THIAGO ASTUN CIRINO

Dois momentos da síntese newtoniana: a matematização da Física por Isaac Newton

Brasília

2023

THIAGO ASTUN CIRINO

Dois momentos da síntese newtoniana: a matematização da Física por Isaac Newton

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao departamento de Filosofia da Universidade de Brasília (UnB) como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Licenciatura em Filosofia.

Orientador: Prof. Dr. Samuel José Simon Rodrigues

Brasília

2023

A todos os seres que já viveram, vivem ou vão viver e não se conformam com as "certezas" da natureza e do mundo.

Agradecimentos

À minha vó Leila que deixou este plano de existência durante este trabalho, mas que sempre estará presente em meu coração.

À minha mãe e ao meu pai, os grandes autores e amores deste e de todos os trabalhos da minha vida.

Aos meus irmãos Daniel e Mateus, que são e sempre serão meus primeiros amigos.

Às minhas sobrinhas Gabi e Loli, duas alegrias, diversão e muito alto astral.

A toda minha família, que apoiou as minhas escolhas mesmo às vezes parecendo incompreensíveis.

Ao meu querido professor Samuel, que se dispôs a me orientar e instruir neste trabalho, bem como nas próximas caminhadas acadêmicas.

Às professoras e professores do departamento de Filosofia da UnB por proporcionarem uma excelente formação.

Aos servidores e funcionários da UnB pela amizade em todos os trabalhos.

Ao Trance, acompanhante diário nesta grande jornada sobre a natureza.

À Mari e ao Cogu, grandes companheiros na realização deste estudo.

Aos amigos e amigas que fiz pra sempre na vida durante a Engenharia na Unesp.

Aos amigos e amigas que fiz pra sempre na vida durante a Filosofia na UnB.

Ao Newton, Galileu e Kepler em nome de todos os pensadores e pensadoras que auxiliaram este estudo.

Aos meus alunos e alunas, que me ensinam querer saber ensinar.

À Luna, que apesar da saudade diária, vive feliz no sítio.

À Lara, minha ex-companheira de vida, pois seu grande carinho e companheirismo foram as primeiras portas abertas aos caminhos profundos da Filosofia.

À cidade de Brasília com suas árvores, silêncio e lago que me encantam todo dia.

Aos livros, aos amigos, à Educação, à Filosofia, à Física, à Matemática e a Vida.

"Nature and Nature's Law's lay hid in Night:

God said, Let Newton be! and All was Light."

Alexander Pope

"No meio de todos (os planetas) encontra-se o sol. Ora, quem haveria de colocar neste templo, belo entre os mais belos, um tal luzeiro em qualquer outro lugar melhor do que aquele donde ele pode iluminar todas as coisas ao mesmo tempo? ... Realmente o Sol está como que centrado num trono real, governando a sua família de astros, que giram à sua volta."

Nicolau Copérnico

"A filosofia encontra-se escrita neste grande livro que continuamente se abre perante nossos olhos (isto é, o universo), que não se pode compreender antes de entender a língua e conhecer os caracteres com os quais está escrito. Ele está escrito em língua matemática, os caracteres são triângulos, circunferências geométricas e outras figuras, sem cujos meios é impossível entender humanamente as palavras; sem eles, vagamos perdidos dentro de um obscuro labirinto."

Galileu Galilei

Resumo

O presente estudo apresenta brevemente o esforço de incríveis homens em suas tentativas de compreender a natureza. Por um lado, temos Galileu e Kepler, os quais constituíram importantes momentos na matematização da Física e da natureza mediante suas investigações na compreensão do mundo. Por outro lado, como síntese desse movimento representado pelos dois pensadores, temos Newton e a determinação das propriedades matemáticas da atração entre os corpos sem nenhum compromisso declarado com a causa física desse fenômeno, o qual determinou uma das famosas generalizações da Revolução Científica do século XVII, a gravitação universal. É esse o panorama e temática deste texto, que em seu início, como exposição da natureza qualitativa do mundo anterior as realizações de Newton, tem nas noções de "mudança", nas concepções sobre a Terra e os corpos celestes de Aristóteles a representação da cosmologia vigente que perdurou por séculos e foi destronada de vez pela síntese newtoniana.

Palavras-chave: Newton, Galileu, Kepler, Física, Matemática.

Sumário

Introdução

Um dos maiores estudiosos sobre Isaac Newton (1642-1727), Ierome Bernard Cohen (1914-2003), afirma que cientistas, filósofos e historiadores estão de acordo que o apogeu das velozes mudanças no conhecimento do mundo e sua compreensão, através da maneira matemática de abordar os fenômenos naturais os quais tiveram como fruto a ciência moderna, são resultados das produções e feitos coletivos da chamada Revolução Newtoniana. Revolução esta que engloba, a qual poderíamos denominar de "várias revoluções", as ciências físicas e a matemática. A exemplo da *Óptica*[1], Newton propõe "um projeto geral de pesquisas na ciência física experimental que constituiu uma agenda para as investigações do século XVIII" (Cohen, 2002, p. 11), no qual se estabeleceu um novo juízo sobre a natureza da cor através da concepção de heterogeneidade da luz. Além disso, destaca-se na obra newtoniana a denominada "mecânica racional", que revolucionou a compreensão da natureza do mundo em função das três muito conhecidas leis do movimento, fundamentais até hoje, bem como através de um novo e moderno conceito de massa dos corpos. Já na matemática, houve a paralela invenção, por parte de Newton e Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), do fabuloso cálculo infinitesimal. Esse cálculo assume, cada vez mais, o posto oficial de linguagem das ciências exatas e sociais na contemporaneidade.

As origens do pensamento e realizações de Newton, que procurava compreender a natureza do mundo que vivemos como um filósofo natural de seu tempo, tiveram influência aristotélica[2] e partiram de interpretações herméticas egípcias, as quais compreendem o amor como força de atração e o ódio como força de repulsão. Nesse sentido, Newton abandonou definitivamente a "velha física", que estava, de um lado, bem adaptada à uma natureza composta apenas por quatro elementos terrestres: o ar, a terra, o fogo e a água, e um celestial: o éter, e por outro, de uma Terra em repouso no centro do universo. Após ter contato com os escritos de importantes homens que trabalhavam na criação de "uma nova ciência da natureza" (Cohen, 2002, p. 19), a nova Física, a nova noção de natureza que surge desses estudos, a qual reflete bem as palavras do escritor argentino Jorge Luis Borges, isto é, que um "autor inventa os seus predecessores", culmina em Newton ao ser implicada por corpos em uma Terra que se movimenta, fruto de "milhares de anos de luta pela compreensão do sistema do mundo, dos princípios de

[1] Obra de Newton publicada pela primeira vez em 1704.
[2] Certamente uma influência baseada em grande rejeição às ideias aristotélicas.

força e movimento" (Cohen, 1967, p. 159). Aliás, como bem afirmou em uma carta enviada à Robert Hooke (1635-1703) em 5 de fevereiro de 1676, Newton declara que só enxergou mais longe "por estar sobre ombros de gigantes".

É nesse sentido que esta monografia filosófica deseja aproximar-se de uma possível proposta-resposta sobre a síntese newtoniana de matematização da Física. Dessa forma, em um primeiro capítulo, o trabalho apresentará a construção aristotélica das noções de mudança e de cosmo, afim de, sucintamente, expor a natureza qualitativa do mundo anterior as realizações de Newton. Logo após, como segundo capítulo do estudo, serão brevemente desenvolvidos dois momentos que abarcaram os cem anos anteriores à síntese newtoniana de matematização da natureza, isto é, a elaboração da cinemática dos movimentos uniformemente acelerados de Galileu di Vicenzo Bonaulti de Galilei (1564-1642) e as três leis do movimento planetário de Johannes Kepler (1571-1630). A partir disso, como forma de se chegar ao núcleo da nova concepção - tentativa de proposta-resposta deste estudo - fruto desses esforços humanos rapidamente representados aqui pelos dois momentos, o terceiro capítulo aborda uma das mais famosas generalizações da Revolução Científica do século XVII, um fenômeno descrito de maneira precisa através de uma noção matemática que explica a atração recíproca entre os corpos, que mudaria definitivamente a visão sobre a natureza, isto é, a gravitação universal newtoniana. Por fim, a conclusão apresenta um breve retorno a tudo discutido, afim de apresentar como as contribuições de Newton, a exemplo da força gravitacional universal, estão diretamente ligadas à matematização da Física e na compreensão da natureza presentes na obra de Isaac Newton.

Capítulo 1

Aristóteles, o antecessor

O afortunado Newton, como escreveu Albert Einstein (1879-1955) em uma reedição no século XX da *Óptica*, representa o ápice das pesquisas de seus predecessores. Contudo, como nos alerta João Zanetic em seu texto “Dos ‘principia’ da mecânica aos Principia de Newton”[3], são possíveis diversos pontos históricos de partida para se tratar do nascimento desse apogeu representado pelo grande arquiteto da Idade da Razão. Além disso, de antemão, é importante afirma que não se pretende fazer uma discussão detalhada sobre os tópicos iniciais escolhidos para este estudo. Porém, é fundamental traçar, em linhas gerais, a concepção de cosmo e a questão da “mudança” aristotélicas, pois a cosmologia e a física do filósofo peripatético concordam muito mais com o senso comum do que as noções que se desmembraram com a revolução newtoniana. Nesse sentido, o estudo feito aqui trata em seu início, como tentativa de abranger o alcance e a significação matemática da proposta de Sir Isaac Newton fornecendo um panorama da realidade geocêntrica a qual os modernos são herdeiros, da concepção da natureza e seus constituintes básicos do mundo sublunar e dos corpos celestiais que dominaram o pensamento europeu até as primeiras décadas do século XVII.

Thomas Kuhn (1922-1996), em sua obra *A Revolução Copernicana* (1957), afirma que “não é difícil encontrar incoerências na obra de Aristóteles, nem, inclusive, esporádicas e flagrantes contradições, contudo, sua visão do homem e do Universo apresenta uma unidade fundamental e jamais desde então havia sido levada a cabo uma síntese comparável à sua quanto a extensão e originalidade”[4] (Kuhn, 1957, p. 78). Isso se expressa, na medida em que a filosofia da natureza aristotélica, nascida há mais de 2300 anos, após diversos desenvolvimentos em um longo período de tempo, tornou-se autoridade máxima nos estatutos dos jesuítas da era medieval. Através da larga aceitação pelo cristianismo, empreendida por Tomás de Aquino (1221-1274), a conhecida doutrina

---

[3] Texto apresentado na mesa-redonda “Os 300 anos do *Principia*”, realizado na XXXIX SBPC em Brasília no dia 18/07/1987

[4] *“It is not difficult to find inconsistencies and ocasional contradictions within the body of Aristotle´s writings But there is a fundamental Unity in his view of man and the universe that has never since been achieved in a synthesis of comparable scope and originality”*

do "Filósofo"[5] passa a condição de autoridade incontestável em diversos campos do conhecimento até a época de Galileu.

Sabendo disso, qual é o item fundamental que a filosofia natural e o conhecimento para Aristóteles se ocupam? A ciência aristotélica, o conhecimento que ele buscava, como nos afirma o estudioso Jonathan Barnes, "tem por objeto coisas reais" (Barnes, 2001, p. 69). Porém, quais são essas coisas reais, as matérias fundamentais que dominaram por um longo período a concepção de natureza, as quais os filósofos buscavam conhecer? Para Aristóteles, são muitos os sentidos do ser, contudo, os vários sentidos se referem a uma coisa só de natureza determinada, isto é, "tudo o que se diz que é ou que existe é ou existe com referência à substância" (Barnes, 2001, p. 73). Essa *kategoria*[6], que o filósofo peripatético estipula haver dez, refere-se as respostas que a questão "O que é isto?" leva, as quais são sobre a essência, ao encontro do "ponto focal da existência" (Barnes, 2001, p. 74) de alguma coisa. Em resumo, a substância, como noção filosófica, objeto da ciência aristotélica fundadas no senso comum, as quais as coisas podem ser demonstradas mediante sua essência, "são a matéria primária do mundo de Aristóteles" (Barnes, 2001, p. 78).

Ao contrário das Forma de Platão, "que existem para sempre e nunca se alteram, as substâncias de Aristóteles são em sua maioria coisas temporárias que passam por uma variedade de alterações" (Barnes, 2001, p. 79). O fenômeno da mudança sempre intrigou os predecessores pré-socráticos. Parmênides (530 a.C. – 460 a.C.), por exemplo, na esfera da filosofia da *physis* se apresentava como um radical defensor do grande princípio, "o próprio princípio da verdade" (Reale, 2017, p. 48), isto é, que o ser é e não pode não ser, e o não ser não é e não pode de nenhum modo ser. Sendo assim, para esse pensador e seus discípulos, a realidade é estável, eterna, e a mudança, o devir, é mera aparência, uma ilusão. Todavia, Heráclito (500 a.C. – 450 a. C.), famoso pela analogia da vida relacionada a um rio, pensava a mudança no mundo real como perpétua. Aristóteles rejeitava todas essas concepções, pois há um gênero de substância imóvel e eterno e outros em que a existência do movimento "é evidente pela indução" (ARISTÓTELES. *Física* 185a 13-14), sendo que boa parte da física aristotélica, a qual estuda o princípio da natureza "a partir da experiência das sensações" (Berti, 2002, p. 55) consiste no estudo das coisas que

[5] Maneira pela qual Aristóteles era reconhecido na época medieval.
[6] Termo utilizado por Aristóteles para se referir a classificação de "predicados".

possuem o princípio da mudança, pois “tem natureza tudo quanto tem tal princípio” (ARISTÓTELES. *Física* 192b 32-33).

No mundo aristotélico, como vimos, as substâncias estão associadas as mudanças. Para ele, há três tipos de substâncias: aquela “associada ao não-movimento daquilo que a tudo movimenta” (Campos & Ricardo, 2014, p. 2), as corruptíveis, sujeitas a geração e a corrupção, e por último, a incorruptível, relacionada ao movimento circular, única mudança dos corpos celestes. A primeira espécie de substância é absolutamente privada de matéria, imóvel e correspondente ao domínio da metafísica[7]. Os outros dois gêneros, contidos respectivamente nas esferas terrestres e celestes, são formados por substâncias sensíveis, capazes de distintas mudanças. Por um lado, as substâncias corruptíveis, sujeitas “a todos os tipos de mudanças”, são constituídas pelos quatro elementos de Empédocles (495 a.C. - 430 a.C.)[8]: ar, terra, água e fogo, os quais constituem o mundo sublunar. Por outro lado, as substâncias incorruptíveis, que compõem os céus, as estrelas e os planetas, constituem a perfeita região supralunar. Vejamos um pouco melhor cada uma dessas duas regiões:

“A esfera da Terra, que integra a região sublunar, é rodeada concentricamente por uma série de esferas ocas” (Évora, 2005, p. 136). Essa região, composta de substâncias corruptíveis formadas pelos quatro elementos, está sujeita a mudança de um ser a ser, mudança de local denominada de “movimento” e representada por um movimento retilíneo (para o alto e para baixo), de um não-ser a um ser, mudança chamada de “geração” e de um ser a um não-ser, mudança essa classificada por “corrupção”. Assim sendo, cada elemento possui um movimento natural e um lugar natural, onde o “fogo”, por exemplo, que é absolutamente leve, movimenta-se para cima e “encontrará seu lugar nas mais remotas extremidades do universo” (Barnes, 2001, p. 100). Já, o elemento “terra”, “que é absolutamente pesado, [..] coincide com o centro da Terra, e o seu movimento natural é retilíneo para baixo, ou seja, em direção ao centro do Universo” (Évora, 2005, p. 136). Agora, em relação aos elementos “água” e “ar”, os lugares naturais se encontram no meio dos outros dois elementos, o que leva ao lugar e movimento dos corpos compostos, constituídos por mais de um elemento, corresponderem ao do

[7] Essa substância, que toma grandes e distintas proporções no período medieval principalmente através da filosofia de Tomás de Aquino, não será mais tratada neste estudo.
[8] Esse pensador pré-socrático é conhecido por ser o criador da teoria cosmogônica dos quatro elementos, terra, fogo, água e ar, presente em seu poema *Sobre a natureza*, o qual sobreviveram em torno de 450 versos. Também, propôs as forças de Amor e Ódio, que atuavam formando e separando esses quatro elementos.

elemento mais predominante. Portanto, “se todas as coisas estivessem em seus lugares naturais, não haveria razão para elas de lá saírem” (Évora, 2005, p. 137), necessitando de um esforço exterior, violência, para que assim acontecesse.

A região celeste, supralunar, é perfeita e eterna. Composta de um quinto elemento, “responsável tanto pela composição das esferas, quanto da matéria celeste e pelo movimento circular” (Campos & Ricardo, 2014, p. 3). Por ter um status mais elevado, como afirma Jonathan Barnes, “honorável”, em relação aos elementos terrestres, o éter não é pesado e nem leve, não sofre alterações de natureza quantitativa e nem qualitativa além de “deslocar-se por tempo indeterminado” (Campos & Ricardo, 2014, p. 3). Isso nos leva que por ser uma região incorruptível, formada pelo elemento celeste, os corpos que a compõem precisam ser perfeitos, isto é, são esféricos. Na obra *Sobre o céu*[9], Aristóteles faz a seguinte argumentação:

> “E posto que a primeira figura é própria do corpo primeiro, e o corpo primeiro é o que se mantêm no primeiro orbe, o que gira com movimento circular será esférico. E também o imediatamente próximo `àquele: pois o vizinho ao esférico é esférico. E igualmente os corpos situados para o centro destes: pois os corpos envolvidos pelo esférico e em contato com ele têm de ser por força totalmente esféricos; e os situados abaixo da esfera dos planetas estão em contato com a esfera de cima. De modo que cada um dos orbes será esférico: pois todos os corpos estão em contato e são vizinhos com as esferas.” (ARISTÓTELES. *Sobre o céu* 287a).

Dessa forma, é possível perceber que o sistema de mundo[10] do filósofo peripatético não comporta somente as regiões esféricas do mundo sublunar e do mundo supralunar. Há várias figuras esféricas que se encaixam perfeitamente umas às outras, onde cada região de esferas concêntricas está em contato com as outras regiões. Esse esquema, que apresenta um modelo de mundo finito, além de não possibilitar a existência do vazio, é o sistema geocêntrico de Aristóteles. Nele, através de uma certa potência[11] relacionada a cada lugar, capaz de produzir efeitos distintos nos corpos”, a noção moderna

---

[9] Obra de Aristóteles sobre a astronomia. Nela, o filósofo trata dos corpos celestiais bem como sua organização em órbitas superiores.
[10] O universo físico aristotélico é “espacialmente finito, mas temporalmente infinito” (Barnes, 2001, p. 100).
[11] Termo traduzido do grego (transliterado) *dynamis.*

de gravidade se assemelha à capacidade dos corpos migrarem naturalmente ao centro do Universo, localizado no mesmo lugar que o centro da Terra. Para Aristóteles, a Física está elaborada em uma natureza expressa por movimentos naturais, que explica a queda dos corpos sem necessariamente precisar de uma teoria, muitos menos matematizada, da gravidade. Os corpos mais pesados movem-se para o centro mais rápido e tudo que é leve tem aptidão para deslocar-se a partir do centro.

Capítulo 2

Dois momentos anteriores à Newton

Os cem anos anteriores ao início das revoluções newtonianas, que separam o nascimento de Galileu à publicação da primeira edição da *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687), contém uma das mais importantes correntes de pensadores e pensamentos científico modernos. Nicolau Copérnico (1473-1543)[12] estremeceu as bases geocêntricas do universo, fortalecendo uma intuição contrária aos fundamentos teóricos da Física e da cosmologia que o precediam, baseados na filosofia da natureza aristotélica. Dessa forma, em que se podia "dizer que as próprias categorias do pensamento estavam organizadas em torno da afirmação de nossa posição central no Universo" (Mariconda, 2006, p. 279), há o início de um intenso, forte movimento, que Alexandre Koyré denomina de "o sentido e o objetivo mais profundos do newtonianismo" (Koyré, 2002, p. 85), o qual busca abolir a crença vigente no valor supremo e "preponderante da tradição e da autoridade consagrada" (Koyré, 2002, p. 85), ao matematizar a natureza. É nesse sentido que o segundo capítulo foca na construção de um possível recorte desses cem anos afim de trabalhar dois[13] importantes momentos da Revolução Científica do século XVII, a cinemática dos movimentos uniformemente acelerados de Galileu Galilei e as três leis do movimento planetário de Johannes Kepler, os quais determinaram de maneira brilhante e bem-sucedida as realizações de Newton.

2.1. Galileu e a cinemática dos movimentos uniformemente acelerados

É possivelmente no curso de medicina, que Galileu iniciou aos 17 anos, o começo de sua hostilidade pela filosofia aristotélica. A medicina nessa época "continuava na direção tradicional de estudar os textos de Galeno (129-200), enquadrado no

---

[12] Nicolau Copérnico publicou o tratado astronômico *De Revolutionibus Orbium Coelestium* em 1543, contudo as ideias sobre o Heliocentrismo já circulavam na Europa desde 1514, a partir da divulgação anônima do *De Hypothesibus Motuum Coelestium a se Constitutis Commentariolus.* Especialmente Nicole d' Oresme (1320-1382) já havia, alguns anos antes, apresentado, como hipótese, a tese do heliocentrismo. Também, Nicolau de Cusa (1401-1464) havia postulado, em um contexto metafísico, o movimento da Terra (sem explicitar um sistema heliocêntrico). Aristarco de Samos, no período clássico grego, também já havia apresentado a tese do heliocentrismo. Há diversos exemplos na história da filosofia.

[13] Apesar de considerar importante para este estudo Rene Descartes (1596-1650) e sua noção de interações mecânicas dos corpos a partir do conceito de imensos vórtices cósmicos, não trataremos dele em uma seção separada semelhante ao realizado com Galileu e Kepler. Contudo, as noções cartesianas serão devidamente trabalhadas quando necessárias ao longo do texto.

conhecimento geral da física e da metafísica de Aristóteles" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 25). Atraído por outros assuntos e sem nenhuma "inclinação para a medicina" (Ronan, 1983, p. 79), o jovem Galileu, nascido em Pisa no ano de 1564, tem os primeiros contatos com as técnicas matemáticas de mensuração criadas e utilizadas por Euclides e Arquimedes. Além disso, foi também durante essa época que o jovem físico descobriu "o isocronismo do pêndulo"[14], ao marcar o tempo do balanço de um candelabro. Em 1585, "Galileu abandona, em definitivo, o curso de medicina sem ter conseguido qualquer grau universitário" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 27).

Para Galileu, as interpretações e explicações qualitativas em "termos de movimentos naturais em direção a lugares naturais" (Loose, 2000, p. 64) as quais fez Aristóteles, não são explicações científicas "*bona fide*"[15]. O pensador pisano, de certa maneira, estabelece uma demarcação do escopo da Física, convencido de que, como afirma na obra *Ensaiador* (1632), "o livro da natureza se acha escrito na língua da matemática" (Loose, 2000, p. 64). Podemos assim pensar, visto por muitos estudiosos como o "fundador da ciência moderna"[16], que Galileu está presente no início de uma nova concepção de ciência, que reposiciona a matemática em um outro lugar. A exemplo dessa obra já citada, o *Ensaiador*, Galileu revela "aspectos importantes" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 149) da concepção moderna e matematizada de filosofia da natureza, que destrói uma noção de cosmo qualitativo hierarquicamente ordenado em que as causas formais e finais eram as explicações sobre e do mundo. Dessa forma, o pensador posiciona a matemática, vista até o momento semelhante a "raciocínios para salvar as aparências[17]" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 151), como explicação realista da natureza, do céu e dos corpos terrestres.

---

[14] O fenômeno demonstrado por Galileu conhecido por "Isocronismo das oscilações pendulares" apresenta a propriedade de que para um mesmo pêndulo, diferentes amplitudes são percorridas no mesmo período. Contudo, esse fenômeno foi posteriormente contestado por Marin Mersenne (1588-1648) e Christiaan Huyghens (1629-1695), ao demonstrarem que a propriedade só é válida para pequenas amplitudes.
[15] Expressão em latim que traduzida significa "boa fé". O estudioso John Loose utiliza esse termo na obra *Introdução Histórica à Filosofia da Ciência (1932)* ao expressar a crítica galileana no uso de qualidades secundárias, como cores e gostos, na explicação da Física.
[16] Pablo Rubén Mariconda faz essa afirmação no artigo "Galileu e a ciência moderna", publicado nos Cadernos de Ciências Humanas – Especiaria v.9, n.16, jul./dez., 2006. Rigorosamente, poderíamos dizer que Galileu é um dos principais fundadores da física moderna, ao lado de Descartes, sobretudo. Descartes apresenta uma formulaão mais geral do princípio de inércia, além do princípio de conservação do movimento.
[17] O professor Cristiano Novaes de Rezende do departamento de filosofia da UFG faz interessantes observações e apresenta importantes citações no texto "Notas sobre os Instrumentos Científicos em Galileu" referentes ao Cardeal Roberto Berlamino (1542-1621) com relação a esse posicionamento/recomendação aos adeptos do copernicanismo.

Os desenvolvimentos galileanos levaram a compreensão dos fenômenos naturais através de teorias físico-matemáticas. Os modernos, de um modo geral, buscam regularidades expressáveis, “as chamadas leis da natureza, e o método de certificar-se de sua verdade através da realização de experimentos” (Mariconda, 2006, p. 269). A exemplo das observações realizadas com o desenvolvimento do telescópio[18], as quais derrubaram as teses aristotélicas de perfeição dos astros celestes, constituído de puras esferas perfeitas recheadas de material celestial, Galileu adota a tese de Copérnico[19] ao afirmar as duas hipóteses centrais do heliocentrismo, a centralidade do Sol[20] no universo e o movimento terrestre. Essa tese, por um lado, leva a reinterpretação da experiência do observador na Terra através de um princípio de relatividade óptica do movimento, e por outro, afasta-se da experiência sensível comum, da apreensão direta, cotidiana e se direciona para uma concepção moderna de experimentação, possível de “corrigir a evidente” observação a olho nu astronômica.

Contudo, neste estudo[21], trataremos de um assunto específico presente, tanto no período anterior ao desenvolvimento da luneta por Galileu, bem como nos desenlaces da mecânica após a condenação de 1633[22]. Esse assunto, ganha uma célebre teoria na publicação da obra *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638)[23], na medida em que é enunciada uma lei matemática de queda dos corpos, através da relação entre espaço e um tempo visto como grandeza física. Assim, a cinemática dos

---

[18] Ao aperfeiçoar o instrumento que permitia a visão de objetos distantes, Galileu realiza notáveis observações astronômicas, fornecendo fortes provas contra a basilar cosmologia de Aristóteles. Com “o poder de ampliação de até trinta vezes” (Ronan, 1983, p. 80), a luneta de Galileu permitiu ver montanhas e vales na Lua, assim como existem na Terra. Ele viu uma Lua, como exemplo, nada polida, que apresentava um relevo acidentado e confrontava a ideia de incorruptibilidade dos céus presente na filosofia peripatética.
[19] Copérnico postula que “toda mudança de posição que se vê é devida ao movimento da coisa observada, ou do observador, ou obviamente de um e de outro” (Copérnico, 1984, p. 29). Para o matemático polonês, coisas que estão em movimentos semelhantes na mesma direção, apresentam um aspecto de não movimento entre a coisa observada e o observador.
[20] A rigor, Copérnico coloca o Sol próximo do centro do Universo, para, com isso, ajustar melhor o movimento dos planetas em seu sistema heliocêntrico.
[21] Mesmo compreendendo a ampliação empreendida por Galileu das leis estabelecidas por Kepler, que serão tratadas na segunda parte deste capítulo, através do uso e aperfeiçoamento do telescópio, nesta monografia é mais importante apresentar a ligação entre as leis de Kepler e a cinemática galileana na síntese newtoniana.
[22] *O Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano* (1632) de Galileu é condenado em 1633 pela Santa Igreja Católica e Apostólica. Como consequência, a Igreja não estava mais disposta a aceitar nem mesmo a instrumentalidade do copernicanismo para discussão sobre a mobilidade da Terra. Além disso, ficando proibido de continuar suas pesquisas cosmológicas, o pensador retorna às investigações mecânica do período paduano.
[23] Na obra *Argumentos e demonstrações matemáticas sobre duas novas ciências* Galileu apresenta a ciência envolvida nas teorias matemáticas do movimento uniforme, do movimento uniformemente acelerado e do movimento dos projéteis, como também expõe a primeira ciência sobre a resistência dos materiais. Quando essa obra for citada no texto, será referida por *Discorsi*.

movimentos uniforme e uniformemente variados desenvolvida por Galileu ao longo de sua vida, apresenta em seu período juvenil na cidade de Pisa[24], entre 1589 a 1592, suas primeiras refutações aristotélicas sobre a proporcionalidade dos pesos nas quedas dos corpos. É aqui, historicamente falando, que o filósofo pisano dá o primeiro passo na direção do estabelecimento da lei natural, a regularidade matemática na queda dos corpos. Então, se o "peso" não influencia na queda de um corpo, como a intuição do senso comum e mesmo a filosofia da natureza de Aristóteles postulam, o que determina "a rapidez das quedas, ou seja, que objetos de mesmo material e de pesos diferentes tendem a ter quedas idênticas?" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 39).

Galileu conquista a cátedra de matemática da Universidade de Pádua em 1592. A República Sereníssima de Veneza, financiadora da universidade, contava com uma "atitude de firme independência" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 33), o que assegurava uma cultura de liberdade, com livre pesquisa e expressão. Apesar desse ambiente propício, o pensador se viu obrigado a ministrar aulas particulares em sua casa para "estudantes nobres ou de famílias ricas" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 35), pois sua situação financeira familiar era muito ruim[25]. É possível perceber que a marca da ciência que Galileu começa a desenvolver relaciona a experiência e experimento controlado "com o emprego da matemática para resolver problemas físicos (naturais), contrariando a tradição aristotélica das universidades, para a qual a matemática e a física são disciplinas radicalmente diferentes" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 39).

Pensemos em duas esferas de mesmo material, contudo uma levemente mais pesada[26] que a outra (um clássico objeto para esse tipo de exercício da mente). Seguimos com as duas esferas até o topo de um prédio. Soltamos as duas exatamente ao mesmo tempo na mesma altura. O que acontece? Um mito amplamente conhecido na

---

[24] Os anos em que Galileu ocupa a vaga da cátedra de matemática da Universidade de Pisa tem um papel importantíssimo, pois neles é que se iniciam as refutações a tese aristotélica "de que a velocidade de queda dos corpos é proporcional a seus pesos" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 29). Ao afirmar que "todos os corpos caem, em um meio que não oferece resistência ao movimento, com a mesma velocidade" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 32), Galileu constata uma regularidade natural, contrária a visão inquestionável d'o Filósofo, e que será devidamente experimentada nos próximos anos devotados à ciência da mecânica na cidade de Pádua.

[25] Como curiosidade histórica, conta-se que os anos em Pádua foram muito rendosos à Galileu. Apesar de toda ocupação atribuída, a estadia em Pádua se mostrou precursora de grandes avanços na mecânica através do desenvolvimento técnico-científico. Galileu inventou e patenteou uma bomba d'água operada por um cavalo, construiu "bússolas e um compasso geométrico-militar" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 35), que além de ser um sucesso comercial, era vendido em sua lojinha acompanhado de um manual que explicava o funcionamento do instrumento.

[26] "Pesada" no sentido do senso comum, sem relação com a noção de "peso" das ciências posteriores que se relaciona com a "massa" e a "aceleração da gravidade.

historiografia galileana, é que o pensador teria deixado cair duas bolas de ferro no famoso experimento da Torre de Pisa[27], algo semelhante ao que propomos anteriormente aqui. Nesse experimento, "para espanto da audiência [do público presente], que esperava, de acordo com a suposição aristotélica, que o mais pesado se adiantasse significativamente ao mais leve" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 30), Galileu revelou, ao demonstrar repetidas vezes, que os corpos caem mediante a lei, uma regularidade matemática, que expressa distância percorrida por corpos em queda, isto é, os corpos percorrem espaços proporcionais ao quadrado dos tempos. Aliás, mesmo que muitos historiadores da ciência, a exemplo da "oposição levantada por [Alexandre] Koyré em sua influente e sedutora interpretação de um Galileu platônico, operando matematicamente *a priori*" (Mariconda, 2006, p. 269)[28], o fato é que no *Discorsi* há "o relato da construção do aparato experimental[29] (o plano inclinado, do qual ainda temos um exemplar [...] – no Museu de História da Ciência de Florença) e dos procedimentos experimentais pelos quais Galileu teria comprovado a lei matemática da queda dos corpos" (Mariconda, 2006, p. 49). Vejamos uma parte desse relato:

> "Numa ripa ou, melhor dito, numa viga de madeira com um comprimento aproximado de 12 braças (...) foi escavada uma canaleta com um pouco mais que um dedo de largura No interior dessa canaleta perfeitamente retilínea, para ficar bem polida e limpa, foi colada uma folha de pergaminho que era polida até ficar bem lisa; fazíamos descer por ela uma bola de bronze duríssima perfeitamente redonda e lisa (...) comparando o tempo requerido para percorrer todo o comprimento com o tempo requerido para percorrer a metade, ou os dois terços, ou os três quartos, ou, para concluir, qualquer outra fração, por meio de experiências repetidas mais de cem vezes, sempre se encontrava que os espaços percorridos estavam entre si como os quadrados dos tempos e isso em todas as inclinações do plano" (Mariconda, 2006, p. 49)[30].

[27] Evidentemente, Galileu não realizou esse experimento, pois a bomba de ar/vácuo foi inventa por Robert Boyle (1627 – 1691) na segunda metade do século XVII. O mito se tornou famoso, pois Vincenzio Viviani descreve com elegância esse episódio na biografia sobre Galileu que ele fez para Leopoldo de Medici.

[28] A atitude de experimentação galileana está devidamente ilustrada nos "manuscritos do volume 72 dos arquivos referentes às obras de Galileu preservados na Biblioteca Nacional Central de Florença" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 51).

[29] As quedas em planos inclinados possuem a vantagem de facilitar a visualização dos momentos da queda pelo fato de serem mais lentas que as quedas livres e quedas verticais.

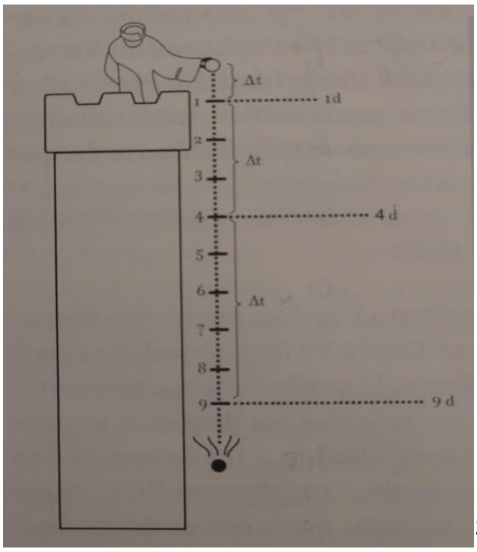
[30] Citação presente na tradução do *Discorsi* feita por L. Mariconda e P. R. Mariconda pela editora Nova Stella em 1988.

Agora, compare com a descrição que Galileu faz, apresentada na obra *Galileu e a nova física*, sobre a argumentação de Aristóteles referente a queda dos corpos:

> "Aristóteles diz: 'Uma bola de ferro de cem libras que cai de uma altura de cem braças chega ao solo antes que uma bola de uma libra tenha descido apenas uma braça" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 282).

Além disso, para Aristóteles, a rapidez de queda de um mesmo corpo "guarda relação inversamente proporcional à densidade desses meios" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 281). Ora, é claro que se fosse assim, afirma Galileu, dentre outras conclusões presentes em seu *Discorsi,* todo corpo desceria em qualquer densidade. Isso é absolutamente falso, e como bem expressa pelo galileano, há corpos que não descem em um meio, mas sobem à superfície, por exemplo, ao comparar o que ocorre com uma bolinha de madeira na água e no ar.

Galileu esquematiza uma teoria físico-matemática do movimento dos corpos. A lei representa que "no primeiro intervalo temporal, o corpo cai a distância 1d; no segundo intervalo temporal, o corpo cai a distância 3d (perfazendo a distância 1d + 3d =4d nos dois intervalos temporais)" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 40), em outras palavras, que ao cair o espaço que esse corpo percorre está relacionado aos números ímpares, isto é, no primeiro intervalo de tempo percorre 1 unidade de espaço, no segundo intervalo percorre 3 unidades de espaço totalizando 4 unidades de espaço após dois intervalos de tempo. Portanto, o espaço total percorrido está proporcionalmente relacionado ao quadrado dos tempos. A figura a seguir expressa o que foi descrito neste parágrafo:



[31]

Prosseguindo em suas pesquisas, Galileu consegue enxergar outro erro de Aristóteles. A concepção aristotélica de movimento dos corpos, que supõe uma "proporcionalidade inversa entre a 'rapidez' de queda de um corpo e a densidade do meio onde ele cai" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 284), não compreende que "todos os corpos caem com a mesma velocidade, se for eliminada a resistência do meio, ou o que é o mesmo, todos os corpos caem, no vazio, com a mesma velocidade" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 285).

A estrutura da cinemática galileana compõe os estudos do movimento uniforme, do movimento uniformemente acelerado e do movimento dos projéteis. Tendo como estratégia metodológica a axiomatização presente nos *Elementos de geometria* de Euclides, o emprego da matemática por Galileu se dá nas "conceituações e usos de grandezas físicas, tais como as de espaço, tempo, velocidade e aceleração" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 292) a partir da Geometria clássica. Sabendo disso, na definição do movimento uniforme, tido como o mais simples por Galileu[32], o movimento constante é "aquele cujos espaços percorridos por um móvel em tempos iguais quaisquer são iguais entre si" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 294). O que é possível concluir, rapidamente se você for um contemporâneo familiarizado com a noção de "velocidade", ou seja, de que nesse tipo de movimento, tem-se que a "velocidade é igual para todos os

[31] Figura extraída da página 40 da obra *Galileu e a nova física* (2ª edição – 2020) dos professores Pablo Rubén Mariconda e Júlio Vasconcelos.
[32] Esse é o motivo pelo qual no *Discorsi* Galileu inicia a exposição de sua teoria do movimento. A ordem a qual nos fala o professor Pablo Rubén se inicia com o movimento uniforme, que é o mais simples, até o movimento dos projeteis, o mais complexo.

instantes”[33]. Como exemplo, vejamos como Galileu chega, a partir de sua teoria, ao primeiro teorema representado a seguir:

> “Teorema I – Proposição I: Se um móvel em um movimento uniforme percorre dois espaços com a mesma velocidade, os tempos dos movimentos estão entre si como os espaços percorridos” (Galilei, 1988, p. 155).

Sendo assim, ele define dois novos axiomas referentes ao movimento uniforme, isto é, o primeiro, o qual afirma que “o espaço percorrido em um tempo maior é maior que o espaço percorrido num tempo menor” (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 295) e o segundo, que percorrer um espaço maior, toma mais tempo que percorrer um espaço menor. Portanto, através desses axiomas:

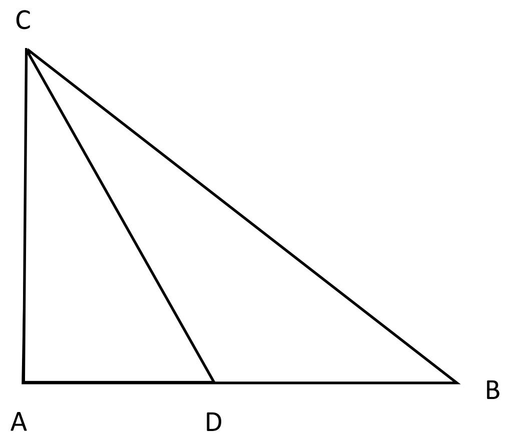
Pelo Teorema I:

Se “Velocidade no espaço percorrido 1 = Velocidade no espaço percorrido 2”;

Então “(tempo 1 : tempo 2) e (espaço percorrido 1 : espaço percorrido 2)”.

Galileu define o movimento uniformemente acelerado de “àquele que, partindo do repouso, adquire em tempos iguais momentos iguais de velocidade” (Galilei, 1988, p. 167). Assim, tem-se como princípio que “os graus de velocidade alcançados por um mesmo móvel em planos diferentemente inclinados são iguais quando as alturas desses planos também são iguais” (Galilei, 1988, p. 167). A figura abaixo, semelhante a presente no *Discorsi*, ilustra o princípio do plano inclinado geometrizado utilizado como explicação desses “graus de velocidade alcançados”:

[33] Pablo Rubén Mariconda nos adverte que é preciso ter cuidado com o emprego do termo “velocidade”, pois há uma certa limitação na “linguagem matemática empregada por Galileu – a teoria euclidiana das proporções – que está impossibilitada de representar a velocidade como uma razão entre espaço e tempo pois só concebe razões entre magnitudes homogêneas, ou seja, entre espaços e espaços ou entre tempos e tempos” (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 295). Para contornar essa limitação e impossibilidade de trabalhar com um conceito que ele não conhecia, Galileu precisou desenvolver alguns axiomas extras. Isso nos leva a enxergar as dificuldades que homens daquele tempo tiveram que destrinchar para criar algo novo.
.



Assim, o que Galileu explica de acordo com a figura anterior é que:

> "os graus de velocidade de um mesmo móvel que desce [a partir do repouso] pelos planos inclinados CA e CD, adquiridos nos pontos finais A e D, são iguais, por ser sua altura CB a mesma; e o mesmo é o grau de velocidade que alcançaria o mesmo móvel, se caísse do ponto C ao ponto B" (Galilei, 1988, p. 167).

Por fim, o movimento uniformemente acelerado para o pensador, como afirma Pablo Rubén Mariconda, é o "movimento naturalmente acelerado" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 298).

Vimos, que a investigação de Galileu tinha, também, um aspecto prático direcionado a técnica além do teórico, onde a marca de sua nova ciência mecânica residia "no uso inovador do método científico, o qual combina a experiência, por meio da experimentação controlada, com o emprego da matemática para resolver problemas físicos, naturais" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 39), contrariando a tradição da filosofia da natureza aristotélica. De fato, Galileu "completa o ideal renascentista de união do conhecimento teórico dos matemáticos com o conhecimento prático dos técnicos" (Mariconda & Vasconcelos, 2020, p. 38), ao colocar unidas matemática e física, distanciando a natureza de uma perfeita hierarquização. Em relação ao movimento dos projéteis[34], Galileu prova que o movimento é parabólico e composto, o qual respeita o princípio de independência entre o movimento retilíneo uniforme segundo a horizontal do movimento e o movimento uniformemente retardado segundo o eixo vertical. Dessa forma, juntamente com o uso de técnicas e reposicionamento da matemática para analisar os resultados, Galileu se aproximou, "embora não tivesse concluído, do que mais tarde

[34] Assunto não tratado neste estudo.

seria chamado de primeira lei do movimento de Newton" (Ronan, 1983, p. 79). Todos esses estudos terão imensa importância para os engenheiros do futuro e, sobretudo, para todo o desenvolvimento da Física clássica.

2.2. Kepler e as três leis do movimento planetário

Johannes Kepler acreditava que Deus tinha criado "o sistema solar de acordo com um padrão matemático" (Loose, 2000, p. 57). Sendo fruto do Renascimento, a orientação pitagórica bem como as correntes neoplatônicas estiveram sempre presentes na vida de Kepler em sua busca por regularidades matemáticas no universo. Quando bem jovem, o pensador foi orientado à carreira eclesiástica por influência de sua família religiosa, mas cedo, aos 17 anos, logo após entrar na Universidade, depois do contato com o sistema de Copérnico, Kepler se afasta do sistema ptolomaico e adere as hipóteses do copernicanismo sobre a posição e movimento terrestres. Além disso, esse pensador foi um dos primeiros a compreender o sistema solar através da chamada "*anima motrix*", espécie de influência de força magnética que o Sol, no centro, exercia sobre os outros planetas e era responsável por um movimento elíptico dos corpos celestes, distinto do necessário e perfeito movimento circular e uniforme. Dessa forma, é possível enxergar nesse breve começo, que as ideias desenvolvidas por Kepler apresentam um modelo que coloca em suspensão muitas concepções aristotélicas da natureza, além de antecipar-se à Newton e sua lei da gravitação universal.

Ptolomeu, que viveu no século II d. C, deixou-nos o *Sistema matemático*[35]. Suma do pensamento astronômico do mundo antigo, "o exato análogo daquele que, no campo das matemáticas, são os *Elementos* de Euclides" (Reale G. , 2017, p. 374), em que, de maneira equilibrada, e, de certa maneira, herdeira dos conhecimentos naturais aristotélicos[36], conseguiu se manter por pelo menos catorze séculos como o tratado astronômico do mundo. É fato que as teses basilares de Ptolomeu, as quais compunham a explicação da realidade concernente ao mundo e à Terra na época de Kepler, posicionou

[35] Do grego transliterado *Mathematiké syntaxis.* Essa suma é mais conhecida por *Almagesto,* nome dado pelos árabes.
[36] É importante notar que apesar do "sistema astronômico [de Ptolomeu ser] basicamente aristotélico, o artifício do epiciclo e deferente", uma combinação de círculos, onde o planeta se move ao longo de um pequeno círculo chamado epiciclo, cujo centro se move em um círculo maior chamado deferente, não se ajustava as noções de esferas cristalinas de Aristóteles. Além disso, essa introdução de elementos se afastou das ideias de Platão, as quais somente o movimento circular uniforme poderia explicar os movimentos celestes.

a matemática como útil ao estudo analítico dos movimentos, "uma vez que a demonstração [para Ptolomeu] tanto aritmética como geométrica é produzida com procedimentos incontestáveis" (Reale G. , 2017, p. 374). Dessa forma, a engenhosidade na apresentação consistente dos dados numérico, usando das noções de epiciclos, deferentes e equantes, mostram um certo racionalismo geométrico na visão do cosmo ptolomaica, cujo os herdeiros, Copérnico, Tycho Brahe (1546 - 1601) e Kepler vão se apoderar e criticar. O mundo ptolomaico continuava sendo composto por um céu e Terra em formato de esfera, onde a Terra é imóvel e se encontra no centro do mundo, contudo, agora, apresenta-se como um modelo geocêntrico baseado em artifícios, os epiciclos e os equantes, por exemplo.

O encontro com Tycho Brahe em 1599, levou Kepler, agora assistente de Tycho, a dar prioridade a dois problemas: a determinação da órbita de Marte e a teoria do movimento da Lua. Tycho foi um astrônomo observacional da época anterior a invenção do telescópio, e suas observações da posição das estrelas e dos planetas alcançaram uma precisão sem paralelo, gerando um grande volume de observações astronômicas de muita qualidade[37] através de longos anos no observatório de Uraniborg construído pelo imperador Frederico II. Logo no início de seus trabalhos com Tycho, Kepler percebeu que essas observações eram valiosas, contudo, somente com a morte inesperada do grande astrônomo em 1601 é que Kepler, através de sua nomeação pelo Imperador Rodolfo ao posto de novo "Matemático Imperial", teve acesso aos dados, anotações e observações de Tycho Brahe. Com os dados observacionais de Tycho, Kepler se lançou exclusivamente aos cálculos e verificação referentes as medidas da órbita de Marte, constatando assim, como um bom neopitagórico, as três famosas leis.

Na obra *Astronomia Nova* (1609), Kepler "narra em detalhes, como em um diário" (Damasio, 2011, p. 6) a solução que ele encontra referente ao problema da retrogradação do planeta Marte[38]. Problema esse que muitos tentavam solucionar, compreender o motivo pelo qual o planeta vermelho parecia andar de tempos em tempos para trás no céu da noite. No começo, Kepler trabalhou com as teorias tradicionais sobre Marte, isto é, o

---

[37] A historiografia diz que usando instrumentos de fabricação própria, Tycho Brahe fez observações com precisão melhores que 1 minuto de arco, isto é, 1/30 do diâmetro aparente do Sol. Ademais, diz-se que "Tycho construiu um catálogo de dados astronômicos muito preciso e com uma continuidade jamais vista antes" (Damasio, 2011, p. 5).

[38] Ptolomeu, com os epiciclos, deferentes e equantes explicava esse movimento, mesmo que de maneira aproximada. De fato, ficou o problema da velocidade, explicado por Kepler. Veja mais em http://www.astro.iag.usp.br/~gastao/Retrogrado/retrogrado.html.

planeta possuía uma órbita circular em volta de um ponto excêntrico em relação ao centro do universo. "De acordo com o próprio Kepler em A*stronomia Nova* foram mais de setenta tentativas" (Damasio, 2011, p. 6) de descrever a órbita de Marte como uma órbita circular excêntrica, aos moldes da origem ptolomaica. Aliás, diz-se que Kepler, quando incumbido desse problema por Tycho, afirmou que o resolveria em oito dias. Tycho morreu e Kepler demorou oitos anos para publicar sua resposta em obra. Nessa obra, a *Astronomia Nova*, é possível perceber pelo menos "três inovações relevantes" (Damasio, 2011, p. 7). Seguindo Copérnico, o pensador colocou o Sol no centro do sistema, desconsiderou o movimento perfeito circular e estipulou que todos os planetas estavam em órbita no mesmo plano. Essas importantes considerações determinaram o alcance do astrônomo em conseguir postular suas três leis universais do movimento planetário.

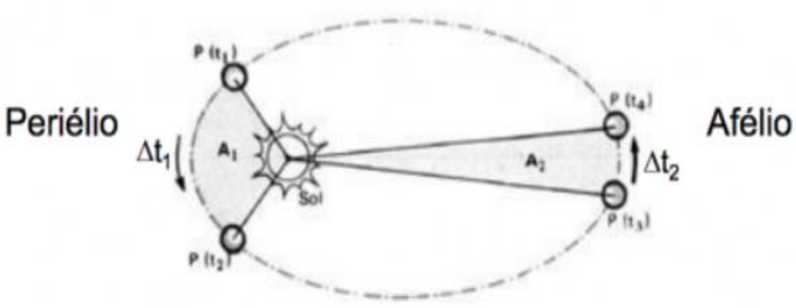
"Somente depois de muitas tentativas é que Kepler resolveu abandonar as órbitas circulares" (Damasio, 2011, p. 7). "Em quatro de julho de 1603, [Kepler] escreve a um amigo dizendo que 'se o formato fosse uma elipse[39] perfeita, todas as respostas que procuro seriam encontradas" (Mourão, 2008), pois já em 1602 ele havia observado que a velocidade orbital de Marte era variável, e o modelo respondia por essa variação, sendo mais lenta longe do Sol e mais veloz próximo àquele astro. Essa constatação levou Kepler, primeiro, a entender que a velocidade do planeta dependia da distância dele em relação ao Sol, e segundo, a qual será conhecida como a 2ª lei de Kepler[40], que a "área varrida pela linha entre o planeta e Sol cobria áreas iguais em tempo iguais" (Damasio, 2011, p. 7).

O método kleperiano na compreensão dessa 2ª lei consistiu em considerar o Sol posicionado no centro e como origem da força que move os planetas. Essa "força", a *anima motrix,* que faz a velocidade aumentar ou diminuir conforme as distâncias desse planeta em relação ao Sol, introduz uma nova visão sobre a natureza dos corpos celestes, os quais, agora, longe de esferas perfeitas de éter e movimentos circulares, possuem leis próprias reguladas pela Física. Mas, se as observações feitas de uma Terra em movimento funcionavam para os outros planetas conhecidos, será que também a órbita da Terra funcionava através de um movimento não uniforme? É nessa investigação, ao colocar genialmente um observador da Terra em Marte, que Kepler, através de "numerosos

[39] A título de curiosidade é interessante saber que o indiano Aryabhata I (476-550) já tinha escrito em seu tratado de astronomia e matemática *Aryabhatiya*, que as órbitas dos planetas em torno do Sol deveriam ser elipses.
[40] Cronologicamente, a 2ª lei foi constatada antes da 1ª lei de Kepler.

ensaios de relações algébricas possíveis" (Loose, 2000, p. 59), baseados nas anotações de Tycho, confirma a Terra como mais um dos planetas. Nada de especial há sobre a Terra, porém há uma confirmação importante, pois ao constatar alguma recorrência sobre a Terra, Kepler poderia generalizar essa constatação para todos os outros planetas[41] através de um método indutivo.

O esquema abaixo representa a lei que Kepler conclui dessa investigação:



Pela figura anterior[42], como Δt1 é igual a Δt2, então A1 é igual a A2, mesmo que a distância percorrida no afélio seja menor que a distância percorrida no periélio, pois como explica a 2ª lei de Kepler[43], a velocidade orbital não é uniforme, mas varia de forma regular.

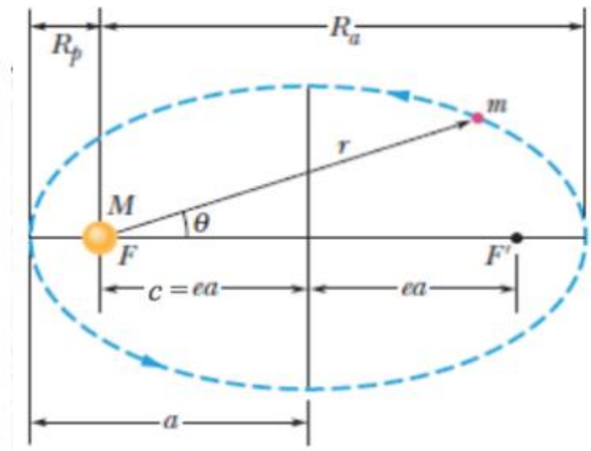
Partindo dessa primeira determinação, Kepler precisou deixar de lado seu neoplatonismo e seu teor neopitagórico[44], pois o círculo como órbita de Marte, não se adequava aos cálculos e nem aos dados observacionais. Escolhendo inicialmente uma órbita de formato oval, Kepler tentou adaptar os dados de que dispunha, mas somente quando considerou[45], após longas tentativas, a órbita como elíptica é que ele verificou a correspondência entre as medidas de Tycho Brahe e seus cálculos. É interessante notar a genialidade de Kepler, pois ele conseguiu abandonar suas convicções e maneira de enxergar o mundo quando necessário. Kepler coloca em questão o axioma aristotélico[46], originado da ideia platônica de perfeição dos movimentos circulares, a partir dos dados

[41] Na época de Kepler somente era conhecido os planetas Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno.
[42] Apesar da figura representar o movimento dos planetas como uma elipse, a enunciação da 1ª lei, a qual define as órbitas dos planetas como elipses em que o Sol está em um dos focos, se dará em momento posterior neste texto, bem como na história da vida de Kepler também.
[43] Conhecida como a "Lei das áreas".
[44] Kepler achava significativo "existirem apenas seis planetas e apenas cinco sólidos regulares" (Loose, 2000, p. 57).
[45] Kepler determinou distintas posições da Terra, a partir de Marte. Com a órbita estudada, Kepler percebeu que se o Sol não estivesse exatamente no centro, os dados ficavam bem ajustados.
[46] Em uma época que Aristóteles ainda era o "Filósofo" perante a Igreja católica.

observacionais e da matemática. Aliás, o pensador enxergava a mecânica celestial semelhante a mecanismos de relógio, isto é, onde os corpos estão envolvidos a mecanismos acionados por forças magnéticas originadas do Sol.

Na *Astronomia Nova* são postuladas outras leis. A conhecida 1ª lei dos movimentos planetários é originária da constatação da 2ª lei, contudo, historicamente, foi consagrada como 1ª lei. Nela, todos os planetas se movem em órbitas elípticas e o Sol está posicionado em um dos focos.

O esquema a seguir auxilia na compreensão do novo sistema de mundo proposto pela 1ª lei de Kepler:



Onde:

M: representa o Sol;

m: representa um planeta;

F e F’: representam os focos da elipse;

Rp: distância do periélio;

Ra: distância do afélio;

a: semieixo maior;

e: c/a – excentricidade da elipse.

Para uma elipse, em qualquer ponto da curva, a soma das distâncias desse ponto aos dois focos é constante. Isto é:

Tomando a posição de “m” como as coordenadas do ponto P(x,y), tem-se:

$$FP + F'P = \text{constante}$$

Além disso, a excentricidade (e), a qual diferencia uma elipse de um círculo, define que quanto menor o valor de “e”, mais a elipse se parece com um círculo. Portanto, a partir desse esquema representativo, podemos ter uma noção dos cálculos e considerações que Kepler faz para chegar à conclusão de que a distância entre o Sol e um planeta varia ao longo da órbita elíptica.

Longos anos[47] após a publicação da *Astronomia Nova* em 1609, Kepler surpreende com a publicação do *Harmonice mundi* em 1618. Para Kepler, em um forte retorno às ideias neopitagóricas e neoplatônicas, a natureza que funciona a partir de números e medidas, apresenta relações numéricas harmônicas nos movimentos planetários, reguladas por uma lei matemática. Dessa forma, na busca pelos planos divinos da natureza, Kepler alcança a conhecida 3ª lei – a lei harmônica – a qual estabelece que planetas com maiores órbitas, movem-se mais lentamente em torno do Sol. Além disso, a expressão dessa lei se dá matematicamente mediante a força que o Sol exerce no planeta, a qual decresce com o aumento da distância planeta-Sol. Observe a relação matemática dessa distância com o período orbital do planeta:

$$P^2 = K \, . r^3$$

Onde, de acordo com o esquema anterior:

P: período orbital do planeta;

K: constante de proporcionalidade;

r: distância média entre o Sol e o planeta.

Por fim, enunciando a 3ª lei temos, a partir das observações e cálculos de Kepler, que o quadrado do período orbital dos planetas é diretamente proporcional ao cubo de sua distância média do Sol.

Vimos que Kepler nunca abandonou sua busca por regularidades matemáticas na natureza. Ao invés da água, do fogo, do ar ou da terra, Kepler e seu neopitagorismo sempre indicaram o número como princípio. Para ele, há uma correlação matemática entre

[47] Refiro-me a “longos anos” na vida de Kepler, pois no período entre as publicações das obras, de 1609 até 1618, aconteceram variados fatos que poderiam ter desviado totalmente o foco dos estudos que o pensador realizou. Contudo, apesar desses contratempos, através de um retorno ao neoplatonismo e ao neopitagorismo, Kepler se orienta à busca dos planos divinos à natureza.

as distâncias dos planetas em torno do Sol e as velocidades orbitais, por exemplo, como provam suas leis dos movimentos planetários. A "lei da área permitiu que Kepler desse conta da não uniformidade do movimento orbital dos planetas, sendo a velocidade menor no afélio e maior no periélio" (Reale G. , 2017, p. 169). Esse exemplo mostra que os cálculos e constatações do pensador vão além da explicação matemática, uma vez que é atribuído uma causa física" na origem dessa questão. Kepler não demonstrou, ou mesmo explicou fenomenologicamente qual o motivo do Sol gerar essa força, mas tudo, para ele, está firmemente baseado na criação do sistema solar por Deus.

Apesar das pesquisas representadas pelos dois momentos neste breve recorte realizado, isto é, a mecânica de Galileu e a astronômica de Kepler apresentarem "uma profunda semelhança entre elas" (Mariconda, 2006, p. 281), pois ambas revelam um claro direcionamento metódico na procura por regularidades matemáticas e formuláveis observadas nos fenômenos naturais, Newton faz um aprofundamento. Cientifico e moderno, além de metódico também, aliado aos dois pensadores brevemente estudados através do movimento de substituição do mundo da qualidade pelo da quantidade, o estilo newtoniano tem o efeito diferencial e marcante de "mostrar como introduzir a análise matemática no estudo da natureza" (Cohen I. B., 2002, p. 171). Na determinação da lei matemática da gravidade universal não será diferente.

Capítulo 3

A síntese de Newton

Newton, além do fato interessante de ter nascido no ano em que morreu Galileu, nos primórdios da teoria da gravitação universal, utilizou-se da "ideia de emanações invisíveis oriundas do Sol" (Schenberg, 1988, p. 21), fruto de interpretação hermética egípcia, a qual hoje veríamos como "absurda". Para ele, as concepções de amor e ódio, oriundas dessas filosofias muito antigas, o levaram a pensar que forças de atração e repulsão dentre os astros influenciavam o que acontecia no que se refere à atração física dos corpos na Terra. O próprio Karl Popper (1902-1994) considera a presença de tendências astrológicas na teoria newtoniana, pois "havia algo que emanava do Sol que era justamente a força de gravitação" (ibid.). Dessa forma, é possível perceber, como afirma o professor Mario Schenberg, que a origem das ideias científicas é "bastante misteriosa" e muitas vezes "não são puramente racionais" (Schenberg, 1988, p. 24). Contudo, é fato que as ideias de Newton compõem a "expressão suprema" (Cohen, 2002, p. 85) de um distinto sistema de mundo sistematizado em números, na Geometria, em medidas exatas e de precisão. Esse novo mundo revelado pelos princípios matemáticos da filosofia natural dos modernos, diferente do mundo da qualidade aristotélico, possui em sua fundamentação duas questões importantes relacionadas a René Descartes (1596-1650). Essas questões, estruturam a crítica newtoniana e precisam ser brevemente vistas antes do aprofundamento da relação entre os dois momentos expostos no segundo capítulo e Newton.

A primeira questão, relaciona-se ao que "talvez seja a maior contribuição de Descartes para a Ciência" (Schenberg, 1988, p. 47), isto é, a criação da Geometria Analítica. Através dela, a noção de espaço ganhou um conceito próprio, desvinculando-se da coisa em si, tornando-se um espaço geometrizado que permite sua constituição através de pontos referenciados por coordenadas. Todavia, para Descartes o espaço é *plenum* de substâncias extensas, ou seja, não há vácuo, pois, só há extensão das substâncias, caracterizada por suas alturas, profundidades e larguras, no espaço. Portanto, corpo (extensão) e espaço são uma coisa só, onde o espaço está repleto de matéria. Em relação a segunda questão, temos a noção de "turbilhão cartesiano" a qual Descartes expressa no *Tratado do Mundo* (1662)[48] e Newton a utiliza na base[49] de sua investigação. Newton mostra que o conceito de imensos redemoinhos cósmicos de matéria[50] não explica os movimentos observados dos astros no céu, nos quais, para Descartes, "os planetas seriam carregados em torno do Sol como gravetos flutuando na água" (Cohen I. B., 2002, p. 309). Além disso, na síntese newtoniana, o espaço, que é "absoluto em sua própria natureza" (Newton, 2022, p. 45), infinito, vazio e homogêneo, existe independentemente dos corpos. Sendo assim, para Newton há união entre "a descontinuidade da matéria e a continuidade do espaço" (Cohen I. B., 2002, p. 91). A tentativa de reconstrução do mundo por Descartes que forneceu a potente Geometria analítica, reconstrução porém excessivamente qualitativa, formou uma importante base crítica da "tão brilhante e bem-sucedida" (Cohen I. B., 2002, p. 88) maneira newtoniana de reconstrução da filosofia da natureza.

Em seus primeiros anos criativos, antes mesmo de se tornar professor universitário no Trinity College[51], o jovem Isaac tinha como interesse o estudo e a "interpretação das Escrituras Sagradas, a cronologia, a teologia, as profecias bíblicas, e ainda a alquimia" (Cohen I. B., 2002, p. 13). Introvertido, "privado de qualquer contato com o pai [que morreu antes dele nascer] e cuidado da mãe [que se casou novamente logo após a morte do pai, deixando-o com os avôs maternos]" (Cohen I. B., 2002, p. 13), Newton, após devorar os "livros que havia descoberto" (Cohen I. B., 2002, p. 19) sobre assuntos de pensadores que tentavam substituir a filosofia natural de Aristóteles, assombrou o mundo com sua energia criativa, principalmente na codificação dos princípios matemáticos da mecânica racional tratados no clássico *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687)[52]. Considerado o primeiro livro, no sentido moderno de física teórica, nele, Newton cultiva "a matemática [...] no que ela se relaciona à filosofia" (Newton, 2022, p. 13), pois "toda a essência da filosofia parece constituir nisso" (Newton, 2022, p. 14).

[48] Já em 1629, Descartes trabalhava nos conteúdos centrais dessa obra os quais estavam ligados às teses do heliocentrismo. Todavia, com a condenação de Galileu em 1633, o pensador abandona os planos de publicá-la. Essa obra só foi publicada após a morte de Descartes que ocorreu em 1650.
[49] O Escólio geral do Livro III, o Sistema de Mundo tratado matematicamente, contém uma dura crítica de Newton a teoria dos vórtices de Descartes.
[50] Nessa teoria, o universo seria encoberto por imensos vórtices de matéria as quais por fricção geraria energia suficiente para a criação da matéria. Além disso, nessa teoria, os sistemas planetários são mantidos pelos vórtices, fixando o sol no centro de um desses turbilhões e mantendo as trajetórias dos planetas em torno dele.
[51] Na maior parte de sua vida, Newton foi professor do Trinity College da Universidade de Cambridge.
[52] A obra *Princípios matemáticos da filosofia natural* será referenciado neste texto por *Principia.*

Portanto, a partir da precisão da Geometria o pensador lançou as bases da mecânica como a essência da filosofia da natureza.

O objetivo dos *Principia* é apresentar, nas palavras de Newton, a "glória da Geometria que, a partir de poucos princípios, trazidos do nada, seja capaz de exibir tantos resultados" (Newton, 2022, p. 14). Esses "poucos princípios", representados por linhas retas e círculos, os quais suas manipulações levam aos incríveis resultados, foram efetivos através de uma maneira científica composta tanto por "um estágio indutivo quanto um dedutivo" (Loose, 2000, p. 94). Através do chamado método da "Análise e da Síntese"[53], o qual Newton afirma ter usado nas investigações dinâmicas presentes no *Principia*, os dois primeiros livros da obra partem dos fenômenos de movimento, afim de "investigar as forças da natureza e, então, dessas forças demonstrar os outros fenômenos" (Newton, 2022, p. 14). Essas análises e sínteses são ilustradas no terceiro livro pela derivação das forças da gravidade "com as quais corpos tendem para o Sol e para os vários planetas" (Newton, 2022, p. 14). Dessas forças, com auxílio de proposições matemáticas, o pensador afirma no Prefácio da primeira edição da obra, que deduz os movimentos da Lua, do mar e dos cometas. É esse o tema deste capítulo, pois a tentativa de proposta-resposta deste estudo, a síntese newtoniana, fruto dos esforços humanos rapidamente representados pelos dois momentos de Galileu e Kepler, passa pelos usos e primeiros desenvolvimentos da matemática na vida de Newton, com o intuito de alcançarmos à ciência da dinâmica, ao fenômeno da gravitação universal, o qual define a atração recíproca entre os corpos de maneira matemática e muda definitivamente a visão sobre a natureza.

A essência dos *Principia*, como afirma Bernard Cohen, "está na demonstração newtoniana de que os fenômenos celestes decorrem de uma força universal de atração" (Cohen I. B., 2002, p. 22). Há, no desenvolver dos três livros que compõem a obra, uma enorme ligação e interação entre a ciência física e a matemática. Além disso, o físico abusa de extrema capacidade intelectual e inventiva para elaborar e executar experimentos que fornecessem significação teórica. Esses enlaces física e matemática,

[53] Newton de certa maneira se opunha ao método de teorizar de Descartes sobre a natureza a partir de princípios metafísicos, ao afirmar a "necessidade de confirmação experimental das consequências deduzidas por síntese, além de enfatizar o valor da dedução de consequências que vão além da evidência indutiva original" (Loose, 2000, p. 94). O físico afirma que "a principal tarefa da filosofia natural é argumentar a partir dos fenômenos, sem construir hipóteses, e deduzir as causas dos efeitos até chegarmos à primeiríssima causa, que decerto não é mecânica" (Cohen I. B., 2002, p. 165).

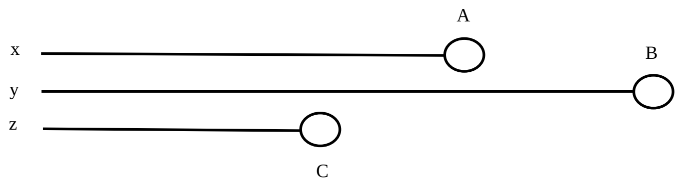
teoria e experimentação resultaram no que Bernard Cohen chama de "a proeza de Newton nos *Principia*" (Cohen I. B., 2002, p. 172), pois são as áreas e atuações diretamente relacionadas ao modo moderno de compreensão matematizada da natureza. Aliás, muitos dos próprios "conceitos matemáticos básicos de Newton derivaram de situações físicas" (Cohen I. B., 2002, p. 173), sendo que muito de seu sucesso, os historiadores da ciência justificam pela " capacidade de reduzir situações físicas complexas à simplicidade matemática" (Cohen I. B., 2002, p. 173), representada por raciocínios regados à criação de curvas geométricas por pontos em movimento. Newton, que fundamentou a noção de gravidade, estava interessado em resolver problemas de matemática pura aplicados à Física.

O jovem físico, em um "breve espaço de aproximadamente doze meses, trabalhando sozinho, absorveu todas as conquistas anteriores da matemática do século XVII" (Cohen I. B., 2002, p. 452), o qual teve como resultado um antigo tratado de outubro de 1666[54]. De nome "Para resolver problemas pelo movimento, as proposições que se seguem são suficientes" (Cohen I. B., 2002, p. 456), o tratado parte de intuições geométricas e demonstra "como manipulações puramente algébricas da equação podem fornecer a solução para outros problemas geométricos" (Cohen I. B., 2002, p. 452). Para ilustrar, temos a proposição 7 a qual expressa uma importante fundamentação[55], de maneira matemática, da Geometria Analítica. Apresentaremos aqui o desenvolvimento feito por Newton dessa proposição, como disposta na obra *Newton: textos, antecedentes, comentários* organizada por Bernard Cohen e Richard Westfall:

> "7. Dada uma equação que expresse a relação entre duas ou mais linhas, x, y, z etc., descritas por dois ou mais corpos em movimento, A, B, C etc. [figura a seguir], a relação entre suas velocidades p, q, r etc. poderá ser assim encontrada: coloquem-se todos os termos de um dos lados, para que eles sejam iguais a zero. E, primeiro, multiplique-se cada termo por tantas vezes p/x quantas x tiver dimensões nesse termo. Segundo, multiplique-se cada termo por tantas vezes q/y quantas y tiver dimensões nele. Terceiro (se houver quantidades desconhecidas), multiplique-se cada termo por tantas vezes r/z quantas z tiver dimensões nesse termo (E, se ainda houver mais quantidades desconhecidas, faça-se o mesmo com

[54] Constituído de proposições, o tratado possui datação de vinte anos antes da publicação da 1ª edição dos *Principia*.
[55] Que uma curva pode ser expressa por uma equação algébrica.

cada quantidade desconhecida). A soma de todos esses produtos será igual a zero. Essa equação fornece a relação entre as velocidades p, q, r etc.



Ou então: Transladem-se todos os termos para um dos lados da equação, multiplicando-os, se forem ordenados de acordo com x, pela progressão

$$etc.\frac{3p}{x}.\frac{2p}{x}.\frac{p}{x}.0.\frac{-p}{x}.\frac{-2p}{x}.\frac{-3p}{x}.\frac{-4p}{x}.etc.$$

e, se forem ordenados pelas dimensões de y, por esta:

$$etc.\frac{3q}{y}.\frac{2q}{y}.\frac{q}{y}.0.\frac{-q}{y}.\frac{-2q}{y}.etc.$$

A soma desses produtos será igual a zero, equação esta que fornece as relações entre suas velocidades p, q etc.

Ou ainda, em termos mais gerais, a equação pode ser multiplicada pelo termo destas progressões:

$$\frac{ap+4bp}{x}.\frac{ap+3bp}{x}.\frac{ap+2bp}{x}.\frac{ap+bp}{x}.\frac{ap}{x}.\frac{ap-bp}{x}.\frac{ap-2bp}{x}.etc$$

e

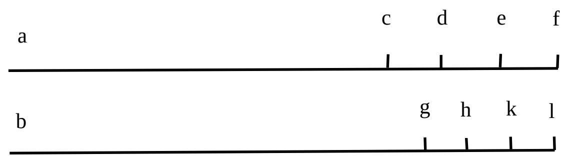
$$\frac{aq+2bq}{y}.\frac{aq+bq}{y}.\frac{aq}{y}.\frac{aq-bq}{y}.etc.$$

(onde a e b significam dois números quaisquer, sejam eles racionais ou irracionais)" (Cohen I. B., 2002, p. 458)

Eis a demonstração dessa proposição feita por Newton:

"Lema. Se dois corpos A, B moverem-se uniformemente, um (ou o outro) de a (ou b) para c,d,e,f (ou g,h,k,l) etc. ao mesmo tempo [figura a seguir], as linhas ac (ou bg), cd (ou gh), de (ou hk), ef (ou kl) etc. serão proporcionais a suas velocidades p (ou q). E, ainda que eles não se movam uniformemente, as linhas infinitamente pequenas que descrevem a cada momento serão proporcionais às velocidades que eles têm ao descrevê-las. E se o corpo A, com a velocidade p, descrever a linha infinitamente pequena (cd=)p x o em um momento, nesse momento o corpo B, com velocidade q, descreverá a linha (gh=) q x o. Pois p:q :: po:qo. Logo, se as linhas descritas forem (ac=) x e (bg=)y num dado momento, elas serão (ad=) x+po e (bh=) y +qo no seguinte

.



Demonstração. Ora, se a equação que expressa a relação entre as linhas x e y for $x^3 - abx + a^3 - dyy = 0$, posso colocar $x + po$ e $y + qo$ no lugar de x e y, porque (segundo o Lema) elas, assim como x e y, significam as linhas descritas pelos A e B. Fazendo isso, resulta

$$x^3 + 3poxx + 3ppoox + p^3o^3 - dyy - 2dqoy - dqqoo = 0$$

$$-abx - abpo$$

$$+a^3$$

Mas $x^3 - abx + a^3 - dyy = 0$ (por suposição). Portanto, resta apenas

$$3poxx + 3ppoox + p^3o^3 - 2dqoy - dqqoo = 0$$

$$-abpo$$

Ou, dividindo-a por *o*, temos

$$3px^2 + 3ppox + p^3oo - 2dqy - dqqo = 0$$

$$-abp$$

Todos aqueles termos em que está *o* são infinitamente pequenos. Omitindo-os, portanto, resta $3pxx - abp - 2dqy = 0$. O mesmo pode ser feito em todas as outras equações.

Daí, observo: primeiro, que sempre desaparecem os termos que não são multiplicados por *o*, sendo eles a equação proposta. Segundo que também desaparecem os termos em que *o* tem mais de uma dimensão, porque são infinitamente menores do que aqueles em que *o* tem uma só dimensão. Terceiro, que, dividindo os termos que ainda restam por *o*, eles terão a forma que devem ter, pela primeira regra da Proposição 7.

De mesma maneira, pode-se demonstrar essa Proposição 7 quando há três ou mais quantidades desconhecidas x, y, z etc" (Cohen I. B., 2002, p. 459).

Newton usa "p" e "q" para expressar o que ele chama de "velocidades instantâneas", pois, como afirma Bernard Cohen, o pensador "não se sentia à vontade com os infinitésimos, que, a seu ver, tinham credenciais geométricas duvidosas" (Cohen I. B., 2002, p. 453). Mas, aliás, pontos com velocidades que se movem onde? Para Newton, o espaço é absoluto e o tempo fluí de maneira uniforme, "sem relação com qualquer coisa externa" (Newton, 2022, p. 45)", sendo pano de fundo de todos os fenômenos do movimento "passível de ser usado para expressar as velocidades com que x e y se alteram" (Cohen I. B., 2002, p. 453). Nesse sentido, é possível através da razão entre as velocidades p/q, conhecidas na notação usada hoje em dia por dx/dy, onde p é "dx/dt" e q é "dy/dt", é encontrar a inclinação, ou tangente, de uma curva em qualquer ponto dado. Além disso, na Proposição 8, Newton mostra como encontrar a área sob as curvas, a chamada quadraturas[56]. Para Cohen, "talvez o passo decisivo na descoberta do método fluxional tenha sido seu reconhecimento de que o método das quadraturas (ou integração) era o inverso[57] do método das tangentes (ou diferenciação)" (Cohen I. B., 2002, p. 453). Portanto, temos que uma linha, a trajetória do ponto em movimento, gera, ao se movimentar, a área, isto é, uma equação algébrica "expressa a natureza de uma curva" (Cohen I. B., 2002, p. 452). Estava assim iniciada "a nova Geometria", analítica, que dá vida ao método fluxional[58], conhecido contemporaneamente por "cálculo infinitesimal".

No *Principia*, Newton utilizou os padrões de raciocínios presentes no tratado de 1666, como "o conceito de taxas de variação instantâneas, a abordagem das áreas e o processo de limites" (Cohen I. B., 2002, p. 454). Aliás, é possível enxergar através da pequena parte apresentada aqui dos tratados de 1666, que Newton amplifica o movimento de deslocamento da procura de modelos mecânicos, físicos, como os turbilhões dos cartesianos, "procurando dar formulações matemáticas aos processos" (Schenberg, 1988, p. 44). Mesmo não utilizando diretamente o cálculo diferencial-integral nos *Principia*, o físico "formulou os princípios gerais da Mecânica dos quais decorrem as formulações das equações diferenciais do movimento dos corpos" (op.cit., p. 47). Aliás, a história da

[56] Área sob as curvas.
[57] Teoria fundamental do cálculo.
[58] Do verbo latino *fluere*.

ciência diz que Newton usou somente da geometria de Euclides, com algumas pitadas do "novo estilo matemático" (Cohen I. B., 2002, p. 455), pois desejava alcançar um maior público, tendo em vista que pouquíssimos conheciam o novo cálculo.

Do cálculo ao aperfeiçoamento da mecânica racional[59] feito nos *Principia*, temos o apogeu da Revolução Científica. Vista como o coração da ciência newtoniana por Bernard Cohen, a ciência da dinâmica, que faz parte da nova filosofia natural moderna, tem suas origens na ciência do movimento galileana. Galileu, como vimos no nosso "primeiro momento estudado", durante as primeiras décadas do século XVII apresentou uma concepção de movimento "radicalmente diferente" (op.cit., p. 271) da aristotélica vigente até então, principalmente em dois pontos: referente a noção de que "a antiga concepção sustentava que um corpo só se move se algum agente o mover" (ibid.) e que há corpos que possuem uma "leveza positiva", composto de elementos que tendiam a "subir" em direção às camadas mais superiores das esferas constituintes do universo. O movimento dos corpos[60], segundo Galileu, ou mesmo o movimento nos planos inclinados como experienciou o pisano, só podem ser devidamente descritos pela matemática, particularmente por uma relação funcional. Todos os corpos são pesados para Galileu e realizam um movimento uniformemente acelerado quando em queda livre, descrita por "aumentos iguais de velocidade são acrescentados em períodos iguais de tempo" (Cohen I. B., 2002, p. 272). Aprofundando-se, temos que as distâncias percorridas num movimento desse tipo, a partir de um repouso, aumenta proporcionalmente ao quadrado do tempo, isto é, "$s = \frac{at^2}{2}$". Por esses poucos fatos matemáticos aqui tratados é que considero a ciência do movimento de Galileu como um primeiro momento importantíssimo para a síntese newtoniana, pois Newton, que "abraçou calorosamente o novo ideal [de ciência]" (Cohen I. B., 2002, p. 272) a qual Galileu, o fundador, é um excelente representante, descreve "coerentemente não apenas os movimentos, mas também as forças que os produziam" (ibid.), tornando a mecânica racional universal, além do projeto de Galileu e dos modernos até então, com capacidade de descrever qualquer movimento matematicamente.

"Em agosto de 1684, uma visita de Edmond Halley (1656 – 1742) levou Newton a redigir um pequeno tratado sobre o movimento orbital, que ficou conhecido como *De*

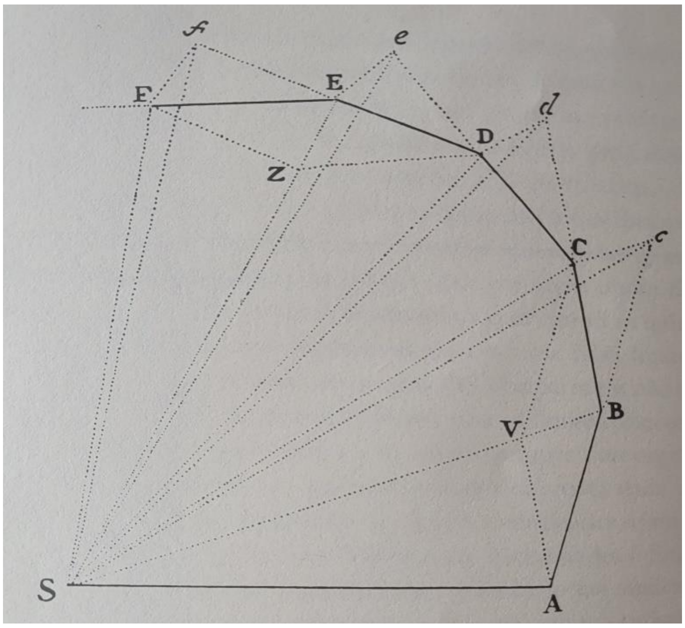
[59] Mecânica racional e ciência da dinâmica são semelhantes na ciência newtoniana.
[60] Galileu se dedicou sobretudo a questão da queda livre dos corpos próximos à superfície da Terra.

motu[61]" (ibid.). Nesse sentido, o encontro entre o astrônomo e o físico, fizeram com que as leis de Kepler ganhassem um novo status. O segundo momento estudado entra aqui, na medida em que as demonstrações de Newton iniciadas no *De Motu* já confirmam as três leis de Kepler. No *De motu* está presente "um conceito central nos *Principia*: o conceito de força centrípeta, que expressa a percepção de que o movimento circular ou orbital é um movimento acelerado e de que um corpo só continuará a se mover numa órbita fechada enquanto uma força que impele para o centro o sustentar nessa trajetória" (op.cit., p. 272). Essa força, ainda sem a generalização matemática, a qual somente será devidamente trabalhada nos *Principia* é a *vis centrípeta* e substitui "a noção confusa, então vigente, de 'força centrífuga" (p.273). No Livro I do *Principia* sobre o movimento dos corpos, Newton demonstra a *vis centrípeta* expressa pela Proposição II – Teorema II através da geometria. Vejamos:

> "Proposição II. Teorema II:
>
> *Todo corpo que se move em qualquer linha curva descrita em um plano, e por um raio traçado até um ponto imóvel ou que se move com um movimento retilíneo uniforme, e descreve, em torno deste ponto, áreas proporcionais aos tempos, é impelido por uma força centrípeta dirigida para aquele ponto".*
>
> Caso 1 – Pois todo corpo que se move em uma linha curva é (pela Lei I[62]) desviado de seu curso retilíneo pela ação de alguma força que o impele. E esta força pela qual o corpo é afastado de seu curso retilíneo e levado a descrever, em tempos iguais os triângulos mínimos iguais SAB, SBC, SCD etc., em torno do ponto imóvel S (pela Proposição XL[63], Livro I. Elementos de Euclides, e Lei II[64]), atua na posição B, de acordo com a direção de uma linha paralela a cC, isto é, na direção da linha BS; e na posição C, de acordo com a direção de uma linha paralela a dD, isto é, na direção da linha CD etc.; e, portanto, atua sempre na direção de linhas que tendem para o ponto imóvel S.

[61] Galileu possui um tratado de mesmo nome, realizado no começo de sua jornada de invenções e descobertas. Esse tratado de Newton é o primeiro rascunho no qual se transformou "nos *Principia* nos dois anos e meio seguintes" (Cohen I. B., 2002, p. 272).
[62] "Lei I: Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele" (Newton, 2022, p. 53).
[63] "Proposição XL – Teorema XIII: Se um corpo, sob a ação de qualquer força centrípeta, é movido de qualquer maneira, e um corpo ascende ou descende em uma linha reta, e suas velocidades forem iguais em qualquer caso de altitudes iguais, suas velocidades serão iguais em todas as altitudes iguais" (Newton, 2022, p. 183).
[64] "Lei II: A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida" (Newton, 2022, p. 54).

Caso 2 – E (pelo Corolário V[65] das Leis) é indiferente se a superfície na qual um corpo descreve uma figura curvilínea está em repouso ou move-se uniformemente para frente em uma linha reta, juntamente com o corpo, a figura descrita e seu ponto S.



Corolário I – Em espaços ou meios não resistentes, se as áreas não forem proporcionais aos tempos, as forças não estarão dirigidas para o ponto no qual os raios se encontram, mas se desviarão dele, em direção à parte para a qual o movimento estiver dirigido, se a descrição das áreas for acelerada, e para longe daquela parte, se a descrição for retardada.

Corolário II – E mesmo em meios resistentes, se a descrição das áreas for acelerada, as direções das forças se desviarão daquele ponto no qual os raios se encontram, na direção da parte para a qual o movimento tende" (Newton, 2022, p. 85).

No mesmo Livro do *Principia*, temos a mesma figura ilustrada anteriormente na Proposição I – Teorema I a qual demonstra a lei kepleriana das áreas, a conhecida 2ª lei

[65] "Corolário V: O movimento de corpos encerrados em um dado espaço são os mesmos entre si, esteja esse espaço em repouso, ou se movendo uniformemente em um alinha reta sem qualquer movimento circular" (Newton, 2022, p. 61).

de Kepler. Veja a matemática, o método, o raciocínio e a geometria empregados pelo físico:

> "Proposição I. Teorema I:
>
> *As áreas que os corpos que giram descrevem por meio de raios traçados até um centro de força imóvel situam-se nos mesmos planos imóveis, e são proporcionais aos tempos nos quais elas são descritas.*
>
> Suponha que o tempo seja dividido em partes iguais, e na primeira parte desse tempo faça o corpo descrever, pela sua força inata, a linha reta AB. Na segunda parte desse tempo, o corpo prosseguiria (pela Lei I), se não fosse impedido, diretamente até c, ao longo da linha Bc igual a AB; tal que, pelos raios AS, BS, cS, traçados até o centro, as áreas iguais ASB, BSc, seriam descritas. Mas quando o corpo chega a B, suponha que uma força centrípeta atue imediatamente com um grande impulso, que, desviando o corpo de sua linha reta Bc, força-o a continuar seu movimento ao longo da linha reta BC. Trace cC paralelamente a BS, encontrando BC em C; e no final da segunda parte do tempo, o corpo (pelo Corolário I[66] das Leis), se encontrará em C, no mesmo plano que o triângulo ASB. Una SC, e, como SB e Cc são paralelas, o triângulo SBC será igual ao triângulo SBc, e, portanto, também ao triângulo SAB. Pelo mesmo argumento, se a força centrípeta atuar sucessivamente em C, D, E etc., e fizer o corpo, em cada partícula de tempo, descrever as linhas retas CD, DE, EF etc., elas irão todas situar-se no mesmo plano; e o triângulo SCD será igual ao triângulo SBC, e SDE a SCD, e SEF a SDE. E, portanto, em tempos iguais, áreas iguais são descritas em um plano imóvel; e, por composição, quaisquer somas SADS, SAFS, daquelas áreas, estão uma para a outra como os tempos nos quais são descritas. Então, faça o número daqueles triângulos aumentar, e suas larguras diminuírem *in infinitum*; e (pelo Corolário IV, Lema III), seu perímetro final ADF será uma linha curva. Portanto, a força centrípeta, pela qual o corpo é continuamente retirado da tangente dessa curva, atuará continuamente; e quaisquer áreas descritas SADS, SAFS, que são sempre proporcionais aos tempos em que são descritas, serão, também neste caso, proporcionais àqueles tempos.
>
> Corolário I – A velocidade de um corpo atraído para um centro imóvel, em espaços livres de resistência, é inversamente como a perpendicular incidente,

[66] "Corolário I: Um corpo, submetido a duas forças simultaneamente, descreverá a diagonal de um paralelogramo no mesmo tempo em que ele descreveria os lados pela ação daquelas forças separadamente" (Newton, 2022, p. 55).

a partir daquele centro, sobre a linha reta que toca a órbita. Pois as velocidades naqueles lugares A, B, C, D, E são como as bases AB, BC, CD, DE, EF, de triângulos iguais; e estas bases são inversamente como as perpendiculares incidentes sobre elas.

Corolário II – Se as cordas AB, BC de dois arcos sucessivamente descritos em tempos iguais pelo mesmo corpo, em espaços livres de resistência, são completadas em um paralelogramo ABCV, e a diagonal BV desse paralelogramo, na posição que esta adquire finalmente quando aqueles arcos são diminuídos *in infinitum*, é estendida para ambos os lados, ela passará através do centro de força.

Corolário III – Se as cordas AB, BC, e DE, EF, de arcos descritos em tempos iguais, em espaços livres de resistência, são completadas nos paralelogramos ABCV, DEFZ, as forças em B e E estão uma para a outra na razão final das diagonais BV, EZ, quando aqueles arcos são diminuídos *in infinitum*. Pois os movimentos BC e EF do corpo (pelo Corolário I das Leis) são compostos dos movimentos Bc, BV e Ef, EZ; mas BV e EZ, que são iguais a Cc e Ef, na demonstração desta Proposição, foram gerados pelos impulsos da força centrípeta em Be E, e são, portanto, proporcionais àqueles impulsos.

Corolário IV – As forças pelas quais os corpos, em espaços livres de resistência, são retirados de movimentos retilíneos e redirecionados para órbitas curvilíneas, estão uma para a outra como os senos versos de arcos descritos em tempos iguais; cujos senos versos tendem para o centro de fora e bisseccionam as cordas quando aqueles arcos são infinitamente diminuídos. Pois tais senos versos são as metades das diagonais mencionadas no Corolário III.

Corolário V – E, portanto, aquelas forças estão para a força da gravidade como os mencionados senos versos estão para os senos versos perpendiculares ao horizonte daqueles arcos parabólicos, descritos pelos projéteis no mesmo tempo.

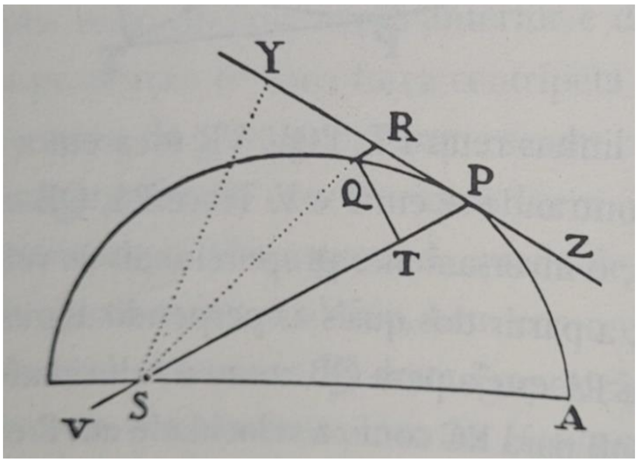
Corolário VI – O mesmo se aplica (pelo Corolário V das Leis) quando os planos nos quais os corpos são movidos, juntamente com os centros de forças localizados naqueles planos, não se encontram em repouso, mas movem-se uniformemente para a frente em linhas retas” (Newton, 2022, p. 83)

É possível perceber que, nessas poucas proposições apresentadas, além das outras que compõem as primeiras proposições no Livro I dos *Principia*, Newton inicia as deduções de seu sistema, o qual será resultado da síntese permitida pela cinemática do movimento de Galileu e as leis dos movimentos planetários de Kepler. Há claramente uma distinção entre as leis matemáticas que descrevem os fenômenos e a causa física dos fenômenos na síntese newtoniana. Kepler, "fora muito além dessa explicação matemática, uma vez que havia atribuído uma causa física a essa variação, ao presumir uma força magnética" (Cohen I. B., 2002, p. 169), entretanto, nunca foi capaz de relacionar as órbitas elípticas a essa força magnética, ou mesmo de "encontrar uma demonstração fenomenológica ou empírica independente de que o Sol exercesse realmente esse tipo de força sobre os planetas" (ibid.). Newton, por outro lado, através de um método, o qual torna a ciência moderna pensada e possível, de caráter experimental, baseada na indução, quantitativa e "não meramente observacional, [a qual], por conseguinte, poderia levar a leis e princípios matemáticos" (Cohen I. B., 2002, p. 164), inicia os *Principia* com a atitude de investigar sobre "quais seriam as propriedades matemáticas de uma força – quaisquer que fossem suas causas ou seu modo de ação, ou qualquer que fosse o tipo dessa força – capaz de produzir a lei das áreas" (Cohen I. B., 2002, p. 170).

Essa atitude é reconhecida em Newton, na medida em que ele investigou as "propriedades da gravitação como causa de fenômenos (sem nenhum compromisso declarado com a causa da gravitação)" (Cohen I. B., 2002, p. 167). O físico "conseguiu correlacionar a aceleração dos corpos em queda na superfície da Terra com a força que sustenta a Lua em sua órbita, e mostrar que a mesma força, variando inversamente com o quadrado da distância do centro da Terra, regia os dois movimentos" (Cohen I. B., 2002, p. 311). Contudo, a argumentação de Newton não demonstra a realidade de uma força física. Precisamos pensar que o resultado matemático, a força representada por um vetor orientado para o centro e em proporção inversa ao quadrado da distância, apenas orienta um possível e futuro entendimento de propriedades físicas dessa força. O fato é que Newton mostrou como introduzir "a análise matemática no estudo da natureza, de um modo particularmente fecundo" (Cohen I. B., 2002, p. 171), isto é, ele "se serviu de uma nova matemática que ele mesmo vinha forjando e que talvez se oculte do observador superficial por trás da máscara externa do que parece ser um exemplo de geometria no estilo grego tradicional" (Cohen I. B., 2002, p. 171). E, portanto, "constituíram um grande avanço em relação à física de Galileu" (Cohen I. B., 2002, p. 167) e de Kepler.

"Newton concluiu que todas as forças centrípetas que variam inversamente com o quadrado da distância são uma só" (Cohen I. B., 2002, p. 311). A Proposição VI –

Teorema V do *Principia* expressa essa força que mantém um corpo em qualquer movimento curvo.

> "Proposição VI. Teorema V:
>
> *Em um espaço livre de resistência, se um corpo girar em qualquer órbita em torno de um centro imóvel, e em um tempo mínimo descreve qualquer arco então nascente; e supondo que o seno verso daquele arco é traçado bisseccionando a corda, e estendido de forma a passar pelo centro de força: a força centrípeta no meio do arco será diretamente como seno verso e inversamente como o quadrado do tempo.*
>
> Pois o seno verso em um tempo dado é como a força (pelo Corolário IV, Proposição I); e, aumentando-se o tempo numa razão qualquer, por ser o arco aumentando na mesma razão, o seno verso será aumentado no quadrado daquela razão (pelos Corolários II e III, Lema XI[67]), e, portanto, é como a força e o quadrado do tempo. Divida ambos os lados pelo quadrado do tempo, e a força será diretamente como o seno verso, e inversamente como o quadrado do tempo.
>
> E o mesmo pode ser facilmente demonstrado pelo Corolário IV, Lema X[68].
>
> 
>
>
> Corolário I – Se um corpo P girando em torno do centro S descreve uma linha curva APQ, a qual é tocada por uma linha reta ZPR em qualquer ponto P; e a partir de qualquer outro ponto Q da curva, QR é traçado paralelamente à

[67] "Lema XI: a subtensa (corda de um arco) evanescente do ângulo de contato, em todas as curvas que possuem curvatura finita no ponto de contato, é como o quadrado da subtensa do arco vizinho" (Newton, 2022, p. 78).
[68] "Lema X: as distâncias que um corpo descreve impedido por qualquer força finita, seja essa força determinada e imutável, ou continuamente aumentada ou diminuída, estão, exatamente no início do movimento, uma para a outra, como os quadrados dos tempos" (Newton, 2022, p. 77).

distância SP, encontrando a tangente em R; e QT é traçado perpendicularmente à distância SP; a força centrípeta será inversamente como o sólido $\frac{SP^2.QT^2}{QR}$, se o sólido for considerado naquela grandeza que finalmente adquire quando os pontos P e Q coincidem. Pois QR é igual ao seno verso do dobro do arco QP, cujo meio é P: e o dbro do triângulo SQP, ou SP.QT, é proporcional ao tempo no qual esse arco duplo é descrito; e, portanto, pode ser usado para representar o tempo.

Corolário II – Por um raciocínio semelhante, a força centrípeta é inversamente como o sólido $\frac{SY^2.QP^2}{QR}$; se SY for uma perpendicular traçada a partir do centro de força sobre PR, a tangente da órbita. Pois os retângulos SY.QP e SP.QT são iguais.

Corolário III – Se a órbita for um círculo, ou tocar ou cortar um círculo concentricamente, isto é, formar com um círculo o menor ângulo de contato ou seção, tendo a mesma curvatura e o mesmo raio de curvatiura no ponto P; e se PV for uma corda deste círculo, traçada a partir do corpo através do centro de força; a força centrípeta será inversamente como o sólido $SY^2.PV$. Pois PV é $\frac{QP^2}{QR}$.

Corolário IV – O mesmo sendo suposto, a força centrípeta é diretamente como o quadrado da velocidade, e inversamente como aquela corda. Pois a velocidade é reciprocamente como a perpendicular SY, pelo Corolário I, Proposição I.

Corolário V – Assim, se qualquer figura curvilínea APQ for dada, e nela um ponto S também for dado, para o qual uma força centrípeta é dirigida continuamente, aquela lei da força centrípeta poderá ser encontrada, pela qual o corpo P será continuamente retirado de um curso retilíneo e, sendo mantido no perímetro daquela figura, descreverá a mesma por uma revolução contínua. Isto é, deveremos obter, por cálculo, o sólido $\frac{SP^2.QT^2}{QR}$ ou o sólido $SY^2.PV$, inversamente proporcionais a esta força" (Newton, 2022, p. 91).

Assim, a matemática newtoniana mostra que é necessário e qual o valor matemático de uma *vis centrípeta* direcionada continuamente para algum centro. Contudo, novamente lembrando, há uma "imensa diferença entre a suposição de um conjunto de condições matemáticas das quais Newton deriva a lei de Kepler e a afirmação de que isso constitui uma descrição física da realidade da natureza" (Cohen I. B., 2002,

p. 170). Apesar da estreita ligação entre Física e Matemática nos desenvolvimentos de Newton, essa separação, derivada da diferença entre as propriedades matemáticas e as propriedades físicas, permitiu Newton tratar devidamente o problema da gravitação, a exemplo, da constatação de que se a força varia "diretamente com a distância ou inversamente ao quadrado da distância, a ação gravitacional da esfera será a mesma como se toda a massa da esfera estivesse concentrada no centro geométrico" (Cohen I. B., 2002, p. 172). Esse modo de raciocínio matemático-físico é central na discussão sobre os feitos newtonianas, na medida em que permitiu a construção de experimentos e sistemas imaginativos.

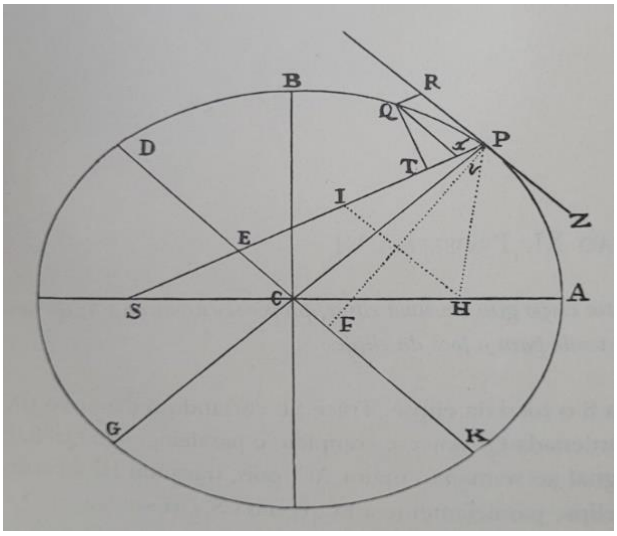
A Proposição XI do *Principia* propõe-se, nas palavras de Newton, "encontrar a lei da força centrípeta que tende para o foco da elipse" (Newton, 2022, p. 101), a qual demonstra a 1ª lei de Kepler e se aplica a outros fenômenos. A essa força, "se aplicou uma palavra já conhecida pelos filósofos da Europa Ocidental, *gravitas*" (Cohen I. B., 2002, p. 311). Vejamos a expressão matemática geométrica da força centrípeta que mantém um corpo em qualquer movimento curvo descrita por Newton:

> "Proposição XI. Problema VI:
>
> *Se um corpo gira em uma elipse, propõe-se encontrar a lei da força centrípeta que tende para o foco da elipse.*
>
> Seja S o foco da elipse. Trace SP cortando o diâmetro DK da elipse em E, e a ordenada Qv em x; e complete o paralelogramo QxPR. É evidente que EP é igual ao semi-eixo maior AC: pois, traçando HI a partir do outro foco H da elipse paralelamente a EC, como CS, CH são iguais, ES e EI serão também iguais; de forma que EP é a metade da soma de OS e PI, isto é (por causa das paralelas HI e PR, e dos ângulos iguais IPR e HPZ), de OS e PH, que, tomados juntos, são iguais ao comprimento de todo o eixo 2AC. Trace QT perpendicular a SP, e chamando o *latus rectum*[69] principal da elipse de L ou $\frac{2BC^2}{AC}$, teremos
>
> L.QR : L.Pv = QR : PV = PE : PC=AC : PC, também
>
> L.Pv : Gv.Pv = L : Gv, e, eGv.Pv : Qv^2 = PC^2 : CD^2.
>
> Pelo Corolário II, Lema VII, quando os pontos P e Q coincidem,

[69] "*Latus rectum* ou corda focal mínima é a corda levantada pelo foco perpendicularmente ao eixo principal da cônica" (Newton, 2022, p. 101).

$Qv^2 = Qx^2, e\ Qx^2\ ou\ Qv^2 : QT^2 = EP^2 : PF^2 = CA^2 : PF^2$, e (pelo Lema XII) = $CD^2 : CB^2$. Multiplicando-se os termos correspondentes das quatro proposições e simplificando, teremos

$L.QR : QT^2 = AC.L.PC^2.CD^2 : PC.Gv.CD^2.CB^2 = 2PC : Gv$, visto que $AC.L = 2BC^2$.Porém, se os pontos P e Q coincidirem, 2PC e Gv serão iguais. E, portanto, as quantidades L.QR e QT^2, proporcionais àquelas, também serão iguais. Multiplique aquelas quantidades iguais por $\frac{SP^2}{QR}$, e $L.SP^2$ será igual a $\frac{SP^2.QT^2}{QR}$. Assim (pelos Corolários I e V, Proposição VI), a força centrípeta é inversamente como $L.SP^2$, isto é, inversamente como o quadrado da distância SP.



O mesmo de outra maneira:

Uma vez que a força tende para o centro da elipse, pela qual o corpo P pode nela girar, está (pelo Corolário I, Proposição X) como a distância CP do corpo a partir do centro C da elipse, trace CE paralelamente à tangente PR da elipse; e a força pela qual o mesmo corpo P pode girar em torno de qualquer outro ponto S da elipse, se CE e OS interceptam-se em E, será como $\frac{PE^3}{SP^2}$ (pelo Corolário III, Proposição VII); isto é, se o ponto S for o foco da elipse, e, portanto, PE for dado como SP^2 reciprocamente" (Newton, 2022, p. 101).

A síntese newtoniana tem como resultado um sistema de mundo fundamentado no princípio da força gravitacional matematizada, como apresentada anteriormente, universal. Essa palavra, "universal", "afirma que toda partícula de matéria do Universo atrai todas as outras partículas de matéria com uma força precisamente definida" (Cohen

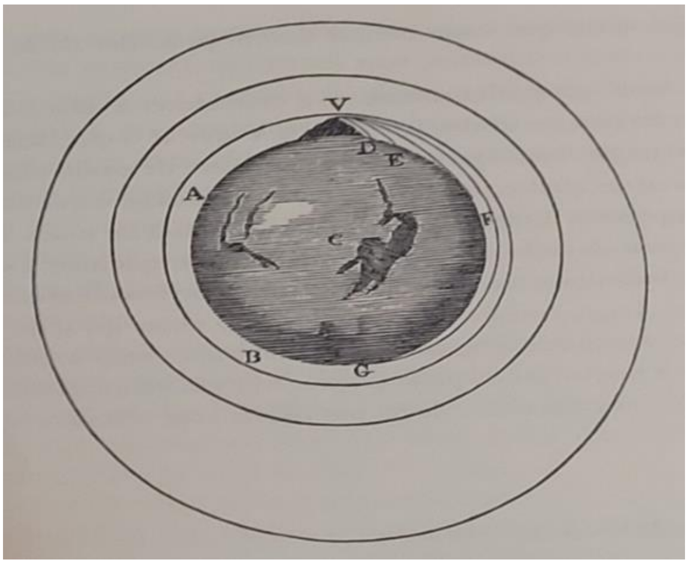
I. B., 2002, p. 310). No Livro III dos *Principia*, Newton aplica os fundamentos matemáticos da gravitação universal estudada nos livros anteriores, demonstrando que "essa atração podia ser identificada com a causa do peso na superfície da Terra" (Cohen I. B., 2002, p. 310). O pensador afirma na introdução que falta demonstrar a partir dos mesmos princípios da filosofia, os princípios matemáticos apresentados, a estrutura do seu Sistema de mundo. Totalmente distinto do mundo aristotélico, afirmado e estruturado a partir das ideias de Galileu e de Kepler, o terceiro livro foi, primeiramente, escrito "num método popular", pois, assim, sua ideia poderia alcançar muitos, fazendo a noção da força gravitacional matematizada em direção ao Sol ser conhecida por muitos. Contudo, por algumas questões e decisões, Newton publicou o Livro III no formato de proposições matemáticas, afim de se fazer necessário o conhecimento anterior das proposições presentes nos primeiros livros. "Depois da morte de Newton, publicou-se uma tradução inglesa de um manuscrito de sua autoria, em latim, que havia circulado em cópias manuscritas" (Cohen I. B., 2002, p. 310), o qual, dando-lhe o título de *De Mundi Systemate* permitiu que a primeira versão do Livro III que Newton sentiu-se receoso em publicar ganhasse certa fama.

Através da prosa, separada por itens, Newton, aborda nesse terceiro livro mais popular, os mesmos passos essenciais da tese "que levou ao princípio da gravitação universal" (Cohen I. B., 2002, p. 311), pautando as leis dos movimentos planetários para apresentar a força de valor matemático inversamente proporcional ao quadrado da distância em relação ao Sol. Veja como Newton postula a ação das forças centrípetas em uma linguagem mais popular no seu Sistema de Mundo:

> "3. A ação das forças centrípetas
>
> O fato de que, por meio de forças centrípetas, os planetas possam ser retidos em certas órbitas é facilmente compreendido se considerarmos os movimentos dos projéteis. Uma pedra que é projetada pela pressão de seu próprio peso é deslocada de seu curso retilíneo, o qual perseguiria pela sua projeção inicial, descrevendo uma linha curva no ar e através deste percurso arqueado logo atinge o solo. E quanto maior for a velocidade com a qual é projetada, mais longe irá antes de cair na Terra. Podemos, portanto, supor que a velocidade seja a tal ponto aumentada que a pedra descreveria um arco de 1, 2, 5, 10, 100, 1000 milhas antes de cair na

Terra, ou mesmo que, excedendo os limites da Terra, passasse ao espaço sem sequer tocá-la.

Seja AFB a superfície da Terra, C o seu centro, VD, VE, VF as linhas curvas que um corpo descreve quando projetado em uma direção horizontal do topo de uma alta montanha, cada vez com maior velocidade; e, como os movimentos celestes são pouco retardados pela pequena ou nenhuma resistência dos espaços onde se realizam, para manter a paridade dos casos suponhamos que não haja ar ao redor da Terra ou que ao menos ele tenha pouco ou nenhum poder de resistência. E pelo mesmo motivo que o corpo projetado com a menor velocidade descreve o arco menor VD, e com maior velocidade o arco maior VE, e aumentando a velocidade ele desloca-se para F e G, se a velocidade for progressivamente aumentada, ele irá além da circunferência da Terra, retornando à montanha de que foi lançado.



E, como as áreas descritas com este movimento por um raio traçado ao centro da Terra são (pela Proposição I, Livro I, Princípios Matemáticos) proporcionais aos tempos em que são descritas, sua velocidade, ao retornar à montanha, não será menor do que a inicial; e, retomando a mesma velocidade, o corpo descreverá repetidamente a mesma curva, conforme a mesma velocidade, o corpo descreverá repetidamente a mesma curva, conforme a mesma lei.

Mas se agora imaginarmos a projeção de corpos na direção de linhas paralelas ao horizonte a partir de alturas maiores, de 5, 10, 100, 1000 ou mais milhas, ou ainda de tantos semidiâmetros da Terra, esses

> corpos, de acordo com suas diferentes velocidades e diferente fora da gravidade em diferentes alturas, descreverão arcos concêntricos com a Terra, ou diversamente excêntricos, e permanecerão girando nessas órbitas assim como os planetas em suas órbitas" (Newton, 2020, p. 337).

No *Sistema de Mundo*, Newton mostrou também que os cometas são como corpos semelhantes aos planetas, descrevendo ´órbitas em torno do Sol, "sob o controle da mesma força de atração que mantinha os planetas em suas órbitas" (Cohen I. B., 2002, p. 312). Apesar de evitar especular sobre as causas físicas diretas da gravidade, além de assegurar que não introduzia "hipóteses fictícias ou imaginárias" (Cohen I. B., 2002, p. 312) em sua visão de natureza no Sistema de mundo, na proposição 25 do Livro III popular, Newton afirma que "as atrações entre os corpos provém "da natureza universal da matéria" (Newton, 2020, p. 357). Já, nos últimos anos de vida, Newton retoma essa especulação ao afirmar na introdução da *Óptica* que o "próprio Deus causava diretamente a gravidade" (Cohen I. B., 2002, p. 313). O fato é que nos *Principia*, Newton "resume-se a estabelecer a quantidade e propriedades desta força" (Newton, 2020, p. 337) matemática, a fim de que seja possível mostrar que os planetas e corpos no geral possam ser retidos em órbitas. No fundo, Newton buscou mostrar as bases matemáticas da filosofia natural, independente da origem e causas físicas dessa força misteriosa direcionada ao Sol. Essa distinção entre as causas da atração e os fenômenos de atração é um fator importante, a qual permitiu a síntese newtoniana do sistema de mundo. Tamanho foi o feito de Newton, que a lei da gravitação universal se tornou "um modelo que outros campos de pensamento tentaram imitar" (Cohen I. B., 2002, p. 313). A exemplo do método seguro newtoniano na descoberta da lei matemática, expresso através da Geometria e ilustrado pelas poucas proposições apresentadas, diversos estudiosos dos assuntos humanos, principalmente nos séculos XVII e XVIII, "perseguiram o objetivo de encontrar análogos dessa lei que pudessem trazer níveis similares de racionalidade e compreensão à vida econômica e política" (Cohen I. B., 2002, p. 313). Um caso emblemático é a chamada "Revolução kantiana"[70] na tentativa de salvar a possibilidade

[70] Chamo aqui de "Revolução kantiana" a ideia de que, agora, a partir do entendimento que nos trouxe Immanuel Kant (1724-1804) da atividade do sujeito, parte do mundo que aparece ao sujeito é fruto da atividade desse próprio sujeito. Esse novo paradigma supera a noção de "coisa pensante" de Descartes, a qual coloca o sujeito somente como um contemplador dos objetos, somente afetado por esses objetos. O sujeito kantiano molda de certa forma a experiência dos objetos, a qual resulta no conhecimento sobre esse mesmo objeto.

de uma ciência da Metafísica, a qual baseada na Revolução copernicana e nos desmembramentos da Revolução newtoniana, resume bem os paradigmas influenciados por Newton.

Conclusão

Com Newton, a Física estava definitivamente matematizada, fundada especialmente numa álgebra. O cálculo o qual Newton desenvolveu era capaz de aprofundar questões impossíveis à Geometria clássica dos gregos. Os padrões de raciocínio matemático desenvolvidos pelo físico, apresentam-se nos *Principia* como um novo estilo matemático, uma nova maneira de entender a natureza, uma nova filosofia da natureza. Os avanços significativos na teoria e no uso das séries infinitas, do uso de infinitésimos, da geometria analítica no desenvolvimento do estudo de curvas entre outras noções, são frutos dos dois momentos tratados, na medida em que no *Principia*, a partir de demonstração matemática, Newton estabelece a existência de fenômenos de atração entre os corpos que já estavam, pelo menos, suspeitos em Galileu e Kepler. Essa força de atração, *gravitas*, definida matematicamente, núcleo da ciência da dinâmica, ganha maiores contornos no *Sistema de Mundo*, a exemplo da concepção de que os cometas são corpos semelhantes aos planetas, e descrevem trajetórias orbitais orientadas pela mesma força atrativa que o Sol exerce nos planetas.

Galileu e Kepler são representantes importantes da síntese newtoniana de matematização da natureza, na medida em que questionam o universo aristotélico, altamente hierarquizado e fundado no senso comum, o qual tinha uma física estruturada na natureza dos movimentos naturais, em que a queda dos corpos, por exemplo, era expressa pelo natural movimento dos corpos pesados, os quais seguem mais rápidos em direção ao centro quanto mais pesado for o corpo. Os desenvolvimentos das ideias desses dois pensadores, postos em síntese por Newton, resultam no conjunto de princípios matemáticos da filosofia natural dos corpos dinâmicos. Aliado a noção de que os fenômenos da natureza são produtos de interações mecânicas, a cinemática do movimento de Galileu e as três leis planetárias de Kepler, permitiram um grande impulso em questões futuras sobre a natureza e sua compreensão matematizada, através do uso do cálculo diferencial e integral, como os efetuados desenvolvimentos pós-Newton na teoria eletromagnética e na criação da Física do Campo[71]. Definitivamente, Newton e a compreensão da natureza haviam "deixado para trás" o mundo de Aristóteles.

[71] Com os desenvolvimentos da teoria da gravidade pós Newton, surge a noção de "campo", o qual pode ser definido como uma grande física que possui um valor de associação em relação aos pontos do espaço. Percebe-se que ao falarmos de "campo gravitacional", estaremos nos referindo a algo extremamente matematizado, o qual atribui uma potencialidade em cada ponto do espaço.

Referências bibliográficas

ARISTÓTELES. ***Acerca Del Cielo***. Tradução espanhola de Miguel Candel. Madrid: Editorial Gredos S.A, 1996.

ARISTÓTELES. **Física I-II**. Prefácio, introdução e comentários: Lucas Angioni. Campinas: Editora da Unicamp, 2009.

BARNES, J. **Aristóteles.** Tradução Adail Ubirajara Sobral e Maria Stela Gonçalves. São Paulo: Edições Loyola, 2001.

BERTI, E. **As razões de Aristóteles**. Tradução Dion Davi Macedo. São Paulo: Edições Loyola, 2002.

Campos, A., & Ricardo, É. C. A natureza da região celeste em Aristóteles. **Revista brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 4, p. 1-6, out 2014.

COHEN, I. B. **O nascimento de uma nova física**. São Paulo: EDART, 1967.

_____. Introdução geral. In: I. B. Cohen, & R. S. Westfall. **Newton: textos, antecedentes e comentários.** Tradução Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto: EDUERJ, 2002, p. 11-18.

_____. Parte 1: Filosofia Natural. In: I. B. Cohen, & R. S. Westfall. **Newton: textos, antecedentes, comentários**. Tradução Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto: EDUERJ, 2002, p. 19-144.

_____. Parte 2: Método Científico. In: I. B. Cohen, & R. S. Westfall. **Newton: textos, antecendentes, comentários.** Tradução Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto: EDUERJ, 2002, p. 145-187.

_____. Parte 5: Mecânica Racional. In: I. B. Cohen, & R. S. Westfall. **Newton: textos, antecendentes, comentários**. Tradução Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto: EDUERJ, 2002, p. 271-308.

_____. Parte 6: O Sistema do Mundo. In: I. B. Cohen, & R. S. Westfall. **Newton: textos, antecedentes, comentários.** Tradução Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto: EDUERJ, 2002, p. 309-362.

_____. Parte 9: Matemática. In: I. B. Cohen, & R. S. Westfall. **Newton: textos, antecedentes, comentários.** Tradução Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto: EDUERJ, 2002, p. 451-496.

COPÉRNICO, N. **As revoluções dos orbes celestes**. Tradução A.D. Gomes & G. Domingues. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1984.

DAMASIO, F. O início da revolução científica: questões acerca de Copérnico e os epiciclos, Kepler e as órbitas elípticas. **Revista Brasileira de Ensino de Física,** v. 33, n. 3, p. 1-7, out 2011.

ÉVORA, F. R. Natureza e Movimento: um estudo da física e da cosmologia aristotélicas. **Cad. Hist. Fil. Ci**., Campinas, Série 3, v. 15, n. 1, p. 127-170, jan/jun. 2005.

GALILEI, G. **Duas novas ciências, incluindo : Da força de percussão.** Tradução e notas, Letizio Mariconda e Pablo R. Mariconda. São Paulo: Nova Stella, 1988.

KOYRÉ, Alexandre. O significado da síntese newtoniana. In: I. Cohen, & R. S. Westfall. **Newton: textos, antecedentes, comentários**. Tradução Vera Ribeiro. 1ª edição. Rio de Janeiro: Contraponto: EDUERJ, 2002, p. 84-100.

KUHN, T. S. ***The Copernican Revolution***. Massachusetts: Harvard University Press, 1957.

LOOSE, J. **Introdução Histórica à Filosofia da Ciência**. Tradução Borisas Cimbleris. Belo Horizonte: Ed Itatiaia, 2000.

MARICONDA, P. R. (jul./dez de 2006). Galileu e a ciência moderna. **Cadernos de Ciências Humanas - Especiaria**, v. 9, n. 16, p. 267-292, jul/dez., 2006.

MARICONDA, P. R. As mecânicas de Galileu: as máquinas simples e a perspectiva técnica moderna. **Scientiae Studia**, v.6, n.4, p. 607-638, 2008.

Mariconda, P. R., & Vasconcelos, J. **Galileu e a nova física.** São Paulo: Associação Filosófica Scientiae Studia, 2020.

MOURÃO, R. **Kepler, a descoberta das Leis do Movimento Planetário**. São Paulo: Odysseus, 2008.

NEWTON, I. O Sistema do Mundo. In: I. Newton. **Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural - Livros II e III**. Tradução Fábio Duarte Jorly. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2020, p. 333-410.

_____. Axiomas ou Leis do movimento. In: I. Newton. **Principia: Princípios Matemático de Filosofia Natural - Livro I**. Tradução Trieste Ricci, Leonardo Gregory Brunet, Sônia Terezinha Gehring, Maria Helena Curcio Célia. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2020, p. 53-68.

_____. Definições. In: I. Newton. **Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural - Livro I**. Tradução Trieste Ricci, Leonardo Gregory Brunet, Sônia Terezinha Gehring, Maria Helena Curcio Célia. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2020, p. 39-51.

_____. Livro I: O movimento dos corpos. In: I. Newton. **Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural - Livro I**. Tradução Trieste Ricci, Leonardo Gregory Brunet, Sônia Terezinha Gehring, Maria Helena Curcio Célia. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2020, p. 71-297.

_____. Prefácio de Newton à Primeira Edição. In: I. Newton. **Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural - Livro I**. Tradução Trieste Ricci, Leonardo Gregory Brunet, Sônia Terezinha Gehring, Maria Helena Curcio Célia. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2020, p. 13-15.

REALE, G. **Filosofia: Antiguidade e Idade Média, vol. 1.** Tradução José Bortolini - Ed. rev. e ampl. São Paulo: Paulus, 2017.

RONAN, C. **História Ilustrada da Ciência vol. I**. Tradução Jorge Enéas Fortes. São Paulo: Círculo do Livro, 1983.

RONAN, C**. História Ilustrada da Ciência Vol. III**. Tradução Jorge Enéas Fortes. São Paulo: Círculo do Livro, 1983.

SCHENBERG, M. **Pensando a Física**. São Paulo: Nova Stella Editorial, 1988.