

Sobre a possível realidade das forças fictícias: uma visão relacional da mecânica

Arden Zylbersztajn^{1*} e André Koch Torres Assis²

¹Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 88040-900 Florianópolis-Santa Catarina, Brazil. ²Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de Campinas, 13083-970 Campinas-São Paulo, Brazil. *Author for correspondence. e-mail: arden@fsc.ufsc.br e assis@ifi.unicamp.br, homepage: <http://www.ifi.unicamp.br/~assis>

RESUMO. Com base no Princípio de Mach, pode-se considerar as forças de inércia, também chamadas forças fictícias, como reais. Neste artigo, apresentamos as idéias de Mach no contexto histórico das críticas à noção newtoniana de espaço absoluto e analisamos a Primeira Lei de Newton, normalmente aceita sem maiores discussões no ensino da mecânica. A seguir, mostramos como aquelas idéias podem ser quantitativamente implementadas através de uma mecânica relacional, segundo a qual as forças de inércia são interpretadas como resultando das interações entre massas locais e a matéria distante no universo. Algumas implicações para o ensino são mencionadas na conclusão.

Palavras-chave: forças fictícias, princípio de Mach, mecânica relacional.

ABSTRACT. A relational view of mechanics on the possible reality of fictitious forces. Basing on Mach's principle we can assume the reality of inertial forces, also called fictitious forces. In this research paper we present the ideas of Mach in the historical context of the criticism directed to the Newtonian notion of absolute space, and an analysis of Newton's First Law, usually accepted without further discussions in the teaching of mechanics. We show next how those ideas can be largely implemented by relational mechanics, in which forces are interpreted as resulting from the interaction of local masses with the distant matter in the universe. In the conclusion, we have considered some implications for teaching.

Key words: fictitious forces, Mach's principle, relational mechanics.

No ensino da mecânica clássica, é usual se estabelecer uma distinção entre forças devido a interações e forças de inércia. Na abordagem padrão, estas forças são apresentadas como tendo *status* ontológicos diferenciados. Enquanto as primeiras são vistas como reais (cuja intensidade pode ser calculada usando-se, por exemplo, a Lei da Gravitação de Newton, ou a Lei de Coulomb), as outras não são associadas às interações fundamentais e não obedecem ao Princípio da Ação e Reação; devido a isto, são também denominadas forças fictícias. De acordo com esta perspectiva, o uso das forças fictícias é apresentado como um artifício que permite estender a aplicação da mecânica newtoniana a referenciais não inerciais, aos quais elas não são, em princípio, aplicáveis¹.

Raramente, contudo, a possibilidade de que tais forças possam ser reais é mencionada nos livros

universitários e pré-universitários de física. Esta possibilidade, no entanto, recebeu sérias considerações por parte de físicos influenciados pelo Princípio de Mach (Ernst Mach, físico e filósofo austríaco, 1838-1916). Apesar da aceitação deste princípio gerar controvérsias na física contemporânea, pode-se argumentar que, qualquer que seja a opinião que se tem sobre a sua validade, a consideração de sua história e implicações reveste-se de valor educacional, já que permite um exame crítico de idéias, normalmente aceitas sem maiores discussões no ensino da mecânica.

Uma destas idéias encontra-se contida na Primeira Lei de Newton, também conhecida como o Princípio da Inércia, que é um dos axiomas básicos da teoria sobre o movimento formulada por aquele cientista no seu livro de 1687, *Princípios matemáticos da filosofia natural* (geralmente conhecido pelo seu título em latim abreviado: *Principia*):

¹ Um exemplo desta abordagem é a Seção 5.4 de (Tipler, 1995).

*Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele.*²

Se perguntarmos: Repouso? Movimento uniforme? Linha reta? Em relação a quê? O mais provável é que um bom estudante de física nos responda que é em relação a um referencial inercial. Todavia, se solicitarmos a este mesmo aluno que nos explique o que é um referencial inercial é quase certo que ele nos diga que um referencial inercial é aquele no qual o Princípio da Inércia é válido! Esta circularidade não é fruto de uma má compreensão por parte do aluno, mas inerente ao próprio princípio, como bem foi observado pelo autor de um clássico sobre a história da mecânica:

*Sempre foi um ponto fraco da mecânica clássica que ela tivesse de postular a existência de um sistema inercial (do qual se derivam um número infinito de tais sistemas) e não fosse capaz de indicar um a não ser de forma aproximada; à questão de quais são os sistemas de coordenadas para os quais o princípio da inércia é realmente válido, ela não pode dar outra resposta que ele é válido para aqueles sistemas para os quais é válido.*³

O espaço absoluto no *Principia*

Ao apresentar sua formulação da mecânica, Newton começa definindo alguns conceitos básicos como quantidade de matéria (que hoje denominamos massa inercial), quantidade de movimento, força inata, força imprimida e força centrípeta, que serão usados no enunciado das suas três leis e na aplicação das mesmas ao estudo dos corpos em movimento. Após as definições, um extenso escólio, no qual são discutidas as idéias de tempo, espaço, lugar e movimento, é apresentado. No contexto desta discussão ele estabelece uma distinção entre espaço e movimento absolutos e relativos:

II - O espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece similar e imóvel. Espaço relativo é alguma dimensão ou medida móvel dos espaços absolutos, a qual nossos sentidos determinam por sua posição com relação aos corpos e é comumente tomado por espaço imóvel; assim é a dimensão de um espaço subterrâneo, aéreo

ou celeste determinado pela sua posição com relação à Terra. Espaços absoluto e relativo são os mesmos em configuração e magnitude, mas não permanecem sempre numericamente iguais. Pois, por exemplo, se a Terra se move, um espaço de nosso ar, o qual relativamente à Terra permanece sempre o mesmo, em um dado tempo será uma parte do espaço absoluto pela qual passa o ar, em outro tempo será outra parte do mesmo, e assim, entendido de maneira absoluta, será continuamente mudado. (...)

III - Lugar é uma parte do espaço que o corpo ocupa e, de acordo com o espaço, é ou absoluto ou relativo. (...)

IV - Movimento absoluto é a translação de um corpo de um lugar absoluto para outro; movimento relativo é a translação de um lugar relativo para outro.

Newton ilustrava esta idéia com o exemplo de um marinheiro movendo-se em um navio: o movimento verdadeiro e absoluto do marinheiro pelo espaço absoluto imóvel seria composto pelo movimento do marinheiro em relação ao navio, pelo movimento do navio em relação à Terra e pelo movimento da Terra em relação ao espaço absoluto.

Newton tinha plena consciência das dificuldades introduzidas pela concepção de espaço absoluto, que ele concebia como infinito, homogêneo e isotrópico. Como as partes de tal espaço seriam indistintas umas das outras por meio dos nossos sentidos, usualmente referimos os movimentos a corpos visíveis:

...Assim, em vez de lugares e movimentos absolutos, usamos lugares e movimentos relativos, e isto sem qualquer inconveniente em questões comuns; mas em investigações filosóficas, devemos abstrair de nossos sentidos e considerar as coisas em si mesmas distintas daquilo que são tão somente em suas medidas perceptíveis. Pois pode ser que não haja um corpo realmente em repouso, em relação ao qual os lugares e movimentos de outros possam ser referidos.

Para Newton, a credibilidade de uma noção tão elusiva como o espaço absoluto poderia ser aumentada através da consideração dos efeitos centrífugos que aparecem nos movimentos circulares, um ponto por ele considerado no seu famoso experimento do balde girante, no qual ele solicita que consideremos um balde com água, suspenso por uma corda comprida e enrolada. Inicialmente, o sistema encontra-se em repouso e a superfície da água é plana. O balde é então girado de uma forma que a corda é rapidamente desenrolada. No começo do movimento a superfície da água permanece plana, mas à medida que o balde comunica gradualmente, por atrito, seu movimento à água, o líquido começa a girar e subir as paredes do recipiente, com sua superfície adquirindo um formato côncavo que se torna mais pronunciado

² Todas as citações de Newton foram extraídas de (Newton, 1990).

³ (Dijksterhuis 1961, p. 353). Com sutil humor britânico, Eddington ressaltou o mesmo ponto ao afirmar que o Princípio da Inércia poderia ser enunciado, de forma alternativa, como: "Todo corpo continua em seu estado de repouso ou movimento uniforme em linha reta a menos que não o faça." (Eddington, 1929, p. 124).

quanto maior a velocidade de rotação (um parabolóide de revolução, como pode ser facilmente mostrado). De acordo com Newton, este comportamento só poderia ser devido à rotação da água com relação ao espaço absoluto, e não relativamente ao balde, à Terra ou às estrelas distantes, e a tendência apresentada pela água em rotação de afastar-se do eixo de seu movimento seria uma evidência de um movimento circular verdadeiro e absoluto, que pode ser conhecido e medido por esta tendência.

Na discussão sobre o balde girante (e também na experiência de pensamento, na qual dois globos presos por uma corda giram em torno do seu centro comum de gravidade), Newton se refere à tendência em afastar-se do eixo de rotação apresentada por corpos quando em movimento circular em relação ao espaço absoluto, o que não ocorreria em um movimento circular relativo. Na mesma análise, ele também faz referência a forças que aparecem como efeitos dos movimentos circulares absolutos:

Os efeitos que distinguem movimento absoluto de relativo são as forças que agem no sentido de provocar um afastamento a partir do eixo do movimento circular. Pois não há tais forças em um movimento circular puramente relativo; mas, em um movimento circular verdadeiro e absoluto, elas são maiores ou menores, dependendo da quantidade de movimento.

Nesta passagem Newton parece estar atribuindo um caráter real para as forças centrífugas que adviriam, de uma forma não explicada por ele, da rotação absoluta dos corpos⁴. Assim, o espaço absoluto seria uma entidade capaz de agir sobre os corpos, mas que não sofreria a ação dos mesmos.

Os esforços de Newton em defender a existência do espaço absoluto podem ser entendidos quando se considera que o mesmo tinha uma função lógica em sua teoria de movimento, provendo o referencial inercial primário, a condição ideal na qual as suas leis de movimento poderiam ser aplicadas em uma forma absolutamente rigorosa, o pano de fundo contra o qual o movimento poderia ser descrito de uma forma racional. Foi a forma encontrada por ele para evitar, pelo menos no nível abstrato da teoria, o círculo vicioso mencionado na introdução deste artigo.

Após apresentar suas leis de movimento, Newton introduziu o conceito de um referencial inercial (ainda que não lhe dando uma denominação específica) no seu quinto corolário: *O movimento de corpos encerrados em um dado espaço são os mesmos entre si,*

esteja esse espaço em repouso, ou se movendo uniformemente em uma linha reta sem qualquer movimento circular.

Isto é, podemos aplicar as leis de movimento de Newton não apenas no espaço absoluto, mas também em qualquer sistema de referência se movendo com velocidade constante em relação a ele.

As fortes convicções de Newton sobre a existência de um espaço absoluto (assim como de um tempo absoluto) podem ser também relacionadas com sua teologia. Segundo alguns autores, ele teria revestido o espaço e tempo absolutos com um significado religioso, a onipresença e eternidade de Deus, respectivamente⁵.

As críticas ao espaço absoluto de Newton e o Princípio de Mach⁶

A concepção de um espaço absoluto foi contestada por Berkeley e Leibniz, contemporâneos de Newton. Apesar de admirador da obra de Newton, Berkeley não admitia uma concepção de movimento que não fosse relativa. Para ele o espaço e o movimento absolutos poderiam ser substituídos pelo sistema das estrelas fixas e pelo movimento relativo ao mesmo, sem que nada de importante se perdesse na teoria newtoniana. Berkeley criticou ainda a associação estabelecida por Newton entre Deus e espaço. Este tema foi também um foco importante das críticas feitas por Leibniz, em sua famosa correspondência com Samuel Clarke, destacado discípulo de Newton (Leibniz, 1983).

As críticas de maior influência à formulação newtoniana da mecânica viriam dois séculos mais tarde com a obra de Ernst Mach, *A Ciência da mecânica - uma apresentação crítica e histórica do seu desenvolvimento*, cuja primeira edição, em alemão, data de 1883 (Mach, 1960). Mach foi um importante filósofo e cientista da virada do século, com contribuições em várias áreas da física. Ele tinha um forte interesse em educação, tendo fundado e co-editado, em 1887, o que deve ter sido, provavelmente, a primeira revista a ser publicada sobre ensino de ciências. Acreditava ainda que a ciência deveria ser ensinada historicamente, e escreveu *A Ciência da mecânica* a partir deste ponto de vista (Matthews, 1994).

Mach posicionou-se contra a definição de massa inercial proposta por Newton na abertura do *Principia* (a saber, massa como o produto da densidade pelo volume do corpo), considerando-a uma pseudo definição. Mach propôs que a

⁵ Por exemplo (Burt, 1983).

⁶ Esta seção é desenvolvida com mais detalhes em (Zylberstajn, 1994).

⁴ Esta interpretação é defendida por (Ghins, 1991).

verdadeira definição de massa somente poderia ser deduzida da relação dinâmica entre corpos, ou seja, a razão das massas como o negativo da razão inversa das contra-acelerações em relação ao referencial das estrelas fixas, ou $m_1/m_2 = -a_2/a_1$. Esta idéia veio a ser incorporada a quase todos os livros de mecânica, sob a denominação de definição operacional de massa, sem que, em geral, a sua origem seja mencionada.

As críticas mais relevantes de Mach foram direcionadas contra as concepções de espaço e tempo absolutos, que para ele não passavam de obscuridades metafísicas, de “ficções arbitrárias de nossa imaginação” que deveriam ser expurgadas da física. No prefácio da sétima edição alemã do seu livro, publicada em 1912, ele escreveu:

O caráter do livro permanece o mesmo. Com respeito às concepções monstruosas de espaço absoluto e tempo absoluto não posso em nada retroceder. Aqui eu apenas mostrei de forma mais clara que Newton muito falou sobre estas coisas, mas não as aplicou seriamente. O seu quinto corolário contém a único (provavelmente aproximado) sistema inercial utilizável na prática.

Ao invés do espaço absoluto de Newton, Mach propôs o resto da matéria no universo: *Tenho permanecido até o presente o único que tem insistido em referir a lei da inércia à Terra, e no caso de movimentos de grande extensão espacial e temporal, às estrelas fixas.* (Mach, 1960, p. 336-337).

Em sua crítica ao espaço absoluto, Mach procurou desarmar a argumentação de Newton baseada no balde girante, afirmando não haver necessidade de se invocar a rotação da água relativamente a um espaço absoluto, desconectado de toda matéria, para explicar o experimento:

A experiência de Newton, com o recipiente de água girando, nos informa simplesmente que a rotação relativa da água em relação aos lados do recipiente não produz forças centrífugas perceptíveis, mas que tais forças são produzidas por sua rotação relativa em relação à massa da Terra e dos outros corpos celestes. Ninguém é competente para dizer qual seria o resultado da experiência se os lados do recipiente aumentassem em espessura e massa até que eles tivessem uma espessura de várias léguas. (Mach, 1960, p. 284)

Ele foi um passo além, propondo que as forças centrífugas são forças reais que aparecem em qualquer sistema de referência em relação ao qual o conjunto das estrelas distantes encontra-se girando, ou seja, o que importa é a existência de um movimento circular relativo. O ponto de vista relacional de Mach e sua suposição sobre a conexão

entre a distribuição de matéria no universo e o movimento (e conseqüentemente com a massa de cada corpo) tornou-se conhecido como o Princípio de Mach, que foi de valor heurístico para Einstein desenvolver sua Teoria da Relatividade Geral. Ele não conseguiu, todavia, incorporar o Princípio às equações da teoria (Ghins, 1992).

Uma mecânica relacional

Mach deixou claro que a matéria distante do conjunto das *estrelas fixas* estabelece um excelente sistema inercial, mas ele não explicou este fato, nem indicou como esta conexão entre as estrelas distantes e os referenciais inerciais determinados localmente poderiam surgir. Um outro ponto é que ele não mostrou como o céu das *estrelas fixas* poderia gerar as forças centrífugas ao girar⁷, isto é, Mach sugeriu que a natureza deve se comportar desta maneira, mas ele não propôs uma Lei de Força específica que tivesse esta propriedade. Com a Lei de Newton da gravitação, uma casca esférica não exerce forças sobre corpos internos, quer a casca esteja em repouso ou girando, não importando a posição ou movimento dos corpos internos.

Um modelo matemático que implementa quantitativamente as idéias de Mach foi desenvolvido por A.K.T. Assis, (Assis, 1998) e (Assis, 1999). O modelo tem como base uma modificação na Lei de Gravitação de Newton, incluindo termos que dependem da velocidade e aceleração entre os corpos em interação, obtida por meio de uma analogia com a Lei de Força de Weber para cargas elétricas. A formulação de uma dinâmica relacional pressupõe ainda um princípio de equilíbrio dinâmico, que substitui a Primeira e a Segunda Leis de Newton: “A soma de todas as forças de qualquer natureza (gravitacional, elétrica, magnética, elástica, nuclear, ...) agindo sobre qualquer corpo é sempre nula em todos os sistemas de referência.”

Uma energia potencial gravitacional do tipo da de Weber e com um amortecimento exponencial é dada por:

$$U = -H_g \frac{m_{g1} m_{g2}}{r} \left(1 - 3 \frac{\dot{r}^2}{c^2} \right) e^{-H_g r/c}$$

Nesta expressão H_g é uma constante, m_{g1} e m_{g2} são as massas gravitacionais das partículas 1 e 2, separadas por uma distância r , $\dot{r} = dr/dt$ é a velocidade radial relativa entre elas,

⁷ Lembrar que do ponto de vista de Mach é equivalente se afirmar que um referencial tem movimento de rotação com relação às “estrelas fixas” ou vice-versa.

de inércia são consideradas artifícios úteis, sem que se considere uma outra perspectiva.

Decerto, problemas relacionados com o ensino do tema aqui tratado podem ser antevistos. As pesquisas sobre concepções alternativas têm mostrado quão difícil é para a maioria dos alunos adquirir uma compreensão conceitual da visão inercial de movimento, e não se pode descartar a hipótese de que a apresentação de críticas e alternativas a essa visão venha tornar a situação mais confusa ainda para eles. Ficam em aberto, e merecem reflexão por parte dos educadores em física, questões sobre o nível de ensino no qual deve se dar a introdução deste tema, e com qual profundidade ele deve ser tratado⁹. Acreditamos ser esta uma discussão que deveria atrair o interesse tanto de pesquisadores em ensino preocupados com a utilização educacional da história da ciência, quanto daqueles voltados para a inserção curricular da física moderna¹⁰.

Referências bibliográficas

- Assis, A.K.T. *Mecânica relacional*. Campinas: Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência da Unicamp, 1998.
- Assis, A.K.T. *Relational mechanics*. Montreal: Apeiron, 1999.
- Batista, I.L. *A Concepção física de espaço e o ensino de mecânica*. São Paulo, 1993. (Master's Thesis in Physics Teaching) - Instituto de Física - Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo.
- Burt, E.M. *As bases metafísicas da ciência moderna*. Brasília: Universidade de Brasília, 1983.
- Dijksterhuis, E.J. *The mechanization of the world picture*. London: Oxford University Press, 1961.
- Eddington, A. *The nature of the physical world*. Cambridge: Cambridge University Press, 1929.
- Gardelli, D. A Origem da inércia. *Cad. Catarin. Ens. Fís.*, 16(1):45-53, 1999.
- Ghins, M. *A inércia e o espaço-tempo absoluto*. Campinas: Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência da Unicamp, 1991.
- Ghins, M. A equivalência dinâmica segundo Mach e a teoria geral da relatividade. In: Évora, F.R.R. (ed.). *Século XIX: o nascimento da ciência contemporânea*. Campinas: Centro de Epistemologia, Lógica e História da Ciência da Unicamp, 1992.
- Kittel, C. et al. *Curso de física de Berkeley*. São Paulo: Edgard Blücher, 1993. v.1. *Mecânica*.
- Leibniz, G.W. *Correspondência com Clarke*. São Paulo: Abril Cultural, 1983. (Coleção Os Pensadores).

- Mach, E. *The science of mechanics: a critical and historical account of its development*. La Salle: Open Court, 1960.
- Matthews, M. R. *Science teaching: the role of history and philosophy of science*. New York: Routledge, 1994.
- Newton, I. *Principia: princípios matemáticos de filosofia natural*. São Paulo: Nova Stella/Edusp, 1990. v.1.
- Nussenzweig, H. M. *Curso de física básica*. São Paulo: Edgard Blücher, 1981. v.1. *Mecânica*.
- Tipler, P. *Física*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995. v. 1. *Mecânica*.
- Valverde, J.G. *Inercia y gravitación: la verdadera influencia de los astros*. Neuquén, Argentina: Fundacion Julio Palacios, 1999.
- Zylbersztajn, A. Newton's absolute space, Mach's principle and the possible reality of fictitious forces. *Europ. J. Phys.*, 15:1-8, 1994.

Received on October 04, 1999.

Accepted on November 25, 1999.

⁹ Uma proposta para o ensino de aspectos ligados à história da mecânica, incluindo as idéias de Mach, nos cursos básicos de terceiro grau e em programas de formação e atualização de professores, é discutida em (Batista, 1993).

¹⁰ Isto já começa a ocorrer, ver (Gardelli, 1999) e (Valverde, 1999)