

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS HUMANAS, LETRAS E ARTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA – MESTRADO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: HISTÓRIA DA FILOSOFIA MODERNA E
CONTEMPORÂNEA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**A gravitação universal na filosofia da natureza de
Isaac Newton**

Valdinei Gomes Garcia

Curitiba
2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS HUMANAS, LETRAS E ARTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA – MESTRADO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: HISTÓRIA DA FILOSOFIA MODERNA E
CONTEMPORÂNEA

Valdinei Gomes Garcia

A gravitação universal na filosofia da natureza de Isaac Newton

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Filosofia. Curso de Mestrado em Filosofia do Setor de Educação, Letras e Artes da Universidade Federal do Paraná. Orientador: Prof. Dr. Eduardo Salles de Oliveira Barra.

Curitiba
2010

à minha sobrinha, Giovana G. Garcia

Agradeço de modo muito especial:

Ao Prof. Dr. Eduardo Salles de Oliveira Barra, por ter me orientado com profissionalismo, cuidadosa dedicação nestes anos de estudos e por ter me recebido com grande amizade no mestrado.

Ao Prof. Dr. Paulo Vieira Neto, pelas ocasiões em que discutimos algumas das frações da filosofia newtoniana.

À Prof^a. Dr^a. Maria Adriana Cappello, que gentilmente participou de minha banca na qualificação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia da Universidade Federal do Paraná.

Ao Alex Calazans e à Veronica Ferreira Bahr Calazans, pelos quais nutro profunda admiração e souberam, como ninguém, dedicar-me intensa amizade.

Aos grandes e ternos amigos que fiz em Curitiba, Mide e Werner, que jamais se apagarão de minha memória.

À minha amiga Caroline Mitrovitch, com quem sempre pude contar em momentos especiais.

Ao Everton Carlos dos Anjos, que, em sua amizade muito especial, sempre me ensina algo novo sobre a vida.

Ao meu amigo Peterson Razende Camparotto, a quem devo muito do que sei hoje.

Aos professores Max Rogério Vicentini, Patrícia Coradin Sita e Paulo Ricardo Martines, aos quais só posso chamá-los de mestres.

À minha família, em especial minha mãe (Jacira Ap. de Oliveira), meu avô (Joaquim Alves de Oliveira) e minha irmã (Josiane G. Garcia), que sempre acreditaram em minha formação e ofereceram intenso apoio e carinho.

ÍNDICE

RESUMO.....	08
ABSTRACT.....	09
INTRODUÇÃO.....	10
CAPÍTULO I – As origens da mecânica (racional) newtoniana: <i>conatus</i> como efeito dos movimentos verdadeiros	
1.1 – Os primeiros estudos mecânicos de Newton.....	15
1.2 – Os primeiros estudos sobre a dinâmica dos movimentos circulares.....	24
CAPÍTULO II – A doutrina do <i>movimento, tempo e espaço absolutos</i>.	
2.1 – A crítica de Newton à “doutrina do movimento” de Descartes: as primeiras idéias sobre os conceitos de <i>movimento, tempo e espaço absoluto</i>	32
2.2 – Os conceitos de <i>Espaço e Corpo</i> como causas de geração do <i>movimento</i>	40
2.3 – A consolidação dos conceitos de <i>movimento, tempo e espaço absolutos</i> nos <i>Principia Mathematica</i>	47
CAPÍTULO III – A gravitação universal e o <i>Sistema de Mundo</i> newtoniano.	
3.1 – Dos princípios da gravitação universal.....	57
3.2 – A relação entre <i>gravidade (peso)</i> e <i>matéria (massa)</i> : A <i>gravidade</i> como um “princípio universal”.....	64
3.3 – A <i>gravitação universal</i> como fundamento do <i>Sistema do Mundo</i> newtoniano.....	75
APÊNDICE À SEÇÃO 3.3: Newton e as hipóteses.....	81
CONCLUSÃO.....	85
BIBLIOGRAFIA.....	89

RESUMO

Esta pesquisa apresenta um estudo sobre o conceito de *força gravitacional* na filosofia da natureza de Isaac Newton. O presente texto foi elaborado a partir dos argumentos desenvolvidos por Newton para defender esse conceito em sua obra mais importante, o *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687). Será visto que, em tais argumentos, Newton restringe o conceito de força gravitacional a partir de um tratamento matemático, que ele próprio elaborou em sua obra. Por outro lado, Newton argumentava, como físico, sobre a necessidade de fornecer uma explicação adequada das leis e conceitos relacionados à experiência. Assim, o programa de Newton deve conter uma explicação de como os princípios matemáticos, dos dois primeiros livros, poderiam ser aplicados ao mundo dos fenômenos, tarefa a qual ele se dedicou no Livro III do *Principia Mathematica*. Por último, é necessário dizer que o conceito de força gravitacional na filosofia da natureza de Newton só pode nos oferecer um resultado significativo quando analisado de um duplo ponto de vista, a saber, o da mecânica racional, isto é, sua “ciência do movimento”, e o da filosofia da natureza, isto é, do “sistema de mundo”.

Palavras-chave:

1. Filosofia da Natureza – 2. Princípios Matemáticos – 3. Força Gravitacional

ABSTRACT

This survey presents a study on the concept of *gravitational force* in Isaac Newton's philosophy of nature. The present text was elaborated from the arguments developed by Newton to defend that concept in his most important work, the *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687). It will be seen that, in such arguments, Newton restricts the concept of gravitational force to a mathematical treatment, which he himself elaborated in his work. On the other hand, Newton argued, as a physicist, on the need to provide an adequate explanation of laws and concepts related to the experience. Accordingly, the Newton's program must contain one explanation of how mathematical principles, from the first two books, could be applied to the world of phenomena, to which he devoted himself in Book III of *Principia Mathematica*. At last, it is necessary to say that the concept of gravitational force in Newton's philosophy of nature can only offers us a meaningful result when analyzed from a double point of view, namely, that of rational mechanics, i.e., his "Science of movement", and that of philosophy of nature, i.e., of the "world system".

Keywords:

1. Philosophy of nature – 2. Mathematical Principles – 3. Gravitational force.

INTRODUÇÃO

Isaac Newton, ao formular e concluir que os corpos atraíam uns aos outros e que diversos fenômenos mecânicos do Sistema Solar decorriam diretamente da ação de uma única *força de atração*, levou a cabo a mais importante e fundamental generalização da Revolução Científica do Século XVII, revolução essa que promoveu a característica central da ciência que dominou o pensamento científico até o final do século XIX. A força de atração gravitacional foi, assim, definida matematicamente: *diminui em proporção direta com o quadrado da distância entre dois corpos, e sua quantidade entre dois corpos quaisquer é diretamente proporcional ao produto de suas massas* (NEWTON, 1987, p. 635). Esse é o princípio da *gravitação universal*. A palavra “gravitação” refere-se, obviamente, à atração; “universal” indica, por sua vez, que *toda* partícula de matéria no Universo atrai *todas* as demais partículas de matéria, com uma força precisamente definida nos termos mencionado acima.

Ao realizar a redação final do Livro III do *Principia*, Newton altera categoricamente o seu padrão argumentativo, em virtude da natureza distinta de seus objetivos. Assim, com a introdução dos *Fenômenos* (Livro III), a questão se deslocou do plano puramente matemático ou mecânico (Livros I e II) para o plano da *filosofia natural*. Antes ele afirmara que as *atrações* entre os corpos “provêm da natureza universal da matéria”. Provavelmente, pouco antes de 1687, ele percebeu que isso não era tudo o que queria dizer e desejava insistir na distinção entre a demonstração matemática de que o mesmo tipo de *atração* deveria existir e a especulação sobre a natureza dessa *atração*. Voltando nossa atenção para a Introdução e o Escólio da seção XI do Livro I – da *Mecânica Racional* –, ambos os textos estabeleceram essa distinção. Eis o que ele afirmara: “Mas essas proposições devem ser consideradas puramente

matemática; e, portanto, deixando de lado todas as considerações físicas [...]” (*Idem*, pp. 329 e 360). No Escólio Geral do Livro III do *Principia*, Newton expressou, entretanto, a distinção que veio a se tornar sua forma definitiva, em poucas linhas ele diz: “Mas, até aqui, não pude descobrir a causa dessas propriedades da gravidade a partir dos fenômenos, e não invento hipóteses”. (NEWTON, 1987, p. 785).

Neste mesmo Escólio, surgem três condições suficientes para a existência da *gravidade*, que bastam para a filosofia natural e experimental. Primeiro, é suficiente “que a gravidade realmente exista”; segundo, que ela “aja de acordo com as leis que propusemos”; terceiro, que “seja suficiente para explicar todos os movimentos dos corpos celestes e de nossos mares”. Nesse sentido, surgiram dois conjuntos inteiramente diferentes de questões. Um deles era técnico, isto é, elaborar, da maneira como Newton os via, os detalhes da mecânica celeste gravitacional, e, desse modo, obter melhores resultados para os problemas da mecânica celeste, tais como o movimento da Lua. Essas atividades podem ser descritas como a estruturação do *Principia*, no nível operacional. O outro conjunto de questões, totalmente diverso, era explicar a gravitação e sua forma de ação, ou descobrir a “causa” da gravitação (COHEN & WESTFALL, 2002, p. 183).

Na perspectiva conceitual da filosofia natural do século XVII, o conceito de força gravitacional que Newton introduziu através do *Principia* redirecionou tanto o nível dos conhecimentos físicos e matemáticos, quanto o nível da concepção metafísica acerca dos eventos da natureza. Newton propôs novos problemas e soluções através de uma metodologia rigorosa e original. A introdução do conceito de *força gravitacional* fez com que Newton dotasse seu sistema de filosofia natural de vários argumentos, a fim de que, justificando os resultados que alcançou, principalmente na mecânica celeste, mostrasse a necessidade de reconhecer a existência das *forças da natureza*.

Muito embora os contemporâneos de Newton tenham elaborado severas críticas à sua filosofia natural – uma delas encontra-se em forma de cartas, nas quais Leibniz discute com Clarke, um teólogo newtoniano, vários assuntos relacionados à teologia natural¹ –, no Escólio Geral do *Principia* Newton insistiu em que sua dinâmica da gravitação e seu *Sistema do Mundo* podiam ser aceitos, mesmo sem ele ter dito nada sobre a “causa” da gravitação. Embora a física newtoniana possua, em alguns momentos, um caráter metafísico, este não se apresenta como uma parte constitutiva ou integrante de sua ciência, não se insere em sua estrutura formal. Um traço característico do *Principia* é a ligação íntima entre matemática pura e a física do movimento, lugar em que os aspectos da filosofia natural (isto é, os fenômenos) são “reduzidos” a princípios matemáticos e, por último, novamente aplicados a problemas físicos, conforme Newton se expressara textualmente no Escólio da seção XI do Livro I.

Certamente que, para Newton, bem como para os seus contemporâneos, existiam problemas fundamentais acerca de *como* as forças poderiam agir a enormes distâncias no espaço vazio. Entretanto, o método pelo qual Newton se guiou permitiu a ele explorar as propriedades de forças, como a gravitacional, do ponto de vista da matemática, em vez da física. Newton pôde desenvolver as leis de ação de uma força semelhante à gravitação em um análogo matemático do mundo da natureza. Nessa maneira de proceder, revelou-se um processo bastante rigoroso e original, pois ele pôde deixar de lado, num primeiro momento de seu estágio investigativo, todas as preocupações referentes ao modo *como* essas forças poderiam agir.

No Livro III do *Principia*, entretanto, Newton passa dos “modelos matemáticos”, idealizados por ele, para conceitos físicos, fornecendo provas da existência de uma *força*

¹ LEIBNIZ. G. W. *Correspondência com Clarke* (trad. Carlos Lopes de Mattos). São Paulo : Abril Cultural, 1979.

de gravitação universal que agiria de acordo com as leis que ele havia descoberto. A idealização de seu “modelo matemático” revelou-se um análogo muito próximo do universo físico, mas não idêntico. O próximo ponto importante a ser considerado por Newton no *Principia* era, então, explicar *como* ocorrem as interações gravitacionais entre os corpos, a partir de um único princípio de força.

Sob essa perspectiva, nossa análise e interpretação pressupõem percorrer parte do caminho que Newton traçou, não apenas ao longo do *Principia*, mas também em textos anteriores a essa obra, para chegar ao conceito definitivo de força de gravitação universal e a relação que Newton estabeleceu entre este e os fenômenos naturais. Conseqüentemente, as discussões serão dirigidas no sentido de apresentar o processo pelo qual Newton pensou, desde os seus primeiros estudos, em edificar uma nova física e reelaborar os fundamentos da *mecânica racional*.

O trabalho dissertativo aqui desenvolvido não tem pretensões de trazer um enfoque original dentro do aspecto conceitual da longa tradição de historiadores e filósofos da ciência que se debruçaram sobre a filosofia da natureza de Newton. O que se pretende é, sim, reconstruir e analisar os conceitos, as soluções e as propostas metodológicas formulados pelo autor do *Principia* em meio às suas tentativas de sustentar e articular o conceito de *força gravitacional* – um esforço que pode ser rastreado retrospectivamente, ao menos, desde o *De Gravitatione* até o *Principia*².

Assim, inicia-se nos **Capítulos I e II** uma discussão da longa reflexão que Newton fez a respeito dos fundamentos da física de Descartes, particularmente sua “doutrina do movimento”. Para tanto, minha atenção inicial se voltará para alguns

² Sendo esse o propósito desse trabalho investigativo, é natural que o elenco das discussões e análises interpretativas selecionado tenha se guiado, grandemente, pelo roteiro de estudos percorrido por meu orientador, sobretudo na sua dissertação *Omnis Philosophiae Difficultas: O Conceito de Força na Filosofia Natural de Newton* (BARRA, 1994.), ora no sentido de me aproximar e estender as suas discussões, ora distanciando-me conceitualmente delas por outros caminhos e possibilidades.

textos da juventude de Newton e, talvez, ao mais importante dentre eles, o *De Gravitatione et Aequipondio Fluidorum*, onde se constata o quanto Newton encontrava-se envolvido com problemas propostos pelo cartesianismo. Ver-se-á, a partir de uma longa nota introdutória no *De Gravitatione*, que Newton faz várias especulações a respeito dos conceitos de *espaço*, *tempo*, *corpo* e *movimento* de Descartes, os quais ele conclui serem inadequados para a finalidade de prover os fundamentos das “ciências mecânicas”.

No capítulo **Capítulo III**, trata-se de elaborar um estudo dedicado à análise do conceito de força gravitacional, pois a este se destina todas as investigações mecânicas de Newton na elaboração do *Principia* e no conceito de gravitação universal encontra-se a expressão mais acabada da teoria newtoniana de força. O argumento de Newton acerca da teoria da força de gravitação universal deverá ser analisado em três momentos distintos: (I) analisar o aspecto físico, lugar em que Newton estabelece a força gravitacional como a causa dos movimentos planetários; (II) o ontológico, lugar em que ele procura explicar a natureza da ação gravitacional que os corpos exercem entre si; (III) por último, o metodológico, lugar em que ele oferece as razões pelas quais se deve aceitar que a gravidade de fato existe, ainda que as investigações de ordem ontológica nada tenham acrescentado conclusivamente à compreensão da natureza da sua ação.

I – AS ORIGENS DA MECÂNICA (RACIONAL) NEWTONIANA: *CONATUS* COMO EFEITO DOS MOVIMENTOS VERDADEIROS

1.1 – OS PRIMEIROS ESTUDOS MECÂNICOS DE NEWTON

Os primeiros estudos que Newton realizou sobre mecânica na década de 1660 estavam ligados à filosofia natural de Descartes, principalmente à sua “doutrina do movimento”. Ao longo da segunda metade dessa década, Newton redigiu uma série de estudos, que foram todos anotados num único caderno de notas, hoje conhecido entre os comentadores pelo título de *Waste Book*³. Nesse manuscrito encontra-se uma série de estudos sobre as colisões (dos corpos) e o movimento circular, onde é possível constatar a influência do *Principia Philosophiae* (1644) de Descartes. No início da quarta parte do *WasteBook* (IId) Newton enuncia seus primeiros *axiomas e proposições*, afirmando que:

- “1. Se uma quantidade antes movia-se, ela nunca cessará de se mover, a menos que seja impedida por alguma causa externa.
2. Uma quantidade mover-se-á sempre em uma linha reta (não mudando a determinação nem a velocidade de seu movimento), a menos que uma causa externa a desvie.”(HERIVEL, 1965, p. 141)

Um pouco mais à frente, Newton inicia novos estudos antecedidos por uma série de novos axiomas, com destaque para o primeiro:

“Ax: 100: Todas as coisas devem preservar-se naturalmente naquele estado em que se encontram, a menos que sejam interrompidas por alguma causa externa, por isso os axiomas 1 e 2. Uma vez que um corpo é movido, ele manterá sempre a mesma velocidade, quantidade e determinação do seu movimento.”(*Idem*, p. 153)⁴.

³ Para as discussões referentes às primeiras idéias de Newton sobre mecânica, utilizo a versão do *Waste Book* publicada por HERIVEL. J. (*The Background to Newton's Principia*. 1965).

⁴ É importante notar como os axiomas acima se assemelham com as duas primeiras “Leis do Movimento” que Descartes enuncia na Segunda Parte do *Principia Philosophiae*, diz ele: **Primeira Lei** - “que cada coisa em particular continua no mesmo estado tanto quanto lhe seja possível, e que jamais ela o modifica a não ser pela colisão com outras coisas. Assim, observamos cotidianamente que, quando alguma parte dessa matéria é quadrada, ela permanece sempre quadrada, se não sobrevém algo de outra parte que mude sua figura; e que, se ela está em repouso, ela não começa a se mover por si mesma. (...) De modo que, se um corpo tenha começado a mover-se, devemos concluir que continuará a mover-se em seguida, e que ele jamais interrompe seu movimento por si mesmo.”(Artigo 37; 1989, p. 84); **Segunda Lei** - “que cada parte da matéria, em sua particularidade, não tende jamais a continuar a se mover

Ainda que os três axiomas acima possuam uma grande semelhança com as Leis do Movimento de Descartes, Newton promove uma mudança fundamental ao tratar *quantitativamente* as “causas externas” responsáveis pelas mudanças no estado de *movimento* ou de *repouso* dos corpos. O essencial para ele foi, a partir dos princípios e noções físicas de Descartes, ter desenvolvido nesse período um “modelo geométrico” que lhe possibilitou analisar as *forças* do movimento dos corpos nas colisões e calcular de modo mais preciso as ações das “causas externas”. Além do mais, esse “modelo de análise” permitiu-lhe tratar de um outro tipo de movimento essencial em suas futuras investigações: o *movimento circular* (dos corpos).

Naquele período de investigação, Newton empregou o termo “força” pela primeira vez, associando-o as “causas externas”. Ele a definiu como sendo “a pressão ou a compressão de um corpo sobre outro” e adiante, no Axioma 3, estabelece a *proporcionalidade entre força e a mudança de movimento produzido por ela*: “Se o corpo *bacd* adquire o movimento *q* pela força *d*, e o corpo *f* o movimento *p* pela força *g*, então $d:q::g:p$ ” (HERIVEL, 1965, pp. 138 e 150).

A razão acima reúne do mesmo lado movimento (*q* e *p*) e força (*d* e *g*), denotando que Newton, como um bom geômetra euclidiano (que respeita o princípio da homogeneidade das grandezas dispostas em relação de proporcionalidade) e um bom cartesiano, não faz ainda nenhuma diferenciação entre tais propriedades da matéria:

segundo linhas curvas, mas segundo linhas retas, ainda que várias de suas partes sejam constantemente obrigadas a se desviar, porque elas encontram outras em seus caminhos e porque, assim que um corpo se move, forma-se um círculo ou um anel de toda a matéria que é movida conjuntamente.”(Artigo 39, p. 85/6). Por outro lado, há duas situações que se configuram diferentes na discussão que Newton estabelece, e que em Descartes teriam sido tratadas distintamente na primeira e segunda leis. A primeira situação surge quando Newton enuncia num único axioma (o Axioma 100) a conservação da “velocidade” e da “determinação” dos movimentos. A segunda é que Newton não se refere, num primeiro momento, à “conservação” do estado de *repouso*, ainda que mais à frente explicará que o repouso seja considerado um “estado inercial”; e nem mesmo relaciona a conservação do movimento à conservação da “figura” do corpo.

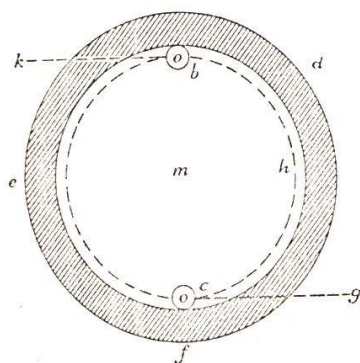
“força” é apenas uma maneira de falar, sendo ontologicamente idêntica ao movimento. No entanto, os termos irão mudar drasticamente depois do *De Gravitatione*.

A presença desse modelo de análise no *Waste Book* tornar-se-á importante nas investigações que Newton realizará a respeito dos *movimentos circulares* e da atuação de uma *força*, uma vez que nesse manuscrito ele explica as mudanças de movimento geradas pelas colisões dos corpos com base no pressuposto conceitual de que “causa externa” dessas mudanças deve ser chamada de “força ou poder capaz de impedir ou mudar a continuação dos corpos em seus estados” (HERIVEL, 1965, p. 156).

O problema de determinar a medida do “*conatus* [tendência, esforço] dos corpos que giram para afastarem-se do centro de seus movimentos”, que Descartes tratou de investigar na Terceira Parte do *Principia Philosophiae*, tornou-se objeto de interesse de Newton entre os anos de 1665 a 1670. Em seu tratado, Descartes postula que os corpos tendem a afastarem-se dos *centros*, em torno dos quais são movidos circularmente, em decorrência da “segunda lei da natureza”, que estabelece a determinação retilínea de todos os movimentos realizados sem nenhum impedimento externo.

Descartes introduz essa noção em virtude do que ele mesmo afirma um pouco mais a frente: “Pois, esta é uma lei da natureza, que todos os corpos que se movem numa órbita, na medida em que dependem de si mesmos, afastam-se do centro de seus movimentos” (Art. 55, vers. latina-1982-p.108). Tal disposição dos corpos que giram para afastarem-se de seus respectivos centros, Descartes denominou de *conatus recedendi a centro* (esforço para afastar-se do centro). Segundo ele, esse *esforço* que surge nos corpos está intimamente ligado ao movimento ao qual foram submetidos e que produz seu efeito apenas se o corpo não for impedido de mover-se em linha reta por alguma outra causa.

O objetivo de Descartes era identificar esse “esforço” que um corpo realiza para se afastar do centro com a “força de seu movimento”. O aspecto mais significativo dessa discussão promovida por Descartes, que impulsionará Newton poucos anos depois em suas pesquisas, é o problema de determinar *quantitativamente* a tendência dessa “força” presente nos corpos. O texto cartesiano sugere uma maneira pela qual se pode determinar a quantidade dessa “força” ao mencionar que quanto mais veloz uma pedra é girada por uma funda, mais retesada ficará a corda que a prende. A tensão originada apenas da força pela qual a pedra se *esforça* para se afastar do centro de seu movimento evidencia a quantidade dessa força (Art. 59, versão latina, 1982, p. 112).



[figura 01]

Ainda que Newton tenha se ocupado dessa discussão, ao ponto de considerar quase todas as possibilidades abertas por Descartes, ele não cuidará de seguir de modo rigoroso a sugestão referida acima; ao contrário disso, fará uma interessante adaptação do modelo das interações dos corpos nas colisões para o tratamento *quantitativo* do *conatus a centro*. É no próprio manuscrito, citado há pouco, que Newton faz as primeiras referências ao *conatus recedendi a centro* analisado por Descartes. No Axioma 20, ele afirma: “Se uma esfera *oc* [fig. 01] move-se circularmente sobre a

superfície côncava de um corpo cilíndrico *edf* em torno do centro *m*, ela deverá pressionar *def* (...)” (HERIVEL, 1965, 147/8). Pois, quando a esfera *oc* está em *c* “a determinação do seu movimento é na direção de *g*” e, se o corpo *edf* cessasse de detê-la, “ela mover-se-ia continuamente na linha *cg* (pelos Axiomas 1 2) obliquamente a partir do centro *m*”. Deste modo, o corpo *edf* mantém a esfera *oc* equidistante do centro *m* em virtude de “um impedimento ou reflexão contínua dela a partir da linha tangente em todos os pontos do círculo *cbh*”. Portanto, segue-se aquilo que foi afirmado acima, pois “o corpo *edf* não pode impedir e encurvar a determinação do corpo *oc*, a menos que eles continuamente pressionem-se entre si” (*Idem*, p. 148).

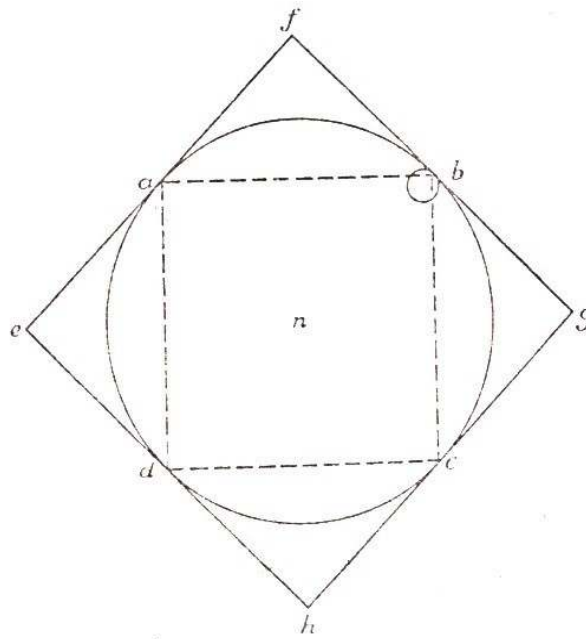
A demonstração do Axioma 20 torna-se ainda mais importante por se referir às noções utilizadas no tratamento das colisões: *reflexão*, *impedimento* e *pressão*; além dos próprios princípios que regulam os movimentos dos corpos nas colisões (Axiomas 1 e 2). O interessante é notar que Newton irá derivar desse modelo das colisões dos corpos o sentido físico das noções e princípios que emprega na análise dos movimentos circulares. É, pois, nesse sentido que ele apresenta o Axioma 21: “Portanto, isto mostra que todos os corpos movidos circularmente realizam um esforço (*endeavour*) a partir do centro em torno do qual são movidos; caso contrário, o corpo *oc* não pressionaria continuamente *edf*” (*Idem*). A “pressão” que o corpo *oc* exerce sobre o corpo *edf*, cuja resistência a esse *conatus* de *oc* impede seu movimento através da tangente *cg*, é a única e principal evidência para o *conatus a centro* que Descartes havia postulado.

Após ter definido o significado físico desse “esforço”, o próximo passo será a tentativa de avaliá-lo *quantitativamente*. O Axioma 22 procura cumprir tal exigência: “A força total através da qual o corpo *oc* esforça-se a partir do centro *m*, na metade de

uma revolução, é de mais que o dobro da força capaz de gerar ou destruir seu movimento, isto é, mais que o dobro da força com a qual é movido” (*Idem*).

O argumento acima tem sua importância dentro do contexto mencionado; no entanto, a medida “mais que o dobro” revela, de certo modo, a imprecisão nas análises que Newton realiza. O que ele apenas se limita a dizer é que a “metade” de uma revolução sendo a trajetória do corpo *oc* do ponto *c* até o ponto *b* passando pelo ponto *h*, e a “força capaz de gerar ou destruir seu movimento” (pelo Axioma 4) sendo a resistência do corpo *edf*, essa ao mesmo tempo em que destrói a força do corpo *oc* para afastar-se do centro *m*, gera nele uma tal quantidade de movimento capaz de movê-lo no sentido inverso de *b* para *h*. Contudo, o significado mais importante nessa primeira tentativa de Newton é o uso do princípio da *proporcionalidade entre força e mudança da quantidade de movimento*, que está implícito no Axioma 23 e servirá para a realização das futuras análises do *conatus a centro*.

Passado algum tempo desde os primeiros estudos, Newton introduziu novas proposições no *WasteBook*, que foram marcadas pela superação do “modelo” cartesiano de uma pedra girando ao ser impulsionada por uma funda (adaptado para uma esfera movendo-se no interior de uma superfície côncava) que influenciou as suas primeiras investigações. Nessa nova série de estudos, Newton concebeu uma esfera que percorre os lados de um quadrado inscrito num círculo, em torno do qual existe um outro quadrado circunscrito (figura 02).



[figura 02]

A passagem abaixo expressa a relação a ser demonstrada:

“(…) a força pela qual ela [a esfera] esforça-se a partir do centro n gerará tanto movimento em um corpo quanto existe em b no tempo em que o corpo b percorre a distancia do semidiâmetro bn (como b é movido com um grau de movimento através de bn em um segundo de uma hora, então a força a partir do centro n sendo continuamente (como a força da gravidade) imprimida sobre um corpo durante um segundo, gerará um grau de movimento nesse corpo). Ou, a força a partir de n está para a força dos movimentos dos corpos :: periferia : raio.” (HERIVEL, 1965, p. 129)

Pois, se a esfera b move-se de a para b .

Então $2fa:ab::ab:fa::$ força ou pressão de b sobre fg para sua reflexão : força do movimento de b .

Logo, “em uma revolução completa”, $4ab:fa::$ força das reflexões em b, c, d, a : força do movimento de b .

Ou seja,

$$\frac{\text{soma total das colisões nos 4 lados}}{\text{força do movimento da esfera}} = \frac{\text{soma dos lados do quadrado}^5}{\text{raio do círculo}}$$

Mas, se aumentarmos o número de lados do polígono circunscrito e, conseqüentemente, os lados de reflexão, até quando exista “um número infinitos de lados” iguais, podendo então ser tomado pelo próprio círculo, segue-se que “a força de todas as reflexões está para a força do movimento dos corpos assim como todos os lados (*id est*, o perímetro) estão para o raio”. (HERIVEL, 1965, p. 130). Dito de outro modo, se aplicarmos o resultado acima a qualquer polígono regular de “infinitos lados”, teremos :

$$\frac{\text{soma total das colisões em todos os lados}}{\text{força do movimento da esfera}} = \frac{\text{soma de todos os lados do polígono}}{\text{raio do círculo}}$$

O raciocínio utilizado até aqui revela que, na passagem ao limite, a soma das forças das reflexões no polígono inscrito tende a zero e muda *continuamente*, tornando-se muito difícil atribuir-lhe qualquer sentido físico (*Idem*, p. 09). Newton adverte então que as “forças de todas as reflexões” realizadas no *mesmo tempo* em que a esfera *b* percorre no círculo uma distância igual ao raio do círculo, devem ser tomadas como aplicadas *continuamente* sobre um corpo, sendo capaz de gerar nele, no *mesmo tempo*, a mesma quantidade de movimento que a esfera *b* possui.

Certamente Newton operou de modo intuitivo nessa altura dos seus estudos mecânicos, tratando de proceder das forças *instantâneas* pelas quais os corpos

⁵ HERIVEL, 1965, p. 09.

interagem nas colisões para as *forças contínuas*, ou seja, aquelas forças cujos efeitos devem ser avaliados com respeito ao *tempo* em que agem sobre os corpos. Tudo isso indica que Newton ainda não tinha a mesma consciência das implicações desse procedimento analítico que demonstra ter alcançado nos seus trabalhos posteriores, tal como acontecerá ao desenvolver um método para passar das *forças impulsivas* para as *forças contínuas* que obviamente constituiu a base da sua teoria dinâmica no *Principia Mathematica* (1687). Mas um dos aspectos de singular importância é o fato de que a partir do *Waste Book* o “modelo” dessas *forças contínuas* é, para Newton, a *força da gravidade* (que aparecerá mais tarde no *Principia*), cujos efeitos sobre os corpos na superfície da Terra certamente ele aprendeu a medir na mesma época em que desenvolvia seus estudos sobre o *conatus a centro*.

1.2 – OS PRIMEIROS ESTUDOS SOBRE A DINÂMICA DOS MOVIMENTOS CIRCULARES

Enquanto trabalhava com os principais problemas mecânicos apresentados por Descartes, Newton tomou contato com as teorias astronômicas mais importantes de sua época, nas quais figuravam autores como Copérnico, Kepler e Galileu. Observando as notas manuscritas de um período pouco anterior ao dos seus estudos mecânicos, intitulados *Questiones Quaedam Philosophicae*, vê-se que ele se introduziu nos problemas astronômicos de sua época a partir das leituras que fez da *Astronomia Carolina* (1661) de Thomas Street. Na *Astronomia*, Street apresenta as *hypotheses copernicanaea* (termo usado no século XVII para referir ao *sistema copernicano* modificado no qual se aplicavam a Primeira e a Terceira Leis de Kepler) que Newton tomou conhecimento e pode, a partir dos dados da astronomia kepleriana, aplicar corretamente a “proporção sesquialtera” ($2/3$) entre os respectivos períodos de revolução e as distâncias médias dos planetas até o Sol, a ponto de afirmar, após o enunciado dessa proporção, que:

“Por exemplo, o período de revolução da Terra transformados em minutos de tempo sendo $525968\frac{1}{2}$ e o de Marte, $989247\frac{1}{2}$. Então, como o quadrado de $525968\frac{1}{2}$ está para o quadrado de $989247\frac{1}{2}$, assim também o cubo de 100000, a distância média da Terra, está para o cubo de 152369, a distancia média de Marte a partir do Sol.” (McGUIERE & TAMNY, 1985, p. 362).

Todavia, por mais que a passagem acima se refira à Terceira lei de Kepler, ela deve ser considerada apenas dentro de um contexto astronômico e não conduzindo às conclusões sobre os movimentos circulares, algo que Newton realizará algum tempo depois quando derivar a *lei do inverso do quadrado das distâncias* para o *conatus a centro* dos planetas.

No *Vellum Manuscript*⁶, texto produzido nos anos de 1665/6, Newton relaciona a *força da gravidade* terrestre com os *conatus a centro* que surgem dos movimentos diurno e anual da Terra. Os resultados obtidos nesse período não são tão precisos, mas revelam o problema a partir do qual ele desenvolveu os primeiros cálculos astronômicos. A conclusão apresentada no *Vellum* é que a “força da gravidade” terrestre é 300 vezes maior que a “força centrífuga” originada pelo movimento diurno da Terra “como 1:300::vis a centro terrae:vim gravitatis.” (HERIVEL, 1965, p. 185). Tudo indica que esta foi uma tentativa de responder a um dos argumentos difundidos contra o *sistema copernicano*, mostrando que a rotação da Terra não lança os corpos no ar porque a força da gravidade, medida pela aceleração da queda dos corpos, é maior que a força que surge a partir da rotação (cf. WESTFALL, 1980, p. 150).

Pouco tempo depois do *Waste Book*, Newton substitui o “tratamento poligonal” pelo “tratamento desviacional”, que resultou em um retorno ao sentido original do *conatus a centro* de Descartes, desvinculando, assim, suas investigações dos movimentos circulares das noções derivadas das colisões entre os corpos. Essa última conduta de Newton liga-se ao fato de que ele passou a considerar com maior frequência as analogias entre o caráter *contínuo* da “força da gravidade” e a ação do *conatus a centro* nos movimentos circulares uniformes (cf. HERIVEL, 1965, p. 12). Em um manuscrito (U.C.L.MS Add. 3958.5) composto algum tempo depois do *Vellum Manuscript*, o *conatus a centro* será medido pela distância *DB* [figura 03] entre a trajetória circular *AD* e a trajetória inercial pela qual o corpo se desviará do círculo *ADEA*, se se movesse livremente na tangente *AB* no mesmo tempo em que percorre *AD*. Esse *conatus*, pela extensão da lei do quadrado do tempo de Galileu para qualquer força

⁶ Doravante, todas as referências a este manuscrito (U.C.L.MS Add. 3958, *fólio* 45) serão feitas a partir da edição publicada por John Herivel, *The Background to Newton's Principia*. 1965.

que produz uma aceleração contínua, “se somente impelisse continuamente uma linha reta à maneira da gravidade, impeliria os corpos através de espaços que são como o quadrado dos tempos”. (*Idem*, p. 193). Então, para que possa ser determinado o *conatus a centro* em uma revolução completa, deve-se procurar a linha que esteja para o tempo de uma revolução completa *ADEA* na mesma proporção em que a distância *BD* está para o tempo representado pelo arco *AD*, isto é, a distância *x* que satisfaz a seguinte proporção:

$$x: ADEA^2::BD:AD^2$$

Pela Proposição 36 do Livro III dos *Elementos* de Euclides, temos que

$$BE:BA::BA:BD$$

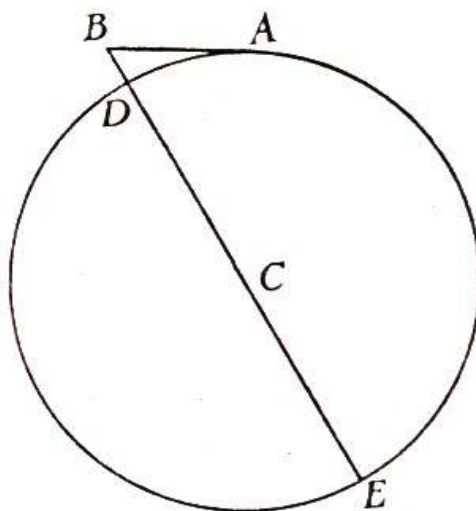
E como a diferença entre *BE* e *DE* e entre *BA* e *DA* é suposta “ser infinitamente pequena”, então

$$DE:DA::DA:DB$$

Logo,

$$DA^2 \text{ (ou } DE \times DB): ADEA^2::DB:ADEA^2/DE$$

A linha procurada é, portanto, “a terceira proporcional na razão da circunferência para o diâmetro”, isto é, $(2\pi R)^2/2R$, ou, $2\pi^2 R$.



[figura 03]

A essa demonstração segue o Corolário que possibilitou as tentativas mais bem sucedidas de Newton de aplicar os resultados alcançados aos movimentos circulares da Terra e da Lua:

“Daí os *conatus a centris* nos diversos círculos são como os diâmetros divididos pelos quadrados dos tempos de revolução, ou como os diâmetros multiplicados pelo [quadrado] número de revoluções feitas no mesmo tempo qualquer que seja este.” (HERIVEL, 1965, p. 194).

Newton deriva a regra do *conatus a centro* “ D/T^2 ” (onde D é a distância, e T o tempo) pela aplicação da lei do quadrado do tempo de Galileu para a distância que o corpo se move sob a ação de uma força constante; pois, se no tempo T de uma revolução completa, o *conatus* move um corpo à distância $2\pi^2R$, ele moverá o corpo à distância $2\pi^2R/T^2$ numa unidade de tempo (*Idem*: 12, 198 nota 6).

Inicialmente, nesse novo passo, Newton utilizará o resultado acima exposto numa tentativa de solucionar o problema que encontrou no *Diálogo* de Galileu⁷,

⁷ Newton tomou conhecimento de vários problemas apresentados por Galileu ao ler sua obra através da edição de Thomas Salusbury (*The Systeme of the World in four Dialogues. By Galileus Galileus*, 1661). Provavelmente essa foi a única obra de Galileu que ele conheceu antes de escrever o *Principia* (Cf. COHEN, 1980, p. 133 e p. 319 nota 11; WESTFALL, 1971, p. 47 nota 3).

calculando a distância que o *conatus a centro* no equador terrestre, provocado pelo movimento diurno da Terra, impeliria um corpo se fosse tanto quanto é o “esforço para aproximar-se do centro [da Terra] em virtude da gravidade” (*conatus accedendi ad centrum virtute gravitates*). Considerando que a unidade de tempo é um “dia periódico”, ou uma revolução completa da Terra, pela proposição provada anteriormente, o *conatus a centro* no equador terrestre impeliria um corpo por $2\pi^2R$, ou “ $19\frac{3}{4}$ semidiâmetros terrestre ou 69.087 milhas. Em uma hora, por 120 milhas; em um minuto, por $500/3$ pés (1/30 milhas); em um segundo, $5/108$ pés.” (HERIVEL, 1965, p. 194). Logo à frente, Newton comparará esse resultado com a medida da distância (16 pés por segundo) que realmente a “força da gravidade” (*vis gravitatis*) impele os corpos para baixo: “em torno de 350 vezes mais longe no mesmo tempo que o esforço a partir do centro”, e conclui que “a força da gravidade é muitas vezes maior, de tal modo que não permite que a Terra girando faça os corpos afastarem-se e lançarem-se no ar.” (*Idem*).

O passo seguinte será comparar a *força da gravidade* com o *conatus* da Lua para afastar-se a partir do centro da Terra. Tal relação é introduzida logo em seguida ao Corolário II onde enuncia a regra “D/T²”. Como o tempo de revolução completa da Lua é de “27 dias, 7 horas e 43 minutos, ou 27, 3216 dias (cujo quadrado será $746\frac{1}{2}$)” e “está distante da Terra 59 a 60 semidiâmetros da Terra”, então, pela segunda parte do Corolário exposto há pouco (“os *conatus*... são... como os diâmetros multiplicados pelo [quadrado do] número de revoluções...”), a proporção entre “os *conatus* da Lua e da superfície da Terra para afastarem-se do centro da Terra” é:

$$\frac{60 \times 1^2}{1 \times 27,3216^2}$$

ou “60 para 746½”. Logo, considerando que o *conatus* no equador da Terra é 12½ (isto é, 746/60) vezes maior que o *conatus* da Lua e 350 vezes menor que a força da gravidade, a força da gravidade “é mais de 4000 vezes maior que o *conatus* da Lua para afastar-se do centro da Terra.” (HERIVEL, 1965, p. 194). Em seguida, Newton estabelece as proporções entre o *conatus* da Terra para afastar-se do Sol (devido ao seu movimento anual) e o *conatus* na superfície da Terra no equador (devido ao seu movimento diurno), e entre aquele e a gravidade na superfície da Terra. Ao calcular essas proporções, ele conclui: “Por fim, como nos Planetas primários os cubos das distâncias do Sol estão reciprocamente como o quadrado do número de revoluções num dado tempo: os *esforços* [*conatus*] para afastarem-se do Sol estarão reciprocamente como o quadrado da distância a partir do Sol.” (HERIVEL, 1965, p. 195).

O raciocínio empregado acima considera que a Terceira Lei de Kepler implica a lei do inverso do quadrado da distância para os “esforços [dos Planetas] para afastarem-se do Sol”. Analisada a partir de um ponto de vista matemático, a implicação torna-se evidente, pois sendo C o *conatus recedendi a centro*, D a distância e T o período de revolução, então, se $C \propto D/T^2$ e $T^2 \propto D^3$, logo $C \propto 1/D^2$. Comparado com o *Principia Mathematica*, os resultados alcançados por Newton aqui são bem significativos.

O manuscrito citado há pouco (U.C.L.MS Add. 3958.5, *fólios* 87, 89), que contém a regra “ $1/D^2$ ” para o *conatus* centrífugo, não traz qualquer referência a este respeito, mas indiretamente nos leva a pensar que tais acontecimentos teriam ocorrido tão logo Newton encontrou essa regra. Como vimos, Newton inferiu através da regra

“ D/T^2 ” que a “força da gravidade é mais de 4000 vezes [precisamente, $350 \times 12 \frac{1}{2} = 4375$ vezes] maior que o *conatus* da Lua para afastar-se do centro da Terra”. Por outro lado, esse resultado é um tanto diferente do valor teórico fornecido pela regra “ $1/D^2$ ”, ou

seja, que a razão entre o *conatus* da Lua e a força da gravidade na superfície da terra é a razão inversa do quadrado da distância da Lua ao centro da Terra para o quadrado do raio da Terra. Assumindo que a distância entre a Lua e o centro da Terra é igual a 60 raios da Terra, a força da gravidade é 3600 vezes maior que o *conatus* centrífugo da Lua. Portanto, uma diferença de aproximadamente 25% em relação ao resultado anterior. Essa diferença deveu-se ao fato de Newton ter assumido o valor de 3500 milhas italianas para o raio da Terra. Mas, se tomarmos essa medida como sendo de 4000 milhas (inglesas), pela regra “ $2\pi^2R$ ” teremos que o *conatus* centrífugo na superfície da Terra será 286,72 vezes maior que a força da gravidade. Então, a força da gravidade será 3584 vezes maior que o *conatus* centrífugo da Lua. Algo que se aproxima bastante do valor teórico de 3600 vezes. No entanto, Newton não percebeu imediatamente o erro que cometera nem há qualquer evidência no manuscrito supracitado de que ele tenha feito essa “comparação” dos resultados obtidos pelas duas regras e, portanto, constatado a diferença entre eles.

Todos esses fatos fornecem indícios de que Newton, nessa época, não poderia jamais ter cogitado a idéia de uma “força” (centrípeta, atrativa) agindo sobre a Lua e *continuamente* equilibrando com sua tendência centrífuga. É somente após suas correspondências com Robert Hooke (1679/80) que surgem em seus escritos as primeiras referências a *forças centrais atrativas*, mas, antes disso, qualquer referência sobre as forças centrais não ultrapassam os limites conceituais do *conatus recedendi a centro* de Descartes. Nesse sentido, a “comparação” feita no manuscrito analisado acima não é exatamente entre “a força necessária para manter a Lua em sua órbita” e a *força da gravidade* na superfície da Terra, mas entre esta e o *conatus* da Lua para afastar-se do centro da Terra. A própria derivação da regra “ $1/D^2$ ” indica que ela se

aplicava apenas aos efeitos dos *conatus a centro* nos movimentos circulares dos planetas. E mesmo considerando que Newton, ao estendê-la para o *conatus* centrífugo da Lua, constatou a diferença com o cálculo feito anteriormente, nada indicaria que ele passou a considerar que outra causa além da gravidade seria a responsável pela manutenção da Lua em sua órbita, mesmo porque tal questão nem tinha sido colocada em suas investigações astronômicas dessa época. A simples referência aos *vórtices* de Descartes fornece dados importantes para deixarmos de acreditar em qualquer possibilidade de Newton ter em mente uma noção próxima do conceito de *gravitação universal* que postulará no *Principia Mathematica*.

II – A DOCTRINA DO MOVIMENTO, TEMPO E ESPAÇO ABSOLUTOS

2.1 – A CRÍTICA DE NEWTON À “DOCTRINA DO MOVIMENTO” DE DESCARTES: AS PRIMEIRAS IDÉIAS SOBRE OS CONCEITOS DE MOVIMENTO, TEMPO E ESPAÇO ABSOLUTOS

Os conceitos de *movimento*, *tempo* e *espaço absolutos* decorrem da consolidação das primeiras idéias de Newton sobre a dinâmica dos movimentos circulares. As primeiras formulações sobre esses conceitos evidenciam uma crítica ao “relativismo cartesiano”. Newton percebeu as dificuldades de conciliar a doutrina de Descartes com o tratamento dinâmico do *movimento*, um dos aspectos mais importantes da mecânica newtoniana. As páginas que se seguirão ressaltam a importância de identificar os pontos mais evidentes dessa crítica localizada no *De Gravitatione et aequipondio fluidorum*⁸ (1666 ou 1670)⁹ e reconstruir os passos que Newton trilhou até chegar a uma concepção definitiva desses conceitos em seu *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.

Newton realizou diversos estudos sobre o movimento enquanto era aluno universitário em Cambridge (1661-1666). As primeiras investigações sobre esse tema foram importantes para a sua futura leitura do *Principia Philosophiae* (1644) de Descartes. A evidência mais significativa a esse respeito encontra-se nas tentativas de Newton em estabelecer a razão do *conatus* (esforço) dos corpos que giram para se afastarem dos centros de seus movimentos. O estudo sobre o *conatus recedendi a centro* (esforço para afastar-se do centro), sempre associados à identificação dos movimentos verdadeiros e absolutos, foi essencial para constituir suas próprias idéias sobre os

⁸ Faço uso aqui da versão para o português contida em: NEWTON. I. *Princípios matemáticos; Óptica; O peso e o equilíbrio dos fluidos*. Traduções de C. L. Matos, P. R. Mariconda e L. J. Baraúna. São Paulo: Abril Cultural, 1979. (Coleção *Os Pensadores*).

⁹ Apesar do fato de o *De Gravitatione et aequipondio fluidorum* (doravante o citarei como *De Gravitatione*) ser uma obra de juventude, encontramos nela os esboços das noções de *movimento*, *espaço* e *tempo verdadeiros e absolutos*, que serão recuperados na maturidade, principalmente no Escólio das Definições do Livro I do *Principia*, lugar em que o vemos, mais uma vez, criticar o cartesianismo.

fundamentos da mecânica e, em especial, sua doutrina do *movimento, tempo e espaço absolutos* no *Principia*.

As primeiras formulações que Newton realizou sobre o *princípio de inércia* foram influenciadas pelas leituras que fez do *Principia Philosophiae* de Descartes. Nessa obra, Descartes estabeleceu na Segunda Parte, Artigo 39, que: “todo corpo movido circularmente tende sem cessar a afastar-se do círculo que descreve”. Newton manteve, assim, a idéia de que a tendência para afastar-se do centro está relacionada com a continuidade dos movimentos retilíneos. Assim como Descartes, Newton identificou, nesses primeiros estágios de sua investigação, duas tendências nos corpos que giram: uma tendência *para afastarem-se a partir da circunferência ao longo da tangente*, e outra *para afastarem-se do centro na direção do raio*. Tudo nos leva a crer que Newton jamais se distanciara significativamente do contexto metafísico e conceitual em que se engradava originalmente o *conatus* centrífugo identificado por Descartes; entretanto, na obra deste último filósofo não se encontra qualquer tentativa de qualificar a intensidade do *conatus* por meio de sua relação de proporção com as demais propriedades dos movimentos circulares.

Newton pretendeu, portanto, explorar as idéias de Descartes onde quer que ocorressem movimentos circulares. Ao constatar a inconsistência da mecânica cartesiana, o objetivo de Newton foi oferecer um tratamento adequado ao *conatus recedendi a centro* nos movimentos circulares. O seu afastamento do universo metafísico e conceitual da mecânica cartesiana, que progressivamente se aprofundou à medida que suas pesquisas prosseguiram, foi devido ao que Newton considerou como uma impossibilidade de fornecer, por meio da doutrina de Descartes, os conceitos

exatos de *movimento*, *lugar* e *espaço*. Assim, Newton compreendeu que seria necessária uma reformulação rigorosa desses conceitos.

O primeiro passo que Newton realizou nesse sentido foi se dedicar ao estudo dos princípios do *movimento local*, que surgem na Definição IV do *De Gravitatione*. Nesse manuscrito, Newton considera que: “(...) é para mim da maior importância refutar esta filosofia no que concerne à extensão, com o objetivo de assentar fundamentos mais verdadeiros para as ciências mecânicas.” (NEWTON, 1979, p. 62). Em seguida, ele apresenta as teses de Descartes sobre o movimento, que são resumidas em três proposições que se seguem:

“[I] (...) a cada corpo corresponde um único movimento particular [próprio], o qual é definido como sendo o deslocamento de uma parte da matéria ou de um corpo da proximidade dos corpos que o tocam imediatamente – e que são considerados como estando em repouso – à proximidade de outros.”

“[II] (...) um corpo que se move em seu movimento particular é constituído não apenas pelas suas partes que se encontram em repouso entre si, mas também por tudo aquilo que é simultaneamente deslocado, embora, naturalmente, isto possa consistir em muitas partes que têm movimentos relativos diferentes.”

“[III] Além deste movimento peculiar [particular] a cada corpo, podem surgir nele inúmeros outros movimentos, isto é, por participação (ou seja, na medida em que faz parte de outros corpos que têm outros movimentos). Cumpre notar, entretanto, que estes não constituem movimentos no sentido filosófico do termo e em linguagem racional, mas tão-somente em linguagem imprópria e de acordo com o modo comum de falar” (NEWTON, 1979. pp. 62- 3).

Para Newton, os movimentos que Descartes considerava como “impróprios”, não-filosóficos, tornar-se-ão os movimentos verdadeiros e absolutos; quanto àqueles definidos como “deslocamento de uma parte da matéria ou de um corpo da proximidade dos corpos que o tocam imediatamente (...) à proximidade de outros”, serão apenas relativos e aparentes. Nesse momento de sua crítica, Newton apresenta as contradições da doutrina cartesiana e inicia pelos efeitos do *movimento circular* dos vórtices planetários em torno do Sol. Para Newton, tudo se passa como se Descartes não houvesse se dado conta da contradição que havia se instaurado ao afirmar na Terceira

Parte do *Principia Philosophiae*, Artigos 26, 27, 28 e 29, que “(...) falando em sentido próprio e em conformidade com o sentido filosófico, a Terra e os demais planetas não se movem” e, mais, que somente o vulgo consideraria que se movem devido a seus deslocamentos em relação às estrelas fixas (NEWTON, 1979, p. 63). O problema é que no artigo 140 ele muda consideravelmente de opinião, diz Newton: “(...) atribui à Terra e aos planetas uma tendência a se afastarem do sol como de um centro [*conatus recedendi a sole*] em torno do qual giram, tendência em virtude da qual são equilibrados nas suas devidas distâncias do sol por uma tendência semelhante do turbilhão em rotação.” (*Idem*, p. 64). Newton questiona do seguinte modo: “Afinal, onde está a verdade? Deriva porventura esta tendência do repouso dos planetas – o qual, no pensar de Descartes, é verdadeiro e corresponde ao sentido filosófico do termo – ou antes do movimento dos mesmos, considerado na sua acepção vulgar e não filosófica?” (*Idem*, p. 64). A conclusão de Newton é que se uma “tendência” não é produzida pelo primeiro movimento tomado no sentido filosófico, mas apenas pelo segundo tomado no sentido vulgar, portanto “seguramente se deve reconhecer o movimento na acepção vulgar, antes que o movimento no sentido filosófico” (NEWTON, 1979, p. 64).

Considerando apenas a acepção filosófica, um corpo pode estar ao mesmo tempo em repouso e em movimento. Além disso, os inúmeros outros movimentos de um corpo devem ser considerados também como movimentos próprios e naturais, pois caso contrário deve-se admitir que as partes de um corpo em movimento estão em repouso. A constatação a que Newton chega é a de que “(...) não existe no universo corpo algum, cujas posições relativas permanecem inalteradas com o passar do tempo” (...), de modo, portanto, que “(...) não existe corpo algum que não se mova no sentido cartesiano.” (*Idem*, p. 68). Conseqüentemente, Newton conclui que: “(...) é impossível que o lugar

exista durante um período de tempo mais longo do que aquele durante o qual esses corpos mantêm as mesmas posições”, portanto, “nem mesmo Deus poderia definir neste momento, com exatidão, e geometricamente, a posição passada de um corpo.” (*Idem*).

Descartes afirma em sua doutrina que apenas as superfícies externas dos corpos se movem propriamente, enquanto que todas as partes internas movem-se apenas por participação naqueles movimentos. Assim, a menos que seja excluída a possibilidade dessa participação, deve-se dizer que o corpo não possui apenas um único movimento que lhe seja próprio, mas vários. Eis que surge a necessidade de que seja suprimida a noção de corpo como sendo “tudo aquilo que se desloca conjuntamente com ele”, com o objetivo de distinguir um único “movimento físico próprio” para cada corpo (NEWTON, 1979, p. 66).

O esforço de Newton ao longo do *De Gravitatione* será no sentido de realizar uma revisão conceitual na doutrina cartesiana que significará admitir que: (I) o “espaço é distinto do corpo”; (II) e “o movimento é algo que acontece com respeito às partes do espaço, e não com respeito à posição dos corpos vizinhos” (*Idem*). Assim, ele inicia uma nova cadeia de argumentos por esse segundo ponto, procurando primeiro refutar as “ficções” de Descartes concernentes à verdadeira “natureza do movimento” ou o “movimento no sentido filosófico”. Newton concluiu que a sua posição e a de Descartes eram as duas únicas posições possíveis e ao mesmo tempo contraditórias, portanto, ao refutar a doutrina de Descartes, ele estaria mostrando a necessidade de estabelecer sua própria posição. É, pois, nesse sentido que Newton “adere” à “acepção comum do movimento”, justamente para reforçar a divergência entre as duas posições. Por outro lado, essa “adesão”, como se verá, é meramente retórica considerando-se o fato de que

os conceitos de Newton sobre o *movimento* estão tão distantes da “acepção vulgar” quanto estão da “acepção filosófica” de Descartes.

Ao lado dessas críticas dirigidas a Descartes, Newton mostra duas outras contradições com respeito à noção de “unicidade do movimento próprio” dos corpos e à reciprocidade do movimento e do repouso entre os corpos contíguos. Os argumentos de Newton centram-se agora nos Artigos 29 a 31 da Segunda Parte do *Principia Philosophiae*, onde, segundo ele, Descartes se “contradiz” ao postular que “conforme a natureza das coisas” apenas um único movimento pode ser atribuído a um mesmo corpo e, no entanto, afirmar que a determinação desse movimento depende de “nossa imaginação”, pela qual os corpos contíguos “apenas parecem estar em repouso, ainda que na realidade possam estar em movimento” (NEWTON, 1979, p. 66).

No Artigo 31, Descartes afirma que existem “realmente inúmeros movimentos em cada corpo”, contrariando novamente o postulado da “unicidade dos movimentos próprios”. Newton conclui, assim, a primeira parte da refutação da doutrina de Descartes. Conseqüentemente, na parte seguinte, onde ele pretende mostrar que “a doutrina de Descartes é absurda em razão das conseqüências absurdas às quais conduz” e, por isso mesmo, seus argumentos terão a forma de uma *reductio ad absurdum*, os temas da “unicidade dos movimentos próprios” e da reciprocidade entre *repouso* e *movimento* reaparecem nas duas primeiras “conseqüências absurdas” apontadas por Newton. A partir dos mesmos fundamentos pelos quais Descartes infere o repouso da Terra no vórtice solar, segue-se também que as partes internas de um corpo em movimento não possuem movimento próprio, mas apenas por participação no movimento próprio de suas partes externas. O absurdo dessa posição é, também, demonstrado pelas implicações da noção de *corpo* de Descartes. De acordo com a

definição de Descartes, *corpo* é tudo aquilo que é transportado conjuntamente com ele, mesmo que isso possa incluir partes que possuam outros movimentos próprios. Sendo assim, ele admite que “cada corpo tem não somente um movimento único que lhe é próprio, mas inúmeros outros, desde que se diga que tais partes se movam em sentido próprio e conforme a verdade das coisas enquanto se move o todo do qual constituem as partes” (NEWTON, 1979, p. 66).

O problema em Descartes surge não apenas da impossibilidade de distinguir claramente o que seja o *movimento* “verdadeiro, absoluto e próprio”, mas também em não permitir que se escape da posição cética que afirma a equivalência de todos os referenciais do movimento, sejam eles contíguos ou longínquos, e toma todos os movimentos como sendo “igualmente filosóficos” – o que, para Newton, é “a mais absurda das afirmações” (*Idem*).

A solução encontrada por Newton, para solapar de vez essa indeterminação ou relativismo presente em Descartes, não é outra senão admitir que possa “haver um único movimento físico para cada corpo” e que as demais mudanças de posição ou relação entre os corpos sejam consideradas como sendo “meras designações externas” (*Idem*). A consequência disso? Permitir que seja possível afirmar que um único movimento natural e absoluto pertença à Terra, pelo qual ela tende a afastar-se do Sol, e que suas translações em relação aos corpos externos sejam meras designações externas. Mas, para que isso seja aceito, dependerá da possibilidade de encontrar uma “entidade imóvel” que assegure a existência dos movimentos verdadeiros e absolutos. Ou seja, necessita-se que haja uma distinção entre *espaço* e *corpo* para que os estados de movimento ou de repouso sejam referidos somente ao espaço (*ente imóvel*) e as posições relativas aos corpos (contínuos ou longínquos) sejam consideradas “meras

designações externas”. A tarefa de Newton no restante do *De Gravitatione* é, portanto, justificar a distinção entre *espaço* e *corpo*.

2.2 – OS CONCEITOS DE *ESPAÇO* E *CORPO* COMO CAUSAS DE GERAÇÃO DO MOVIMENTO.

As críticas dirigidas a Descartes no *De Gravitatione* dizem respeito às “condições de existência do movimento” que, segundo Newton, pressupõe: (I) uma causa pela qual tenha sido gerado; (II) e que, ao mesmo tempo, uma velocidade e uma determinação definidas possam ser atribuídas a ele. Nesse sentido, o abuso de Descartes está no fato de violar ambas as condições, justamente por admitir que o movimento possa ser gerado mesmo quando nenhuma força é impressa e, na medida em que os lugares existem apenas no momento em que os corpos se movem, não permite definir nem uma velocidade uniforme nem uma linha reta na qual se realiza o movimento.

Portanto, se Descartes impede a própria definição da velocidade e da determinação dos movimentos, torna-se impossível a própria existência do movimento, “pois não pode existir movimento sem uma certa velocidade e determinação” (NEWTON, 1979, p. 68). Conseqüentemente, a doutrina de Descartes admite que “o movimento pode ser gerado onde não existe nenhuma força em ação” e, ao contrário, que mesmo “Deus não poderia gerar o movimento em alguns corpos, ainda que os impulsionasse com a maior força” (*Idem*, p. 66). A origem disto está nas “designações externas” pelas quais Descartes pretende determinar o estado de movimento dos corpos. Entretanto, o problema não se restringe à utilização de “designações externas” para determinar o movimento dos corpos, mas inclui ainda admitir que os corpos mudem “suas distâncias e posições relativas sem movimento físico” (NEWTON, 1979, p. 68) – como no caso dos planetas que, embora estejam todos verdadeiramente em repouso, mudam constantemente suas posições relativas às estrelas fixas.

De acordo com Newton, outro problema na doutrina de Descartes é a noção de “lugar”, pois este deixa de existir após os corpos contíguos terem alterado suas posições relativas. Qual é, então, a consequência disto? Não ser possível encontrar o *lugar* onde o movimento começou e os pontos intermediários do “espaço” percorrido (pelo corpo); e a impossibilidade de definir qual seja a determinação de qualquer movimento. Assim, “uma vez que a velocidade depende da distância percorrida durante um determinado período de tempo, segue-se que o corpo em movimento não pode ter nenhuma velocidade [...]” A partir daí Newton confessa que “não pode haver movimento” (*Idem*).

Os argumentos de Newton insistem na impossibilidade de, por meio da “doutrina do movimento” de Descartes, estabelecer um vínculo necessário entre os movimentos verdadeiros e suas causas. Uma vez que nem mesmo a ação de Deus, o qual Descartes considera ser a “causa primeira” de todos os movimentos, poderia gerar inequivocamente o movimento num determinado corpo. As especulações que Newton registra no *De Gravitatione* destinam-se a assegurar a existência dos *movimentos verdadeiros e absolutos*, cuja condição suficiente e necessária seja tão-somente a ação de uma força suficiente para gerá-los.

Newton “concede” a Descartes a verdade das razões que o levaram a admitir a reciprocidade do movimento e do repouso e, ao mesmo tempo, recusar a noção comum do movimento; para tanto, ele diz: “Na realidade, não existe no universo corpo algum cujas posições relativas permaneçam inalteradas com o passar do tempo, e certamente não existe corpo algum que não se mova no sentido cartesiano: isto é, corpos que não se movam em relação à proximidade de corpos contíguos nem são partes de outros corpos que assim se desloquem” (NEWTON, 1979, p. 68). Por outro lado, essa “concessão”

que Newton faz acaba depondo contra Descartes, em virtude do que ele diz logo em seguida: “Por conseguinte, é necessário que a definição de lugares, e conseqüentemente também dos movimentos locais, seja referida a alguma coisa destituída de movimento, tal como a extensão sozinha, ou o espaço, na medida em que se vê que este se distingue dos corpos” (*Idem*, p. 69).

A persistência da convicção na indistinção entre *matéria (corpo)* e *extensão (espaço)*, segundo Newton, deve-se à demonstração feita por Descartes nos Artigos 4 e 11 da Segunda Parte do *Principia Philosophiae*. É, pois, por esse motivo que Newton confessa que: “a fim de que não permaneça dúvida alguma acerca da natureza do movimento, responderei a este argumento explicando o que é a extensão e o que é o corpo, e como diferem um do outro” (NEWTON, 1979, pp. 69 e 70). A partir deste ponto, Newton reconhece a necessidade de afastar-se das críticas à *física cartesiana* para criticar o “fundamento primordial da filosofia cartesiana”, isto é, distinção entre substâncias *pensantes* e *extensas*, “com o objetivo de assentar fundamentos mais verdadeiros para as ciências mecânicas” (*Idem*, p. 70).

O primeiro passo de Newton é apontar que a ontologia tradicional aristotélica, inclusive a cartesiana, não pode exprimir de modo correto a natureza do *espaço*, porque ele não é nem uma *substância* nem um *acidente* e nem mesmo um *nada*. Além do mais, por ser um “efeito imanente de Deus”, o *espaço* não existe absolutamente por si mesmo, tampouco possui “as disposições próprias que caracterizam as substâncias, isto é, as ações, tais como os pensamentos na inteligência e os movimentos nos corpos” (*Idem*, p. 70). Entretanto, é necessário considerar que o *espaço* “não existe como um acidente que inere a algum sujeito”, porque ele existiria mesmo “onde” ou “quando” não existirem mais corpos (*Idem*). Enfim, o *espaço* não “pode ser definido como um nada, pois, ao

contrário, é alguma coisa real” (*Idem*). O *espaço* possui uma realidade justamente por lhe atribuirmos propriedades reais, o que o torna compreensível com uma *idéia*, mas o mesmo não pode de fato ocorrer com o *nada*.

O passo seguinte é enumerar as “propriedades” do *espaço*. Tal enumeração não tem a função de mostrar que o *espaço* “é alguma coisa”, mas, tão somente, mostrar “o que [ele] é”. Assim, as propriedades que nos revelam a *realidade do espaço* são as seguintes: (1) “o espaço pode ser distinguido em partes em todas as direções, sendo que essas partes são sempre contíguas” (*Idem*, p. 70); (2) “o espaço estende-se infinitamente em todas as direções” (*Idem*, 71); (3) “as partes do espaço são imóveis” (*Idem*, p. 73); (4) “o espaço é uma disposição do ser enquanto ser”, razão pela qual é o efeito derivativo primário da existência das coisas (*Idem*, p. 74); “(5) As posições, distâncias e movimentos locais dos corpos devem ser referidas às partes do espaço” que, em função de sua inatividade intrínseca, não podem impedir, favorecer ou alterar os movimentos dos corpos (*Idem*); “(6) o espaço é eterno em sua duração e imutável em sua natureza, visto que é um efeito imanente de um ser eterno e imutável” (*Idem*, p. 75).

Cada uma das propriedades do *espaço* acima enumeradas poderia ser longamente analisada. No entanto, é fundamental nos determos em alguns aspectos que contribuíram para Newton atribuir um “estatuto ontológico ao espaço” – que, a um só tempo, pressupõe e exclui a ontologia da *substância* e do *acidente*. Analisar este ponto da discussão promovida por Newton no *De Gravitatione* pode nos auxiliar a esclarecer as suas reais posições metafísicas e epistemológicas a respeito das noções de *realidade*, *existência*, *atualidade* e *potencialidade*, que se encontram essencialmente em meio ao estabelecimento de uma distinção real entre o *espaço* e os *corpos*.

Todavia, para compreendermos todos esses pressupostos envolvidos no tratamento que Newton dispensa ao longo do *De Gravitatione*, é necessário incluirmos a noção de *tempo* que, para ele, era análoga ao *espaço*, de tal maneira que todos os atributos dispensados ao *espaço* sejam também verdadeiros para o *tempo*. É importante notar que, diferentemente do que fará anos mais tarde no *Principia*, no *De Gravitatione* Newton se refere aos termos *tempo* e *tempo absoluto* sob o nome de “duração” (*duratio*).

Para Newton, tudo que existe se encontra necessariamente disposto em relação ao *espaço* e ao *tempo*. Deste modo, não existe nem pode existir ser algum que não se relacione com o *espaço* e *tempo* de alguma forma. Contudo, *espaço* e *tempo* não estão relacionados à natureza dos seres e, conseqüentemente, não existem como propriedades reais dos seres ou atributos inerentes as suas substâncias. O que se encontra implícito aqui é a idéia de que *espaço* e *tempo* são afecções inerentes à existência dos seres, ou seja, efeitos derivativos primários de existência do ser. Agora, se fossem somente afecções da existência de seres finitos, como os corpos, o *espaço* e o *tempo* permaneceriam apenas durante a existência desses seres. Mas o que garante ao *espaço* uma “duração eterna” é o fato de ser um “efeito imanente de um ser eterno e imutável”, de tal modo que: “Se em algum momento o espaço não tivesse existido, naquele momento Deus não teria estado em nenhum lugar, e nessa hipótese Deus ou teria criado o espaço mais tarde (espaço no qual ele mesmo não estaria), ou então, Deus teria criado a sua própria ubiqüidade – o que seria igualmente contrária à razão” (NEWTON, 1979, p.75).

As conjecturas de Newton na passagem acima indicam o quanto é imperativo que o *espaço* exista, uma vez que Deus, “por existir sempre e em todo o lugar, constitui

a duração e o espaço”. A diferença essencial entre *espaço* e *corpo* revela que, enquanto a existência do *espaço* é necessária, os *corpos* existem apenas em virtude da vontade de Deus, que os poderia ter criado de ilimitados modos diferentes. Se a origem dos *corpos* se mostra como tal, é impossível, de acordo com Newton, afirmar *a priori* ou de modo “positivo” seja lá o que for acerca da sua natureza. Conseqüentemente, é preferível descrever *per hypothesi* “uma determinada espécie de ser, em tudo semelhante aos corpos, e cuja criação não podemos negar que esteja dentro do poder de Deus, de sorte que dificilmente podemos dizer que não seja corpo” (*Idem*).

Newton avança mais em suas considerações “hipotéticas” ao pensar que seria possível a Deus ter criado, em certas regiões do *espaço*, seres que fossem *móveis*, *impenetráveis* e capazes de estimular a percepção nas mentes criadas. Certamente tais seres “apresentariam os mesmos fenômenos” que atribuímos aos corpos (*Idem*, p. 76), pois “esses seres não serão menos reais que os corpos”, em virtude de que “qualquer realidade que atribuímos aos corpos deriva dos seus fenômenos e qualidades sensíveis” (NEWTON, 1979, p. 77):

“E assim, se todo este universo fosse constituído desta espécie de seres, dificilmente se comportaria de outra forma. Por conseqüência, tais seres ou seriam corpos ou semelhantes a corpos. Se forem corpos, neste caso podemos definir os corpos como sendo *determinadas quantidades de extensão que o Deus onipresente dota de certas condições* [mobilidade, impenetrabilidade e resistência].” (*Idem*, p. 76).

A maneira hipotética pela qual Newton orienta o seu argumento em prol da definição acima não a torna destituída de valor. Deve-se ter em mente aqui que a *hipótese* refere-se apenas à maneira pela qual Deus criou os corpos, mas não à existência atual deles: a existência atual do *espaço* está implicada na existência de Deus, cuja ubiqüidade constitui o *espaço* e a *duração*.

Para finalizar sua crítica à doutrina de Descartes, Newton encaminha suas últimas considerações “no que concerne à extensão”. Em tais considerações ele ataca a demonstração feita por Descartes nos Artigos 4 e 11 da Segunda Parte dos *Principia Philosophiae*, de que abstraído as qualidades acidentais dos corpos (*dureza, cor e peso*), aquilo que permanece é a *extensão* em *profundidade, largura e comprimento* e que, por isso mesmo, a verdadeira natureza do *corpo* consiste somente na *extensão*. A isso tudo, Newton responde:

“(…) como é falacioso e suspeito este argumento de Descartes. Com efeito, rejeitando os acidentes dos corpos, o que permanece não é apenas a extensão – como ele afirma – mas também as faculdades em virtude das quais os corpos podem estimular as percepções na inteligência e pôr em movimento outros corpos. Se, além disso, rejeitarmos essas faculdades e todo o poder de mover, de sorte que permaneça exclusivamente uma concepção precisa do espaço uniforme, porventura Descartes há de fabricar vórtices e algum universo a partir desta extensão? Certamente não, a não ser que invoque a Deus, o único capaz de criar corpos *de novo* em tais espaços (recriando tais faculdades, ou a natureza dos corpos, conforme expliquei acima). Assim sendo, não me equivoquei na exposição que precede, ao atribuir natureza corpórea às faculdades acima enumeradas” (NEWTON, 1979, p. 83).

As últimas palavras de Newton, antes de prosseguir em suas “Definições” no *De Gravitatione*, revelam o quanto ele estava convencido de ter provado que os espaços não são os próprios corpos, mas apenas os “lugares” nos quais os corpos existem e se movem (*Idem*, p. 83). Os argumentos de Newton não revelam apenas uma severa crítica dirigida a Descartes, mas também o quanto ele estava preocupado em elaborar a sua própria doutrina do movimento, doutrina essa que pressupõe as noções de *espaço* e *corpo* como fundamentos. É através da noção de *espaço* que Newton estabelecerá o substrato cinemático para a existência dos movimentos verdadeiros e absolutos. Por outro lado, é fundamentalmente através da noção de *corpo* que ele introduzirá um substrato ontológico para as *forças* existentes na natureza.

2.3 – A CONSOLIDAÇÃO DAS IDÉIAS DE NEWTON SOBRE *MOVIMENTO, TEMPO E ESPAÇO ABSOLUTOS* NO *PRINCIPIA MATHEMATICA*

No *De Gravitatione*, Newton demonstrou a inconsistência da doutrina cartesiana do *movimento, lugar e espaço* com as investigações acerca das condições físicas fundamentais em que ocorrem os movimentos. Porém, um passo também importante dado por Newton foi a inferência das definições que o ajudariam a sustentar sua própria doutrina do *movimento local* (movimento enquanto mudança de lugar). Para tanto, ele definiu *lugar* como “uma parte do espaço que uma coisa enche adequadamente”; *corpo* como “aquilo que enche um lugar”; *repouso* como “a permanência no mesmo lugar”; *movimento* como “mudança de lugar.” (NEWTON, 1979, p. 61 e 62 – *Definições: I, II, III e IV*). Ao estabelecer essas definições, Newton julgou-as contrárias a tudo que Descartes havia estabelecido, ao ponto de confessar que era de extrema importância “refutar” tais “ficções”, no sentido de argumentar positivamente sobre os fundamentos metafísicos dessas definições (*Idem*, p. 62).

Nesse pequeno manuscrito, Newton expressou o sentido físico do papel que deveria ser atribuído às forças nos movimentos, de um modo bastante similar àquela que aparece nos seus escritos posteriores. Na Definição V, ele afirma que:

“*Força* é o princípio causal do movimento e do repouso. É um princípio externo que impresso em algum corpo gera, destrói ou muda de algum modo seu movimento; ou é um princípio interno pelo qual o movimento ou o repouso inculcido ao corpo é conservado, e qualquer ser esforça-se para preservar-se em seu estado e resiste ao movimento” (NEWTON, 1979, p. 83).

As definições de *esforço (conatus), ímpeto, inércia, pressão e gravidade* a seguir estão em sintonia com essa mesma orientação: “*Conatus* é a força impedida, ou a força à qual se opõe resistência”; “*Ímpeto* é uma força, na medida em que é impressa a alguma coisa”; “*Inércia* é a força interna do corpo para que seu estado não seja facilmente modificado por uma força externa aplicada sobre ele”; “*Pressão* é o esforço

que as partes contíguas fazem para penetrar umas nas dimensões das outras”; “*Gravidade* ou peso é uma força que existe em um corpo e que o impulsiona a ir para baixo” (NEWTON, 1979, pp. 83 e 4). Esses conceitos são os principais fundamentos sobre os quais Newton reconstruirá as ciências mecânicas. A noção de *força*, juntamente com as noções de *espaço*, *corpo* e *movimento*, significou o afastamento radical de Newton em relação aos conceitos da filosofia cartesiana, fruto das transformações que empreendera nos princípios mecânicos herdados dessa tradição.

As Definições mencionadas acima antecipam o caráter fundamentalmente dinâmico da doutrina do *movimento* de Newton. O enfoque dinâmico, que culminará, anos mais tarde, *Principia Mathematica* com a explicação causal do movimento contida na teoria do *Sistema do Mundo*, fundada no conceito de *força gravitacional*. A idéia de que a “força é um princípio causal do movimento e do repouso”, ao mesmo tempo em que impede o erro cometido por Descartes (que o movimento possa existir sem que qualquer força esteja em ação), motiva os esforços investigativos de Newton no *Principia*, quais sejam: *analisar e explicar os movimentos locais a partir das forças que são necessárias para gerá-los*.

Os avanços positivos das idéias de Newton na época do *De Gravitatione* foram demonstrados pela necessidade que ele identificou de distinguir conceitualmente as diversas “forças” que produzem os movimentos, a fim de que as propriedades observadas nos movimentos pudessem ser atribuídas às forças específicas que estivessem em ação nos corpos. Nesse sentido, Newton define que a ação de um “princípio externo” sobre um corpo constitui o *ímpeto* que “gera, destrói ou muda de algum modo seu movimento”. A *pressão* é um exemplo dessa força, pois é através dela

que se realiza a “comunicação” do movimento entre os corpos “mediante um ponto ou uma superfície de contato” (NEWTON, 1979, p. 84).

Segundo Newton, a origem dessa *pressão* é o “*conatus* das partes contíguas para penetrar umas as dimensões das outras” (*Idem*). Entretanto, esse *conatus* não se realiza se as partes contíguas de um corpo ou de dois ou mais corpos em contato pudessem penetrar umas as dimensões das outras, cessando, assim, a *pressão*. Tudo isso indica que o *conatus* é uma força apenas potencial que está permanentemente impedida de atualizar-se. Por sua vez, esse *conatus* origina-se de um “princípio interno” ou “inércia”, pelo qual o corpo esforça-se para preservar-se em seu estado e resistir ao impedimento. De tal maneira que, se eventualmente o corpo preserva seu estado resistindo ao impedimento, isso deve ser atribuído à inércia ou força interna do corpo. Comparecem aqui as principais noções relacionadas às forças que constituem os fundamentos do tratamento dinâmico dos movimentos realizado por Newton no *Principia*.

As investigações de Newton sobre o movimento no *De Gravitatione* representaram os primórdios de sua doutrina do *movimento, espaço e tempos absolutos* do *Principia*, apresentada no Escólio colocado no final da seção das Definições do Livro I. Essa doutrina encerra o núcleo dos conceitos mais fundamentais do programa de análise e explicação causal dos movimentos que Newton realiza no *Principia*, algo que julga ser impossível de se realizar se os *movimentos relativos* forem tomados como sendo *verdadeiros*, e o *movimento* e o *repouso* forem considerados como sendo estados recíprocos dos corpos contíguos. Desse modo, é preciso reconhecer, sobretudo, que

“O movimento verdadeiro nem é gerado nem é modificado a não ser pelas forças imprimidas no próprio corpo movido; por outro lado, o movimento relativo pode ser gerado ou mudado sem que quaisquer forças sejam imprimidas nesse corpo. Pois basta que as forças sejam imprimidas exclusivamente nos outros corpos com os quais estabelecem uma relação para que, ao cederem àquelas, seja mudada essa relação na qual consistia o repouso ou movimento relativo deles.” (NEWTON, 1987, p. 131).

Não resta dúvida de que Newton estava consciente de sua pretensão, isto é, de ter inscrito suas idéias no interior de um programa de explicação causal dos movimentos ao afirmar que “(...) as maneiras pelas quais vamos obter os *movimentos verdadeiros* a partir de suas causas, efeitos e diferenças aparentes e o contrário, serão explicadas amplamente no próximo tratado” (NEWTON, 1987, p. 134); e mais ainda da impossibilidade de realizá-lo sem afastar as conseqüências do relativismo cartesiano e, conseqüentemente, na ausência de uma explicação adequada dos conceitos de *espaço* e *tempo absolutos*.

No início do Escólio das Definições, Newton assegura em que termos ele concebe *tempo, espaço, lugar e movimento*:

“Até aqui, expus as definições das palavras menos conhecidas e expliquei o sentido em que pretendo que sejam compreendidas no discurso que se segue. Não defino o tempo, o espaço, o lugar e o movimento, pois são bem conhecidos de todos. Devo apenas observar que o vulgo não concebe essas quantidades com base em nenhuma outra idéia senão a relação que ele tem com os objetos sensíveis. E é daí que surgem certos preconceitos para cuja eliminação será conveniente distingui-las em absolutas e relativas, verdadeiras e aparentes, matemáticas e vulgares”(NEWTON, 1987, p. 127).

Em seguida acrescenta:

I. *O tempo absoluto*, real e matemático, por si só e por sua natureza, flui uniformemente, sem relação com qualquer coisa externa, e recebe também o nome de duração; o tempo relativo, aparente e comum é uma medida sensível e externa (precisa ou desigual) da duração por meio do movimento, que é comumente usado em lugar do tempo verdadeiro, como uma hora, um dia, um mês ou um ano.

II. *O espaço absoluto*, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, mantém-se sempre semelhante e imóvel. O espaço relativo é certa medida ou dimensão móvel dos espaços absolutos, que os nossos sentidos determinam por sua posição em relação aos corpos, e que é comumente tomado pelo espaço imóvel (...). O espaço absoluto e o relativo são iguais na forma e na magnitude, mas nem sempre se mantêm numericamente os mesmos (...).

III. *Lugar* é uma parte do espaço que um corpo ocupa, e, com relação ao espaço, é absoluto ou relativo. Digo uma parte do espaço, e não a situação do corpo ou a superfície ambiente. Com efeito, os lugares dos sólidos iguais são sempre iguais, mas as superfícies são quase sempre desiguais, por causa da dessemelhança das figuras; as situações, porém, não têm, propriamente falando, quantidade, sendo antes afecções dos lugares que os próprios lugares. O movimento do todo é o mesmo que a soma dos movimentos das partes, ou seja, a translação do todo que sai de seu lugar é a mesma que a soma da

translação das partes que saem de seus lugares, e por isso o lugar do todo é o mesmo que a soma dos lugares das partes, sendo, por conseguinte, interno e achando-se no corpo todo”(Idem, pp. 127 e 128).

Uma vez que Newton afirma ser desnecessário definir *tempo*, *espaço*, *lugar* e *movimento*, visto serem termos “bem conhecidos de todos”, explicita, no entanto, que enquanto “quantidades”, essas noções são vulgarmente confundidas com suas “medidas sensíveis”. É, pois, nesse sentido que adverte ser necessário distinguir essas “quantidades” em *absolutas* e *relativas*, *verdadeiras* e *aparentes*, *matemáticas* e *vulgares*. Assim, tomar o *tempo* e o *espaço* como faz o vulgo significa usar ao invés do tempo verdadeiro e do espaço imóvel suas medidas sensíveis, isto é, tomar a *duração* segundo o *movimento* (como a hora, o dia, o mês e o ano) e o *espaço* por meio da situação relativas dos corpos.

Contrário a isso tudo, *tempo* e *espaço absolutos* são definidos pela sua própria natureza e sem qualquer relação com as coisas externas, como aquele que flui uniformemente (o *tempo*) e aquele que permanece sempre similar e imóvel (o *espaço*). Além do mais, do mesmo modo que a “ordem das partes do tempo é imutável”, assim também a “ordem das partes do espaço é imutável”, visto que os lugares “permanecem imóveis e constituem o espaço que chamo imóvel” (NEWTON, 1987, p. 129).

Conseqüentemente, isso assegura que os movimentos verdadeiros possam ser definidos como sendo a “translação do corpo de um lugar absoluto para outro [lugar absoluto]”, onde “lugar” significa “a parte do espaço que o corpo ocupa” (*Idem*, p. 130). A discussão promovida aqui é a mesma que Newton realizou no *De Gravitatione*, lugar no qual estabeleceu as “analogias” entre as propriedades do *tempo* e do *espaço* e considerou a noção de *tempo absoluto* como representada pela *duração*. A imobilidade das partes do *espaço* é explicada por meio da analogia com as partes da *duração*, isto é: a ordem e as posições relativas de suas partes (no caso da *duração*, o “hoje”, o “ontem”,

etc.) é o único “princípio de individuação” de que dispõem, alterá-las significa transformá-las em outras (NEWTON, 1979, p. 73). Assim como o *espaço*, é necessário também considerar a *duração* enquanto uma “disposição do ser enquanto ser”, e através de ambos determinar a “quantidade de existência” de todos os seres (*Idem*, p. 74). Em uma pequena passagem do Escólio do Livro I, Newton retoma essas duas analogias afirmando que:

“Todas as coisas estão no tempo, enquanto ordem de sucessão, e no espaço, enquanto ordem de situação [*lugar*]. É da essência das coisas que os lugares existam; e é absurdo pensar que os lugares primeiros se movam. Estes são lugares absolutos e apenas as translações a partir desses lugares são movimentos absolutos.” (NEWTON, 1987, p. 129).

Por outro lado, no *Principia* Newton não discorre de maneira extensiva em suas explicações para existência do *espaço* e *tempo absolutos* tanto quanto havia feito no *De Gravitatione*. Entretanto, a passagem supracitada demonstra que suas posições não se alteraram, pois ele continuou pensando que o *espaço* e o *tempo* são “predicados” necessários da existência das coisas; de maneira que nada pode existir – e isso incluindo o *movimento* – sem referência à ordem de sucessão do *tempo* e à ordem de situação do *espaço*.

Mas podemos perceber uma “limitação” de ordem prática na referência dos *movimentos locais* aos *lugares absolutos*, isso porque “as partes do *espaço* não podem ser vistas e distinguidas entre si pelos nossos sentidos [...]” (*Idem*). Não possuímos também nenhuma razão, segundo Newton, para tomar como verdadeiras as “medidas sensíveis” do *espaço* e do *tempo*, “pois é possível que não exista nenhum movimento uniforme, pelo qual o *tempo* seja exatamente medido” e, o que é mais agravante, “pode ser que nenhum corpo esteja verdadeiramente em repouso, ao qual os lugares e os movimentos sejam referidos.” (*Idem*, pp. 129 e 130). A questão aqui não é mais certificar se realmente existem *movimentos verdadeiros* e *absolutos*, pois isto é uma

conseqüência da existência do *espaço* e *tempo absolutos* – que deveria ser assegurada pelo argumento exposto acima –, mas “conhecer” e “distinguir” o *movimento* e o *repouso absolutos* dos *relativos* (*Idem.*).

Newton confessa que a solução é, então, “distinguir o repouso e o movimento, tanto os absolutos como os relativos, por suas *propriedades, causas e efeitos.*” (*Idem*), a saber: (I) Propriedades – (i) “que os corpos verdadeiramente em repouso estejam parados em relação um ao outro”; (ii) “que as partes que guardam as posições dadas em relação a seus todos participam dos movimentos desses todos”; (iii) “movendo-se o lugar, juntamente se move o conteúdo, e, por isso, um corpo que se move de um lugar em movimento participa também do movimento do seu lugar”; (II) Causas – “[as forças] impressas nos corpos para gerar o movimento”; (III) Efeitos – “as forças para se afastar do eixo do movimento circular.” (NEWTON, 1987, pp. 130 e 131).

A diferença entre *movimento relativo* e *movimento absoluto* é, por sua vez, descrita por Newton em uma longa passagem contida no Escólio do Livro I do *Principia*. De acordo com ele, “o *movimento absoluto* é a translação de um corpo de um “lugar absoluto” para outro, e o *movimento relativo* é a translação de um “lugar relativo para outro”. Neste caso, para ilustrar tal raciocínio, Newton imagina uma embarcação à vela sendo empurrada pelo vento. Assim, o “lugar relativo” de um corpo é a parte do navio em que tal corpo se encontra, ou a parte da concavidade que o corpo ocupa e que, portanto, move-se junto com a embarcação. O “repouso relativo” é a permanência do corpo na mesma parte do navio ou de sua cavidade. Por outro lado, o “repouso real”, “absoluto”, é a permanência do corpo na mesma parte do espaço imóvel em que se movem o navio “em si”, sua cavidade e tudo o que ela contém (NEWTON, 1987, p. 128).

Portanto, se a Terra pudesse “se manter realmente em repouso”, o corpo que está em repouso relativo no navio mover-se-ia, em termo reais e absolutos, com a mesma velocidade do navio em relação à Terra. Mas, como a Terra também se move, o movimento verdadeiro e absoluto do corpo aumentará, em parte pelo movimento verdadeiro da Terra no espaço imóvel, e em parte pelo movimento relativo do navio em relação à Terra. Agora, se o corpo também se mover “relativamente” no navio, seu movimento verdadeiro aumentará, em parte pelo movimento verdadeiro da Terra no espaço imóvel, e em parte pelos movimentos relativos tanto do navio em relação à Terra quanto do corpo em relação ao navio, e desses movimentos relativos decorrerá o movimento relativo do corpo em relação à Terra (NEWTON, 1987, p. 128). Para Newton, no entanto, seria “difícil conhecer os movimentos verdadeiros de cada um dos corpos”, distinguindo-os dos movimentos aparentes, porque as partes do espaço imóvel nas quais os movimentos verdadeiros ocorrem não são percebidas por nossos sentidos.

Uma solução que Newton sugere em contraste às dificuldades de se “conhecer” os movimentos verdadeiros seria a possibilidade de “medir” os efeitos provocados por eles. Para tanto, Newton idealiza um “experimento” que ficou conhecido como o “experimento do balde”. Embora a solução pareça simples, ela ilustra claramente a situação na qual é possível distinguir o movimento circular verdadeiro. Imagina-se um “recipiente” (um balde) suspenso por uma longa corda, que é tantas vezes contorcida pelo movimento circular do recipiente até o limite. Preenche-se o recipiente com água e ambos suspensos em repouso. Em seguida, com um impulso (“a ação repentina de uma força”), o recipiente é colocado em movimento circular contrário e a água, que nos primeiros momentos desse movimento permanecerá no estado em que se encontrava antes, apresentando uma superfície plana, gradualmente começará a girar e terá sua

superfície alterada para uma figura côncava, subindo pelas paredes do recipiente até que esteja em repouso relativo a este. Portanto, “essa subida da água mostra sua tendência a se afastar do eixo de seu movimento [*conatus recedendi ab axe motus*]; e o movimento circular verdadeiro e absoluto da água, que aqui é diretamente contrário ao relativo, torna-se conhecido e pode ser medido por esta tendência” (NEWTON, 1987, p. 132).

De início, quando o movimento relativo da água no recipiente era máximo, não havia nenhum esforço para afastar-se do eixo; a água não mostrava nenhuma tendência à circunferência, nem nenhuma subida na direção dos lados do recipiente, mas mantinha uma superfície plana, e, portanto, seu movimento circular verdadeiro ainda não havia começado. Entretanto, um tempo depois, quando o movimento relativo da água havia diminuído, a subida em direção à borda do recipiente mostrou o esforço dessa para afastar-se do eixo. A presença desse esforço indica a existência de um movimento circular verdadeiro e único (da água), que não depende das translações em relação aos corpos externos (*Idem*).

Certamente que no contexto acima, isto é, no “experimento do balde”, Newton estava consciente de que se tratava, tão somente, de uma “ilustração empírica” de um princípio mecânico abstrato. Este foi, na verdade, um procedimento usual adotado por Newton também em outras passagens do *Principia*, especificamente nos Livros I e II. No entanto, a “medida” dos efeitos dos movimentos circulares verdadeiros deve ser tomada apenas para identificá-los, mas, jamais, para provar a existência, por exemplo, do espaço ao qual se referem – isto é, jamais seria possível uma “prova experimental” do espaço absoluto.

Agora, se há uma “dificuldade no sentido de conhecer os movimentos verdadeiros de cada um dos corpos”, como Newton se expressara, e se, portanto, ainda

corrompem “a matemática e a filosofia aqueles que confundem as quantidades verdadeiras com as relações e as medidas vulgares das mesmas”, a tarefa que resta então é, pois, assumir que: “(...) podem ser tomados argumentos em parte dos movimentos aparentes que são diferentes dos movimentos verdadeiros, em partes das forças que são as causas e os efeitos dos movimentos verdadeiros.” (NEWTON, 1987, p. 133). As palavras finais de Newton no Escólio das Definições indicam as etapas seguintes de sua investigação, que culminarão, certamente, na estrutural conceitual do Livro III do *Principia*:

“(...) será ensinado mais extensivamente no que segue como inferir os movimentos verdadeiros através de suas causas, efeitos e diferenças em relação aos movimentos relativos e, ao contrário, através dos movimentos ou verdadeiros ou aparentes inferir suas causas e efeitos. Pois compus o tratado que se segue para esse fim.” (NEWTON, 1987, p. 134).

O Livro III do *Principia* nos mostra que foi exatamente isto que Newton realizou. Pois, a partir dos “movimentos relativos” dos planetas, procurou determinar os efeitos e as causas desses movimentos e, em seguida, a partir desses efeitos – a tendência retilínea de seus movimentos –, e dessas causas – a força gravitacional exercida sobretudo pelo Sol –, procurou determinar os “movimentos verdadeiros” dos planetas. Em virtude desta abordagem conceitual, Newton orientou tanto as suas novas idéias quanto as antigas acerca dos fundamentos das “ciências mecânicas”, lançando, assim, todas as bases necessárias de uma nova *filosofia natural*.

III – A *GRAVITAÇÃO UNIVERSAL* E O *SISTEMA DO MUNDO* NEWTONIANO.

3.1 – DOS PRINCÍPIOS DA *GRAVITAÇÃO UNIVERSAL*

No início do Livro III do *Principia* Newton introduziu uma advertência em relação à mudança que realizaria na maneira de operar em suas investigações. Para os propósitos que ele havia estabelecido, caberia a tarefa de abandonar (em alguns momentos) a postura de matemático e geômetra, que assumira nos dois primeiros livros, na medida em que estava finalmente em condições de expor e sustentar seu *Sistema do Mundo*:

“Nos livros precedentes tratei dos princípios da filosofia, mas não dos filosóficos, e sim meramente dos matemáticos, [isto é], daqueles sobre os quais talvez se possa discutir nos assuntos filosóficos. Tais são as leis e condições dos movimentos e das potências ou forças que dizem respeito principalmente à filosofia. Entretanto, para que não parecessem áridas, illustrei-as com alguns Escólios filosóficos, fornecendo uma exposição das coisas que são de natureza mais geral e nas quais parece fundar-se principalmente a filosofia (...). Resta-nos mostrar, a partir destes mesmos princípios, a constituição do sistema do mundo.” (NEWTON, 1987, p. 613).

O propósito principal de Newton nesse livro é explicar os fenômenos naturais e celestes com o auxílio dos princípios matemáticos expostos nos dois primeiros livros. As suas investigações no Livro III levaram-no a tratar tanto do sistema planetário – ao qual todos seus contemporâneos se referiam como sinônimo exclusivo de “sistema de mundo” – quanto do movimento da Lua, da forma da Terra, das marés e do movimento dos cometas, a todos eles oferecendo uma explicação baseada em um único princípio: *a gravitação universal*

A idéia de uma interação mútua entre os planetas, promovida pelo princípio de gravitação universal – com o apoio indispensável da terceira lei do movimento –, possibilitou a Newton avançar no estudo do “problema de dois corpos”, em torno do qual seus contemporâneos haviam se esforçado para determinar as propriedades do

movimento planetário, uma vez expressas pelas Leis de Kepler, e tratar (matematicamente) de um problema bem mais complexo ao considerar as perturbações planetárias causadas pela interferência externa de um terceiro corpo. Considerar, por exemplo, a ação perturbadora do Sol no sistema Terra-Lua, implica que as Leis de Kepler se restringem a um sistema matemático idealizado onde apenas um corpo, ou um ponto sem massa, gira em torno de um centro de força imóvel, sem sofrer qualquer ação externa a esse sistema. No *Principia*, a rigorosa estrutura das idealizações matemáticas elaborada no Livro I permitiu a Newton passar desse sistema para o Livro III, o *Sistema do Mundo*, levando-o a reelaborar as condições do movimento planetário regidas pelas leis keplerianas.

A Segunda e a Terceira Leis de Kepler¹⁰ são apresentadas no início do Livro III antes das Proposições, numa seção denominada “Fenômenos” (*Phaenomena*), que constava na primeira edição dos *Principia* (1687) como “Hipóteses”. Essas leis deixam de ser tratadas matematicamente no âmbito restrito de um sistema ou modelo idealizado e passam a desempenhar a função de expressar a regularidade *aparente* dos movimentos planetários. Nesse sentido, elas descrevem os principais fenômenos que o princípio da gravitação universal de Newton pretende explicar. Mas, antes disso, as Leis de Kepler constituem as premissas do argumento que Newton constrói para, através das Leis do Movimento e das principais Proposições dos Livros I e II, inferir a lei e as propriedades da força necessária para gerar aqueles movimentos. Contudo, numa certa altura de seu

¹⁰ Johannes Kepler (1571-1630) estudou as observações do astrônomo Tycho Brahe sobre os movimentos dos planetas e descobriu, por volta de 1605, que estas observações seguiam leis matemáticas relativamente simples. Em 1609 Kepler apresentou os resultados de suas investigações astronômicas e matemáticas na publicação de um trabalho intitulado *Astronomia Nova... De Motibus Stellae Martis*, onde surgiu, pela primeira vez, a enunciação de suas duas primeiras leis do movimento planetário: a **Primeira Lei** (Lei das Órbitas), que estipula que as órbitas dos planetas são elipses, com o Sol ocupando um dos focos destas e, a **Segunda Lei** (Lei das Áreas), que afirma que o raio vetor que uma planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais. A **Terceira Lei** (conhecida como “Lei Harmônica”) apareceu somente depois na obra *A harmonia do Mundo*, de 1619, e diz que existe uma razão constante entre os quadrados dos períodos de revolução (T) que são proporcionais aos cubos das distâncias médias (a) do Sol aos planetas: $T^2 = ka^3$, onde k é uma constante de proporcionalidade. (cf. COHEN. B., 1988, p. 171-3).

argumento, Newton se incumbirá de mostrar as “perturbações” ou os “desvios” que as interações gravitacionais dos corpos celestes introduzem nos movimentos planetários descritos segundo os Fenômenos. Conseqüentemente, as conclusões de Newton não decorrem de uma maneira diretamente dedutiva de suas premissas.

Os dois primeiros Fenômenos, sendo instanciados pelas Segunda e Terceira Leis de Kepler, estabelecem a Lei das Áreas e Lei Harmônica para os satélites de Júpiter e de Saturno. A primeira segue da forma quase circular das órbitas desses satélites, com os respectivos planetas situados nos centros, e do movimento uniforme que realizam em torno desses centros – como “consta pelas observações astronômicas” (NEWTON, 1987, p. 619). Quanto à segunda, não é necessário que se faça qualquer inferência, pois se conclui diretamente da comparação entre os tempos e as distâncias calculadas e aquelas observadas.

No Fenômeno III, Newton afirma a “hipótese copernicana” de que “Os cinco planetas primários, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno giram em torno do Sol com suas órbitas” (*Idem*, p. 622), pois é o que se observa através de suas respectivas “fases” relativas à reflexão da luz solar. E pelos mesmos motivos astronômicos afirma no Fenômeno IV que “(...) os tempos periódicos dos cinco planetas primários e do Sol em torno da Terra ou da Terra em torno do Sol, estando em repouso as estrelas fixas, estão na razão da potência $\frac{3}{2}$ das distâncias médias do Sol”, e acrescenta no comentário, “Pois os tempos periódicos são os mesmos e as magnitudes das órbitas as mesmas, tanto se o Sol gira em torno da Terra quanto se a Terra gira em torno do Sol” (*Idem*, pp. 622-23). Mas são apresentadas apenas as medidas dos tempos e das distâncias médias para o caso de a Terra girar em torno do Sol. De qualquer modo, isso mostra que, pelo menos nessa seção do Livro III, Newton não tinha qualquer preocupação cosmológica, guiando-se apenas pela intenção de descrever os movimentos

relativos dos corpos celestes com os dados e informações astronômicas disponíveis a sua época.

Assim ele procede também no Fenômeno V, onde considera que se observa a Lei das Áreas no movimento planetário apenas quando se considera o Sol como centro, pois “com raios traçados até a Terra, [os planetas primários] descrevem áreas muito pouco proporcionais aos tempos” (NEWTON, 1987, p. 624). Após afirmar a Lei das áreas também para o movimento da Lua em torno da Terra, no Fenômeno VI, Newton comenta sobre os padrões de exatidão desta seção: “(...) o movimento lunar é um pouco perturbado pela força solar, mas nesses Fenômenos negligencio minúcias de desvios imperceptíveis” (*Idem*, p. 624).

Ainda que os Fenômenos funcionem como ponto de partida para a estrutura do argumento de Newton nas primeiras proposições do Livro III, requer-se também duas outras classes de princípios: (i) os “princípios do movimento”, que reúnem as Leis do Movimento e os principais teoremas demonstrados nos Livros I e II; (ii) as *Regras para Filosofar* (*Regulae philosophandi*), que funcionam como “axiomas” metodológicos evocados para fundamentar certas formas de inferências não-dedutivas.

As *Regras para Filosofar* aparecem no início do Livro III desde a segunda edição do *Principia* (1713), quando eram três Regras e a partir da terceira edição (1723) passaram a ser quatro. As Regras I e II, presentes desde a primeira edição como “Hipóteses” I e II, afirmam:

"Regra I: Não devem ser admitidas mais causas para as coisas naturais que aquelas que sejam verdadeiras e suficientes para explicar seus fenômenos.

Regra II: Por causa disso, na medida em que seja possível, devem ser atribuídas as mesmas causas aos efeitos do mesmo gênero" (NEWTON, 1987, pp. 615-16).

Ambas se inspiram na estipulação de que a natureza nada faz em vão, visto que “a natureza é simples e não se dá a excessos com causas supérfluas para as coisas”, conforme Newton observa no comentário à Regra I. Mas como se trata de “regras”, cuja

legitimidade para os fins pretendidos por Newton poderia dispensar qualquer razão de ordem especulativa, ambas as regras, tomadas conjuntamente, funcionam como um princípio metodológico de economia – uma variação da conhecida “navalha de Ockham” (ROSSI, 2001, p. 393). Contudo, a segunda Regra se diferencia da primeira ao mencionar que a “mesma causa” deve ser atribuída aos efeitos do mesmo tipo, sem contribuir para o esclarecimento do significado da expressão “do mesmo tipo”. Enquanto essas duas primeiras Regras garantem a unicidade e a uniformidade das causas no tratamento dos mesmos fenômenos, as duas seguintes fornecem os fundamentos das generalizações realizadas por indução.

“Regra III: As qualidades que não podem ser intensificadas nem enfraquecidas, e que pertencem a todos os corpos para os quais experimentos podem ser realizados, devem ser consideradas como qualidades de todo corpo.”

Regra IV: Na filosofia experimental, as proposições obtidas a partir dos fenômenos por indução, não obstante as hipóteses contrárias, devem ser tidas como verdadeiras, ou exata ou muito aproximadamente, até que ocorram outros fenômenos, pelos quais tornem-se ou mais exatas ou sujeitas a exceções” (NEWTON, 1987, pp. 617-18).

Por meio da Regra III, Newton pretende assegurar que as qualidades ou propriedades dos corpos (a extensão, a dureza, a impenetrabilidade, a mobilidade e a força de inércia) conhecidas “por intermédio de experimentos” possam ser “estabelecidas como gerais” (*Idem*, p. 617). Na segunda edição do *Principia*, a “Hipótese” III desaparece para dar lugar a essa Regra. Mas o caráter dela revelou-se polêmico porque ela se opunha ao apriorismo dos filósofos continentais, entre eles, Descartes e Leibniz, (KOYRÉ, 1968, p. 320-1), fato esse que se esclarece devido ao tratamento que Newton lhe dedicou:

“Pois as qualidades dos corpos só se esclarecem mediante experimentos, (...) e aquelas que não podem diminuir, tão pouco podem ser suprimidas. Certamente, não se pode fantasiar temerariamente sonhos contra a segurança dos experimentos, nem se distanciar da analogia da natureza, que é sempre simples e congruente consigo mesma” (NEWTON, 1987, p. 617).

Logo, por ser justamente tal como se apresenta, pode-se generalizar os dados da experiência e atribuir a todos os corpos as propriedades que eles revelam. E, para

garantir o êxito esperado com essa Regra, Newton acrescenta ainda em seu comentário que:

“(…) se mediante experimentos e observações astronômicas consta *universalmente* que todos os corpos em torno da Terra gravitam até ela, e isto segundo a quantidade de matéria contida em cada um, e que a Lua gravita até a Terra segundo a sua quantidade de matéria, e vice-versa, que nosso mar gravita para a Lua, que todos os planetas gravitam mutuamente entre si e que a gravidade dos cometas até o Sol é similar, haverá de dizer, em virtude desta regra, que todos os corpos gravitam entre si. E, inclusive, será mais forte o argumento sobre gravidade universal a partir dos fenômenos, de que sobre a impenetrabilidade dos corpos: já que desta [qualidade] não temos nenhuma experiência nos corpos celestes e, tão pouco, observação alguma” (NEWTON, 1987, p. 618).

Ao comentar a que grau de generalização pode-se aproximar com a Regra III, Newton faz uma importante advertência no sentido de que não se pode aceitar a *gravidade* como uma propriedade *essencial* dos corpos: “Entretanto, não afirmo em absoluto que a gravidade seja essencial aos corpos. Por *força insita* entendo somente a *força de inércia*. Esta é imutável. A gravidade diminui ao distanciar-se da Terra” (*Idem*). Para Newton, o princípio de *inércia* restringe-se à função da *massa* de um corpo; a *gravidade*, ao contrário, diz respeito à *atração*, cuja força varia (aumenta ou diminui) de acordo com a distância. É, pois, nesse sentido, que Newton afasta qualquer possibilidade de identificar a gravidade como uma qualidade inerente à matéria.

As asserções empíricas que nos permitem conhecer as qualidades sensíveis (porém essenciais) dos corpos, tal como garante a Regra III, parece não ter convencido os filósofos continentais, reforçando ainda mais a oposição à filosofia natural de Newton (KOYRÉ, 1968, p. 321). Assim, é por tal motivo que no *Principia* Newton formula a Regra IV com uma afirmação muito explícita: “Na filosofia experimental, as proposições obtidas a partir dos fenômenos por indução, não obstante as hipóteses contrárias, devem ser tidas como verdadeiras (...)”. Nesta filosofia proposta por Newton é necessário examinar os fatos e admitir que um certo grau de certeza possa ser atribuído às proposições obtidas através de tais argumentos indutivos. A Regra IV funciona como

uma advertência no sentido de que os argumentos indutivos não são evitados por quaisquer hipóteses contrárias imaginadas – levada a cabo, a quarta Regra é normalmente considerada como dirigida aos cartesianos.

Newton defende a legitimidade da sua pretensão quanto ao caráter universal da gravitação com base numa aplicação das *Regras para Filosofar*. O princípio de *gravitação* permite justificar por uma mesma causa efeitos idênticos, como a queda de uma pedra sobre o solo e a “queda” contínua da Lua em órbita em torno da Terra, instanciada pela Regra II. É legítima considerá-la *universal* na medida em que ela intervém em todos os fenômenos celestes e terrestres conhecidos – conforme o argumento oferecido na Regra III. “Hipóteses” alternativas à gravitação universal podem ser consideradas, como, por exemplo, a dos *vórtices* (de Descartes); no entanto, elas não têm valor probatório, a não ser que sejam também derivadas das observações – como estipula a Regra IV.

Nos livros precedentes, Newton não se dedicou em definir uma espécie ou modo de “atração” e “impulsos” em termos de uma causa ou princípio físico, como é o caso da gravitação universal; preocupou-se, na verdade, em advertir o leitor que quando atribui “qualquer” tipo de ação não se referia às “forças em um sentido verdadeiro e físico, a certos centros, que são apenas pontos matemáticos” (NEWTON, 1987, p. 126).

Portanto, Newton procurou realizar uma cuidadosa distinção entre os princípios matemáticos dos dois primeiros Livros do *Principia* e sua aplicação à filosofia natural, tal como ocorre no Livro III. De tal modo, não se deve aceitar o terceiro livro apenas como matemático e “hipotético”, pensando no desenvolvimento de uma mecânica e não uma filosofia da natureza. Ao introduzir os Fenômenos no início do Livro III, Newton quer promover “a base fenomenológica de sua física” (COHEN, 1980, p. 117).

3.2 – A RELAÇÃO ENTRE *GRAVIDADE (PESO)* E *MATÉRIA (MASSA)*: A *GRAVIDADE* COMO UM PRINCÍPIO UNIVERSAL

O argumento do Livro III do *Principia* depende da aplicabilidade dos princípios mecânicos formulados nos Livros I e II e, em especial, do estabelecimento da proporcionalidade entre *peso* e *massa*, de maneira tal que dois corpos quaisquer, alinhados na mesma posição, *gravitem* no mesmo grau de intensidade de acordo com a quantidade de matéria existente em cada um deles. O argumento de Newton é de que a proporcionalidade entre *peso* e *massa*, demonstrada para corpos terrestres por meio de experimentos com pêndulos e, para os planetas e satélites planetários, pela análise de seus movimentos orbitais, pode ser seguramente generalizada para *todos* os corpos.

A Proposição I postula que uma força exercida por Júpiter sobre os seus satélites é centrípeta e inversamente proporcional ao quadrado da distância. A primeira parte dessa Proposição é assegurada, ou evidente, pelo Fenômeno I e, principalmente, pelas Proposições II e III, Seção II do Livro I, que afirmam que, se a Segunda Lei de Kepler é satisfeita, então uma força centrípeta deve estar agindo. A segunda parte da Proposição necessita recorrer ao Fenômeno I, utilizando o Corolário VI da Proposição IV do Livro I, que trata do movimento uniforme em *órbitas circulares*, a fim de mostrar, pela Terceira Lei de Kepler, que as forças que atuam sobre os ditos satélites são “inversamente como os quadrados das distâncias dos lugares ao centro”. O mesmo pode ser dito para os satélites de Saturno (NEWTON, 1987, p. 625).

A Proposição II afirma o mesmo que a primeira, mas agora a força centrípeta que é inversamente proporcional ao quadrado da distância vale para o Sol e os cinco primeiros planetas. A dedução dessa Proposição desenvolve-se aproximadamente da mesma maneira que a Proposição I. A primeira parte da demonstração sendo

estabelecida a partir do Fenômeno V e da Proposição II, do Livro I, e a segunda parte a partir do Fenômeno IV e do Corolário VI da Proposição IV do mesmo Livro (*Idem*, pp. 625/26).

Como foi visto (seção 3.1), recorrendo-se aos Fenômenos, Newton pôde aplicar um sistema onde apenas um corpo move-se em órbitas circulares, pelas Proposições II e III do Livro I, para demonstrar a existência de uma força que afasta continuamente os planetas de “suas órbitas retilíneas”, mantendo-os “em suas órbitas respectivas”, e que esta mesma força está dirigida para o Sol, variando inversamente com o quadrado da distância, como garante a Proposição em discussão¹¹.

No começo do Livro III Newton utiliza, então, um sistema muito simples, com a presença de um único corpo atuando em uma órbita circular, para os satélites de Júpiter, bem como para os planetas. Em seguida, utiliza um sistema mais complexo para os planetas, que surgiu na Seção IX do Livro I, onde passa da consideração dos corpos em órbitas imóveis ao movimento dos corpos em órbitas móveis. Isso o leva a investigar a diferença entre as forças que produzem movimento em uma órbita em repouso e aquelas que o produzem em uma órbita que gira em torno de algum outro centro de força.

O argumento de Newton até o momento é de que os planetas, que por si mesmos se moveriam em linha reta, são retidos em suas órbitas devido à ação de uma força centrípeta que os desvia continuamente para o centro, de modo que suas órbitas são os resultados das composições desses dois movimentos. O mesmo ocorre com a Lua, que é retida em sua órbita por uma força que se dirige para a Terra, e cuja intensidade varia inversamente com o quadrado da distância, como mostra a Proposição III que enuncia: “A força pela qual a Lua é retida em sua órbita, dirige-se para a Terra e é inversamente

¹¹ Com a demonstração da Proposição II, nota-se que Newton recorre a um sistema mais complexo, tal como ele havia introduzido no Corolário I da Proposição XLV, Seção IX do Livro I. Agora, ele pode demonstrar, a partir de um dado observado, a “imobilidade dos afélios”, e afirmar que existe uma força que deve “variar inversamente com o quadrado da distância”.

como o quadrado da distância dos lugares ao centro da Terra” (*Idem*, 1987, p. 626). Isso se prova ao reunir o que afirmam o Fenômeno VI (“A Lua, com um raio traçado até o centro da Terra, descreve uma área proporcional ao tempo”) e a Lei das Áreas (as Proposições I e II do Livro I, que enunciam: “Todo corpo, que por um raio traçado até o centro de outro corpo, que é de alguma forma movido, descreve áreas proporcionais aos tempos em torno daquele centro, é impelido por uma força composta da força centrípeta que tende para aquele outro corpo, e de toda força acelerativa pela qual aquele outro corpo é impelido”).

Newton conclui que essa força é inversamente proporcional ao quadrado das distâncias até o centro da Terra ao considerar a “lentidão do apogeu lunar”, que, a cada revolução, é de apenas “três graus e três minutos”, a ponto de se poder “desprezá-lo” (NEWTON, 1987, p. 626). Agora, pelo Corolário I da Proposição XLIX do Livro I, Newton supõe que se a distância da Lua até o centro da Terra está para o semidiâmetro da Terra como D está para 1 , a força que se originaria de tal movimento seria *inversamente proporcional* a $D^{2-\frac{4}{243}}$, ou seja, na razão inversa um pouco mais que o quadrado da distância, mas que seria 5934 mais próximo da razão quadrada do que da cúbica (*Idem*).

O movimento (muito lento) do apogeu lunar tem a sua origem na ação do Sol, posto que esse corpo afasta, com a sua força, a Lua da Terra. Assim, pelo que havia sido afirmado no Corolário II da Proposição XLV do Livro I, a “ação do Sol” sobre a Lua, que é a responsável por esse acréscimo à razão inversa do quadrado, deve ser tomada como estando para a força centrípeta da Terra “como 2 está para $357,45$, ou como 1 está para 1782940 ”. Desprezando essa “minúscula força do Sol”, a força restante será aquela com a qual a Terra mantém a Lua em sua órbita, qual seja, inversamente

proporcional ao quadrado da distância da Lua ao centro da Terra – isto é, inversamente proporcional a potência 24243 da distância da Lua ao centro da Terra (*Idem*, p.627).

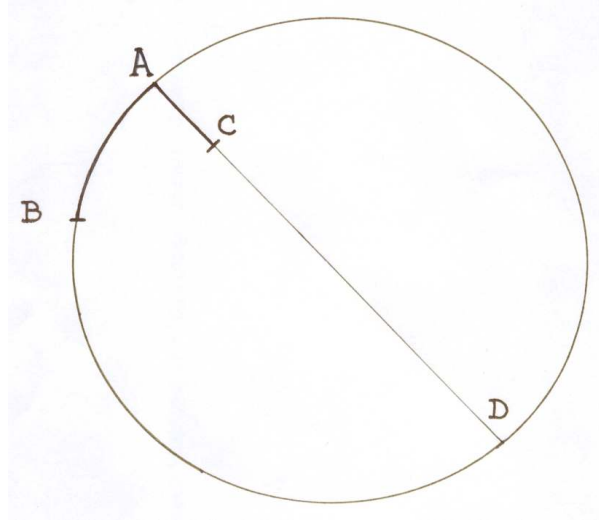
Na demonstração da Proposição III, nota-se que Newton não a concebeu como sendo conclusiva, a ponto de reconhecer que as propriedades da força que mantém a Lua em sua órbita seriam melhor esclarecidas ao “comparar esta força [centrípeta] com a da gravidade, como será feito na próxima Proposição”.

Depois de mostrar que a Terra possui uma força inversa do quadrado que atua sobre a Lua e que está dirigida para o centro da Terra, Newton procede, na Proposição IV do Livro III, a identificar esta força com a da *gravidade*: “A Lua gravita para a Terra e é continuamente desviada do movimento retilíneo e retida em sua órbita pela força da gravidade” (NEWTON, 1987, p. 627). Para isso, Newton supõe que se “a Lua fosse privada de todo movimento” e “caísse” em direção a Terra “sob a ação daquela força pela qual (pelo Corolário da Proposição III) é mantida em sua órbita (...), descreveria um espaço de $15\frac{1}{12}$ pés parisiense em um minuto”, à distância de “sessenta semidiâmetros terrestres”, isto é, a distância média entre a Lua e a Terra (*Idem*, p. 628).

Newton infere isto a partir da Proposição XXXVI do Livro I e do Corolário IX, Proposição IV do mesmo livro, onde se afirma que:

“o arco descrito por um corpo em um tempo qualquer, girando uniformemente em um círculo com uma dada força centrípeta, é uma média proporcional entre o diâmetro do círculo e o espaço que o mesmo corpo, caindo pela mesma força dada, descreveria no mesmo tempo dado”.

Assim se estabelece a seguinte relação: $AD:AB::AB:AC$.



[figura 04]

Tem-se então $AC = AB^2 / AD$ (figura 04) e, neste caso, AC é também o seno verso do arco AB , pelo Corolário IV, Proposição I do Livro que afirma:

“As forças pelas quais os corpos, em espaços livres de resistência, são retirados de movimentos retilíneos e redirecionados para órbitas curvilíneas em tempos iguais; cujos senos versos tendem para o centro de força e bisseccionam as cordas quando aqueles arcos são infinitamente diminuídos”.

Sendo a medida da circunferência da Terra 123249600 pés parisienses, e a distância média da Terra até a Lua de 60 semidiâmetros terrestres, o perímetro da órbita da Lua será de 7394976000 pés. E sendo o período lunar de 27 dias, 7 horas e 43 minutos, ou 39343 minutos, então o arco médio percorrido em um minuto será de 187961,67 pés. Dividindo o perímetro lunar por π , tem-se o diâmetro da órbita da Lua igual a 2353888464,48 pés. Logo, se $AB^2 = 35329589389,1$ e $AD = 2353888464,48$, então $AC = 15,009$ pés parisienses. O seno verso do arco que a Lua com o seu movimento médio à distância de sessenta semidiâmetros terrestres, sob a ação da força centrípeta terrestre, descreveria no tempo de um minuto é de aproximadamente $15 \frac{1}{12}$ pés parisienses, “ou mais exatamente 15 pés, 1 polegada e

$1\frac{4}{9}$ linhas”. Observando que essa força centrípeta decresce inversamente como o quadrado da distância, pela Proposição III, “na superfície terrestre ela será 60×60 vezes [aumentará 60^2 vezes] maior que na Lua”, portanto, a Lua cairá $15\frac{1}{12}$ pés por segundo.

A realização de experimentos com pêndulos resultou na afirmação de que a força da gravidade causa a queda de um corpo situado na superfície da Terra. A partir deste ponto, conclui-se que “a força [centrípeta] pela qual a Lua é retida em sua órbita, se descesse até a superfície da Terra, tornar-se-ia igual à força da gravidade entre nós” (NEWTON, 1987, p. 628); e pelas Regras I (“Não devem ser admitidas mais causas para as coisas naturais que aquelas que sejam verdadeiras e suficientes para explicar seus fenômenos”) e II (“devem ser atribuídas às mesmas causas aos efeitos do mesmo gênero”), pode-se, finalmente, concluir que:

“(…) essa é a mesma força que chamamos de gravidade. Pois se a gravidade fosse distinta dessa força, os corpos desceriam para a Terra sob a ação de ambas as forças com o dobro de velocidade, e descreveriam caindo no tempo de um segundo o espaço de 3016 pés parisienses: contra toda experiência” (NEWTON, 1987, p. 628).

A Proposição V é apenas uma generalização do resultado obtido com a Proposição IV, e diz que os satélites de Júpiter gravitam para Júpiter, os de Saturno para Saturno e os planetas para o Sol, e que as forças centrípetas de todos estes corpos são as mesmas que as gravitacionais. Newton justifica essa Proposição afirmando que a revolução dos satélites jovianos em torno de Júpiter é um fenômeno do mesmo tipo que o da revolução da Lua em torno da Terra, e, “(…) portanto, pela Regra II, devem ser devidos a um mesmo tipo de causa” (NEWTON, 1987, p. 630), que a Proposição IV demonstrou ser a força da gravidade.

Na segunda edição do *Principia* (1713) Newton introduziu mais um corolário na Proposição V, somando-se três no total. O Corolário I procura mostrar que os satélites também exercem forças gravitacionais em seus planetas, e os planetas no Sol, pois, pela Terceira Lei do Movimento, “(...) toda atração é mútua, Júpiter gravitará para todos os seus satélites, Saturno para os seus, a Terra para a Lua, e o Sol para todos os planetas primários” (*Idem*). No Corolário II, Newton procede de modo inverso daquele que havia feito na demonstração dessa proposição, pois “A gravidade que se dirige para cada planeta é inversamente proporcional ao quadrado da distância dos lugares a partir do centro do planeta” (*Idem*). O Corolário III afirma, por sua vez, que:

“Todos os planetas gravitam entre si, pelos Corolários I e II. E por isso, Júpiter e Saturno, atraindo-se próximo da conjunção deles, perturbam sensivelmente os movimentos um do outro, o Sol perturba os movimentos lunares, o Sol e a Lua perturbam nossos mares, como será explicado adiante” (*Idem*).

A introdução do Corolário III, a partir da segunda edição do *Principia*, é um indicio de quão Newton estava preocupado em replicar as críticas que foram feitas contra ele ao mencionar a idéia da gravidade universal. Conseqüentemente, ele considerou necessário esclarecer melhor o seu raciocínio, assinalando que se todos os planetas são centros para os quais se dirige uma força gravitacional, logo “todos os planetas gravitam entre si”. Tudo isso indica que no Livro III Newton estava preocupado em esclarecer que se ocupava efetivamente dos fenômenos e questões físicas, e não apenas de questões matemáticas. Deste modo, com o acréscimo do Corolário III, nota-se que Newton estabelece a prova fenomênica da *gravitação universal* dos planetas e satélites, procurando resumir o seu procedimento do seguinte modo:

“Até aqui chamamos aquela força pela qual os corpos celestes são retidos em suas órbitas de *força centrípeta*. Agora é evidente que é a mesma que a *gravidade*, e por isso a chamaremos de gravidade daqui em diante. Pois a causa daquela força centrípeta pela qual a Lua é mantida em sua órbita,

deve ser estendida a todos os planetas, pelas Regras I, II e IV.”
(NEWTON, 1987, p. 631).

Com relação à dedução da Proposição VI, Newton procede em duas etapas. Na primeira parte mostra que todos os corpos *gravitam* em direção a todos os planetas. Na segunda enuncia que a força gravitacional de um corpo em direção a um planeta é proporcional às suas *massas*. Na própria demonstração, Newton não utiliza a terceira *Regra para Filosofar* para estabelecer sua conclusão final; ela é somente evocada no Corolário II, principalmente para atacar a visão cartesiana do *éter*. Por outro lado, com base em experimentos, como Newton diz neste Corolário, e na *Regra III*, pode-se concluir que, para todos os corpos, seus *pesos* são proporcionais às suas *massas* (*Idem*, 1987, p. 634).

A argumentação atinge o seu ápice com o enunciado da Proposição VII, que estabelece a existência de uma força gravitacional exercida por todos os corpos, proporcional às suas *massas*. Inicialmente, Newton nota que já estabelecera que todos os planetas gravitam mutuamente um em direção ao outro, e que a força gravitacional em direção a cada um, considerada isoladamente, obedece à lei inversa do quadrado da distância. A partir deste momento, Newton utiliza a Proposição LXIX do Livro I, para indicar que a força gravitacional em todos os planetas é proporcional às suas massas – o segundo aspecto do consagrado enunciado da gravitação universal, qual seja, que a gravidade entre os corpos é inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa e *diretamente proporcional às suas massas*. Nas próprias palavras de Newton no enunciado da Proposição VII:

“A gravidade ocorre em todos os corpos e é proporcional à quantidade de matéria existente em cada um” (NEWTON, 1987, p. 635). Por força do Corolário II, a “gravidade entre as partículas iguais de um corpo [em massa?] é inversamente proporcional ao quadrado da distância dos lugares até elas.” (*Idem*. p. 636).

Assim, poder-se-á dizer que é somente em conjunto com os seus Corolários que a Proposição VII assegurará a regra pela qual a força gravitacional age universalmente.

Mas, antes, na demonstração dessa Proposição, aplica-se a Terceira Lei do Movimento:

“Antes provamos que todos os planetas são mutuamente graves, e que a gravidade para cada um tomado individualmente é inversamente proporcional ao quadrado da distância dos lugares ao centro do planeta. É consequência disso (pela Proposição LXIX e seus corolários, Livro I) que a gravidade para todos os planetas é proporcional à matéria existente neles” (*Idem.* p. 635).

Na Proposição LXIX do Livro I, a qual Newton se refere no texto acima, ele idealiza um sistema com vários corpos interagindo por forças atrativas:

“Se em um sistema de vários corpos A, B, C, D, etc., e se qualquer um desses corpos, como exemplo, o corpo A atrai os demais corpos B, C, D, etc. com *forças acelerativas* que são inversamente como o quadrado das distâncias a partir do corpo atrativo; e, da mesma forma, o corpo B atrair também os restantes A, C, D, etc, com força que são inversamente como os quadrados das distâncias a partir do corpo atrativo; *as forças absolutas dos corpos atrativos* A e B estarão uma para a outra como os próprios corpos A e B, aos quais essas forças pertencem” (*Idem.*, 1987, pp. 358/359).

Agora, pelo o exposto acima, supomos que a *força atrativa absoluta* seja representada por FAA e a *atração acelerativa* por AA . Assim, obteremos a relação que se expressa da seguinte forma:

$$FAA_A : FAA_B :: AA_{B,C,D \text{ para } A} : AA_{A,C,D \text{ para } B}$$

e, portanto,

$$FAA_A : FAA_B :: AA_{B \text{ para } A} : AA_{A \text{ para } B}$$

Entretanto, em virtude de que as *forças motoras* são como as *forças acelerativas* – como estipula a Definição VIII: “Portanto, a força acelerativa manterá a mesma relação com a força motora (...)”¹² –, e a *massa* dos corpos atraídos conjuntamente, representemos a *força motora* por FM e a *massa* por M . Teremos então:

¹² No esclarecimento que Newton oferece a essa Definição, torna-se evidente um dos principais propósitos do Livro I do *Principia*: proporcionar apenas uma noção matemática das forças (isto é, das *forças motoras, acelerativas e absolutas*), sem considerar, pelo menos naqueles momentos iniciais de sua investigação, quaisquer fundamentos para as causas físicas daquelas forças. Do mesmo modo, afirmou que termos como “atração” e “impulso” são considerados por ele não fisicamente, mas matematicamente.

$$FM_A = AA_{A \text{ para } B} \times M_A$$

e

$$FM_B = AA_{B \text{ para } A} \times M_B,$$

então, pela Terceira Lei do Movimento,

$$FM_A = FM_B.$$

Portanto,

$$AA_{B \text{ para } A} : AA_{A \text{ para } B} :: M_A : M_B$$

Logo,

$$FAA_A : FAA_B :: M_A : M_B$$

A conclusão a qual Newton chega no Corolário I da Proposição LXIX é que:

“(…) se cada um dos corpos do sistema *A, B, C, D*, etc., considerados individualmente, atrai todos os outros corpos com forças acelerativas que são inversamente como o quadrado das distâncias até o atraente, as forças absolutas de todos aqueles corpos estarão entre si como os próprios corpos” (NEWTON, 1987, p. 359).

Dado que “a gravidade em cada planeta obedece à proporção inversa do quadrado” (Corolário II da Proposição V, Livro III), então se segue que “a gravidade ocorre em todos os corpos [os planetas] e é proporcional à quantidade de matéria existente em cada um” (Proposição VII). Nota-se com isso que Newton estabelece uma proporcionalidade que responde pela medida da força gravitacional absoluta dos planetas. A partir de então, deriva-se a proporcionalidade entre a *gravidade* e a *massa* dos planetas ao relacionar as ações motoras mútuas entre os planetas e os corpos que gravitam para eles, pois o mesmo ocorre naqueles corpos cujos *pesos* são proporcionais às suas *massas*. O passo seguinte é acrescentar que:

“Além disso, como todas as partes de qualquer planeta *A* são graves em relação a qualquer planeta *B*, e a gravidade de uma parte está para a gravidade do todo como a matéria da parte está para a matéria toda, e para toda ação existe uma reação igual (pela Terceira Lei do Movimento); então o planeta *B* gravitará inversamente em relação a cada parte do planeta *A*, e sua gravidade em relação a cada parte estará para sua gravidade em relação ao todo como a matéria da parte está para a matéria toda. Q. E. D.” (NEWTON, 1987, p. 635).

Certamente que neste ponto o texto refere-se à Proposição VI, na qual se estabeleceu que “(…) os pesos de cada uma das partes de um planeta qualquer [planeta *A*] em relação a outro [planeta *B*] são entre si como a matéria existente em cada uma de

suas partes.” (*Idem.* p. 633). A Proposição VII estabelece, por sua vez, a igualdade entre as razões da *gravidade* e da *matéria* no *todo* e nas *partes*; portanto: “(...) a gravidade em relação ao planeta todo surge e se compõem da gravidade em relação a cada uma de suas partes”, pelo Corolário I dessa mesma proposição (*Idem.* p. 635).

Vistas agora em conjunto, as proposições VI e VII são as mais significativas em relação ao argumento da gravitação universal. Na Proposição V Newton havia estabelecido a gravidade como sendo a causa dos movimentos planetários, em virtude das acelerações ocorrerem segundo uma “mesma razão e lei” em todos os lugares. Mas, com a Proposição VII, estabelece-se a relação entre as *ações motoras* da gravidade aos corpos e conclui, baseando-se na proporcionalidade entre os *pesos* e as *massas*, que “a gravidade é proporcional à quantidade de matéria dos corpos.” (*Idem.*).

Nas Proposições seguintes, Newton introduz: a *força da gravidade* no interior do corpo dos planetas; a estabilidade do sistema solar e a “imobilidade do centro de gravidade comum da Terra, do Sol e de todos os planetas.” (NEWTON, 1987, p. 641). Uma vez estabelecido que existe uma força gravitacional que age na razão inversa do quadrado da distância e que atua entre o Sol e os planetas, pode-se usar agora as leis e propriedades de tal força. Até este ponto do Livro III os movimentos planetários foram discutidos a partir dos fenômenos, enquanto que agora, descobertos os “princípios dos movimentos”, resta deduzir os movimentos celestes *a priori*, partindo dos próprios princípios do movimento (*Idem.*, 1987, pp. 642-43). A isso tudo, acrescenta-se o fato de que Newton inverte o seu modo de proceder, pois conhecidas as propriedades da *gravidade* deve-se derivar os movimentos planetários a partir das forças pelas quais os corpos celestes agem uns sobre os outros.

3.3 – A *GRAVITAÇÃO UNIVERSAL* COMO FUNDAMENTO DO *SISTEMA DO MUNDO* NEWTONIANO

A partir da Proposição XIII Newton introduz, pela primeira vez no Livro III, as órbitas elípticas dos planetas, questão que estava ausente nos Fenômenos e nas doze primeiras Proposições. Por outro lado, os movimentos derivados a partir das propriedades da força da gravidade não coincidem com aqueles descritos segundo as Leis de Kepler. Conseqüentemente, é necessário ter em mente a distinção feita por Newton no Escólio das Definições do Livro I entre *movimentos aparentes* e *verdadeiros*. O mais importante nesse passo do Livro III foi demonstrar que as órbitas planetárias são elipses com o Sol em seu foco comum e descrevem áreas proporcionais aos tempos.

Mas, neste caso, o sistema solar das Leis de Kepler não constitui uma representação exata do mundo da natureza, menos ainda no caso de Saturno, devido à perturbação provocada por Júpiter e da Terra, dado que a “órbita da Terra é sensivelmente perturbada pela Lua” (NEWTON. 1987, p. 644). É necessário, nesse sentido, deixar, momentaneamente, os Fenômenos de lado para tratar os movimentos a partir da única hipótese que aparece no Livro III, isto é, a Hipótese I: “O centro do sistema do mundo está em repouso” (*Idem.* p. 641). No entanto, a palavra *hipóteses* deve ser aceita tal como Newton a descreveu em sua carta a R. Cotes, de 1713: “E a palavra ‘hipóteses’ é usada por mim, aqui, apenas para expressar uma proposição que não seja um fenômeno nem seja deduzida de qualquer fenômeno, mas assumida ou suposta, sem nenhuma comprovação experimental” (COHEN. B. & WESTFALL. R. S. 2002, p. 155). Ou seja, Newton introduz essa hipótese apenas como uma “suposição”

(sem ter que aceitá-la realmente), cujo objetivo é verificar quais as conseqüências que surgiriam na determinação dos movimentos planetários.

Na Proposição XI afirmou-se que “O centro comum de gravidade da Terra, do Sol e todos os planetas está em repouso” (NEWTON. 1987, p. 641), pois, excetuando-se o fato de sofrer a ação externa de uma força (pelo Corolário IV das Leis do Movimento), tal centro ou está em repouso ou move-se uniformemente em linha reta. Mas se esse centro mover-se continuamente, o *centro do mundo* também se moverá, caso este que entraria em contradição com a Hipótese I.

Com relação à Proposição XII, procurou-se mostrar que o Sol é permanentemente agitado pela ação gravitacional dos planetas, mas não o suficiente para afastá-lo muito do *centro comum de gravidade*. A justificativa para isso é dada evocando-se o Corolário II da Proposição VIII, Livro III, que afirma que os dois maiores planetas, Júpiter e Saturno, têm respectivamente 1067 e 3021 vezes menos matéria que o Sol e suas distâncias até este astro estão aproximadamente nessa mesma razão para o diâmetro solar (*Idem.* p. 638). Conseqüentemente, deslocariam esse *centro comum de gravidade* para um ponto afastado do centro do Sol, mas não muito distante de sua superfície. A partir desse raciocínio, no Corolário da Proposição XII concluiu-se que:

“(…) o centro comum de gravidade da Terra, do Sol e de todos os planetas deve ser considerado como o centro do mundo. Pois como a Terra, Sol e todos os planetas gravitam entre si mutuamente, e, portanto, são agitados perpetuamente em função de suas forças de gravidade segundo as leis do movimento: é evidente que seus centros móveis não podem ser considerados como o centro do mundo em repouso. Se nesse centro devesse ser colocado aquele corpo para o qual todos os corpos gravitam em grau máximo (como é a opinião comum), esse privilégio deveria ser concedido ao Sol. Mas, como o Sol move-se, deverá ser escolhido um ponto em repouso, do qual o centro do Sol se afaste o mínimo possível, e do qual se afastaria ainda menos, se apenas o Sol fosse mais denso e maior, de tal modo que se movesse menos”(NEWTON. 1987, p. 642).

O centro do sistema do mundo não pode ser a Terra e muito menos o Sol, como era comum pensar que fossem até o momento em que Newton escrevia os *Principia*.

Portanto, uma vez suposto um “centro imóvel” para o qual tendem as forças que movem os planetas, Newton pode estabelecer na Proposição XIII as órbitas elípticas e a leis das áreas para o movimento planetário.

A demonstração da Proposição XIII exige que se recorra aos resultados estabelecidos nas proposições anteriores. Pela Proposição VIII, sabe-se que o peso dos planetas em relação ao Sol é inversamente proporcional ao quadrado de suas distâncias; portanto, “(...) se o Sol estivesse em repouso e os demais planetas não agissem mutuamente entre si”, pelas Proposições I, XI e o Corolário I da Proposição XIII, do Livro I, “suas órbitas seriam elípticas, tendo o Sol no foco comum, e descreveriam áreas proporcionais aos tempos” (*Idem*, p. 643).

No entanto, é preciso lembrar que pelo Corolário III da Proposição V, “Todos planetas gravitam entre si, (...) e, atraindo-se mutuamente, perturbam seus movimentos [suas órbitas] sensivelmente” (*Idem*, p.630). Mas para essas perturbações que são “muito pequenas”, Newton havia estabelecido na Proposição LXVI do Livro I que as áreas descritas tornam-se mais proporcionais aos tempos e as órbitas mais próximas da forma elíptica, na medida em que o corpo central também é agitado pelas ações mútuas entre os corpos desse sistema.

Por outro lado, Newton diz na Proposição XIII que “As ações de Júpiter sobre Saturno não podem ser inteiramente ignoradas. Pois a gravidade de Júpiter está para a do Sol (a iguais distâncias) como 1 está para 1067”, pelo Corolário I da Proposição VII. Portanto, “na conjunção de Júpiter e Saturno, (...) a gravidade de Saturno até Júpiter estará para a gravidade de Saturno até o Sol como 81 está para 16×1067 , ou como 1 está para 211 aproximadamente” (NEWTON. 1987, p. 643). Newton pôde então concluir que:

“E a isto se deve à perturbação da órbita de Saturno em cada conjunção desse planeta com Júpiter, suficientemente sensível a ponto dos próprios

astrônomos ficarem perplexos. Segundo as diferentes posições do planeta nessas conjunções, sua excentricidade ou aumenta ou diminui e seu afélio ou progride ou retrocede, e o movimento médio acelera-se ou retarda-se alternadamente” (*Idem*. p. 643).

O que chama a atenção é o fato de que ao predizer o efeito da ação gravitacional de Júpiter sobre a órbita de Saturno e também afirmar que “a órbita da Terra é sensivelmente perturbada pela Lua”, bem como tantos outros exemplos que surgem ao longo do Livro III do *Principia*, indica que Newton pôde oferecer uma explicação causal dos movimentos planetários de acordo com os princípios que ele havia formulado nos Livros I e II. Ao lado dos princípios de sua *mecânica racional*, erigiu-se um sistema bem mais complexo que aquele formulado por Kepler, uma vez que se observou certa discrepância entre os fenômenos celestes e o sistema kepleriano, por esse não fornecer uma representação mais detalhada do mundo da natureza.

Ao lado dessas explicações, e da significativa mudança provocada na reelaboração das Leis de Kepler, o Livro III do *Principia* demonstra uma forte tendência em estabelecer uma diferença entre a física (ou a observação) e a exatidão dos raciocínios matemáticos aplicados ao *sistema do mundo*. Por exemplo, na proposição XIII, Newton mencionou que em relação às órbitas elípticas, as ações mútuas entre os planetas são “muito pequenas”, a ponto de se poder ignorá-las, excetuando-se o caso da ação de Júpiter sobre Saturno. Essas ações mútuas perturbam os movimentos dos planetas em elipses em torno do Sol móvel menos (pela Proposição LXVI do Livro I) de que se esses movimentos se realizassem em torno do Sol em repouso.

Na Proposição XIV afirma-se que os afélios estão em repouso, pela Proposição XI do Livro I, do mesmo modo que os planos das órbitas, pela Proposição I do mesmo Livro, e ao se repousarem os planos, também se repousam os nodos (NEWTON. 1987, p. 644). Mas, devido às ações mútuas dos planetas e cometas em suas respectivas revoluções originam-se algumas desigualdades, tão insignificantes que podem ser

“desprezadas”. Agora, encontrar os diâmetros principais das órbitas, como se diz na Proposição XV, é levar em conta a razão da potência $\frac{2}{3}$ dos tempos periódicos, pela Proposição XV do Livro I. Em seguida, deve-se aumentar cada um (dos tempos) em razão da soma das massas do Sol e cada planeta à primeira das duas médias proporcionais entre tal soma e o Sol, pela Proposição LX do Livro I (*Idem.* p. 645). Para encontrar as excentricidades e os afélios das órbitas, a Proposição XVI indica que o problema se resolve também recorrendo à Proposição XVIII do Livro I (*Idem.*).

Na Proposição XXV investiga-se o movimento da Lua e suas desigualdades. Mas, nessa Proposição, bem como nas próximas, Newton introduz suposições simplificadas ou considera uma série de situações que não correspondem com a realidade, por exemplo, na Proposição XXVI diz que:

“(…) a área que a Lua descreve com um raio traçado até a Terra é proporcional ao tempo, salvo na medida em que o movimento lunar é perturbado pela ação do Sol. Nos propusemos investigar aqui a desigualdade do *momento*, ou do incremento horário. Mas, para que o cálculo resulte mais simples, suponhamos que a órbita da Lua seja circular, e desprezemos todas as desigualdades” (*Idem.* p. 667).

O sentido que as últimas proposições assumem no sistema do mundo newtoniano, principalmente as que correspondem ao movimento lunar, mostra o quanto Newton teve que introduzir suposições simplificadas com relação aos efeitos que, embora matematicamente demonstráveis, eram pequenos o bastante como para que pudessem ser desprezados em um sistema que fosse autêntico apenas no interior dos limites da observação.

Além disso, acrescenta-se que, segundo os princípios da dinâmica celeste de Newton, nem as órbitas puramente elípticas e nem mesmo a Lei das Áreas poderiam ser descrições precisas do sistema solar. Nesse sentido, pode-se compreender o por quê de certas leis se incluírem entre as “hipóteses” do Livro III, que constavam da primeira

edição dos *Principia*. Tratava-se de hipóteses planetárias do sistema do mundo. Porém, mais tarde quando Newton mudou a designação dessas “hipóteses planetárias”, convertendo-as em “Fenômenos”, provavelmente estava indicando que esses enunciados referentes aos movimentos dos planetas primários e secundários não são verdadeiros no sentido em que o são as leis matemáticas, mas que são verdadeiros somente nos limites de precisão das observações. Assim, torna-se importante ter em mente essa distinção, visto que se poderia pensar que para Newton haveria uma correspondência exata entre os raciocínios matemáticos, ou suposições simplificadas, e o mundo físico, embora o Livro III se constitua de raciocínios que empregam sistemas matemáticos ou resultados derivados de tais sistemas.

Com relação à *gravitação universal*, embora tenha admitido que suas conclusões levaram-no a um “princípio do movimento” dos corpos celestes – segundo ele, “princípios retirados das matemáticas e confirmados por numerosas experiências” –, Newton não recorre a nenhum dos raciocínios matemáticos para justificá-lo. O mais importante era derivar a *gravitação universal* e fornecer uma explicação física para o conceito de *força* referida na primeira Lei do Movimento, pois, não reconhecer essa atitude, implicaria em considerar que a *força* responsável pelo movimento curvilíneo dos planetas jamais poderia ser identificada com a ação exercida por um corpo central, lugar de que deriva a proporcionalidade entre *massa* e *força gravitacional*.

APÊNDICE À SEÇÃO 3.3: NEWTON E AS HIPÓTESES.

A discussão promovida no Capítulo III (seção 3.1) nos autoriza aqui estender a análise em torno de uma questão que sempre foi motivo de polêmica quando se teve como foco investigativo a ciência newtoniana. Quando se tratou das *Regras para Filosofar*, as quais serviram para Newton como princípios metodológicos que o auxiliaram nas justificações em torno do conceito da *gravidade universal*, mencionou-se o fato de que Newton rejeitou, textualmente no Escólio Geral (Livro III) do *Principia*, o uso e a formulação de *hipóteses* em sua filosofia natural (“Não invento hipóteses”, *Hypotheses non fingo*)¹³. Mas quais foram as razões que teriam levado Newton a adotar uma posição severa em relação às *hipóteses*? Que restrições foram feitas por ele no sentido de delimitar o campo de atuação das *hipóteses* em se tratando de filosofia natural?

Evidentemente que não se trata, aqui, de oferecermos uma solução para uma questão tão polêmica, mas, apenas, uma tentativa de elucidar, em linhas gerais, as dificuldades que Newton previa em justapor *hipóteses* ao lado de uma ciência que, em grande parte, devia em muito as observações extraídas da experiência – contrariando, a essas alturas, o cartesianismo que aceitara as hipóteses dos Vórtices Celestes e Terrestres, sem um fundamento último nas experiências.

O principal interesse de análise nos momentos derradeiros da presente discussão se volta para o Escólio Geral do Livro III quando, a partir da segunda edição

¹³ Newton realizou algumas mudanças introduzidas a partir da segunda edição do *Principia* (1713), devidas, sobretudo, às polêmicas nas quais ele se envolveu após a publicação da primeira edição (1687), quando passou a usar “hipótese” também num sentido depreciativo para designar as proposições que não se adequavam às exigências da “filosofia experimental”, a ponto de afirmar enfaticamente: *Hypotheses non fingo*, acrescentado ao *Principia* a partir da segunda edição. Newton faz, então, a substituição das “Hipóteses” pelos “Fenômenos” no início do Livro III.

do *Principia*, surgem as afirmações mais contundentes de Newton a respeito das hipóteses:

“Até aqui expliquei os fenômenos dos céus e do nosso mar através da *força da gravidade*, todavia não atribuí uma causa à gravidade. Em todo caso, essa força surge de alguma causa que penetra até o centro do Sole dos planetas, sem diminuição de força, e que age (...) segundo a quantidade de matéria sólida, e cuja ação se estende por todos os lados a imensas distâncias, decrescendo sempre na razão duplicada das distâncias. (...) Porém, ainda não pude deduzir a razão destas propriedades da gravidade a partir dos fenômenos e não invento hipóteses. Pois tudo aquilo que não é deduzido a partir dos fenômenos deve ser chamado de *Hipóteses*; e as hipóteses, quer sejam elas metafísicas, quer físicas, de qualidade ocultas, ou mecânicas, não têm lugar na *Filosofia Experimental*. Nessa filosofia, as proposições são deduzidas a partir dos, e se convertem em gerais pela indução. Assim, a impenetrabilidade, a mobilidade, a ímpeto [força] dos corpos e as leis dos movimentos e da gravidade tornam-se conhecidas. E é suficiente que a gravidade realmente exista, atue segundo as leis por nós expostas e seja capaz de sustentar todos os movimentos dos corpos celestes e do nosso mar”. (NEWTON. 1987, p. 785).

De acordo com Newton, se não há dedução a partir dos fenômenos, deve-se, portanto, considerar como hipótese. Assim, torna-se improvável e, naquele momento, impossível deduzir a razão das *propriedades* da gravidade também a partir dos fenômenos. Evidente, pois, que se trata de limitações e procedimentos metodológicos quanto ao princípio de gravitação universal, a partir do qual Newton pensou ter explicado todos os movimentos dos corpos celestes e dos mares. Mas Newton esbarrou em uma outra questão: explicar conceitualmente a *força da gravidade*. Porém, os seus esforços vão apenas até o ponto de dizer que “essa força origina-se de alguma causa”, sem, contudo, “(...) deduzir a razão dessas propriedades da gravidade a partir dos fenômenos e não invento hipóteses”.

A restrição que Newton promove às hipóteses parece-nos ser mais uma restrição quanto à metodologia utilizada para justificar a atribuição de uma “causa” à gravidade. Encontramo-nos, no entanto, diante de um problema que a teoria cartesiana dos Vórtices não via nenhuma dificuldade. Em sua teoria dos Vórtices, Descartes afirmava que uma matéria fluída invisível move-se circularmente em torno do Sol e carrega os planetas, identificando, assim, a *causa* dos deslocamentos circulares

aparentes que estes realizam em relação ao Sol. Segundo Descartes, a gravidade dos corpos terrestres é também causada pelo mesmo tipo de matéria, que constitui um pequeno vórtice em torno da Terra e pressiona os corpos na direção do seu centro. Os fenômenos celestes e terrestres são explicados, na teoria cartesiana, através das hipóteses dos vórtices, os mesmos fenômenos para cuja explicação Newton que julgara ser “suficiente que a gravidade realmente exista, atue segundo as leis por nós expostas”.

É, pois, em contraste com os pressupostos do cartesianismo que Newton se vê, de certa maneira, obrigado a tratar do problema de se atribuir uma causa à gravidade universal dos corpos

Do ponto de vista epistemológico, Newton também manteve uma posição radicalmente crítica em relação aos argumentos que Descartes desenvolveu em seu *Principia Philosophiae*, em especial às fontes de “evidências metafísicas” evocadas para os seus “princípios das coisas materiais” (Art.46, Terceira Parte). Para Newton, a primeira crítica deve ser dirigida à concepção cartesiana da *realidade das substâncias* e daquilo que se pode assegurar no conhecimento da “natureza dos corpos”. Nesse sentido, Newton foi categórico:

“A partir dos fenômenos, conhecemos as propriedades das coisas e, a partir das propriedades, concluímos que as coisas existem e as chamamos de substâncias; mas não temos qualquer ideia das substâncias. (...) as substâncias ou as essências mesmas não conhecemos através de nenhum sentido nem de nenhuma ação reflexiva e, por isso, não temos mais ideia delas do que um cego tem das cores. E, quando se diz que temos uma ideia de Deus ou uma ideia de corpo, nada deve ser entendido exceto que temos uma ideia das propriedades ou atributos de Deus ou uma ideia das propriedades pelas quais os corpos se distinguem de Deus ou uns dos outros. Por isso que em nenhum lugar discutimos sobre as ideias das substâncias abstraídas das propriedades, nem deduzimos nenhuma conclusão a partir dela”. (HALL E HALL, 1962, p. 354 *Apud* BARRA, 1995, p. 231).

Para Newton, é impossível o conhecimento *apriorístico* da substância dos corpos e, portanto, não se pode derivar dela nada que possa servir para fundamentar as realidades a serem explicadas na física. Contrariamente a isso tudo, se é possível atribuir propriedades observáveis à força da gravidade, na medida em que se pode

descrevê-la a partir de uma lei universalmente verificada, existem indícios fortes e suficientes para concluir que “a gravidade realmente exista”, como consta no Escólio Geral do *Principia*.

No âmbito de sua sustentação metodológica do princípio de gravitação universal, Newton sempre procurou limpar o terreno de qualquer discussão que levasse a identificação deste princípio a uma “hipótese”. As divergências de Newton com a metodologia de Descartes e todos aqueles que defendiam o uso das hipóteses não se encontra apenas nas insuficiências e inadequações encontradas no interior daquela doutrina, mas também na incapacidade de fundamentar o método experimental na filosofia natural –, isto em virtude de que a “(...) a principal ocupação da filosofia natural é argumentar a partir dos fenômenos, sem formular hipóteses, e deduzir as causas a partir dos efeitos até chegar à causa primeira , que certamente não é mecânica (...)” (NEWTON, 1996, p. 270).

CONCLUSÃO

O objetivo de reconstruir os passos argumentativos mais importantes de Newton na justificação do conceito de *gravitação universal* no *Principia* permitiu-nos constatar o quanto ele esteve envolvido, num primeiro momento, com os principais conceitos e problemas da física cartesiana – tanto em virtude de uma compreensão quanto no sentido de provocar um afastamento devido às suas pretensões de estabelecer fundamentos mais verdadeiros para as ciências mecânicas. Um dos aspectos centrais da física cartesiana que mereceu uma análise crítica de Newton, em anos anteriores a sua obra mais conhecida, refere-se à “doutrina do movimento” e aos conceitos de *espaço*, *tempo*, *corpo* e *movimento*. Mas, tanto nessa primeira análise quanto na posterior análise da teoria dos *vórtices* de Descartes, surgiram indícios suficientes para suspeitar que nos momentos iniciais de suas investigações Newton possuísse realmente uma definição exata, ou até mesmo próxima, do conceito de *gravitação universal* que apareceu mais tarde no *Principia*.

As primeiras críticas endereçadas a Descartes diziam respeito às reais condições de existência do movimento, que, para Newton, exigiam, por exemplo, a *causa* pela qual tal *movimento* havia sido gerado; uma velocidade e uma determinação definidas e que necessariamente devem ser atribuídas a um único e mesmo corpo móvel. O equívoco de Descartes, segundo Newton, estava no fato de violar as duas condições indicadas acima e, também, em admitir que o movimento pudesse ser gerado mesmo quando nenhuma força fosse impressa e na medida em que os lugares existam apenas no momento em que os corpos se movem, não permitindo definir nem uma velocidade uniforme nem uma linha reta na qual se realiza o movimento.

A partir deste momento Newton demonstrou a inconsistência da doutrina cartesiana do *movimento* (que implicaria nas noções de *lugar* e *espaço*) com as investigações acerca das condições físicas fundamentais em que ocorrem os movimentos. Porém, um passo decisivo dado por Newton foi a inferência das definições que o ajudariam a sustentar sua própria doutrina do *movimento local*, *lugar*, *corpo* e *repouso*. O estabelecimento dessas definições foram importantes para se afastar de vez dos pressupostos da física de Descartes, reduzidos a meras “ficções”.

A essas alturas, as investigações permitiram a Newton esboçar o sentido físico que deveria ser atribuído às *forças* nos movimentos ao proceder em uma análise criteriosa de certos conceitos como: *esforço* (*conatus*), *ímpeto*, *inércia*, *pressão* e *gravidade*. Esse grupo de conceitos formou o principal fundamento sobre os quais Newton pode, como vimos, reconstruir as ciências mecânicas, um programa que resultou anos mais tarde no *Principia* com a explicação causal do movimento contida no Livro III sobre o *Sistema do Mundo*, fundado no conceito de *gravitação universal*. A definição de *força*, juntamente com as noções de *espaço*, *corpo* e *movimento* representou, portanto, a reviravolta conceitual que Newton projetara realizar nos princípios mecânicos herdados da tradição cartesiana e avançar na edificação de uma ciência segura.

O Livro III do *Principia* deve, portanto, ser considerado o ponto de chegada das investigações realizadas por Newton desde textos muito anteriores a essa obra. Como vimos, todos os passos dados rumo a uma ciência da dinâmica que pudessem explicar os fenômenos celestes e terrestres ressurgem ali. Mas os argumentos do Livro III dependeram da aplicabilidade dos princípios matemáticos e mecânicos formulados essencialmente nos Livros I e II. No entanto, neste mesmo Livro Newton necessitou passar dos modelos matemáticos para conceitos físicos e demonstrar a influência de

uma força atuante e de caráter universal que agiria de acordo com as leis que ele havia explicado.

Com relação a sua formulação final e mais acabada no *Principia*, a *gravitação universal*, embora tenha admitido que suas conclusões levaram-no a um “princípio do movimento” dos corpos celestes – segundo ele, “princípios retirados das matemáticas e confirmados por numerosas experiências” –, Newton não recorre a nenhum dos raciocínios matemáticos para justificá-lo. O mais importante era derivar a *gravitação universal* e fornecer uma explicação física para o conceito de *força* referida em sua primeira Lei do Movimento, pois, não reconhecer essa atitude, implicaria em considerar, por exemplo, que a *força* responsável pelo movimento curvilíneo dos planetas jamais poderia ser identificada com a ação exercida por um corpo central, lugar de que deriva a proporcionalidade entre *massa* e *força gravitacional*.

Com a divulgação da teoria da *gravitação universal*, na primeira edição do *Principia* (1687), Newton se viu obrigado a responder as críticas que surgiram em decorrência do problema de adequá-la empiricamente e dos problemas relativos aos seus fundamentos físicos, os quais reduziam quase tudo à explicação da atuação da *gravitação* entre os corpos celestes localizados a grandes distâncias. Este derradeiro problema fez com que Newton produzisse uma série de argumentos importantes para conhecer seus pensamentos sobre a estrutura e a natureza dos fenômenos, seja pelas relações que estabeleceu entre o conceito matemático da *gravidade* com outros processos naturais, a fim de se aprofundar nas investigações sobre as forças presentes na natureza, ou pelos princípios metodológicos que ele advertiu ter orientado as suas investigações nesse campo – conseqüentemente, fundamentando a legitimidade do problema e apresentando as bases para uma solução coerente.

Não se deve, contudo, conjecturar que a origem do problema da explicação da gravidade tenha surgido apenas no contexto das críticas após a primeira publicação do *Principia*. Pois existem indícios de que ao final da redação desta obra, ou até mesmo bem antes de seu aparecimento, Newton reconhecia a necessidade de oferecer uma explicação, pensando que ela constituía uma etapa do programa de investigação que pretendia realizar. Mas, para os padrões metodológicos de sua ciência da dinâmica estabelecidos no *Principia*, as palavras de Newton no Escólio Geral (Livro III) possuem grande significado na tentativa de superar os problemas que surgiram na decorrência de explicar a *gravidade*: “(...) para nós, basta saber que a gravidade realmente existe e age de acordo com as leis que explicamos, e que serve fartamente para explicar todos os movimentos dos corpos celestes e de nosso mar”. A *gravidade* atua a enormes distâncias e está presente em todos os movimentos dos corpos. Nenhuma outra força da natureza pareceu se comportar dessa maneira para Newton. Certamente desconcertante é o caráter irreduzível da *gravidade*. Não há na mecânica newtoniana explicação para a *força da gravidade* em outros termos que aqueles formulados no *Principia*: conhecemos a *força da gravidade* por intermédio de seus efeitos e a entendemos por meio dos princípios que constituem a sua forma matemática.

BIBLIOGRAFIA:

BARRA, E. S. O. “Newton sobre Movimento, Espaço e Tempo”. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*. Campinas, 1993. Série 3, v. 3, n. 1/2, p. 85.

BARRA, E. S. O. *Omnis Philosophiae Difficultas: O Conceito de Força na Filosofia Natural de Newton*. 1994. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

COHEN. B. & WESTFALL. R. S. *Newton, textos, antecedentes e comentários*. Tradução de V. Ribeiro. Editora: EDUERJ, Rio de Janeiro, 2002.

COHEN. B. *O nascimento de uma nova física*. Trad. de Maria A. G. da Costa. Notas de José F. G. da Costa. Editora Gradiva, Lisboa, 1988.

COHEN. I. B. *Introduction to Newton's Principia*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1971.

DESCARTES. R. (1954 [1637]) *The Geometry of René Descartes*. [Trad. Smith, D. e Lathan, M.]. New York: Dover Publications.

DESCARTES. R. *Princípios da Filosofia*. Tradução de G. A. de Almeida, R. Landim Filho, E. M. Rocha, M. Gleizer e U. Pinheiro. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2002.

DESCARTES. R. *Principia Philosophiae*. Paris : J. Vrin. 1982 (Oeuvres De Descartes, publiées par Ch. Adam et P. Tannery, tome VIII/1)

DESCARTES. R. *Discurso do Método*. Trad. J. Guinsburg e Bento Prado Júnior. São Paulo : Nova Cultural, 1987. (Col. Os Pensadores)

DESCARTES. R. *Principes de la Philosophie*. Paris : J. Vrin. 1989 (Oeuvres de Descartes, publiées par Ch. Adam et P. Tannery, tome IX/2)

EUCLIDES. *The thirteen books of Euclid's Elements*. Chicago: Britannica, 1952

HALL. A. R. e HALL. M. *Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press, 1962.

HEATH. T. *The Thirteen Books of Euclid's Elements*. New York : Dover, 1956, 3 vols.

HERIVEL. J. *The Background to Newton's Principia: A study of Newton's dynamical researches in the years 1664-84*. Oxford : Clarendon Press, 1965.

KOYRÉ. A. *Études Newtoniennes*. Paris : Gallimard, 1968.

LEIBNIZ. G. W. *Correspondência com Clarke* (trad. Carlos Lopes de Mattos). São Paulo : Abril Cultural, 1979. (Col. Os Pensadores)

NEWTON. I. *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*. Tradução de C. L. Mattos, P. R. Mariconda [et alii]. Introdução e notas de H. M. LACEY. São Paulo. Editora: Globo S. A., 2000. Coleção *Os Pensadores*.

NEWTON. I. *Princípios matemáticos; Óptica; O peso e o equilíbrio dos fluídos*. Tradução de C. L. Mattos, P. R. Mariconda e L. J. Baraúna. São Paulo: Abril Cultural, 1983. (Coleção Os Pensadores).

NEWTON. I. *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Translated by Andrew Motte and revised by Florian Cajori. Califórnia: University of Califórnia Press, 1978. Col. Great Books of the Western World: Newton/Huygens, vol. XXXIV.

NEWTON. I. (1987) *Princípios Matemáticos de la Filosofia Natural*. Traducción, introducción y notas de Eloy Rada Garcia. Madrid : Alianza, 1987. 2 vols.

NEWTON. I.(1990) *Principia : princípios matemáticos de filosofia natural*. Tradução de T. Ricci [et alii]. São Paulo: Nova Stella/EDUSP, 1990. Vol. I.

NEWTON. I. *Óptica*. Tradução, introdução e notas de André K. T. Assis. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 1996.

ROSSI. P. *O nascimento de ciência moderna na Europa*. Tradução de A. Angonese. Bauru, São Paulo: Editora EDUSC, 2001.

WESTFALL. R. S. *Never at Rest; a Biography of Isaac Newton*. Cambridge : Cambridge University Press, 1982.

WHITESIDE. D. T. *The Mathematical Papers of Isaac Newton*. 8 vols. Cambridge: Cambridge University Press [MP], 1980.

Versão final aprovada pelo orientador em/...../.....

Eduardo Salles de Oliveira Barra

(orientador)