

O experimento do balde girante de Newton: muitas perguntas, poucas respostas

Luciano Carvalhais Gomes

RESUMO

O presente artigo faz uma análise crítica das definições e do escólio das leis do movimento contidas no "Principia", bem como do experimento do balde girante sugerido por Newton. Além de nossa interpretação, apresentamos e analisamos algumas explicações alternativas ao experimento, baseadas nas críticas de Ernst Mach ao conceito de inércia newtoniana. O objetivo principal é criar um debate sobre um assunto muito importante para o entendimento da mecânica newtoniana, mas pouco discutido. Ao longo do artigo emitimos a nossa opinião, mas há ainda várias perguntas esperando por respostas convincentes.

Palavras-chave: Espaço absoluto. Balde girante. Leis de Newton. Inércia.

The experiment of Newton's bucket: Many questions, few answers

ABSTRACT

This paper makes a comment upon of the definitions and of the scholium of the movement laws contained in "Principia", as well as the experiment of the rotating bucket suggested by Newton. Besides our interpretation, we presented and analyzed some alternative explanations to the experiment, based on the critics of Ernst Mach to the concept of newtoniana inertia. The main objective is to create a debate about a very important subject for the newtoniana mechanics understanding, but a little bit discussed. Along the article we emitted our opinion, but there are many questions waiting for convincing answers.

Keywords: Absolute space. Newton's bucket. Newton's laws. Inertia.

1 INTRODUÇÃO

Ao ingressar em Cambridge, Newton teve contato com a filosofia natural aristotélica, que desde a época da criação das universidades havia formado o núcleo da educação superior. Por volta de 1664, quase na metade de seu curso de graduação, começou a ler livros de autores que contestavam esta filosofia, entre eles estavam René Descartes, Pierre Gassendi (1592-1655) e Robert Boyle (1627-1691). Apesar de identificar-se com a filosofia cartesiana, várias de suas opiniões eram diferentes. Em torno de 1672, quando ainda era um jovem professor em Cambridge, redigiu um manuscrito para tratar das propriedades de fluidos em equilíbrio. No entanto, mais de dois terços do documento contêm dezenove definições que versam sobre aspectos mais

Luciano Carvalhais Gomes é Mestre em Educação para a Ciência e o Ensino de Matemática pela Universidade Estadual de Maringá. E-mail: carvalhaisgomes@uol.com.br

Acta Scientiae	Canoas	v. 9	n.2	p. 39-63	jul./dez. 2007
----------------	--------	------	-----	----------	----------------

gerais da filosofia natural. O manuscrito, não publicado, intitulava-se *De Gravitatione et Aequipondio Fluidorum* (O peso e o equilíbrio dos fluidos). A importância deste texto está no fato de mostrar o momento de ruptura de Newton com alguns conceitos da filosofia mecânica de Descartes - como lugar, corpo, repouso, movimento e espaço - além de indicar umas das primeiras noções de Newton do conceito de força.

Newton começa o texto considerando que os termos quantidade, duração e espaço são bem conhecidos para poderem ser definidos por outros nomes. As quatro primeiras definições são sobre lugar, corpo, repouso e movimento. De acordo com Newton, lugar é a parte do espaço que uma coisa preenche adequadamente; corpo é aquilo que preenche um lugar; repouso é permanecer no mesmo lugar e movimento é a mudança de lugar¹. Para Descartes, lugar é a superfície que circunda o corpo; corpo é aquilo que possui extensão (altura, largura e profundidade); repouso, a grosso modo, é o oposto do movimento² e movimento "[...] é o transporte de uma parte da matéria, ou de um corpo, da vizinhança daqueles que o tocam imediatamente, e que nós consideramos como em repouso na vizinhança de outros" (DESCARTES apud SAPUNARU, 2006, p.70). Ao argumentar contra esta última definição, Newton afirma que ela da margem a várias incoerências. Por exemplo:

Primeiramente, a seguinte consideração. No instante em que o Filósofo defende calorosamente que a Terra não se move, pelo fato de não se deslocar da proximidade do éter contíguo, dos mesmos princípios segue que as partículas internas dos corpos duros, pelo fato de não se deslocarem em relação à proximidade das partículas imediatamente contíguas, não têm movimento em sentido estrito [...]. (NEWTON, 1996a, p.306)

Ou seja, as partículas internas de um corpo rígido nunca estariam em movimento, independente de qualquer referencial, o que seria um absurdo, de acordo com Newton. Outro conceito em Descartes que não o agrada é o de espaço. O espaço na filosofia cartesiana era consequência da relação entre os corpos, "[...] o espaço só existiria na presença de um corpo" (SAPUNARU, 2006, p.68). Para Newton, o espaço precisa ter existência concreta, ao contrário da idéia de extensão de Descartes que levaria ao ateísmo. Afinal, se a extensão era o próprio corpo e o espaço só existiria na presença deste corpo ou da extensão, então, Deus não poderia estar em nenhum espaço. Mas Newton não concebia Deus sem a presença do espaço e nem o espaço sem a presença de Deus. Deus tem um papel fundamental na filosofia natural newtoniana, diferente de Descartes que acreditava que Deus interveio na natureza apenas no ato da Criação e deste ponto em diante a matéria tornou-se autônoma e autogovernada, Newton

¹ Barbatti (1997) citando Westfall, afirma que estas definições são provenientes do *Syntagma Philosophicum* de Gassendi.

² Vale a pena dar uma olhada em Barra (2003) para entender melhor alguns aspectos filosóficos mais sutis da definição de repouso para Descartes.

afirmava que Deus, por ser um agente inteligente, intervinha na natureza a todo o momento (NEWTON, 1996a; SAPUNARU, 2006; BARBATTI, 1997). Esta definição de espaço absoluto aparecerá novamente nos *Principia*, e, juntamente com o seu famoso experimento do balde girante, será o tema deste artigo.

2 DAS PRIMEIRAS DEFINIÇÕES DO PRINCIPIA AO ESCÓLIO DAS LEIS DO MOVIMENTO

Em 5 de julho de 1687 - depois de muitos experimentos com colisões, um magnífico estudo matemático e muitas reflexões filosóficas -, Newton resume às suas conclusões sobre a natureza dos movimentos dos corpos terrestres e celestes no livro clássico intitulado *Philosophiae naturalis principia mathematica* (Princípios Matemáticos da Filosofia Natural, geralmente citado como *Principia*), reeditado, em edições revistas, em 1713 e 1726. Este é dividido em três partes ou livros. No Livro I, aparecem as suas famosas três leis da mecânica. No Livro II, há um estudo dos movimentos através de meios materiais resistentes e os movimentos desses meios. Neste livro, Newton demonstrou que se os movimentos periódicos dos planetas se desenvolvessem nos turbilhões de matéria fluida, segundo a hipótese de Descartes, estes movimentos não respeitariam as três leis de Kepler, portanto, a teoria dos vórtices deveria ser rejeitada. Por fim, no Livro III, Newton aplicou alguns resultados obtidos nos dois livros anteriores, fornecendo a formulação final da Lei da Gravitação Universal, e alguns exemplos de sua aplicação.

Newton inicia o Livro I apresentando oito definições. A Definição I é sobre a quantidade de matéria que é definida como o produto da densidade pelo volume. Abaixo de cada definição Newton faz alguns comentários, no caso desta definição ele afirma que ao longo do livro irá se referir à quantidade de matéria pelo nome de corpo ou massa, sendo esta proporcional ao peso. Com esta definição, Newton rompeu com a visão aristotélica e cartesiana de "substância", pois agora a quantidade de matéria não depende mais do tamanho ou da forma do corpo. Para os cartesianos, todos os corpos eram feitos de uma "substância extensa", por isso não percebiam que volumes iguais poderiam conter diferentes tipos de matéria e vice-versa (SAPUNARU, 2006). Na Definição II, Newton define quantidade de movimento como "[...] a medida do mesmo, provindo da velocidade e da quantidade de matéria, tomadas em conjunto" (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.279). Ou seja, quantidade de movimento é o produto da massa pela velocidade. A Definição III é a *vis insita*, já comentada no *De Gravitatione*, só que agora Newton afirma que a *vis insita* é uma força inata da matéria responsável pela manutenção do seu estado de movimento, "[...] seja este de repouso ou de movimento uniforme em linha reta" (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.279). E acrescenta os seguintes comentários:

Essa força é sempre proporcional ao corpo a que pertence e em nada difere da inatividade da massa, exceto em nossa maneira de concebê-la. Não é sem

difficuldade que um corpo, em virtude da natureza inerte da matéria, é retirado de seu estado de repouso ou de movimento. Em função disso, tal *vis insita* pode ser chamada, usando-se um nome sumamente significativo, de inércia (*vis inertiae*), ou força de inatividade. **Mas um corpo só exerce essa força quando outra força, imprimindo-se sobre ele, esforça-se por alterar seu estado;** e o exercício dessa força pode ser considerado tanto uma resistência quanto um impulso; é resistência na medida em que em que o corpo, para manter seu estado atual, opõe-se à força imprimida; e é impulso na medida em que o corpo, não cedendo facilmente à força imprimida por um outro, esforça-se por alterar o estado desse outro. A resistência costuma ser atribuída aos corpos em repouso e o impulso, aos que estão em movimento; mas o movimento e o repouso, tal comumente concebidos, distinguem-se apenas em termos relativos; e tampouco estão sempre realmente em repouso os corpos comumente considerados como tais. (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.279, grifo nosso)

Fica evidente, por estes comentários, a diferença entre a *vis inertiae* e o *impetus* medieval. A primeira é responsável apenas pela manutenção do estado de repouso ou do movimento retilíneo uniforme, enquanto que o *impetus* é responsável pelo movimento do corpo, quando ele cessar o corpo pára. Na Definição IV, Newton define a força imprimida como "[...] uma ação exercida sobre um corpo para modificar seu estado, seja de repouso, seja de movimento uniforme em linha reta" (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.279). Ao comentar esta definição, Newton dá o golpe mortal na teoria do *impetus*:

Essa força consiste apenas na ação e não mais permanece no corpo quanto a ação encerra. Pois o corpo conserva qualquer novo estado que adquira, por sua simples inércia. Mas as forças imprimidas têm origens diferentes, provindo da percussão, da pressão ou da força centrípeta. (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.279, grifo nosso)

A crença de que um *impetus* passa do movente para o móvel foi derrubada. E pela última frase, vemos que Newton considera que as origens de uma *vis impressa* podem ser tanto forças instantâneas (percussão) quanto contínuas (pressão e forças centrípetas). Na Definição V, Newton considera como força centrípeta "[...] aquela pela qual os corpos são atraídos ou impulsionados, ou tendem de um modo qualquer para um ponto ou para um centro" (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.280). A diferença marcante entre a força centrípeta e a percussão e pressão é que estas últimas agem após um contato físico observável entre os corpos, como nas colisões, já a ação da força centrípeta só é percebida, na maioria das vezes, por um contínuo desvio do movimento retilíneo uniforme do corpo. Não há um agente físico visível exercendo esta força. Ao comentar sobre a força centrípeta, Newton apresenta vários exemplos ilustrativos de uma maneira bastante didática, acostumando o leitor com os seus efeitos. Somente no Livro III, ele mostra que uma única força universal é

a responsável por manter os corpos celestes em suas órbitas e pela queda dos corpos terrestres. Mas, como ele mesmo assinalou, "[...] É necessário que a força tenha uma quantidade exata, e compete aos matemáticos descobrir a força capaz de servir exatamente para reter um corpo numa determinada órbita, com uma determinada velocidade [...]" (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.280-281). Esta é a principal função dos dois primeiros Livros. Ou seja, desenvolver os princípios matemáticos gerais da dinâmica dos corpos em movimento que serão aplicados ao mecanismo do Universo. No final do comentário, Newton indica três tipos de medidas da quantidade de uma força centrípeta: absoluta, aceleradora e motriz. Que são os assuntos, respectivos, das Definições VI, VII e VIII.

Na Definição VI, ele diz que "A quantidade absoluta de uma força centrípeta é a medida da mesma que é proporcional à eficácia da causa que a propaga a partir do centro pelos espaços ao redor" (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.281). Como exemplo Newton cita a força magnética que aumenta com o tamanho do imã, podemos complementar dizendo que no caso de uma força gravitacional a quantidade absoluta é proporcional às massas dos corpos. Na Definição VII, temos a seguinte afirmação: "A quantidade aceleradora de uma força centrípeta é a medida da mesma que é proporcional à velocidade que ela gera em um determinado tempo" (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.281). Podemos interpretar, deste modo, a quantidade aceleradora como sendo a aceleração do corpo. O que é comprovado pelos seus comentários desta definição, quando ele diz que a força da gravidade varia com a distância à Terra, mas "[...] a distâncias iguais, contudo, é a mesma por toda a parte, porque (retirando ou descontando a resistência do ar) acelera igualmente todos os corpos em queda, sejam eles pesados ou leves, grandes ou pequenos" (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.281). A Definição VIII define a quantidade motora da força centrípeta e como ela é medida: "A quantidade motriz de uma força centrípeta é a medida da mesma que é proporcional ao movimento que ela gera num determinado intervalo de tempo" (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.281).

Reescrevendo esta definição em notação moderna temos: $\vec{F} \propto \frac{d\vec{p}}{dt}$, sendo \vec{p} o momento linear ou quantidade de movimento do corpo. No terceiro parágrafo dos comentários que acompanha esta definição, Newton apresenta mais três equações:

[...] a quantidade de movimento provém da celeridade multiplicada pela quantidade de matéria, e a força motriz provém da força aceleradora multiplicada pela mesma quantidade de matéria. [...] Daí o fato de que, perto da superfície da Terra, onde a gravidade aceleradora ou força produtora da gravidade é a mesma em todos os corpos, a gravidade motriz, ou o peso, é proporcional ao corpo, mas, se subirmos para regiões mais altas, onde a gravidade aceleradora é menor, o peso seria igualmente diminuído, e será sempre igual ao produto do corpo pela gravidade aceleradora [...]. (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.282, grifo nosso)

As frases grifadas em linguagem moderna podem ser escritas, respectivamente, da seguinte maneira: $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$; $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ e $\vec{P} = m \cdot \vec{g}$. Por estas oito definições, está evidente que Newton tinha consciência de que a ação de uma força contínua gera uma aceleração constante. Logo após estas definições, Newton escreveu um escólio onde diz que não irá definir tempo, espaço, lugar e movimento, pois são conceitos bem conhecidos de todos. No entanto, ele faz questão de frisar a diferença que existe entre o caráter absoluto e relativo, real e aparente, matemático e comum destas grandezas. Decerto ele queria evitar as contradições e as conseqüências que achava absurdas do relativismo cartesiano citadas no De Gravitatione. Na concepção de Newton:

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. (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.283)

Do mesmo modo:

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; assim é a dimensão de um espaço subterrâneo, aéreo ou celeste, determinada por sua posição com respeito à Terra. O espaço absoluto e o relativo são iguais na forma e na magnitude, mas nem sempre se mantêm numericamente os mesmos. Se a Terra se move, por exemplo, um espaço do nosso ar, que em relação e com respeito à Terra mantém-se sempre o mesmo, em um momento será uma parte do espaço absoluto pela qual o ar passa, e em outro momento será outra parte desse mesmo espaço, de modo que, entendido em termos absolutos, estará mudando continuamente. (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.283)

Newton sabe que a definição de espaço absoluto é muito importante para o entendimento de suas leis do movimento, que serão apresentadas em seguida. Estas leis não serão corretamente interpretadas se os movimentos relativos forem tomados como sendo verdadeiros. Então, surge uma pergunta natural: como distingui-los? Ele não fugiu a esta discussão e propôs realizar tal distinção pelas causas e efeitos dos movimentos verdadeiros:

As causas pelas quais os movimentos verdadeiros e os relativos se distinguem entre si são causas impressas nos corpos para gerar o movimento. O movimento

verdadeiro não é gerado nem se muda senão por forças impressas no próprio corpo movido; mas o movimento relativo pode ser gerado e mudar-se sem forças impressas nesse corpo. Basta, com efeito, que se imprimam apenas em outros corpos, com os quais se faz a relação, de modo que, faltando eles, muda-se aquela relação em que consiste o repouso ou movimento relativo de determinado corpo. Da mesma forma, o movimento verdadeiro sempre sofre alguma mutação pelas forças impressas no corpo movido, mas o movimento relativo não é mudado necessariamente por essas forças. De fato, se as mesmas forças se imprimirem também em outros corpos com que se estabelece relação, de modo a conservar a situação relativa, estará igualmente conservada a relação em que consiste o movimento relativo [...]. (NEWTON, 1996b, p.27-28)

Se a causa é a força aplicada, quais serão os efeitos? Newton responde:

Os efeitos pelos quais se distinguem uns dos outros os movimentos absolutos e os relativos são as forças de se afastar do eixo do movimento circular. De fato, no movimento circular simplesmente relativo não há tais forças; no verdadeiro, porém, e absoluto, existem em maior ou menor grau conforme a quantidade do movimento. (NEWTON, 1996b, p.28)

Para exemplificar esta explanação, Newton expõe a célebre experiência do balde, tão criticada por Ernst Mach (1838-1916). Mas antes de analisá-la, vamos adiantar as leis do movimento apresentadas após o escólio, pois a nossa análise será melhor empreendida e entendida com o auxílio destas leis. Não pense o leitor ser um ato incoerente de nossa parte utilizar de leis ainda não enunciadas por Newton no livro para explicar este exemplo, pois temos certeza que, ao elaborá-lo, ele já tinha estas leis em mente.

3 O ESTABELECIMENTO DAS TRÊS LEIS DO MOVIMENTO

Newton define as suas três leis:

[Primeira Lei:] Todo corpo continua em seu estado de repouso, ou de movimento uniforme em linha reta, a menos que seja compelido a modificar esse estado por forças imprimidas sobre ele.

[Segunda Lei:] A variação do movimento é proporcional à força motriz imprimida, e ocorre na direção da linha reta em que essa força é imprimida.

[Terceira Lei:] Para cada ação existe sempre uma reação igual e contrária: ou as ações recíprocas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas para partes contrárias. (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.286-287)

Barra (1994), citando Whiteside, nos informa que nos primeiros meses de 1685, em um manuscrito intitulado *De Motu corporum*, Newton havia enunciado a Primeira Lei com a mesma redação que aparece acima, exceto pela ocorrência da expressão "pela força insita", ou seja: "Todo corpo persevera pela força insita (*vis insita*) em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta..." (WHITESIDE apud BARRA, 1994, p.64). Nos manuscritos posteriores e em todas as três edições do *Principia* (1687, 1713, 1726), o enunciado da Primeira Lei é igual ao citado, sem a *vis insita*. O que não quer dizer um retorno à concepção cartesiana, pela qual o movimento, assim como o repouso, é conservado exclusivamente porque é um "estado". Ou seja, a matéria, enquanto extensão, é completamente indiferente ao movimento ou ao repouso. Conforme Barra (1994, p.64), "Ao contrário de Descartes, Newton manteve desde o *De Gravitatione* que tais estados são conservados em virtude de uma força inerente, inata e essencial à matéria [...]". Assim, devemos analisar o enunciado da Primeira Lei em conjunto com a Definição III, ficando claro, portanto, que "[...] Newton jamais se afastou da posição de que a perseverança dos estados inerciais depende da natureza intrínseca da matéria que, além de não poder mudar por si só seu próprio estado, conserva-o através da força inerente a ela" (BARRA, 1994, p.65).

Com relação à Segunda Lei, não podemos inferir, pela fala de Newton, aquela famosa equação que modernamente costuma representá-la: $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ ou $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ se a massa for considerada constante. Mas estas equações estão implícitas no enunciado da Definição VIII e nos comentários que a acompanha. Porque lá e não aqui? A resposta está relacionada com os tipos de forças imprimidas que Newton trabalhava. De acordo com os comentários que ele fez na Definição IV, estas forças eram tanto instantâneas (percussão) quanto contínuas (pressão e forças centrípetas, entre elas, a gravidade). Podemos diferenciar estas forças da seguinte maneira: a força de percussão altera o movimento em um tempo desprezível; a força de pressão altera o movimento em um tempo pequeno, mas não desprezível e a força centrípeta altera o movimento continuamente, em um dado tempo. Assim, como na Definição IV Newton estava referindo-se às forças centrípetas, foi possível relacionar a variação da quantidade de movimento com o tempo, já no enunciado da Segunda Lei, o que devemos entender por "força imprimida" é a força de percussão, que altera o movimento, mas em um tempo desprezível. Corroborando o nosso argumento, Dias (2006) afirma que Bernard Cohen propõe que a omissão do tempo na Segunda Lei não foi um erro de Newton, pois sempre que este "[...] tratava uma força discreta, atuando por impulsos de duração muito pequena, [...] ele omitia o tempo e que, no caso de forças contínuas, o tempo era incluído" (COHEN apud DIAS, 2006, p.229). Complementando, Barra (1994) nos diz que uma "[...] confirmação de que a Segunda Lei se refere exclusivamente a forças entendidas como impulsos pode ser encontrada nas origens mais imediatas dessa Lei, que são certamente a física dos impactos ou das colisões" (BARRA, 1994, p.69). Mas deve ficar claro para o leitor que Newton tinha plena consciência de que a Segunda Lei também poderia ser aplicada quando a força imprimida fosse contínua, deixando implícito, deste modo, a famosa equação citada acima. Encontramos na Seção VI,

Proposição XXIV, Teorema XIX, do Livro II, do Principia, um comentário de Newton que confirma esta nossa afirmação:

Pois a velocidade, que uma força dada pode gerar em uma matéria dada em um tempo dado, é diretamente proporcional à força e ao tempo, e inversamente proporcional à matéria. Quanto maior a força ou o tempo, ou quanto menor a matéria, maior a velocidade que será gerada. Isto é manifesto da segunda lei do movimento (NEWTON, 2005, p.692)

Traduzindo em linguagem algébrica moderna temos: $\bar{v} \propto \frac{\bar{F} \cdot \Delta t}{m}$. De acordo com Sapunaru (2006, p.148), a análise historiográfica de Cohen mostrou que a ênfase dada por Newton à ação das forças de impacto na Segunda Lei do Movimento não prejudicou em nada a aplicação desta lei à ação das forças contínuas. E teria sido por esta razão que Newton não teria se preocupado em redefinir ou separar essa lei em itens distintos para forças de impacto e para forças contínuas. Nas palavras de Cohen: "[...] a distinção entre as duas formas [para forças de impacto e para forças contínuas] da lei [II] é mais significativa para nós do que teria sido para Newton" (COHEN apud SAPUNARU, 2006, p.148). Aliás, o estudo experimental das colisões também foi muito importante para o estabelecimento de sua Terceira Lei. Estes estudos foram inspirados nos experimentos imaginários de Descartes sobre colisões, que os fez para dar um embasamento empírico à sua teoria do movimento, estabelecendo as "regras dos choques". Regras estas que muitos cientistas da época - entre eles Christopher Wren (1632 - 1723), John Wallis (1616 - 1703) e Christiaan Huygens (1629 - 1695) - encontraram erros. Subseqüente ao enunciado da Terceira Lei, Newton faz o seguinte comentário:

[...] Quando um corpo se choca com outro, e por sua força altera o movimento do outro, esse corpo (em virtude da igualdade da pressão recíproca) também sofre uma variação idêntica em seu movimento, em direção à parte contrária. As variações causadas por essas ações são iguais, não nas velocidades, mas nos movimentos dos corpos, isto é, se os corpos não forem impedidos por outros empecilhos. Isso porque, visto que os movimentos são igualmente modificados, as variações das velocidades feitas em direção às partes contrárias são inversamente proporcionais aos corpos. Essa lei também se dá nas atrações, como será demonstrado no escólio seguinte. (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.286-287)

O escólio citado é o das leis do movimento, o último antes do Livro I. Logo no início deste escólio, Newton faz questão de reafirmar que a sua filosofia natural é um casamento perfeito entre o racionalismo e o empirismo, ou seja, entre a matemática e

a experiência: "Até aqui, estabeleci tais princípios da forma como foram aceitos pelos matemáticos e confirmados por um grande número de experimentos" (NEWTON, 1996b, p.38). Em seguida, esclarece que pelas primeiras duas leis do movimento e pelos primeiros dois Corolários é possível encontrar os resultados alcançados por Galileu a respeito da aceleração de queda livre dos corpos, em que a distância varia com o quadrado do tempo; e da descrição das trajetórias dos projéteis, que o cientista italiano conseguiu demonstrar tratar-se de uma parábola. Depois, menciona que Wren, Wallis e Huygens, com o auxílio das duas primeiras leis do movimento juntamente com a Terceira Lei, determinaram, de maneira independente, as regras do impacto e reflexão de corpos duros. Mas ele adverte que para os experimentos concordarem perfeitamente com a teoria, os efeitos da resistência do ar e da elasticidade dos corpos têm que ser considerados. Então, descreve com detalhes experimentos com colisão entre pêndulos que realizou considerando estes efeitos, chegando à conclusão de que a Terceira Lei "[...] na medida em que se refere a percussões e reflexões, está provada por uma teoria que concorda exatamente com a experiência" (NEWTON, 1996b, p.42).

4 ANÁLISE NEWTONIANA DA EXPERIÊNCIA DO BALDE GIRANTE

Agora podemos analisar a questão do espaço absoluto e a experiência do balde proposta por Newton. Para entendermos o que as três leis do movimento têm a haver com este assunto, imaginemos que um observador esteja parado dentro de um trem supersilencioso se movimentando com velocidade constante em relação ao espaço absoluto. De repente, ele percebe que uma caixa de madeira que estava apoiada em um chão completamente liso começa a se movimentar para trás espontaneamente. No referencial dele, por não conseguir identificar nenhum tipo de força agindo por contato ou à distância sobre a caixa que pudesse modificar o seu estado de repouso, este fato não pode ser explicado pelas três leis do movimento. Pois, nesta situação, a Primeira Lei afirma que a tendência da caixa era continuar em repouso. De modo análogo, a Segunda Lei enuncia que sem força imprimida não poderia ocorrer variação na quantidade de movimento. Por último, a Terceira Lei também não é obedecida porque aparece alguma força sobre a caixa vinda "do nada", não existe ação agindo sobre a caixa, que, por sua vez, não exerce reação em corpo algum. Como explicar esta violação das Três Leis? Na realidade, não houve violação nenhuma, pois a caixa teve uma alteração de movimento relativo, mas não verdadeiro. E como Newton já havia nos alertado, o "[...] movimento verdadeiro não é gerado nem se muda senão por forças impressas no próprio corpo movido; mas **o movimento relativo pode ser gerado e mudar-se sem forças impressas nesse corpo**" (NEWTON, 1996b, p.27, grifo nosso).

Uma explicação possível para o que aconteceu é que, inicialmente, o trem e a caixa estavam em movimento retilíneo uniforme em relação ao espaço absoluto, os dois tinham um movimento verdadeiro. Em algum momento, por forças impressas apenas no trem, este variou a sua velocidade - acelerou - o que deixou a caixa para trás, continuando, por inércia, a se movimentar uniformemente em relação ao espaço

absoluto. Mas, como o espaço absoluto não pode ser visto e determinado pelos nossos sentidos, o próprio Newton admite ser "[...] difícilimo [...] conhecer os verdadeiros movimentos de cada um dos corpos, distinguindo-se efetivamente dos aparentes [...]" (NEWTON, 1996b, p.29). No entanto, "[...] há argumentos que suprem esse defeito, em parte provindos dos movimentos aparentes, os quais constituem diferenças dos movimentos verdadeiros, em parte oriundos das forças que são causas e efeitos desses movimentos" (NEWTON, 1996b, p.29). Acreditamos que o principal argumento implícito em suas idéias é que todo observador ligado a um sistema físico animado de um movimento acelerado em relação ao espaço absoluto vê desenvolverem-se "forças de inércia" nos corpos presentes a este sistema. Cremos, portanto, que é para ilustrar este seu pensamento que ele expõe a experiência do balde, descrita da seguinte maneira:

Penduremos, p. ex., um vaso por meio de uma corda muito comprida, e viremo-lo muitas vezes até ficar a corda endurecida pelas voltas; enchamo-lo então de água e largue-mo-lo: subitamente ocorrerá aí certo movimento contrário, descrevendo um círculo, e, relaxando-se a corda, o vaso continuará por mais tempo nesse movimento. A superfície da água [dentro do vaso] será plana no começo, como antes do movimento do vaso, mas depois, imprimindo-se aos poucos a força da água, esta começará sensivelmente a mexer-se, afastando-se aos poucos do centro e subindo aos lados, de modo a formar uma figura côncava (como eu mesmo experimentei); e, na medida em que o movimento aumentar, a água subirá sempre mais, até que, por último, igualando-se no tempo sua revolução com a do vaso, descansará relativamente nele. **Esta subida indica o esforço para afastar-se do eixo do movimento, e por esse esforço se torna conhecido e se mede o verdadeiro e absoluto movimento circular da água, aqui inteiramente contrário ao movimento relativo.** (NEWTON, 1996b, p.28, grifo nosso)

O trecho destacado deixa claro que na visão de Newton a superfície da água torna-se côncava por ela ser impedida pelo balde de seguir, por inércia, um movimento retilíneo uniforme em relação ao espaço absoluto, como reza a Primeira Lei. Vamos esclarecer melhor este nosso ponto de vista acrescentando alguns comentários na análise que Newton deu para o fenômeno. Primeiro ele diz:

No início, quando era sumo o movimento relativo da água, não produzia nenhum esforço por se afastar do eixo; a água não tendia à circunferência, subindo aos lados do vaso, mas permanecia plana, e, por conseguinte, **seu verdadeiro movimento circular ainda não tinha começado.** (NEWTON, 1996b, p.28, grifo nosso)

Newton relata que quando o movimento relativo era máximo entre a água e o balde a mesma continuava em repouso com a sua superfície plana. Deste modo, um

observador que estivesse na borda do balde veria a água executar um movimento circular, mas como ela não tenderia a sair pela tangente, ele concluiria tratar-se de um movimento relativo. A força súbita e desconhecida que colocou a água em movimento em relação a ele é uma "força de inércia", análogo ao bloco que estava em repouso no piso do trem. Continuando, Newton complementa:

Depois, porém, que o movimento relativo da água diminuiu, sua subida para os lados do vaso indicava o esforço por afastar-se do eixo, e **esse esforço mostrava seu verdadeiro movimento circular**, continuamente crescendo até atingir seu máximo quando a água passou a descansar relativamente no vaso. (NEWTON, 1996b, p.28, grifo nosso)

Imaginemo-nos, ainda, um observador girando junto com o balde. Aos poucos, ele notará que a água começará a diminuir o seu movimento e a subir pelas paredes. A única explicação plausível é que esta iniciou o seu verdadeiro movimento circular e ao encontrar um obstáculo que a impeça de seguir, por inércia, em linha reta, o comprime fortemente. É a resultante desta compressão que dá o formato côncavo à sua superfície. O mesmo aconteceria, no exemplo do trem, se no final do vagão o encontro da parede com o piso fosse abaulado. A caixa, ao ser impedida de continuar em seu estado de repouso inercial em relação ao espaço absoluto, subiria pela parede até certa altura. Ao finalizar o seu raciocínio, Newton (1996b, p.28, grifo nosso) afirma:

Portanto, **aquele esforço não depende da translação da água com relação aos corpos ambientes**; logo, o verdadeiro movimento circular não pode ser definido por essas translações. **Só há um verdadeiro movimento circular de qualquer corpo que gira, correspondendo ao único esforço**, como seu efeito próprio e adequado, ao passo que os movimentos relativos, consoante as várias relações, com os corpos externos, são inúmeros, e, como as relações, são completamente destituídos de efeitos verdadeiros, a não ser enquanto participam daquele verdadeiro e único movimento. (NEWTON, 1996b, p.28, grifo nosso)

A nossa conclusão é de que, em um movimento circular verdadeiro, ao impedirmos que as partículas do corpo saiam pela tangente, percebemos a existência das "forças de inércia", que são ausentes em um movimento circular relativo. É importante frisar que após o balde e a água estarem girando com a mesma velocidade angular em relação ao espaço absoluto, a velocidade relativa nula entre ambos não elimina a "força de inércia" da água adquirida ao longo do movimento. A compressão que esta exerce na parede do balde depende, primordialmente, de sua velocidade em relação ao espaço absoluto.

5 OUTRAS INTERPRETAÇÕES

Façamos agora uma análise crítica de outras interpretações deste experimento. Fitas (1996) imagina uma experiência análoga à descrita por Newton, mas, ao invés de água no interior do balde, ele supõe um molde de uma substância rígida, por exemplo madeira. Neste caso, durante todo o experimento a superfície livre da madeira jamais ficará côncava. O que o leva a tirar duas conclusões:

[...] não há qualquer deformação que permita supor a existência de uma força (o que não significa que não exista e não se manifeste em efeitos não observáveis directamente); segundo, o facto de não se identificar uma força centrífuga (através da observação directa) obriga a reconhecer que não há qualquer movimento do molde em relação ao espaço absoluto. As duas experiências, a de Newton e esta última, são formalmente iguais e as conclusões extraídas são completamente diferentes. (FITAS, 1996, p.21)

Ora, o exemplo imaginado por Newton não tem um carácter universal, é apenas para ilustrar o surgimento das "forças de inércia" no movimento circular verdadeiro em uma situação em que isto possa ser observado. Evidente que Newton não esperava que todas as superfícies adquirissem um formato côncavo na presença destas forças. No caso do molde de madeira citado, da mesma maneira que todas as moléculas da água tinham a tendência de sair pela tangente, as moléculas da madeira também procuram este caminho. A diferença é que as ligações entre as primeiras são mais fracas, o que possibilita que as moléculas mais afastadas do centro, por terem uma velocidade tangencial maior, subam pela parede do balde. A pergunta a ser feita é como a distribuição das forças de contato da água com a parede do balde possibilitam que a mesma suba. Em nossa opinião, para termos uma resposta satisfatória, teríamos que levar em consideração o mecanismo de transferência de movimento da parede do balde para as moléculas de água que estão em contato direto e o mecanismo de transferência de movimento destas moléculas para as outras até o centro.

Em um outro artigo, Neves (2005) afirma que este experimento foi apresentado por Newton "[...] para estabelecer a idéia de um espaço absoluto [...]" (NEVES, 2005, p.189). Não estamos de acordo com esta opinião, o espaço absoluto foi definido para diferenciar o movimento verdadeiro do relativo, a experiência é apenas uma maneira de distingui-los. Em conformidade com o nosso ponto de vista, Barra (1994) assim se expressa:

A rigor não existe aqui uma "prova experimental" do espaço absoluto como alguns comentadores entenderam. Se Newton houvesse concebido a necessidade de fornecer uma justificação empírica para o espaço absoluto, em respeito à estrutura argumentativa do Principia que é observada com acentuado rigor, não seria em um Escólio do Livro I que ele apresentaria seus resultados, mas nas proposições do Livro III onde se orienta metodologicamente pelos princípios da "filosofia experimental". Quando muito, o chamado "experimento

do balde" pode ser tomado como uma ilustração empírica de um princípio mecânico abstrato, como tantas outras que Newton utiliza ao longo dos Escólios das proposições dos Livros I e II do Principia. **Com maior precisão, a medida dos efeitos dos movimentos circulares verdadeiros deve servir tão-somente para identificá-los, mas nunca para provar a existência do espaço ao qual se referem.** Aliás, o próprio Newton adverte que contrapem "a matemática e a filosofia aqueles que confundem as quantidades verdadeiras com as relações e as medidas vulgares das mesmas. (BARRA, 1994, p.53-54, grifo nosso)

Mais a frente, Neves (2005) sugere que Newton considerava a superfície côncava da água como uma conseqüência de um *conatus centrifugo* - tendência do corpo em afastar-se do centro da circunferência na direção do raio - provocado por uma ação do espaço absoluto sobre a água. Em suas palavras: "[...] Newton a atribui ao espaço absoluto, uma, digamos assim, entidade que agiria sobre tudo mas que não sofreria ação de coisa alguma [...]" (NEVES, 2005, p.193). Novamente não pactuamos com o autor, primeiro por que Newton em momento algum falou em *conatus centrifugo* ao analisar esta experiência. Ele apenas disse que a subida da água para os lados do vaso "[...] indicava o esforço por afastar-se do eixo [...]" (NEWTON, 1996b, p.28). Pela nossa leitura, trata-se da tendência em sair pela tangente, e não ao longo do raio. Se já é difícil explicar o motivo pelo qual a água sobe pelas paredes ao comprimir o balde na direção tangencial, fica quase inimaginável uma explicação devida a compressão radial. Por último, Newton, no *Principia*, sempre foi coerente em suas definições e jamais conferiu ao espaço absoluto a capacidade de agir sobre os corpos, muito pelo contrário, ele fez questão de afirmar: "O espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, mantém-se sempre semelhante e imóvel" (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p.283). Acreditamos esta ser uma interpretação forçada do autor, atribuindo mais a Newton do que o que ele realmente disse. Neves (2005) fundamentou os seus argumentos, principalmente, em Mach (1960) e Assis (1989; 1998; 1999). Vamos mostrar as principais idéias destes dois autores ligadas a explicação da experiência do balde de Newton, em um primeiro momento, e depois, com o auxílio do artigo de Escobar e Pleitez (2001a), faremos os nossos comentários.

Segundo Fitas (1998, p.121), no prefácio da primeira edição alemã (1883) de seu livro *A Ciência da Mecânica*, Mach escreveu: "[...] o presente volume não é um tratado sobre a aplicação dos princípios da mecânica. O seu objectivo é clarificar idéias, expor o significado real do assunto e expurgar as obscuridades metafísicas". Estas obscuridades são as definições newtoniana de massa, força, espaço e tempo. Para Mach, a definição de massa dada por Newton cria um circulo vicioso, pois ele não definiu previamente o conceito de densidade de forma adequada, desse modo, a densidade depende do conceito de massa e a massa depende do conceito de densidade³.

³ Encontramos em Sapunaru (2006) o seguinte comentário de Henry Crew sobre este "suposto" engano de Newton: "[...] na época de Newton, densidade e gravidade específica eram utilizadas como sinônimos, e a densidade da água era arbitrariamente tomada como unitária. As três unidades fundamentais empregadas [...] eram, portanto, densidade, comprimento e tempo, em lugar das nossas, massa, comprimento e tempo. Em tal sistema, é tanto natural como logicamente permissível definir massa em termos de densidade" (CREW apud SAPUNARU, 2006, p.126-127).

Mas o "[...] conceito de massa assume uma forma muito palpável quando se emprega dinamicamente o princípio da acção e reacção" (MACH apud FITAS, 1998, p.126), por este motivo, "[...] talvez a contribuição mais importante de Newton no que diz respeito aos princípios é a formulação da igualdade da acção e reacção" (MACH apud FITAS, 1998, p.126). Mach acreditava que a massa inercial não era uma propriedade intrínseca de um dado corpo, sendo o seu valor derivado da relação dinâmica entre este e todo o universo. Conforme resumiu bem Gardelli (1999):

Assim, para Mach, se um corpo é forçado a deixar o seu estado inicial de repouso ou de movimento retilíneo uniforme através da atuação de uma força local real (gravitacional, elétrica, magnética, elástica etc), então instantaneamente deve surgir uma força aplicada pelo conjunto das estrelas fixas sobre esse mesmo corpo a fim de evitar que ele altere o seu estado inicial.

Portanto, diferentemente de Newton, que acreditava que inércia é uma propriedade intrínseca da matéria, **Mach entendia inércia como sendo uma força de interação gravitacional entre os corpos materiais e o conjunto das estrelas fixas e que somente atua sobre eles no caso de se tentar acelerá-los em relação a elas**⁴. (GARDELLI, 1999, p.49, grifo nosso)

Baseado nesta sua concepção de massa inercial, Mach contesta a interpretação dada por Newton da experiência do balde:

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 a 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 finalmente uma espessura de várias léguas. Uma única experiência está diante de nós e nossa função é fazê-la concordar com os outros fatos conhecidos por nós e não com as ficções de nossa imaginação. (MACH apud ASSIS, 1999, p.70, grifo nosso)

Esta visão relacional de força fez com que Mach interpretasse a força de inércia newtoniana como uma interação entre o corpo e o espaço absoluto, o que não foi dito

⁴ De acordo com Assis (1999, p.73): "[...] Mach não enfatizou que a inércia de um corpo é devido a uma interação **gravitacional** com os outros corpos no universo. Em princípio esta ligação entre a inércia de um corpo e os corpos celestes distantes poderia ser devida a qualquer tipo de interação conhecida (elétrica, magnética, elástica...) ou mesmo a um novo tipo de interação. Em nenhum lugar ele disse que a inércia de um corpo deveria vir de uma interação **gravitacional** com as estrelas fixas. Os primeiros a sugerir isto parecem ter sido os irmãos Friedlander em 1896 [...]. Esta idéia também foi adotada por W. Hofmann em 1904, por Einstein em 1912, por Reissner em 1914-1915, por Schrödinger em 1925 e por muitos outros desde então [...]"

por Newton. Deste modo, ele "[...] afirmava ser inconcebível corpos interagirem com espaço, pois para ele, matéria só poderia interagir com matéria" (GARDELLI, 1999, p.48). Para substituir o espaço absoluto como referencial de movimento, Assis (1999, p.63) nos informa que Mach considerava a Terra um bom referencial para experiências típicas de laboratório que duram muito menos do que uma hora e que não se estendem muito no espaço comparado com o raio terrestre, por outro lado, em experiências que duram muitas horas ou nas quais estudamos movimentos com escalas temporais e espaciais grandes, um sistema de referência inercial melhor do que a Terra é o referencial definido pelas estrelas fixas. E para Assis (1999): "Hoje em dia podemos dizer que um sistema de referência inercial melhor ainda para estudar a rotação ou movimento de nossa galáxia como um todo (em relação às outras galáxias, por exemplo) é o referencial definido pelas galáxias externas ou o sistema de referência no qual a radiação cósmica de fundo é isotrópica" (ASSIS, 1999, p.63).

Assis (1999) afirma que não foi somente Newton que se enganou a não perceber o caráter relacional das forças, o mesmo erro também foi cometido por Albert Einstein (1879 - 1955), que apesar de ter sido fortemente influenciado pelo *Princípio de Mach*⁵, não conseguiu implementá-lo. Para justificar este seu argumento, o autor cita alguns problemas que encontrou nas teorias da relatividade restrita e geral de Einstein. Por exemplo, a assimetria da indução eletromagnética citada por Einstein no primeiro parágrafo do artigo "Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento", segundo Assis (1999, p.77), não aparece no eletromagnetismo de Maxwell e sim na interpretação específica da formulação de Lorentz para a eletrodinâmica. Nesta interpretação, quando um ímã está em movimento em relação ao éter, ele gera neste um campo magnético e elétrico, este último agiria no circuito que está em repouso em relação ao éter, induzindo nele uma corrente. Se o ímã está em repouso no éter, ele gera apenas um campo magnético, deste modo, quando o circuito está se movendo no éter ele sofrerá ação de uma força magnética que induzirá uma corrente. O que ocasiona uma assimetria na origem da corrente, que na primeira situação é devida ao campo elétrico e na segunda à força magnética. Para Assis (1999, p.81), ao invés de tentar se livrar desta assimetria tornando supérfluo o éter e considerando a velocidade do ímã e do circuito em relação ao observador, Einstein poderia simplesmente seguir o caminho de Faraday (1791 - 1867), Maxwell (1831 - 1879) e Weber (1804 - 1891) e considerar a velocidade relativa entre o ímã e o circuito na análise. Esta direção seguida por Einstein fez com que ele postulasse a constância da velocidade da luz, Assis (1999) não concorda que a velocidade da luz no vácuo seja constante independentemente do estado de movimento do observador ou do detector. Em suas palavras:

A luz é uma entidade física que carrega momento linear e energia, que é afetada pelo meio onde se propaga (reflexão, refração, difração, rotação de Faraday do

⁵ Assis (1999, p.72-73) define "Princípio de Mach" como a idéia de que a inércia de qualquer corpo (sua massa inercial ou sua resistência a sofre acelerações) surge ou é causada por sua interação com o universo distante.

plano de polarização etc.), que age sobre os corpos aquecendo-os, provocando reações químicas, ionizando átomos etc. Neste sentido ela não tem nada de especial e como tal tem similaridades tanto com corpúsculos quanto com o som. A aceitação por outros físicos desta conclusão de que a velocidade da luz é constante para todos observadores inerciais independente de seus movimentos em relação à fonte criou problemas e paradoxos inumeráveis nestes últimos noventa anos. Nada disto aconteceria mantendo-se o conceito plausível de que a velocidade mensurável da luz depende da velocidade do observador ou do detector. (ASSIS, 1999, p.86-87)

Um outro problema encontrado por Assis (1999, p.91) deve-se ao fato de Einstein interpretar a velocidade que aparece na força de Lorentz, $\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \cdot \vec{B}$, como sendo a velocidade da carga em relação ao observador ou ao sistema de referência inercial (e não em relação ao dielétrico como defendido por Thomson (1856 - 1940) e Heaviside (1850 - 1925), nem também em relação ao éter como defendido por Lorentz). Isto ocasiona uma dependência desta força ao sistema de referência, o que seria mais simples se ela dependesse apenas de sua posição, velocidade e aceleração em relação às outras cargas com que está interagindo, como acontece na eletrodinâmica de Weber.

Mais um aspecto interessante levantado por Assis (1999) é que a teoria da relatividade geral tinha por objetivo inicial quantificar todas as idéias de Mach, mas o próprio Einstein admitiu não ter conseguido cumprir esta meta. No começo, ele percebeu que qualquer teoria que implementasse o Princípio de Mach apresentaria quatro conseqüências: a inércia de um corpo aumentaria ao se acumular massas ponderáveis na sua vizinhança; massas vizinhas a um corpo ao serem aceleradas provocariam nele uma força aceleradora no mesmo sentido da aceleração; um corpo em movimento de um movimento de rotação produziria no seu interior um campo de forças centrífugas radiais e um "campo de Coriolis" que faz com que corpos em movimento sejam desviados no sentido da rotação; e um corpo num universo vazio não poderia ter inércia, ou, toda inércia de qualquer corpo tem que vir de sua interação com outras massas no universo. Ainda de acordo com (ASSIS, 1999), a primeira conseqüência não aparece na relatividade geral. A segunda acontece, mas sua interpretação não é única. A terceira aparece, mas não com os dois termos - forças centrífugas e de Coriolis - indicados simultaneamente com os coeficientes corretos, como se sabe que eles existem em referenciais não inerciais da teoria newtoniana. E a quarta conseqüência também não ocorre. Ou seja:

Einstein nunca pôde evitar o aparecimento da inércia em relação ao espaço absoluto nas suas teorias, embora fosse uma exigência do princípio de Mach que a inércia de qualquer corpo só deveria surgir em função dos outros corpos do universo, mas não em relação ao espaço vazio.

Isto mostra que mesmo na sua teoria da relatividade geral os conceitos de espaço absoluto ou de sistemas de referência inerciais preferenciais desvinculados da matéria distante ainda estão presentes, o mesmo ocorrendo com a inércia ou com as massas inerciais. (ASSIS, 1999, p.103)

Como teoria alternativa para a implementação quantitativa das idéias de Mach, Assis (1999) propõe a Mecânica Relacional, baseada apenas em grandezas relativas entre os corpos materiais e na eletrodinâmica de Weber. Deste modo, ele acredita evitar todos os paradoxos típicos das teorias de Einstein como a contração de comprimento, a dilatação do tempo, a invariância de Lorentz, as transformações de Lorentz, a constância da velocidade da luz no vácuo qualquer que seja o estado de movimento do detector, as leis covariantes, a métrica de Minkowski, o espaço quadridimensional, a geometria riemanniana aplicada na física, o elemento de Schwarzschild, os símbolos de Christoffel, a curvatura do espaço, as forças entre corpos materiais dependentes do estado de movimento do observador, etc. De acordo com Assis (1999, p.112), estes conceitos teóricos "[...] desempenham o mesmo papel que os epiciclos na teoria ptolomaica", e a Mecânica Relacional seria um novo paradigma para a física, que evitaria todos estes epiciclos de maneira simples, além de estar baseada em concepções filosóficas mais intuitivas, razoáveis e palpáveis. O autor começa a apresentação da Mecânica Relacional enunciando os três postulados que a caracterizam:

- (I) Força é uma quantidade vetorial que descreve a interação entre corpos materiais.
- (II) A força que uma partícula pontual A exerce sobre uma partícula pontual B é igual e oposta a força que B exerce sobre A e é direcionada ao longo da linha reta conectando A até B.
- (III) 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. (ASSIS, 1999, p.116)

Em seus comentários, ele afirma que o primeiro postulado deixa claro que força é uma interação entre corpos materiais, não descrevendo uma interação de um corpo com o "espaço". O que é uma alusão à força de inércia de Newton, que na visão de Mach e de Assis, deve-se à interação do corpo com o espaço absoluto, mas nunca é demais frisar que Newton jamais interpretou a força de inércia desta maneira, e sim como uma propriedade intrínseca da matéria. O segundo postulado é semelhante à Terceira Lei de Newton. A novidade maior está no terceiro postulado que é contrário à Segunda Lei de Newton, deixemos que o próprio autor explique as suas vantagens sobre esta lei:

A vantagem deste terceiro postulado, comparado com a segunda lei do movimento de Newton, é que não introduzimos nele os conceitos de inércia, de massa inercial, de espaço absoluto e nem de sistema de referência inercial. Na mecânica newtoniana tínhamos que a soma de todas as forças era igual à variação do momento linear (produto da massa inercial pela velocidade) com o

tempo. No caso de massa constante isto era igual ao produto da massa inercial do corpo por sua aceleração em relação ao espaço absoluto ou em relação a um sistema de referência inercial. Isto significa que estes conceitos tinham de ter sido introduzidos e clarificados anteriormente e que formam uma parte essencial da segunda lei do movimento de Newton. O nosso postulado evita tudo isto e esta é sua maior vantagem. Além do mais, ele é válido em todos os sistemas de referência, enquanto que a segunda lei de Newton só era válida em sistemas inerciais, caso contrário seria necessário introduzir as forças fictícias. (ASSIS, 1999, p.117-118)

Em seguida, Assis (1999) afirma que os três postulados podem ser substituídos por um único, a saber: "A soma de todas as energias de interação (gravitacional, elétrica, elástica...) entre qualquer corpo e todos os outros corpos no universo é sempre nula, em todos os sistemas de referência. Este postulado pode ser chamado de princípio de conservação da energia" (ASSIS, 1999, p.118). Para o autor a vantagem deste postulado em relação ao postulado análogo da mecânica clássica é que não há necessidade de introduzir o conceito de energia cinética, que tem embutido o conceito de massa inercial e de espaço absoluto ou sistemas inerciais. Para implementar estes postulados e obter as equações de movimento seguindo as idéias de Mach, Assis (1999) utiliza expressões de força e energia baseadas naquelas deduzidas por Weber, em 1848, para a interação entre duas cargas elétricas. A principal diferença em relação às newtonianas é que estas dependem apenas da distância relativa, da velocidade radial e da aceleração radial entre as partículas interagentes. Isto é, elas são completamente relacionais tendo o mesmo valor para todos os observadores, independente se eles são ou não inerciais do ponto de vista newtoniano.

Depois de algumas demonstrações matemáticas, Assis (1999) prova que, não havendo rotação relativa entre os corpos interagentes, a força que as estrelas e galáxias distribuídas uniformemente ao redor de um certo corpo exercem sobre ele não é mais igual a zero, como Newton havia demonstrado em sua mecânica, e sim igual a menos o produto da massa pela aceleração. Havendo a rotação relativa, a força de interação gravitacional entre as estrelas e o corpo em questão é igual a menos o produto da massa pela aceleração, mais as forças de Coriolis e centrífuga, mais um terceiro termo que não possui nome específico e que aparece quando a velocidade angular relativa entre os corpos interagentes não é constante. Aplicando este raciocínio ao experimento do balde de Newton, Assis (1999) mostrou que se houver uma rotação relativa entre o Universo e o balde, então surgirá a força que empurra a água em direção às paredes do balde, como queria Mach. Além desta demonstração, Gardelli (1999) enumera outras cinco conclusões a que Assis (1999) chegou:

1. As forças inerciais surgem devido à interação gravitacional de um certo corpo com o restante do Universo.
2. A massa inercial é, na verdade, a própria massa gravitacional.

3. O espaço absoluto de Newton é identificado como o conjunto das galáxias e estrelas fixas.
4. Não é mais necessário diferenciar referenciais inerciais de referenciais não-inerciais.
5. Para se deduzir uma expressão análoga à 2ª Lei de Newton, Assis postulou que a resultante das forças que atuam sobre um certo corpo não é mais igual ao produto da massa pela aceleração e sim igual a zero. Agora, deve-se levar em conta não só as forças locais que atuam sobre o corpo, tais como as forças peso, elástica, elétrica, magnética etc., como também a força exercida pelas estrelas e galáxias sobre o corpo. (GARDELLI, 1999, p.51)

Encontramos em Escobar e Pleitez (2001a) uma crítica ríspida à *Mecânica Relacional*. Apesar de concordarmos com muitos dos argumentos expostos, não nos agradou a maneira que os autores se expressaram, como observou muito bem Marques (2001):

[...] O primeiro é o estilo, pelo menos desprimoroso, com que os autores do artigo "Mecânica Relacional: A Propósito de uma Resenha", [RBEF 23 (3), 260 (2001)] redigiram seu texto. Devo dizer que não conheço pessoalmente o autor da Mecânica Relacional, a não ser por um texto seu publicado em livro intitulado Eletrodinâmica de Weber. Assim não tenho o propósito de desagrává-lo do tratamento recebido. Tampouco tenho o propósito de veicular qualquer juízo de mérito em favor dele ou de seus críticos; simplesmente nunca li a Mecânica Relacional e os argumentos de seus críticos são contextualizados de tal forma que não cabe qualquer posição a não ser associar-se à condenação. Lembra aqueles julgamentos da Santa Inquisição onde um promotor, braço esticado, dedo em riste apontado para a face do réu, mudo e cabisbaixo, volta-se para seus pares e com afiada eloquência alinha pecados, fraquezas, violações das sagradas escrituras, uma só das quais seria suficiente para condená-lo à fogueira. Entendo que esse estilo de texto deve ser evitado: **dá a impressão de que existem assuntos tabus dentro da física que não admitem questionamentos e este é um ensinamento muito ruim, além de ser reprovável do ponto de vista do bom gosto.** Relatividade Geral, Restrita ou qualquer outro assunto. Mesmo que se corra o risco de ultrapassar os limites que separam a ortodoxia daquilo que os autores chamaram de "ciência patológica". Ninguém melhor que Einstein simbolizou exemplarmente esse tipo de independência intelectual e cultivou essa característica da física [...]. (MARQUES, 2001, Cartas ao Editor, grifo nosso)

E a resposta de Escobar e Pleitez (2001b) à carta de Marques (2001) não foi muito convincente, deixando claro que há uma certa antipatia destes autores por Assis, que transpareceu no artigo. Vejamos a resposta:

Não é nossa intenção realizar a Santa Inquisição contra o Professor Assis ainda mais que o artigo prende-se única e exclusivamente à obra que foi objeto da resenha publicada anteriormente na mesma RBEF. Uma inquisição teria, para justificar este nome de tão tristes lembranças, que realizar um trabalho extenso cobrindo toda a obra do Professor Assis. Procuramos no nosso artigo mostrar que em ciência não basta o questionamento! É bom lembrar que em ciência não vale tudo. Se é verdade que na proposta de uma nova teoria pode "valer tudo" (Feyerabend) o mesmo não acontece na verificação dessa teoria. Neste caso é o acordo com os dados experimentais que vai dizer se a teoria vale ou não. A Mecânica Relacional já foi eliminada pela experiência e foi isto que procuramos mostrar aos leitores da RBEF. (ESCOBAR; PLEITEZ, 2001b, Cartas ao Editor)

Polêmicas à parte, Escobar e Pleitez (2001a) endereçam as suas primeiras críticas ao *Princípio de Mach*, lembrando que este não foi implementado quantitativamente de maneira consistente por nenhuma teoria, nem mesmo pela relatividade geral. O que apenas confirma o que Assis (1999) já havia informado. Mas ao afirmarem que também não tem sido possível verificá-lo experimentalmente, podemos deduzir que a explicação dada por Mach da experiência do balde girante não é considerada como correta por estes autores, neste ponto estamos de acordo. Corroborando a informação de Assis (1999), Escobar e Pleitez (2001a) afirmam que Einstein tinham o *Princípio de Mach* como guia para a construção das teorias da relatividade. De tal maneira que, em 1912, usando uma versão rudimentar da teoria da relatividade geral, mostrou que se uma esfera oca massiva é acelerada em torno de um eixo que passa pelo centro no qual se encontra uma massa inercial pontual, então a massa inercial desta última é aumentada. Mas na versão mais elaborada, as primeiras soluções obtidas para sua equação de campo gravitacional iam contra o *Princípio de Mach*, mostrando que a validade das equações dependia de um espaço absoluto no qual um corpo de prova teria inércia mesmo na ausência de outras massas. Na esperança de reconciliar a relatividade geral com o *Princípio de Mach*, em 1917, Einstein teve que modificar suas equações introduzindo uma constante cosmológica, de tal modo a obter um universo homogêneo, isotrópico e estático, onde a inércia de um corpo não existiria na ausência de matéria em sua vizinhança. Mas, segundo Escobar e Pleitez (2001a, p.262), ainda em 1917, a demonstração do astrônomo holandês Willem de Sitter (1872 - 1934) de que as equações modificadas admitiam uma solução para um universo vazio, que correspondia a um universo em expansão, foi o acontecimento crucial para a sua credibilidade nesse princípio ser abalada. Após passar um ano tentando mostrar que a solução de de Sitter era fisicamente inaceitável (devido a alguma singularidade), Einstein abandonou suas tentativas de implementar rigorosamente o princípio de Mach. Em 1954, em uma carta, ele disse:

Na minha opinião nunca mais deveríamos falar do princípio de Mach. Houve uma época na qual pensava-se que os 'corpos ponderáveis' eram a única realidade física e que, numa teoria todos os elementos que não estiverem totalmente determinados por eles, deveriam ser escrupulosamente evitados. Sou consciente que durante um longo tempo também fui influenciado por essa idéia fixa. (EINSTEIN apud ESCOBAR; PLEITEZ, 2001a, p.263)

O interessante é que os autores não dão por encerrado o assunto ao afirmarem que "A origem da inércia (das massas) continua a ser um ponto em aberto em qualquer teoria fundamental das partículas elementares" (ESCOBAR; PLEITEZ, 2001a, p.263), eles apenas não concordam que o *Princípio de Mach* seja a solução adequada. Esta é a opinião que defendemos, não sabemos o porquê da matéria ter a tendência de seguir a Primeira Lei do movimento, assim como Newton não sabia, mas também não acreditamos que a inércia dependa da interação com outros corpos. As outras críticas dos autores são para a afirmação de que as teorias da relatividade estão erradas. Depois de refutarem os argumentos da assimetria da indução eletromagnética e da covariância, eles afirmam que os supostos paradoxos citados por Assis (1999) - a contração de comprimento, a dilatação do tempo, a curvatura do espaço, a constância da velocidade da luz no vácuo qualquer que seja o estado de movimento do detector, etc. - já foram comprovados por vários experimentos. Após a descrição de alguns destes experimentos, eles complementam: " Em 100 anos de prêmios Nobel apenas em 6 ocasiões não foi entregue. Deste total, 27 estão relacionados de alguma maneira com a relatividade especial e pelo menos 1 com a TGR" (ESCOBAR; PLEITEZ, 2001a, p.265). A intenção dos autores foi mostrar que inúmeros experimentos meticulosos, premiados inclusive com o Nobel, confirmaram as teorias da relatividade. Aqui a nossa opinião oscila para os dois lados. Em parte concordamos com este argumento, afinal, não podemos desprezar a capacidade intelectual destes cientistas laureados e pensar que todos abraçaram as teorias de Einstein cegamente. Como se apenas Assis (1999) tivesse conhecido a eletrodinâmica de Weber e refletido sobre a possibilidade de sua utilização na mecânica. Mas, por outro lado, sabemos que as pesquisas não são isentas de influências políticas, sociais e econômicas. Deste modo, questionamos se a *Mecânica Relacional* foi rejeitada por não responder adequadamente estes experimentos premiados, ou, por não atender ao interesse econômico da comunidade científica dominante que ganha altas quantias com as pesquisas envolvendo as teorias da relatividade. Aos adeptos da *Mecânica Relacional* fica aqui um alento, a história da ciência mostra que, mais cedo ou mais tarde, teorias inconsistentes clamam por substituição, se este for o caso das teorias da relatividade, não faltará oportunidade para a *Mecânica Relacional* provar a sua eficácia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muitos professores têm-se preocupado com o fato dos estudantes estarem demonstrando desestímulo e desinteresse em aprender os conhecimentos básicos na área de Física, pois esta é abordada em sala de aula, geralmente, restringindo-se à resolução de problemas e exercícios de quadro-negro. Porém, o ato de ensinar é uma atividade complexa para cada professor, rodeada de riscos de insucesso para cada um dos seus alunos ou para o conjunto dinâmico de uma sala de aula. Considerando a complexidade do processo ensino/aprendizagem e admitindo ser o conhecimento uma conquista pessoal do educando, somos levados a acreditar que qualquer proposta metodológica, por melhor que seja, não será, por si só, garantia de aprendizagem. Ela

deverá ser acompanhada pela competência do professor e pela consciência e vontade do aluno em querer aprender. Nesta perspectiva, o elemento principal reside no despertar do interesse do aluno, fundamental nesta caminhada, cabendo ao professor a difícil tarefa de oferecer ao aluno condições favoráveis para sua aprendizagem e a construção do conhecimento, de sua história, de suas bases epistêmicas, de suas contingências. Uma boa opção como elemento para o despertar do interesse do aluno seria um estudo mais aprofundado sobre algumas controvérsias científicas. Isso poderia permitir ao educando desenvolver algumas das competências e habilidades sugeridas pelos Parâmetros Curriculares Nacionais, como, por exemplo:

Reconhecer o sentido histórico da ciência e da tecnologia, percebendo o seu papel na vida humana em diferentes épocas e na capacidade humana de transformar o meio.

Compreender as ciências como construções humanas, entendendo como elas se desenvolvem por acumulação, continuidade ou ruptura de paradigmas, relacionando o desenvolvimento científico com a transformação da sociedade. (BRASIL, 2000, p.13)

Deste modo, sugerimos o estudo teórico do experimento do balde girante, em sala de aula, incentivando os alunos a participarem do debate. Além dos motivos já citados, acreditamos que o aluno, ao ser mergulhado no contexto das opiniões divergentes dos cientistas sobre este experimento, poderá desenvolver, potencialmente, um espírito crítico, desmistificando o conhecimento científico. E o professor terá oportunidade de experimentar uma aula diferente do método tradicional de ensinar Física, segundo Megid (1998, p.17), um método que tem:

Um ensino calcado na transmissão de informações através de aulas quase sempre expositivas, na ausência de atividades experimentais, na aquisição de conhecimentos desvinculados da realidade. Um ensino voltado primordialmente para a preparação aos exames vestibulares, suportado pelo uso indiscriminado do livro didático ou materiais assemelhados e pela ênfase excessiva na resolução de exercícios puramente memorísticos e algébricos. Um ensino que apresenta a Física como uma ciência compartimentada, segmentada, pronta, acabada, imutável.

Gostaríamos de convidar também o leitor a dar a sua explicação sobre o que acontece na experiência do balde girante. Este é um assunto muito importante para o entendimento da mecânica newtoniana, mas pouco discutido. Por exemplo, não encontramos nas obras clássicas de Mecânica qualquer menção a este experimento. Ao longo do artigo emitimos a nossa opinião, mas há ainda várias perguntas esperando por respostas convincentes. Por isto, dividimos com o leitor as nossas dúvidas: Por que a água sobe pelas paredes, como se existisse uma força puxando para cima? Qual

é a função do espaço absoluto no experimento? Por que um corpo insiste em seguir a Primeira Lei de Newton?

REFERÊNCIAS

- ASSIS, A. K. T. *On Mach's Principle*. Found. Phys. Letters, v.2, p.301-318, 1989.
- _____. *Mecânica Relacional*. Campinas: Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência/Unicamp, 1998.
- _____. *Uma nova Física*. São Paulo: Perspectiva, 1999.
- BARBATTI, M. *A filosofia natural à época de Newton*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.21, n.1, p.153-161, 1999.
- _____. *Conceitos físicos e metafísicos no jovem Newton: uma leitura do De Gravitatione*. Revista da SBHC, n.17, p.59-70, 1997.
- BARRA, E. S. O. *Omnis Philosophiae Difficultas: o conceito de força na filosofia natural de Newton*. São Paulo, 1994. 193f. Dissertação (Mestrado em Filosofia) - Faculdade de Filosofia, Ciências Humanas e Letras, Universidade de São Paulo.
- _____. *A metafísica cartesiana das causas do movimento: mecanicismo e ação divina*. Scientiae Studia, v.1, n.3, p.299-322, 2003.
- BRASIL. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio*. Brasília: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Média e Tecnológica, 2000.
- COHEN, I. B.; WESTFALL, R. S. *Newton: textos, antecedentes, comentários*. Tradução de Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: EdUERJ - Contraponto, 2002.
- DIAS, P. M. C. *F=ma?! O nascimento da lei dinâmica*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.28, n.2, p.205-234, 2006.
- ESCOBAR, O.; PLEITEZ, V. *Mecânica Relacional: a propósito de uma resenha*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 23, n. 3, p.260-270, 2001a.
- _____. *Escobar e Pleitez respondem*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.23, n.4, Cartas ao Editor, 2001b.
- FITAS, A. J. S. *Os Principia de Newton, alguns comentários (Primeira parte, a Axiomática)*. Vértice, n.72, p.61-68, 1996.
- _____. *Mach: o positivismo e as reformulações da mecânica no séc. XIX*. Atas do 3º Encontro de Évora sobre História e Filosofia da Ciência (Universidade de Évora, 11-12 de Novembro, 1996), Évora, Universidade de Évora, p.115-134, 1998.
- GARDELLI, D. *A origem da inércia*. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v.16, n.1, p.43-53, 1999.
- MACH, E. *The science of Mechanics - A critical and historical account of its development*. La Salle: Open Court, 1960.
- MARQUES, A. *Crítica e bom uso do idioma*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.23, n.4, Cartas ao Editor, 2001.
- NEVES, M. C. D. *"Conatus Recedenti ab Axé Motus" ou a parábola do balde de Newton*. In: NEVES, M. C. D.; SAVI, A. A. (orgs.). *De Experimentos, Paradigmas e Diversidades no Ensino de Física*. Maringá, PR: Massoni, 2005. p.189-196.

MEGID, J. N.; PACHECO, D. *Pesquisas sobre o ensino de Física no Brasil*. In: Nardi, R. (org.) *Pesquisas em Ensino de Física*. São Paulo: Escrituras Editora, 1998.

NEWTON, I. *O peso e o equilíbrio dos fluidos*. São Paulo: Nova Cultural, 1996a, p.300-334.

_____. *Princípios matemáticos da filosofia natural*. São Paulo: Nova Cultural, 1996b, p.14-260.

_____. *Os princípios matemáticos da filosofia natural*. In: HAWKING, S (org.). *Os gênios da ciência: sobre os ombros de gigantes*. 2.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. p.449-908.

SAPUNARU, R. A. *O "Estilo Newtoniano", o espaço, o tempo e o movimento "absolutos": controvérsias entre cartesianos e newtonianos*. Rio de Janeiro, 2006. 178 f. Dissertação (Mestrado em Filosofia) - Faculdade de Filosofia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Recebido em: out. 2007 **Aceito em:** nov. 2007