

O Conceito de “Força” em Newton

Questão: Qual o estatuto ontológico do conceito de força?

1. Mecanicismo com Forças à Distância

O trabalho de Isaac Newton (1642-1727) pode ser visto, por um lado, como a culminação da tradição de pesquisa da filosofia mecânica, ao enunciar suas três leis da mecânica (princípio de inércia, definição de força e princípio de ação e reação). No entanto, especialmente em seu estudo da lei de atração gravitacional, introduziu a concepção de uma força que age à distância. Ao fazer isso, injetou no programa mecanicista um elemento da tradição do naturalismo animista (de Kepler), e foi bastante criticado por isso. No entanto, não seguiu explicitamente a concepção de realidade desse naturalismo renascentista, mas adotou uma postura “instrumentalista” de renunciar à busca de uma explicação mecânica para esta atração.

Em sua juventude, Newton era partidário da concepção mecânica de Descartes e Huygens, adotando a visão atomista divulgada principalmente por Pierre Gassendi. No período 1664-66, estudou a mecânica de Descartes e assimilou o princípio de inércia e as leis do choque entre corpos⁹⁸. A noção de “força”, “a potência de uma causa”, era concebida como uma pressão de um corpo sobre outro, estando restrita a choques entre corpos. Desses autores, herdou a noção de que a força exercida por um corpo em outro, durante um choque, é igual à força recebida. Passou a estudar os movimentos circulares, imaginando uma bola que está presa em uma arena circular, e se move chocando-se constantemente com as paredes da arena. Derivou uma expressão para a força “centrífuga” (também estudada por Huygens), que descreve o movimento de fuga em relação ao centro (e não uma atração): $F = mv^2/r$. Juntou este resultado com a 3ª lei de Kepler (que relaciona os períodos e os raios médios das órbitas dos planetas: $T^2/r^3 = \text{cte.}$), e encontrou uma força que decresce com a distância de acordo com $1/r^2$ (faça como exercício, lembrando que $v=2\pi r/T$). Ao aplicar esta fórmula para a “queda” da Lua (usando a lei de Galileu, $d = \frac{1}{2} at^2$), encontrou uma discrepância de uns 15%, e deixou a questão de lado. Além disso, Newton não tinha ainda a noção de uma força de *atração*.

Ao finalizar esses estudos, em 1666, Newton abandonou a mecânica e foi trabalhar com matemática e com óptica. Em 1675, após realizar importantes pesquisas em óptica, esboçou uma visão de mundo que seguia Descartes em sua concepção de que a gravidade podia ser explicada a partir do movimento das partículas do éter, que ocupariam todo o espaço. No entanto, adotava um princípio secreto de “sociabilidade” para explicar algumas reações químicas. Neste ano, ficou sabendo de uma correção para o valor de um grau de latitude, medida pelo astrônomo francês Jean Picard em 69,1 milhas inglesas, ao invés do valor de 60 milhas que Newton usara em seu cálculo da queda da Lua em 1666. Com essa correção, a lei da força gravitacional que ele havia encontrado passou a explicar bem o movimento da Lua.

Em 1679, recebeu um convite de Robert Hooke (1635-1703) para reexaminar o problema dos movimentos planetários. Após algumas dificuldades iniciais, Hooke lhe sugeriu usar uma lei de *atração* com uma força proporcional a $1/r^2$. Deu alguns passos adiante, mas teve uma crise nervosa e acabou abandonando as pesquisas, recuperando-se ao longo de cinco anos. Finalmente, em 1684, o astrônomo Edmund Halley visitou Newton, perguntando ao exímio matemático qual seria a trajetória de um corpo orbitando com uma força de atração proporcional a $1/r^2$, ao que Newton respondeu que seria uma elipse, conforme tinha calculado

⁹⁸ Seguimos WESTFALL (1971), op. cit. (nota 92), pp. 120-59, e DIJKSTERHUIS (1986), op. cit. (nota 94), pp. 463-91.

cinco anos antes para o problema de Hooke. As peças então se encaixaram, e Newton retomou seu trabalho em mecânica, recebendo estímulo e auxílio financeiro de Halley. Disso resultou a publicação da grandiosa obra *Philosophiae naturalis principia mathematica* (Princípios naturais da filosofia natural, 1687).

Outra obra importante de Newton foi seu *Opticks* (1704). Nesta, estendeu sua concepção – de que existem forças que atuam à distância entre todos os corpos – para todas as partículas, inclusive átomos e partículas de luz. Tais forças poderiam ser de atração, o que explica a coesão dos corpos e a capilaridade, e também de repulsão, como na expansão dos gases. O magnetismo seria outro exemplo importante de forças atuando à distância. Reações químicas também poderiam ser explicadas por meio da atração e repulsão no nível microscópico. Ao final do séc. XVIII, essa concepção tornar-se-ia o paradigma dominante (especialmente para o grupo que trabalhava em torno de Laplace), no que às vezes é chamado a visão “astronômica” da natureza: partículas imponderáveis (sem peso) sujeitas a forças de atração e repulsão.

2. Definições e Leis no *Principia*

O Livro I do *Principia* não falou em gravitação, mas apresentou os princípios gerais da mecânica, com definições básicas e as suas três leis. Com estas leis e a noção de força centrípeta (força central), Newton derivou as três leis de Kepler. No Livro II, considerou sistemas com fluidos, e criticou a concepção cartesiana de vórtices para o sistema solar. No Livro III, aplicou sua teoria para a descrição detalhada do sistema solar, mostrando que a lei da gravitação é a mesma para as luas de Júpiter, para os planetas em torno do Sol e para um corpo caindo na superfície da Terra. Enunciou então a lei da gravitação universal.

É interessante enfocarmos os conceitos fundamentais apresentados por Newton⁹⁹, buscando entender se esses fundamentos são extraídos da observação ou formulados teoricamente.

Seguindo o método axiomático de Euclides, como era costume no séc. XVII, Newton parte de oito definições. A primeira é do conceito de *massa*, que chamava “quantidade de matéria”, e define como o produto da densidade e do volume. Tal definição passou a ser considerada problemática, já que ele não define o que seria “densidade”. Com o desenvolvimento do texto, certas propriedades de “massa” deixaram claro que ela se distingue da noção de “peso”, conceitos esses que antes de Newton não eram distinguidos claramente (salvo em Kepler).¹⁰⁰

A segunda definição é de “quantidade de movimento”, hoje em dia às vezes chamada de “momento linear”, que seria o produto da massa e da velocidade. As definições 3, 4 e 5 apresentam uma lista de três tipos de “força”. O que chama de “força inata da matéria” (*vis insita*) é o que chamamos de inércia, uma tendência do corpo de resistir à ação de forças externas, e de permanecer em seu “estado”, seja ele de repouso ou movimento retilíneo uniforme. A “força imprimida é uma ação exercida sobre um corpo para modificar seu estado”. É o nosso conceito atual de *força*, e é exemplificado pela percussão ou pela pressão (como era costume na filosofia mecânica) e também pela força centrípeta (o que era uma novidade). A força centrípeta, descrita na sexta definição, é aquela dirigida para um ponto, e exemplificada pela gravidade (atuando sobre projéteis e sobre a Lua), pelo magnetismo, pela

⁹⁹ Trechos relevantes de Newton se encontram na excelente coletânea de COHEN & WESTFALL (2002), op. cit. (nota 57), pp. 152-7, 278-91.

¹⁰⁰ Ver JAMMER, M. (2000), *Concepts of mass in classical and modern physics*, Princeton University Press. Versão em português em preparação pela Editora Contraponto.

força dos planetas (neste momento ainda não identificado com a gravidade) e pela força de uma funda (ou seja, a força elástica ou a tensão em uma corda).

Nas definições seguintes, caracteriza três tipos de “quantidades” de uma força centrípeta. A primeira é a “quantidade absoluta”, que no caso de uma força elétrica estaria relacionada com a *carga* de um corpo. Ele não apresenta este exemplo, mas sim o da força magnética, cuja “carga” estaria relacionada ao tamanho do ímã e à sua intensidade. No caso de uma força gravitacional, a quantidade absoluta seria a massa do corpo que gera a força (o que poderíamos chamar a “carga gravitacional”).

A “quantidade aceleradora” de uma força centrípeta seria simplesmente sua aceleração, a “velocidade que ela gera em um determinado tempo”. Na superfície da Terra, a quantidade aceleradora é igual para dois corpos, “retirando ou descontando a resistência do ar”. Já em montanhas elevadas, ela é menor.

Na definição 8, apresenta a “força motriz”, que equivale à nossa noção atual de força, e é exemplificado pelo peso. O enunciado exprime claramente a noção de uma força contínua, que em um “determinado intervalo de tempo” gera um movimento, ou seja, gera uma variação na quantidade de movimento. Esta definição se aproxima bem da nossa concepção atual da expressão $F = ma$, ao contrário da 2ª lei, como veremos a seguir.

Newton pôde assim afirmar (p. 282) que “a força de aceleração está para a força motriz assim como está a celeridade para o movimento”, ou seja, $a/F = v/p$, já que a quantidade de movimento é $p = mv$ e a força motriz é $F = ma$.

No escólio que se segue, diz que não irá definir tempo, espaço, lugar e movimento, pois esses conceitos “são bem conhecidos de todos”. Com referência ao *tempo*, distingue entre o tempo *absoluto*, real, matemático, que “flui uniformemente, sem relação com qualquer coisa externa”, e o tempo *relativo*, que seria “uma medida sensível e externa”. Analogamente, haveria o *espaço absoluto*, sem relação com coisas externas, e o espaço relativo, que seria uma medida do espaço absoluto. Analogamente, haveria um “lugar” (volume) absoluto e um relativo, e também um *movimento absoluto* e um movimento relativo. No Cap. XII discutiremos mais a fundo esta distinção.

Mais adiante no Livro 1, Newton apresenta suas famosas três leis. A 1ª lei é o *princípio de inércia*, que afirma que um corpo permanece em seu estado de movimento uniforme (velocidade constante) “a menos que seja compelido a modificar esse estado por forças imprimidas sobre ele”.

A 2ª lei afirma que “a variação do movimento é proporcional à força motriz imprimida, e ocorre na direção da linha reta em que essa força é imprimida”. Por “movimento” entende-se a quantidade de movimento $p = mv$ (introduzimos o negrito para designar grandezas vetoriais). A interpretação mais natural para o leitor moderno é supor que Newton está afirmando que a força motriz é a derivada temporal do momento linear, ou seja, $F = d/dt(mv)$, que seria equivalente a $F = ma$.

Dijksterhuis (1986, pp. 470-4), porém, observa que a noção de força usada por Newton em seus cálculos é de uma força impulsiva I , como em um choque entre corpos, que resulta em uma variação finita de momento: $I = \Delta(mv)$. Para sustentar esta interpretação, o historiador holandês refere-se ao Corolário 1 que se segue às leis, cujo enunciado é o seguinte:

“Um corpo que sofre a ação de duas forças simultâneas descreve a diagonal de um paralelogramo no mesmo tempo em que descreveria os lados do paralelogramo por essas forças, separadamente” (ver Fig. XI.1).

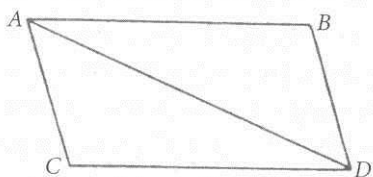


Figura XI.1: Paralelogramo descrevendo os movimentos resultantes de forças impulsivas exercidas em A.

Newton salienta que o movimento de A para B, etc., é uniforme, de forma que está claro, neste caso, que a força exercida em A é impulsiva. A 2ª lei garante que as duas forças agindo em A agem de maneira independente, resultando no movimento de A para D. Este é um bom exemplo de uma soma *linear* de causas.

É verdade que Newton parecia ter a noção de uma força que age de maneira contínua, como exprimiu em sua Definição 8 (e também em seu Corolário 2, que não mencionamos), mas a utilização da 2ª lei em seus cálculos envolve sempre uma força impulsiva. Quem consolidou a concepção moderna de $F = ma$, para forças de todos os tipos, foi Leonhard Euler (1707-83), em 1750¹⁰¹.

A 3ª lei de Newton é a *lei de ação e reação*: “para cada ação existe sempre uma reação igual e contrária”. Se um corpo A exerce uma força F_{AB} sobre um corpo B, então necessariamente haverá uma força $-F_{AB}$ sendo exercida em A.

O Corolário 3 mostra como o princípio de conservação da quantidade de movimento segue das 2ª e 3ª leis. O Corolário 4 mostra que o “centro de gravidade” de corpos interagentes permanece em seu estado de movimento inercial.

3. A Natureza da Força

Qual é a natureza da força gravitacional e das forças em geral? Haveria por trás da força gravitacional uma *vera causa*, um processo real que resulta nos movimentos observados? Ou seria o conceito de força apenas uma construção matemática obtida a partir dos movimentos observados?¹⁰² Newton oscila entre essas duas concepções.

Em seu famoso “Escólio Geral”, escrito em 1713, na 2ª edição do *Principia*, Newton afirma (in COHEN & WESTFALL, 2002, pp. 154-5):

Até hoje, entretanto, não pude descobrir a causa dessas propriedades da gravidade dos fenômenos, e não invento hipóteses; pois o que quer que não seja deduzido dos fenômenos deve ser chamado de hipótese, e as hipóteses, sejam elas metafísicas ou físicas, de qualidades ocultas ou mecânicas, não têm lugar na filosofia experimental.

Para entender o que Newton quis dizer com isso, é preciso distinguir duas acepções do termo “hipótese”. (i) No sentido mais usual hoje em dia, uma hipótese é qualquer tese que conjecturamos sem que ela ainda tenha sido submetida a teste. (ii) No sentido usado por Newton, é uma conjectura a respeito da natureza não-observável que estaria por trás dos fenômenos observáveis.

¹⁰¹ TRUESDELL, C. ([1960] 1968), “A program toward rediscovering the rational mechanics of the age of reason”, in *Essays in the history of mechanics*, Springer, Berlim, pp. 84-137. Ver pp. 112-7.

¹⁰² Essa maneira de apresentar a distinção é baseada na seguinte interessante bibliografia sobre os problemas filosóficos da mecânica clássica: HESSE, MARY (1964), “Resource letter PhM-1 on philosophical foundations of classical mechanics”, *American Journal of Physics* 32, 905-11.

Na verdade, antes de escrever o *Principia*, Newton trabalhou em uma teoria “mecanicista” da gravitação (ou seja, só com forças de contato, como em Descartes, ver seção X.6). Isso aparece em uma carta a Boyle em 1678, e reaparece na Questão 21 do *Opticks*. Tendo fracassado em sua tentativa, declarou então que “não invento hipóteses” (*hypotheses non fingo*), ou seja, que não há necessidade de estipular causas ou mecanismos ocultos, já que a expressão matemática da lei de atração universal é suficiente para que se explique o movimento dos corpos celestes. Tal atitude pode ser chamada “fenomenista”, em oposição ao “realismo” da filosofia mecânica (ver Cap. III).

4. Realismo e Fenomenismo em Newton

Newton era realista ou fenomenista, com relação às forças gravitacionais?

A tradição mecanicista de Descartes e Huygens era realista (assim como o atomismo grego), já que concebiam mecanismos envolvendo partículas invisíveis que dariam conta dos fenômenos macroscópicos observados. Newton foi formado nesta tradição (recebendo influências também do naturalismo animista, uma visão também realista), e assim ele tinha uma atitude basicamente realista. Um exemplo claro de uma tese realista é sua defesa do espaço absoluto, que veremos no próximo capítulo. Outro exemplo é sua tese de que a luz consiste de partículas emitidas com diferentes velocidades.

No entanto, ao anunciar que não se preocuparia em inventar hipóteses a respeito das causas da força gravitacional, adotou uma postura fenomenista. Seria esta uma postura descritivista ou instrumentalista? Não se costuma chamar sua atitude de “descritivista” porque ele não tinha preocupação em reduzir o significado de enunciados teóricos a enunciados de observação, como Mach faria mais tarde. Por outro lado, ele não seria um “instrumentalista” no sentido forte da tradição astronômica, conforme expresso no prefácio de Osiander, que mencionamos na seção anterior.

Uma solução é dizer que adotou um “instrumentalismo metodológico”, ou seja, já que não conseguiu imaginar um mecanismo para a gravitação, absteve-se de postular uma hipótese, não por um princípio filosófico, mas apenas pelas circunstâncias do problema.

No entanto, a partir do séc. XIX, sua afirmação seria interpretada por muitos como a afirmação de que a Física não precisa se preocupar com mecanismos ocultos, que basta conhecer o estado inicial e as condições de contorno observáveis, para daí fazer previsões utilizando as leis de movimento da Física. No séc. XIX, o trabalho que lançaria esse projeto anti-realista seria a *Teoria analítica do calor* (1822), de Joseph Fourier, que descrevia situações de equilíbrio e condução térmica de maneira matemática, sem se comprometer com a natureza última do calor, com o debate de se o calor era uma forma de movimento de partículas ou uma substância, um fluido sem peso (“calórico”). Este trabalho foi uma das fontes de inspiração para o positivismo do séc. XIX, que se inicia com Auguste Comte (Kolakowski, porém, cita Hume como o primeiro positivista completo).

Apesar de sua atitude metodologicamente instrumentalista com relação às causas da força gravitacional, Newton considerava que as forças existiam de fato, ou seja, era um realista com relação à entidade “força”. No séc. XIX, Mach desenvolveria um positivismo radical no qual o próprio conceito de força seria visto como uma mera construção mental, um termo teórico (não observável), que buscava definir em termos de grandezas observáveis, como posições e acelerações (como veremos na seção XVI.2).

Para finalizar, notamos que a distinção entre realismo e fenomenismo leva a uma distinção entre dois tipos de teorias científicas (segundo nomenclatura de Rankine, 1855, citado por Nagel, 1961). *Teorias hipotéticas* (transcendentes, microscópicas) enunciam relações entre entidades hipotéticas que não são observáveis, como os mecanismos ocultos da

filosofia mecânica ou os átomos da teoria cinética dos gases. Já as *teorias abstrativas* (fenomenológicas, macroscópicas) formulam apenas relações entre propriedades observáveis, como foi feito por Fourier, em sua teoria do calor, e pela termodinâmica. A afirmação de Newton de que não inventaria hipóteses a respeito da natureza da lei da gravitação é própria de uma teoria abstrativa.

5. Há Juízos Sintéticos A Priori?

Será que apenas através do raciocínio (antes da observação) a gente consegue chegar a alguma verdade sobre o mundo real? Vimos que Descartes considerou que sim (seção X.5): partiu de princípios *a priori*, atingíveis pela razão pura (sem experiência ou observação), de que o “eu” existe, de que Deus existe, de que Ele é perfeito e invariável, e teria deduzido a lei de conservação da quantidade do movimento. Como esta lei descreve o movimento dos corpos do mundo, diz-se que é um enunciado *sintético* ou factual.

Os empiristas britânicos rejeitaram essa pretensão dos metafísicos (como Descartes e Leibniz) de que se pudesse conhecer o mundo apenas através da razão, sem observação. David Hume (1711-76) foi o mais importante crítico desta concepção, salientando que existem “verdades analíticas a priori”, mas não sintéticas a priori. Uma verdade *analítica* é ou uma verdade lógica, como ‘Dentro de uma hora choverá aqui ou não choverá aqui’, ou uma verdade por definição, como ‘Nenhum casado é solteiro’. A negação de uma verdade analítica é uma contradição lógica, mas a negação de uma verdade sintética é uma possibilidade lógica (por exemplo, que a grandeza $m \cdot e^{-v}$ se conserva, ao invés de mv).

Em suma, para o empirismo não há verdades sintéticas a priori. No entanto, influenciado por Hume, o alemão Immanuel Kant (1724-1804) buscou fazer uma síntese do racionalismo dos metafísicos e do empirismo britânico (que ganhara adeptos na França), salientando que o nosso conhecimento do mundo envolve uma construção mental, e que a estrutura comum a tudo o que observamos (como o espaço euclidiano, a relação de causalidade, etc.) é algo que nosso intelecto constrói, e não algo que possamos dizer que existe na realidade. Para Kant, a geometria euclidiana exprime como o mundo é de fato, mas tal geometria pode ser conhecida de maneira a priori! Assim, para Kant, haveria verdades sintéticas a priori. A diferença com Descartes é que tais verdades não se refeririam a algo “lá fora”, no mundo real, pois para Kant tal mundo das coisas-em-si é inatingível pela razão pura, pela a ciência. Para o filósofo de Königsberg, as verdades mais gerais de nosso conhecimento exprimem a maneira como nós (ou qualquer ser inteligente que tenha experiência do mundo) inevitavelmente organizamos nossa experiência. E estas verdades podem, para Kant, serem conhecidas de maneira a priori.

No final de sua vida, Kant procurou mostrar que as próprias três leis da mecânica newtoniana são sintéticas a priori, ou seja, deriváveis teoricamente, sem necessidade de observar o mundo. Esse projeto deixa claro a *certeza* que se tinha da veracidade da mecânica clássica, a noção de que a ciência atinge verdades definitivas.

No séc. XX, o positivismo lógico herdou a concepção empirista de que não há verdades sintéticas a priori, mas a partir da década de 1950, críticos como Quine argumentaram que a própria distinção entre enunciados analíticos e sintéticos é mal formulada.

Hoje em dia, a questão se coloca em um contexto “naturalizado”, ou seja, levando em conta que nossa mente é fruto de um cérebro que evoluiu biologicamente, de maneira a se adaptar de forma muito fina com o ambiente. Será que o fato de termos evoluído por seleção natural, dentro de um mundo físico-químico-biológico, permite que possamos conhecer verdades a respeito de nós mesmos e do mundo (do qual fazemos parte) sem termos que observar o mundo exterior?