Moysés e Tipler em: primeira e segunda leis de Newton

Domínio Genérico • 19 Jan 2024

Provavelmente os dois livros introdutórios de Mecânica mais usados nos cursos de graduação no Brasil são das coleções *Física Básica*, de Moysés Nussenzveig, e *Física para Cientistas e Engenheiros*, de Tipler e Mosca. Eu, particularmente, gosto bastante do primeiro e considero o segundo uma lista de exercícios nada mais que razoável. Meu objetivo neste texto é fazer um breve comentário sobre os tratamentos que esses livros dão às duas primeiras leis de Newton. Tenho aqui comigo a 5ª edição do Moysés e a 6ª edição do Tipler, doravente é a elas que me refiro.

Antes de chegar nas leis de Newton, Moysés, na seção **4.1 FORÇAS EM EQUILÍBRIO**, traz uma construção – arrisco dizer – perfeita da ideia de força e seu caráter vetorial. Essa é tônica geral de Moysés, o livro apresenta argumentos com grau satisfatório de profundidade (salvo algumas exceções) e até busca contradições a serem superadas. Tipler, por outro lado, é superficial na maior parte do tempo.

Para introduzir a primeira lei de Newton, Tipler recorre a vários exemplos práticos pra argumentar o que foi percebido por Galileu e Newton: “em nossa experiência do dia-a-dia[1]” os objetos freiam como consequência do atrito. É afirmado que “Galileu raciocinou que, se pudéssemos remover todas as forças externas sobre um objeto”, a velocidade não sofreria alteração. O grande problema do argumento usado é que ele não vem precedido por nenhuma discussão sobre forças, de modo que “remover todas as forças” tem um significado demasiado vago.

Já Moysés, que discutiu o conceito de força previamente, especialmente em situações de equilíbrio, traz uma longa citação do Diálogo, de Galileu, em que Salviati convence Simplício da lei da inércia usando experimentos mentais envolvendo uma bola perfeitamente esférica e um plano perfeitamente liso. Moysés deixa claro que os experimentos propostos por Salviati não são reais, mas podem ser considerados “casos limites” daquilo que conseguimos reproduzir em laboratório. Fazer essa diferenciação entre a idealização e a realização concreta do fenômeno serve ao mesmo tempo para justificar a idealização e apontar seus limites enquanto representação do real. Afinal, quando fazemos teoria queremos apreender o funcionamento da natureza usando

nosso raciocínio sobre a observação, de modo que nossa teoria não é, por si mesma, a natureza, mas um conjunto articulado de ideias que representam aquilo que por ela está posto.

Ambos os livros enunciam a primeira lei de Newton seguindo mais ou menos o próprio Newton no Principia:

Primeira Lei de Newton (Tipler & Mosca) Um corpo em repouso permanece em repouso *a não ser* que uma força externa atue sobre ele. Um corpo em movimento continua em movimento com rapidez constante e em linha reta *a não ser* que uma força externa atue sobre ele.[2]

Primeira Lei de Newton (Moysés) Todo corpo persiste em seu estado de repouso, ou de movimento retilíneo uniforme, a menos que seja compelido a modificar esse estado pela ação de forças impressas sobre ele.

Logo após enunciar a primeira lei, Tipler faz uma ressalva à sua validade a partir de um exemplo.

> Se você é um passageiro de um avião que voa em linha reta em uma altitude constante e deposita cuidadosamente uma bola de tênis sobre a bandeja (que é horizontal), então, em relação ao avião, a bola permanecerá em repouso desde que o avião continue voando a uma velocidade constante em relação ao solo. […]
>
> Suponha, agora, que o piloto repentinamente acelere o avião para a frente (em relação ao solo). Você irá, então, observar que a bola sobre a bandeja começa repentinamente a rolar para os fundos do avião, acelerando (em relação ao avião) mesmo que não haja força horizontal agindo sobre ela.
>
> – Tipler & Mosca, p. 94.

Moysés, por outro lado, argumenta contra uma suposta tautologia da primeira lei.

> O que significa realmente esta lei? Como podemos saber que não existem “forças impressas sobre o corpo”? Pelo fato de que permanece em repouso ou movimento retilíneo e uniforme? se assim fosse, Eddington teria tido razão quando criticou o enunciado da 1ª lei, dizendo ser equivalente a “… persiste… exceto quando não persiste” (o que corresponderia à bem conhecida predição meteorológica: “Tempo bom, salvo se chover”). Esta crítica é injusta. Se todas as forças fossem

> devidas ao contato com outros corpos, bastaria a ausência de contato para estabelecer a ausência de forças. O exemplo da força-peso, e das forças elétricas e magnéticas, mostra, porém, a existência de forças que atuam sem que haja contato direto com o corpo responsável pela força.
>
> Entretanto, estas forças tendem a diminuir à medida que os corpos em interação se afastam um do outro. Em média, a distância típica entre uma estrela e sua vizinha mais próxima é ~ 1018 cm […], o que deveria ser suficiente para que forças entre elas possam ser desprezadas. A observação das estrelas confirma que elas obedecem com muito boa aproximação à lei da inércia. Em relação a que referencial? Não é em relação à Terra, pois um observador terrestre vê as estrelas girarem no céu noturno.
>
> – Moysés, p. 93-94.

As duas últimas citações convergem para a constatação de que a primeira lei de Newton tem validade apenas em uma classe especial de referenciais, ditos *inerciais*. Que são esses referenciais? Ora, os referenciais nos quais vale a lei! Melhor não seria, então, apresentar tal lei como a definição de referencial inercial? Se assim fosse, o nome “lei” deixaria de ser adequado.

O que não é imediato, mas fruto da observação, é a existência desses referenciais! Por isso, é preferível o seguinte enunciado:

Primeira Lei de Newton Existe um referencial inercial.

Claro, a existência de um referencial inercial implica a existência de outros infinitos, cada um movendo-se com velocidade constante em relação aos demais. Assim, mais que uma definição, temos na primeira lei uma verdade sobre a natureza: os referenciais inerciais existem. Mas isso não é tudo.

Chama a atenção que Tipler usa um referencial acelerado em relação ao chão – e, portanto, acelerado em relação à Terra – como exemplo de referencial não inercial, o que parece indicar que a Terra serve de referencial inercial, ao passo que Moysés diz explicitamente que a Terra não é um referencial inercial, “pois um observador terrestre vê as estrelas girarem no céu noturno”. Essa afirmação de Moysés também parece entrar em contradição com a sua argumentação pra validade da primeira lei uma vez que sempre recorreu, mesmo que de maneira implícita, ao referencial terrestre.

Como indica o pêndulo de Foucault, com instrumentos de medidas suficientemente precisos e um experimento executado em uma escala de tempo suficientemente grande, de fato conseguimos verificar que a Terra não é um referencial inercial. Mesmo assim, tal qual os habitantes de Lagash desenvolvendo a Teoria da Gravitação Universal, todos os experimentos que levaram a formulação inicial do conceito de inércia foram executados neste planeta. Como isso é possível? Isso ocorre pela mesma razão que Moysés admite que as estrelas dão um referencial inercial ainda que saibamos que elas também apresentam movimento relativo entre si: porque, a depender dos instrumentos de medida usados e da escala do fenômeno a ser observado, tais referencias satisfazem o enunciado da primeira lei tal qual enunciada por Moysés e Tipler dentro da precisão exigida. A Terra, em particular, se comporta em muito boa aproximação como referencial inercial pra grande parte dos movimentos observados em nossa experiência cotidiana.

Indo em direção à segunda lei de Newton, Tipler (finalmente) define força como aquilo que provoca variação de velocidade de um corpo num referencial inercial, admitindo representação teórica por meio de vetores. O texto cita também as quatro interações básicas da natureza (a saber: gravitacional, eletromagnética, forte e fraca) e explica que todas as forças macroscópicas que experimentamos são manifestações das interações gravitacional e eletromagnética. Essa exposição é puramente formalista. Não temos acesso ao conteúdo da coisa, apenas a sua manipulação formal: se há alteração de velocidade num referencial inercial, há força e ela é descrita por um vetor. Enxergo na classificação das quatro interações fundamentais uma tentativa de atribuir algum conteúdo às ideias elaboradas por meio da insinuação de que existem leis físicas versando sobre tipos específicos de forças, mas isso é bondade minha já que o texto não explicita essa intenção, pelo contrário, apenas apresenta quatro rótulos com breves descrições igualmente restritas a rotulações vazias.

Em seguida, Tipler expõe uma heurística, comparando chutar uma bola de futebol e uma bola de boliche, o que leva ao conceito de massa inercial como a medida da resistência que um corpo oferece a mudar seu estado de movimento. Similarmente, porém de forma mais aprofundada, Moysés infere, baseado em tudo que já discutiu, que deve existir uma relação linear entre força e aceleração, de modo que tal constante de proporcionalidade serve de medida de inércia.

Para a segunda lei de Newton, temos os seguintes enunciados:

Segunda Lei de Newton (Tipler & Mosca) A aceleração de um corpo é diretamente proporcional à força resultante que atua sobre ele, e o inverso da massa do corpo é a constante de proporcionalidade. Assim,

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{res}}{m}\text{, onde } \vec{F}_{res} = \sum \vec{F} \tag{1}$$

Segunda Lei de Newton (Moysés) [3]

$$\mathbf{F} = m\,\mathbf{a} \tag{2}$$

Neste ponto, Moysés critica a interpretação de que a segunda lei de Newton é uma definição de força (tópico completamente ignorado por Tipler):

> Muitas vezes se diz que a 2ª lei não passa de uma definição de força. Se assim fosse, ela seria desprovida de conteúdo físico, e não poderíamos questionar sua validade: no máximo, poderíamos argumentar sobre se é ou não uma definição conveniente.
>
> Se $\mathbf{F}$ fosse dado apenas pela [equação (2)], ela seria realmente uma definição de força. Entretanto, isto não é verdade: as forças que atuam sobre uma partícula resultam de sua interação com outras partículas, e veremos que são dadas por leis de forças, que definem $\mathbf{F}$ em termos da situação em que a partícula se encontra. Exemplos disso são a lei da gravitação universal e as leis que dão as forças elétricas e magnéticas que atuam sobre uma partícula carregada. A [equação (2)] é uma espécie de molde, que permanece vazio enquanto não substituímos F pela sua expressão em termos de leis de forças, mas que adquire todo o seu significado uma vez que isto é feito.
>
> – Moysés, p. 96-97.

Conscientemente ou não, a exposição de Moysés possui um caráter dialético. Na já elogiada seção **4.1 FORÇAS EM EQUILÍBRIO**, o autor elabora o conceito de *força abstrata* – i.e., força em seu caráter universal – a partir da generalização racional de situações factuais (começa com o senso comum de força como esforço muscular e segue adiante usando aparatos com molas). Na citação imediatamente acima, o autor aponta pra realização da força por meio de uma *força concreta* – i.e., sua objetivação em circunstâncias particulares –, dando os exemplos de força gravitacional e força eletromagnética entre dois corpos específicos. Com isso, Moysés teoriza o conceito de força em sua completude através da união – que não pode ser de outra forma senão – dialética entre o universal e o particular. Quem já leu *O Capital*, de Karl Marx, deve reconhecer o tratamento que o filósofo dá à categoria de trabalho ao definir *trabalho abstrato* e *trabalho concreto*. Esse é um exemplo nítido de formulação teórica de aporte materialista com movimento dialético entre concreto e abstrato.

Adiante, os dois livros usam a segunda lei de Newton pra obter uma escala de massas inerciais: submetendo dois corpos a forças de mesma intensidade, a razão de suas massas inerciais é igual a razão das intensidades de suas acelerações. Assim, é possível medir massas inerciais em relação a massa inercial de um corpo escolhido arbitrariamente como padrão. Claro que comparações entre massas inerciais são mais simples que isso dada a coincidência entre massa inercial e massa gravitacional, o que faz com que balanças meçam a primeira, mas isso não é um fato apriorístico. O ponto aqui é a constatação de que a segunda lei de Newton nos diz que corpos distintos possuem uma mesma característica, a inércia, passível de ser medida e comparada por meio de um processo físico.

A unidade de massa do Sistema Internacional de Medidas é o quilograma, que hoje é definido em termos de constantes físicas, mas já foi dado por meio de um objeto padrão. Assim, tal qual Marx diz "que o valor de troca [de uma mercadoria] não pode ser mais do que o modo de expressão […] de um conteúdo que dele pode ser distinguido" (no caso, da quantidade de trabalho socialmente necessária para reprodução da mercadoria), quando dizemos que um corpo tem massa de tantos quilogramas, esse número de quilogramas é apenas uma expressão quantificada da inércia do corpo.

Em suma, os dois livros conseguem explicitar na segunda lei de Newton um princípio de funcionamento da realidade objetiva, mais que mera definição como fazem com a primeira lei.

Do emprego de referenciais específicos como inerciais à relação entre força e movimento, o caráter quase que puramente formalista de Tipler esconde algo que aparece em Moysés e suas discussões: a construção da teoria. A partir de experimentos, desenvolvemos abstrações que representam a natureza como é e revelam os elementos que determinam em grau mais radical aquilo que é observado. Após isso, retornamos aos fenômenos a fim de compreendê-los, com suas particularidades, sob a luz das abstrações que alcançamos.

Mais leituras sobre reformulações das leis de Newton podem ser encontradas nas referências do livro *Mecânica Analítica*, de Nivaldo Lemos, que é voltado pra um curso mais avançado de Mecânica Clássica. Nivaldo se poupa de uma discussão sobre as leis de Newton por uma questão de escopo do texto, mas indica onde encontrar um bom debate na literatura:

> Praticamente desde a sua formulação nos Principia, as três leis do movimento de Newton vêm sendo alvo de controvérsias quanto ao seu conteúdo físico e consistência lógica, o que tem gerado propostas de

> reformulação da versão tradicional com o intuito de escapar às críticas (Eisenbud 1958; Weinstock 1961). Embora a primeira e a segunda leis sejam às vezes interpretadas como uma definição de força (Marion & Thornton 1995)[4], adotaremos o ponto de vista que julgamos mais correto, segundo o qual elas são leis genuínas e não meras definições (Anderson 1990).
>
> – Nivaldo, p. 5.

As formulações de Eisenbud e Weinstock estão sumarizadas nas respostas a esta pergunta no Physics Stack Exchange. Anderson é particularmente interessante por enfatizar as relações das leis de Newton com pressupostos geométricos sobre a estrutura do universo, o que faz uma boa ponte com a relatividade einsteiniana.

---

1. Minha versão do livro não conta com correções do novo acordo ortográfico.↩
2. Grifos dos autores.↩
3. $\mathbf{F}$ é a força resultante, $\mathbf{a}$ é a aceleração sofrida pelo corpo e m é a massa inercial do corpo.↩
4. Não achei legalmente a versão de 1995, mas a do link tem o que se quer na página 58.↩