se diminuirmos a elevação no primeiro plano até quase coincidir com o do meio, e dermos o mesmo impulso na bola, sua velocidade se reduzirá a uma taxa menor no tempo. Se fizermos o mesmo com o terceiro plano, tornando menos íngreme sua descida, ao mesmo impulso, a velocidade da bola aumenta a uma taxa menor no tempo. No limite, os dois planos inclinados coincidem com o plano não inclinado, e como as acelerações de suas bolas se tornavam menores, aqui elas devem chegar à zero. Destarte, o que se espera para a bola impulsionada sobre o plano uniforme após receber o impulso, é que siga sobre ele retamente, mantendo de maneira constante a velocidade que adquiriu pelo impulso recebido. Não há razões para que ela diminua a velocidade até parar, ou a aumente, uma vez que não há subidas nem descidas, casos únicos em que a força normal não "anula" a força da gravidade.

Então porque a experiência diária nos mostra que sobre um plano como o do meio, a bola vai retardando até parar? O raciocínio nesta experiência imaginária é bom demais para que este fato nos negue a sua conclusão. Nesse caso, é preciso "ver de perto" o que está acontecendo, o plano da experiência real pode ser levemente inclinado para cima ou ter pequenas protuberâncias com os quais a bola entra em colisão, também é preciso olhar para a bola, se ela não tem buraquinhos que se encaixariam nessas protuberâncias, em suma, nem todas as forças no entorno deixam de agir sobre a bola, ainda as há, e se opõem ao seu movimento, sendo chamadas de atrito. Estas são as razões pelas quais justificamos os resultados da experiência real, isso implica dizer que o plano da experiência aqui imaginada, deve ser



**Figura 7:** Experimento Imaginário para a Lei da Inércia

perfeitamente uniforme e liso e a bola perfeitamente esférica, corpos ideais de um mundo ideal. Superfícies assim, sem forças de atrito, não existem na natureza. De fato

*"é impossível produzir uma superfície plana que seja "verdadeiramente" plana, ou uma superfície esférica que seja "realmente" esférica (...) a perfeição não pertence a este mundo. Certamente, pode-se aproximar dela, mas não se pode atingi-la (...) É aí que a imaginação entra em cena (...) Ela não se embaraça nas limitações que nos são impostas pelo real. Ela "realiza" o ideal e até o impossível. Opera com objetos perfeitos, e são tais objetos que a experiência imaginária põe em jogo. Assim, ela permite que esferas perfeitas rolem sobre planos perfeitamente lisos(...)"(KOYRÉ, 2011).*

E na verdade, muitas vezes *"são experiências imaginárias que estão subentendidas nas leis fundamentais dos grandes sistemas de filosofia natural, como os de Descartes, de Newton, de Einstein... e também de Galileu"* (KOYRÉ, 2011).

Contudo, o relato de Newton sobre como chegou a suas leis, e por conseguinte à lei da inércia, pode ser reconsiderado, se lermos sua primeira lei tendo em conta o princípio de superposição de forças, primeiro corolário dos *Principia*, sobre o qual nos deteremos dentro de nosso exame da segunda lei.

Como ficou entendido, não podemos realizar uma experiência com um corpo que se ache isolado de forças. Contudo, é possível realizar experiências com um corpo sujeito a uma resultante de forças igual a zero. O primeiro corolário, é na verdade um resultado experimental, e dele sabemos que uma força resultante nula produz o mesmo efeito da ausência real de forças. Quando o consideramos, o princípio da inércia se estabelece como um princípio inferido do mundo real, *"dos fenômenos"* como diz Newton. Ao realizarmos experiências em

que as forças que agem sobre um corpo têm resultante praticamente nula, observamos seu estado de repouso ou de movimento retilíneo e uniforme. Mas o princípio de superposição mostra que uma resultante nula produz o mesmo efeito da ausência real de forças, conseqüentemente os mesmos estados dinâmicos são válidos para um corpo livre da ação de todas as forças. O corpo de que fala o princípio da inércia.

A formulação do princípio da inércia pode ser pensada de duas maneiras. Na primeira, eliminamos tanto quanto possível as forças que podem intervir sobre o corpo, como acontece por exemplo quando o fazemos deslizar sobre superfícies cada vez mais polidas, onde somos daí, instigados a imaginar o que aconteceria em uma situação ideal, em que fosse possível eliminar em 100% as forças de atrito, ou quaisquer outras forças. Nesse caso, para chegarmos ao resultado, concebemos mentalmente uma experiência que envolveria superfícies perfeitamente lisas e uniformes, quer dizer, sem a interferência de forças que decorreriam ora da inclinação, ora das saliências da superfície. Nesta idealização, de um corpo livre de todas as forças, achamos, apoiados em um argumento matemático, o que dita o princípio da inércia.

Na segunda abordagem, o princípio da inércia não foi concebido a partir de um processo de eliminação das forças sob as quais um corpo está sujeito, pelo contrário, podemos até mesmo submeter o corpo a ação de muitas forças, contanto que a soma dessas forças seja zero. Incluímos agora o princípio empírico da superposição de forças, de onde sabemos que uma força resultante nula em qualquer direção equivale a ausência de forças naquela direção. Analisando por uma experiência no laboratório como se comportam corpos sob força resultante nula chegamos a conclusão sobre corpos livres da ação de forças tais como ditados pelo princípio da inércia.

Com o auxílio do princípio da superposição de forças, se pode considerar a lei da inércia como inferida dos fenômenos de acordo com o relato de Newton. Este princípio denota a força como uma grandeza vetorial e ele se sugere nos comentários de Newton após enunciar a sua segunda lei.

## LEI II

*A mudança na quantidade de movimento é proporcional à força motora impressa e faz-se na direção da linha reta segundo a qual a força motora é impressa.*

Esta é a lei de força de Newton, também conhecida como *lei fundamental da dinâmica*. O conceito de força nela usado é o da definição IV. Recordamos que a definição de *força impressa* é uma definição qualitativa, nela não foi dado um modo de determinar a

intensidade da força. Newton vai fazer isso na definição VIII, sob o nome de *quantidade motora de uma força centrípeta*, uma classe de força impressa a qual pertence a gravidade. Comparando o enunciado da última definição e da segunda lei vemos que não há muita diferença. Esta observação permite a alguns interpretarem a segunda lei do movimento como uma definição quantitativa de força impressa, o que é errado. Vimos que, enquanto que as definições constituem declarações convenientes, os axiomas são declarações factuais, i.e, baseada em fatos da natureza.

Onde se encontra um fato da natureza sendo descrito no enunciado da segunda lei? Para entendermos isto, é preciso ter em mente que a segunda lei de Newton só ganha significado como lei, se buscarmos na natureza a expressão de  $\vec{F}$  que deve ser substituída na fórmula matemática por ela sugerida, proporcional à mudança da quantidade de movimento, precisamente  $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ . Newton não forneceu uma expressão geral a ser substituída nesta lei, porque só conhecia a expressão para a força gravitacional, que aliás, lhe bastava, pois a gravidade era seu principal interesse, e podia então, mediante sua segunda lei, explicar e prever uma série de fenômenos celestes, como o faz no *Sistema do Mundo*.

Contudo "*se não existisse nada além da gravitação, então a combinação dessa lei (da gravitação) e a lei da força (a segunda lei do movimento) seria uma teoria completa*" (FEYNMAN, 2008). Mas há outras forças na natureza e a segunda lei deve ser usada como guia para achar a expressão destas outras forças. Uma vez achadas e colocadas na expressão puramente matemática  $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ , teríamos a descrição precisa de um fenômeno, como toda boa lei permite fazer.

Outra coisa importante sobre a segunda lei aparece logo nos comentários abaixo do enunciado:

*"se o corpo já se encontra em movimento, o novo movimento (sempre dirigido na mesma direção da força atuante) é adicionado ou subtraído ao primeiro, conforme sejam concordantes ou opostos um ao outro; ou juntos obliquamente se forem oblíquos, de modo a produzir um novo movimento composto pela determinação dos dois"* (NEWTON, 2010).

O caráter vetorial da quantidade de movimento já falado por Newton na definição II, é retomado aqui. Como as mudanças nestas quantidades vetoriais se dão por causa da ação de forças impressas, e elas ocorrem sempre na direção da reta sobre a qual a força é impressa, é possível disso, supor também o caráter vetorial das forças. As quantidades de movimento se somam vetorialmente, porque as forças que geram estas quantidades obedecem a mesma soma.

Newton apresentará esta conclusão em forma de corolário, sendo o seu primeiro, aparecendo logo após o enunciado da terceira lei.

O Corolário diz: *"Um corpo, atuado simultaneamente por duas forças, descreverá a diagonal do paralelogramo cujos lados seriam descritos pelo corpo, no mesmo tempo, se fosse atuado por essas forças em separado"*. Seu corolário descreve o teorema do paralelogramo de forças ou princípio da superposição das forças.

O segundo Corolário é consequente do primeiro: *"E assim se explica quer a composição (...) quer a decomposição de qualquer força (...)"* (NEWTON, 2010).

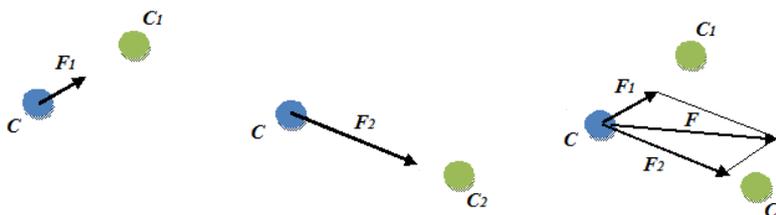
Em seu segundo escólio, que encerra a parte introdutória dos Principia, Newton mostra argumentos para dar suporte ao que afirmam suas leis e corolários. Ele inicia com as seguintes palavras: *"Até aqui, apresentei princípios recebidos pelos matemáticos e confirmados por numerosas experiências"*, seguindo com a leitura desse escólio entendemos que a derivação newtoniana da composição de força, teve como base mais profunda a composição cinemática das velocidades de Galileu: *"(...) pelos dois primeiros Corolários, Galileu descobriu que o movimento dos projéteis se fazia em trajetórias parabólicas (...) se o corpo é lançado numa direção qualquer, o movimento proveniente deste lançamento é composto com o movimento proveniente da gravidade"* (NEWTON, 2010), e a explicação continua, parecida a do Corolário 1.

Há no entanto reservas a se fazer quanto ao Corolário 1. Embora Newton o defenda como um princípio confirmado pela experiência por partir da composição das velocidades já demonstrada por Galileu, o princípio presume que a ação de uma força sobre um corpo independe da ação de outra força. Coisa que não é evidente. Como as forças têm diversas fontes materiais, devemos considerá-las, e não há considerações a esse respeito quando Newton faz sua apresentação do princípio. Não podemos garantir que ele seja de todo válido só porque as velocidades se superpõem, e disso, pelo seguinte processo de derivação de conceitos:  $\Delta \vec{v} \rightarrow \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \rightarrow m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ , consequentemente também as forças se superporiam. É preciso levar em conta as diversas fontes materiais das forças no problema.

Tal princípio de superposição não se trata de uma questão matemática para que seja dada como Corolário, mas de uma questão empírica. Esquematizemos uma situação, e em vista dela vejamos porque é importante considerar os corpos fontes responsáveis pelas forças.

Seja um corpo  $C$  sujeito a uma força devida ao corpo  $C_1$ , posicionado no ponto  $p_1$ . A esta força chamemos  $F_1$ . O corpo  $C_1$  é agora retirado e um terceiro corpo  $C_2$  é posicionado em um ponto  $p_2$ . Este então exerce sobre o corpo  $C$  uma força  $F_2$ .

Reposicionando por fim o corpo  $C_1$  na posição original  $p_1$ , determinamos a força  $F$  resultante sobre o corpo  $C$ . Abaixo, ilustramos as três situações em sequência da esquerda para a direita.



**Figura 8:** O Princípio de Superposição de Forças

O princípio de superposição das forças nos permite dizer que a força  $F$  que os corpos  $C_1$  e  $C_2$  exercem em conjunto sobre o corpo  $C$  é a soma vetorial das forças  $F_1$  e  $F_2$  que os corpos  $C_1$  e  $C_2$ , respectivamente, exerceriam individualmente sobre  $C$ . Isto é definitivo? Independentemente da natureza dessas forças? Deve-se ter em conta que  $C_1$  e  $C_2$  também se interagem, e disso, podem ocorrer variações nas suas propriedades. Se pensarmos neles como corpos eletricamente carregados, as forças exercidas seriam de natureza elétrica, nesse caso, a proximidade entre os dois poderia alterar a distribuição de cargas elétricas nesses corpos, e isso ocasionaria uma mudança na força que cada um deles aplica sobre o corpo  $C$  (CHAVES; SAMPAIO, 2012).

Quer dizer, a força  $\vec{F}$  calculada a partir do princípio de superposição que deve garantir a independência das forças, certamente não seria verificada na experiência. Daí a importância de considerar a fonte material das forças, e verificar nos corpos se a presença de um não interferiria na força aplicada pelo outro. No entanto, pela vasta aplicabilidade do princípio de superposição de forças, a questão aqui levantada não vem a ser uma dificuldade, mas mais uma observação crítica no sentido de cautela ao se abordar o problema.

Mais uma vez, Mach, na revisão dos enunciados de Newton, feitas no seu livro *A Mecânica como Ciência*, reformula o *Corolário* e o apresenta como uma Proposição Experimental, na qual diz: "A aceleração induzida por um qualquer número de corpos num dado corpo são independentes entre si" (FITAS, 1998). Ao leitor atento, a ideia pode ser a mesma que o enunciado de Newton traz. Contudo, Mach a trata como proposição experimental, e em uma outra proposição experimental diz que os corpos induzem acelerações uns sobre os outros "sob determinadas condições especificadas pela física experimental" (FITAS, 1998) Segundo o nosso exemplo, tais condições seriam aquelas em que  $F_2$  não se modificaria pela

presença de  $C_1$  e  $F_1$  pela presença de  $C_2$ .

Não obstante as reformulações e críticas, a terceira lei recebeu de Mach a seguinte apreciação: *"talvez a contribuição mais importante de Newton no que diz respeito aos princípios é a formulação da igualdade da ação e da reação"* (FITAS, 1998).

### LEI III

*A toda a ação opõe-se sempre uma igual reação. Isto é, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são iguais e opostas.*

A terceira lei de Newton trás uma importante característica das forças: a de que as forças atuam aos pares. Um corpo que exerce uma força sobre outro sofre dessa mesma força, porém em sentido contrário, aplicada pelo outro corpo. *"Aquilo que puxa ou comprime outra coisa é puxado ou comprimido da mesma maneira por essa coisa"* (NEWTON, 2010). Newton dá como exemplos do valor dessa lei, situações bastante simples e intuitivas: um dedo que pressiona uma pedra e é igualmente pressionado por ela; um cavalo que puxa uma pedra por meio de uma corda e é igualmente puxado pela pedra; e um corpo que colide com outro. Estes são os únicos exemplos dados em comentário à lei.

Como podemos notar, são todos exemplos que envolvem forças de contato, casos em que a lei é evidente, pois não se pode tocar uma coisa sem ser tocado por ela, e a igualdade exata das forças opostas, se demonstra do princípio da conservação da quantidade de movimento inferido das experiências sobre colisões. Fenômeno muito estudado nas décadas anteriores à publicação dos *Principia*.

No mesmo escólio em que cita Galileu como prova de seu primeiro corolário, Newton cita algumas dessas experiências realizadas com pêndulos por ele e outros *"grandes geômetras"* de seu tempo como Sir Christopher Wren, Wallis, Huygens e Mariotte. Anuncia que em todos os casos se verificou a conservação da quantidade de movimento e conclui nestes termos: *"e assim a lei III, no que diz respeito a percussões e reflexões (colisões), é provada por uma teoria confirmada exatamente da experiência"* (NEWTON, 2010).

Mas como se prova a validade da terceira lei para forças de ação à distância, como a gravidade? Diferentemente do que sucede às forças de contato, não é evidente de que a maçã que cai sob a ação do seu peso também esteja puxando a Terra para si<sup>7</sup>. Mas Newton garante que a lei também se verifica nas atrações, forças à distância, e dá sua prova logo após a primeira

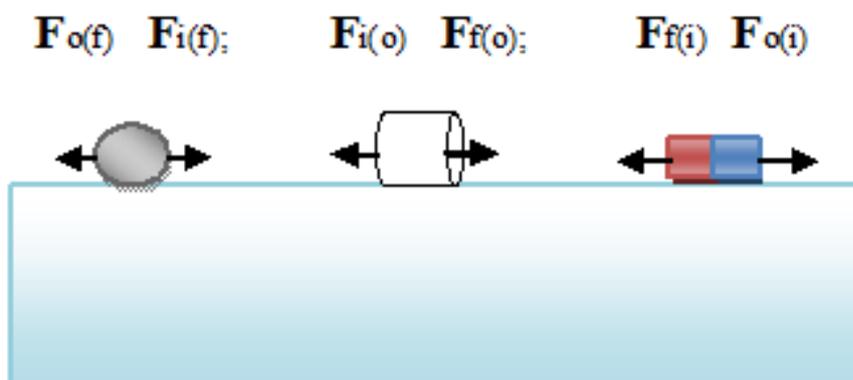
<sup>7</sup>Evidências experimentais da terceira lei no caso gravitacional disponíveis à Newton só poderiam ser: o fenômenos das marés e da precessão dos equinócios. A causa principal desses fenômenos é a força de atração da Lua sobre a Terra, estudada por Newton no livro III.

com o seguinte argumento:

*"Suponhamos que se interpõe um obstáculo para impedir a junção de dois corpos quaisquer, A e B, que se atraem mutuamente. Então, se um dos corpos, por exemplo A, é mais atraído para o outro, neste caso B, do que B para A, o obstáculo é mais comprimido por A do que por B, e não permanece em equilíbrio; a pressão mais forte prevalecerá e fará que o sistema dos dois corpos mais o obstáculo se mova no sentido de B, com movimento continuamente acelerado até ao infinito, coisa absurda e contrária à Lei I. Pois, pela Lei I, o sistema deve permanecer no seu estado de repouso ou movimento uniforme segundo uma linha reta; e, portanto, os corpos devem fazer pressão igual sobre o obstáculo, devem ser atraídos um pelo outro igualmente"* (NEWTON, 2010).

Newton fala de uma situação verificada por uma experiência que diz ter realizado. Nesta experiência os corpos A e B fazem o papel de um ímã e um ferro, colocados em recipientes de modo a flutuar em água calma. Newton observara, que eles se juntam, mas depois, nenhum empurra o outro; pois são atraídos um para o outro por forças iguais, garantindo o equilíbrio.

Reproduzimos a ideia do experimento pela figura abaixo, onde devemos supor que os corpos estão sobre uma superfície em que o atrito é mínimo, como um bloco de gelo. Identificamos cada uma das forças envolvidas:  $F_{i(f)}$ : força exercida pelo ímã sobre o ferro;  $F_{f(i)}$ : força exercida pelo ferro sobre o ímã;  $F_{i(o)}$ : força exercida pelo ímã sobre o obstáculo;  $F_{f(o)}$ : força exercida pelo ferro sobre o obstáculo;  $F_{o(i)}$ : força exercida pelo obstáculo sobre o ímã;  $F_{o(f)}$ : força exercida pelo obstáculo sobre o ferro.

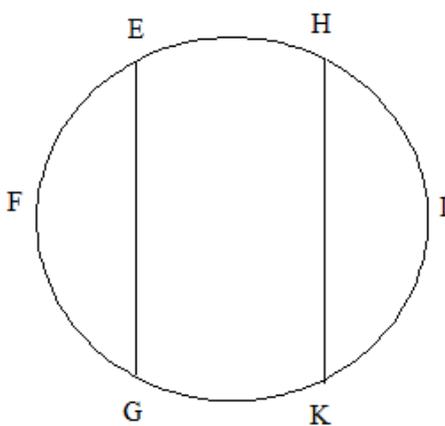


**Figura 9:** Experimento para Verificação da Terceira Lei nas Atrações

A terceira lei para o caso das atrações diz que  $F_{i(f)} = F_{f(i)}$ . Vamos à prova: da observação de que o sistema fica em equilíbrio quando o imã e o ferro se aproximam pressionando o obstáculo, podemos postular que o par de forças que atua sobre cada elemento do sistema (ferro, imã e obstáculo) têm resultante nula, e portanto:  $F_{o(f)} = F_{i(f)}$ ;  $F_{i(o)} = F_{f(o)}$  e  $F_{f(i)} = F_{o(i)}$ . Como a terceira lei já fora provada para o caso de forças de contato, postulamos também que  $F_{f(o)} = F_{o(f)}$  e que  $F_{i(o)} = F_{o(i)}$ . Agora, raciocinemos: sendo  $F_{o(f)} = F_{f(o)}$  e  $F_{o(f)} = F_{i(f)}$ , então  $F_{i(f)} = F_{f(o)}$ . Sendo também  $F_{o(i)} = F_{i(o)}$  e  $F_{o(i)} = F_{f(i)}$ , então  $F_{f(i)} = F_{i(o)}$ . Mas,  $F_{i(o)} = F_{f(o)}$ , conseqüentemente  $F_{i(f)} = F_{f(i)}$ .

É claro que com esta experiência não provamos para o caso de a atração ser de natureza gravitacional. Mas Newton o faz logo em seguida por meio de um raciocínio bastante criativo:

*"Seja o globo terrestre FI, cortado pelo plano EG em duas partes EGF e EGI; os seus pesos (as forças de atração) uma para o outro são iguais. Porque, se por um outro plano HK paralelo ao plano EG a parte maior EGI for cortada em duas partes EGKH e HKI, sendo a parte HKI igual à parte EFG; a parte média EGKH não terá propensão para nenhuma daquelas partes e ficará em equilíbrio entre elas. Mas a parte HKI comprimirá a parte média no sentido da outra parte EGF e, portanto, a força com que EGI, soma das partes HKI e EGKH, tenderá para EGF será igual ao peso de HKI, isto é, igual ao peso de EGF. Logo, os pesos de EGI e de EGF serão dirigidos um para o outro, e iguais, como eu queria demonstrar. E, de fato, se estes pesos não fossem iguais, a Terra, que flutua no espaço sem resistência, cederia ao peso maior e, retirando-se diante dele, vogaria no infinito" (NEWTON, 2010).*



**Figura 10:** Representação do Planeta Terra por Newton

Semelhante prova fazemos mais simplesmente utilizando o argumento de simetria de reflexão no espaço. Dividimos nosso argumento em cinco situações.

### SITUAÇÃO I

Da experiência, sabemos que um corpo  $A$  como a Terra atrai um corpo  $B$  como a maçã a uma certa distância de  $A$ , mediante uma força diretamente proporcional à massa de  $B$ :  $P \propto m$ , inserida uma constante de proporcionalidade  $g$ , fica  $\vec{P} = m\vec{g}$ . Por ora, nada nos diz que  $B$  também atrai  $A$  com uma força de mesma intensidade.



**Figura 11:** Terra-maçã 1

### SITUAÇÃO II

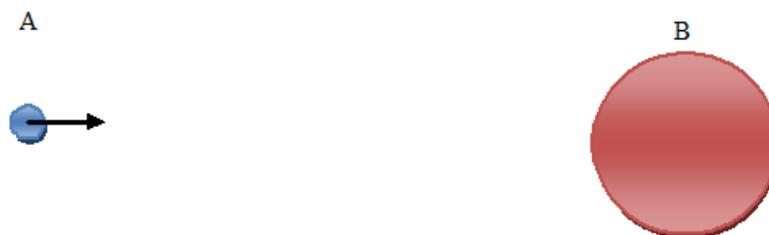
Mantida a distância, que não mudará em todas as situações, aumentamos a massa de  $B$  de modo que seja igual a massa de  $A$  (representada aqui pelo tamanho igual). Com isso a força que a  $A$  exerce sobre  $B$  aumenta no mesmo fator que a massa de  $B$ .



**Figura 12:** Terra-maçã 2

### SITUAÇÃO III

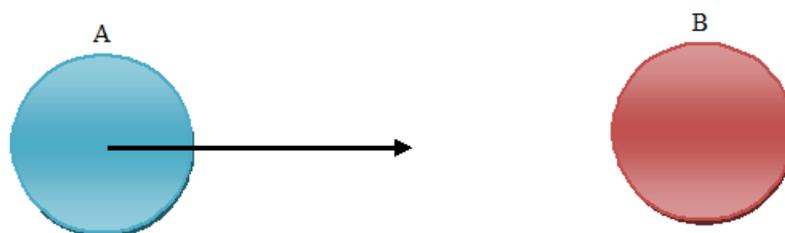
Façamos agora  $A$  perder massa até que adquira a mesma massa de  $B$  na situação I. Chegamos assim, a uma configuração semelhante a da situação I refletida no espelho. Porque a física não muda por uma simetria de reflexão, temos que na presente situação  $B$  exerce sobre  $A$ , uma força exatamente igual a que  $A$  exercia sobre  $B$  na primeira situação. Mas ainda assim, pelo mesmo argumento, nada podemos dizer sobre qualquer força que  $A$  exerça sobre  $B$  agora.



**Figura 13:** *Terra-maçã 3*

#### SITUAÇÃO IV

Desta vez, façamos com que *A* volte a sua massa original. Sabemos que a força que *B* exerce sobre *A*, deve aumentar no mesmo fator do aumento da massa de *A*. Esta atual força de *B* sobre *A* será igual a força de *A* sobre *B* da situação II. Pois *A* e *B* sofreram variações idênticas de massa.

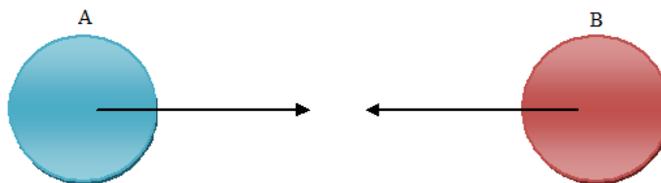


**Figura 14:** *Terra-maçã 4*

#### SITUAÇÃO V

Finalmente, notamos que a situação IV é semelhante à situação II, em que os corpos apresentam a mesma massa, e portanto o processo físico deve ser o mesmo. Para isso, voltamos a expressar no corpo *B*, a força que este sofria por causa de *A* na situação II que é exatamente igual a força sofrida por *A* por causa de *B* na situação IV. Como consequência, *A* e *B* se atraem por meio de forças que são iguais e opostas:

Demonstramos desse modo a verdade da terceira lei no caso gravitacional até aqui para corpos de mesma massa. A terceira lei foi fundamental para que se pudesse inferir a lei da gravitação universal. Na lei da gravitação universal, as forças pelas quais os corpos se atraem depende da massa de ambos os corpos. Este detalhe só pôde ser adquirido da formulação da terceira lei. Não só pela variação da massa de *B* que a força sobre *B* aumentará, se esta massa aumenta; ou decairá, se ela diminui. Mas como essa força é sempre igual aquela que *B* faz sobre *A*, a mudança na massa de *A* acarreta na mudança da força sob a qual *A* está sujeito e



**Figura 15:** *Terra-maçã 5*

consequentemente também na mudança da força sob a qual *B* se encontra.

Dessa forma, a vasta aplicação da lei da gravitação é uma prova constante da validade da terceira lei nas variadas situações em que podemos encontrar os corpos *A* e *B*. Isto está de acordo com as duas primeiras Regras para o Estudo da Filosofia Natural. Isto é, as forças iguais e opostas, deduzidas aqui para corpos de mesma massa, constituem causas fundamentais que permitem descrever as interações de natureza gravitacional, assim, (pelas Regras 1 e 2) tais pares de forças, devem ser os mesmos que atuam entre dois corpos de massas quaisquer.

Após citar ainda uma variedade de exemplos que contextualizam a ação e reação Newton escreve: "*Com estes exemplos, pretendi apenas mostrar a grande universalidade e certeza da Terceira Lei do Movimento*" (NEWTON, 2010).

## 4 *Considerações Finais*

A terceira lei do movimento, verificada nas diversas formas de interação que envolvem dois corpos; à distância e ao contato, pode deixar de valer em situações específicas que não o contato. A limitação do princípio de ação e reação não reconhecida por Newton, o fez pensá-lo, ainda que deduzindo-o do princípio de conservação da quantidade de movimento a (C.Q.M), como um axioma, "*uma realidade primária, um fato básico*" (ROHDEN, 2008), do qual se extraía tanto C.Q.M como a força gravitacional. Ao lado das limitações atualmente reconhecidas do princípio de ação e reação, o princípio de C.Q.M sempre se manteve válido, o que faz dele um princípio mais fundamental que o primeiro.

Com o surgimento das novas teorias físicas do início do séc. XX, como a relatividade de Einstein e a Mecânica Quântica, delineou-se os limites entre os quais prevaleceria os princípios newtonianos. Aproximações deles seriam obtidas como casos especiais nas duas teorias ao se aplicar baixas velocidades comparativamente à velocidade da luz (teoria relativística) e grandes massas comparativamente às massas das partículas elementares (teoria quântica).

Isto não se deu somente em relação aos princípios da mecânica aqui discutidos, mas também aos seus conceitos. Na física atual a força newtoniana perdeu o caráter adquirido com o seu sucesso, de conceito fundamental, e é colocada como grandeza secundária. Que conceito mais fundamental toma seu lugar?

Desde a formulação da chamada mecânica analítica por volta de 1815, o conceito de energia demonstrou dar muitos e bons resultados. Mas no tempo de Newton, ele já tinha sido tratado por Leibniz no desenvolvimento de sua mecânica. Criada por Joseph Louis Lagrange, a mecânica analítica ou lagrangeana, está baseada no estudo de funções definidas sobre a energia de um sistema de partículas. Uma função lagrangiana, quando expressa pela diferença entre a energia cinética e a energia potencial do sistema mediante a equação de Euler- Lagrange fornece a segunda lei de Newton para uma força conservativa expressa como sendo menos a derivada da energia potencial em relação à posição. Com isso todos os fenômenos sob o domínio da mecânica newtoniana são igualmente descritos pela mecânica analítica. Contudo, esta nova

mecânica não se detém no âmbito das coisas subjugadas pela outra, mas pode-se adequá-la na física de uma maneira geral, para descrever problemas de termodinâmica, de eletromagnetismo, além de aquelas novas teorias físicas, serem igualmente escritas no formalismo lagrangeano.

No ensaio Sobre a natureza das leis físicas, Max Planck escreveu:

*"A superioridade do potencial sobre a força não decorre apenas de que, com a introdução do primeiro, as leis da física recebem uma forma mais simples; a noção de potencial tem uma significação que se estende muito além da noção de força. Ela ultrapassa sobretudo o domínio da mecânica e se aplica às afinidades químicas em que, evidentemente, já não se trata de uma força newtoniana"* (PLANCK, 2012).

Não obstante estas limitações que hoje se reconhece nos conceitos e princípios formados por Newton, eles serviram de apoio para que se alcançasse o olhar mais abrangente fornecido pelas novas teorias. Assim como os princípios de Kepler e de Galileu serviram de apoio para que Newton achasse princípios mais fundamentais e gerais do que os apresentados pelos seus antecessores.

Como ilustração desse progresso de princípios, temos que as leis do movimento e da gravitação universal explica perturbações sofridas pela trajetória elíptica da Terra em torno do Sol ao aproximar-se de vez em quando de Júpiter, além de explicar o movimento dos outros corpos celestes como cometas, estrelas duplas etc., coisas que as leis de Kepler não podiam explicar. Posteriormente, a teoria da Relatividade Geral de Einstein, veio explicar perturbações sofridas pela trajetória de Mercúrio, que a cada volta completada em torno do Sol, tinha sua orientação alterada (o que se chama de precessão do periélio), além de trazer à tona o entendimento de outros corpos celestes como os buracos negros, coisas que a teoria de Newton não podia abarcar.

Assim como os princípios expostos na obra de Newton constituíram base para princípios mais fundamentais, seus conceitos constituíram base intuitiva para abstrações mais profundas. O conceito de força, por exemplo, remete ao esforço muscular humano, o que dá um caráter intuitivo às leis físicas. E isto constitui um ponto de partida importante no processo da pesquisa científica:

*"primeiro é preciso recorrer a um poder de intuição intimamente ligado a nossas sensações específicas, pois essa é a fonte de onde brotam todas as ideias; mas, se partindo daí quisermos chegar às leis físicas, devemos abstrair nossas imagens intuitivas (...) pois só a abstração liberta as leis físicas de toda ligação*

*antropomórfica e permite que elas se manifestem sob uma força simples e geral"*  
(PLANCK, 2012).

Assim se deu, quando Newton, além de considerar a sua noção de força segundo as formas de contato "percussão" e "pressão", a considera para a força centrípeta, que inclui a força gravitacional.

Por ser a base de importantes teorias sucessoras e pela intuitividade que em seguida leva a abstrações profundas, não dizemos redundantemente pelo valor da obra, porque o valor da obra também reside nestas coisas; ler a respeito dos conceitos e princípios nela apresentados por Newton, como já referido, nos permite que melhor os compreendamos, dando-nos conta do seu desenvolvimento metódico e do desenvolvimento teórico pelo qual passaram.

## *Referências*

- ALVES, R. **Filosofia da Ciência: Introdução ao Jogo e as suas Regras**. Ed. São Paulo: Loyola, 2013.
- BOLIVAR, A. O. **Realmente se Ensina Física no Brasil?** CBPF-CS-007/03.
- CHAVES, A. SAMPAIO, J. F. **Física Básica: Mecânica**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- DESCARTES, R. **Princípios de Filosofia**. Tradução de João Gama. Edições 70, Ltda.
- FEYNMAN, R. P. **Lições de Física**. Porto Alegre: Bookman, 2008
- FITAS, A. J. S. **Mach: o Positivismo e as Reformulações da Mecânica no séc. XIX**. Évora: Universidade de Évora, 1998, p. 115-134.
- GARBI, G. G. **C.Q.D.: Explicações e Demonstrações sobre Conceitos, Teoremas e Fórmulas Essenciais de Geometria**. São Paulo: Editora Livraria de Física, 2010.
- HAWKING, S.W. MLODINOW, L. **O Grande Projeto: Novas Respostas para as Questões Definitivas da Vida**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2011.
- JAMMER, M. **Conceitos de Força: Estudo sobre os Fundamentos da Dinâmica**. Rio de Janeiro: Contraponto: PUC-Rio, 2011.
- KOYRÉ, A. **Estudos de História do Pensamento Científico**. Tradução de Márcio Ramalho. - 3. Ed. - Rio de Janeiro: Forense, 2011.
- LOSEE, J. **Introdução Histórica à Filosofia da Ciência**. Belo Horizonte: Itatiaia, 2000.
- NEWTON, I. **Princípios Matemáticos da Filosofia Natural**. Tradução de J. Resina Rodrigues. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 2010.
- PASCAL, B. **Do Espírito Geométrico**. Tradução de Antonio Geraldo da Silva. Escala. Coleção Grandes Obras do Pensamento Universal.
- PLANCK, M. **Autobiografia Científica e outros Ensaios**. Tradução de Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012.
- REALE, G. ANTISERI, D. **História da Filosofia: Antiguidade e Idade Média**. São Paulo: Paulus, 1990. Vol. 1.
- \_\_\_\_\_ **História da Filosofia: do Humanismo a Kant**. São Paulo: Paulus, 1990. Vol. 2.
- ROHDEN, H. **Filosofia Contemporânea: o Drama Milenar do Homem em Busca da Verdade Integral**. São Paulo: Martin Claret, 2008.