
A ORIGEM DA INÉRCIA

Daniel Gardelli

Curso Anglo Vestibulares de São Paulo

Centro de Educação Vivencial Mater et Magistra

Núcleo de Educação e Cultura Mogi - NECM-ANGLO.

São Paulo - SP

Resumo

O presente artigo discute os conceitos newtonianos de massa inercial e espaço absoluto, referenciais inerciais e não-inerciais, e as condições de validade da 2ª Lei de Newton. Apresenta ainda o Princípio de Mach como uma possível explicação para a origem da inércia.

I – Introdução

O Princípio Fundamental da Dinâmica, mais conhecido pelo nome de 2ª Lei de Newton, diz que a resultante \vec{R} das forças que atuam em um certo corpo é igual ao produto de sua massa inercial m por sua aceleração resultante \vec{a} , ou seja, $\vec{R} = m\vec{a}$ ¹, sendo que a aceleração do corpo é medida em relação a um referencial inercial.

Mas o que vem a ser massa inercial? E referencial inercial? Será que essa equação sempre é válida?

Para respondermos a estas perguntas, devemos analisar cuidadosamente a obra de Isaac Newton (1642-1727) intitulada *Philosophiae Naturalis Principia*

¹ Na verdade, se quisermos ser mais coerentes com as palavras de Newton, o Princípio Fundamental da Dinâmica deve ser escrito na forma $\vec{R} = d\vec{p} / dt$, sendo $\vec{p} = m\vec{v}$ a quantidade de movimento associada a um certo corpo de massa inercial m movendo-se com velocidade \vec{v} em relação a um referencial inercial. Segundo Newton: “A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida.” [Ref. 1, pág. 15, Lei II]. A 2ª Lei de Newton, escrita na forma $\vec{R} = m\vec{a}$, foi proposta em 1750 pelo matemático suíço Leonhard Euler (1707-1783). Ela pode ser expressa nesta forma no caso em que a massa do corpo é considerada constante.

Mathematica (Princípios Matemáticos de Filosofia Natural) [1], cuja 1ª edição é de 1687. Além de

entendermos os conceitos de massa inercial e referencial inercial, veremos também que para se utilizar corretamente a 2ª Lei de Newton, deve-se eleger convenientemente um referencial inercial em relação ao qual se mede a aceleração do corpo em questão.

II – A Dinâmica Newtoniana

Ao estudarmos o seu trabalho, notamos que Newton tinha uma idéia muito clara a respeito do movimento e a interação entre os corpos do Universo.

Com relação à interação, ele postulou que quando dois corpos interagem entre si, sempre surgem duas forças de mesma intensidade, mesma direção e sentidos opostos, cada uma delas atuando em um dos corpos interagentes². A essa idéia, deu-se o nome de *Princípio da Ação e Reação* ou *3ª Lei de Newton*.

Com relação ao movimento dos corpos, ele percebeu que quando *todas as forças* aplicadas em um certo corpo *se anulam* mutuamente, este corpo só pode ser encontrado em apenas dois estados: o estado de repouso ou o estado de movimento retilíneo uniforme, ambos em relação a um referencial inercial³. E a essa idéia, deu-se o nome de *Princípio da Inércia* ou *1ª Lei de Newton*.

No caso de haver uma força resultante diferente de zero atuando sobre o corpo, então este sofre uma aceleração inversamente proporcional à sua massa inercial e no mesmo sentido da atuação da força, em relação a um referencial inercial adotado arbitrariamente, o que ficou conhecido por *Princípio Fundamental da Dinâmica* ou *2ª Lei de Newton*⁴.

Ainda nos *Principia*, Newton fala de uma certa propriedade intrínseca aos corpos materiais conhecida por inércia ou *vis insita*, que pode ser medida através da chamada *massa inercial* desses corpos, e que tende a mantê-los em seus estados iniciais

² “A toda ação há sempre oposta uma reação igual, ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.” [Ref. 1, pág. 16, Lei III]

³ “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.” [Ref. 1, pág. 15, Lei I]

⁴ Ver nota de rodapé nº 1.

de repouso ou de movimento retilíneo uniforme⁵. Ou seja, massa inercial é uma medida da resistência oferecida pelos corpos à mudança de seus estados iniciais de repouso ou de movimento retilíneo uniforme. Caso uma força atue sobre um certo corpo, quanto maior for sua massa inercial, maior será a sua resistência à mudança desses estados que porventura o corpo possa se encontrar inicialmente, e por conseguinte, menor será a sua aceleração em relação a um referencial inercial.

Mas o que vem a ser um referencial inercial? Para entendermos esse difícil conceito newtoniano, é preciso que tomemos conhecimento de uma experiência que o próprio Newton realizou e relatou em sua obra.

III – A Experiência do Balde de Newton

Trata-se de uma experiência em que inicialmente considera-se um balde com água em seu interior, ambos em repouso em relação à Terra, caso em que se verifica que a superfície da água apresenta um formato plano (Fig.1). Em seguida, numa segunda situação, considera-se a água e o balde girando juntos com uma velocidade angular constante, novamente em relação à Terra, verificando-se agora que a superfície da água apresenta um formato côncavo (Fig.2).

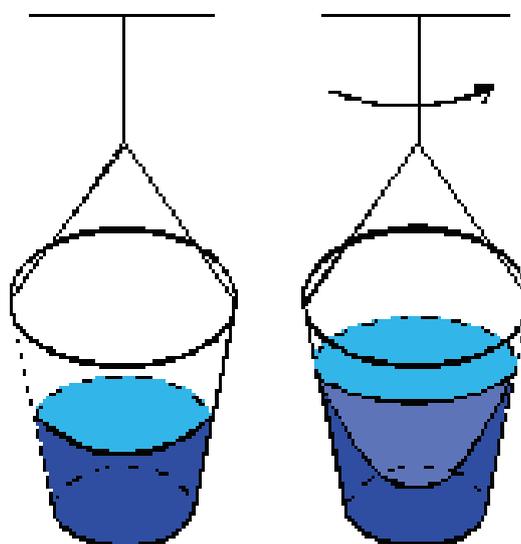


Fig.1

Fig.2

Procurando analisar esta experiência de acordo com os pontos de vista da Mecânica Newtoniana, algumas perguntas que surgem são: Por que a superfície da água

⁵ “A vis insita, ou força inata da matéria, é um poder de resistir, através do qual todo o corpo, estando em um determinado estado, mantém esse estado, seja ele de repouso ou de movimento uniforme em linha reta.

Essa força é sempre proporcional ao corpo ao qual ela pertence, e em nada difere da inatividade da massa, a não ser pela nossa maneira de concebê-la. A partir da natureza inerte da matéria, um corpo não tem seu estado de repouso ou movimento facilmente alterado. Sob esse ponto de vista, essa vis insita pode ser chamada, mais significativamente, de inércia (vis inertiae) ou força de inatividade.” [Ref. 1, pág. 2, Definição III]

é plana em uma situação e côncava em outra? O que causa essa mudança de formato? Quem interage com a água quando o balde está girando?

Pode-se pensar em três possíveis causas responsáveis pela concavidade da água: sua rotação em relação ao balde, em relação à Terra ou em relação às estrelas fixas⁶.

Que a rotação em relação ao balde não é responsável pela mudança no formato da superfície da água pode ser compreendido imediatamente observando que não há movimento relativo entre a água e o balde nas duas situações citadas anteriormente. Assim, qualquer que seja a força exercida pelo balde sobre a água na primeira situação, ela será a mesma na segunda situação, já que a água estará em repouso em relação ao balde nos dois casos.

A rotação da água em relação à Terra também não pode ser responsabilizada pelo resultado da experiência, já que a força exercida pela Terra sobre os corpos que se encontram em sua superfície é atrativa para baixo em direção ao seu centro e não centrífuga em direção às paredes do recipiente em rotação, como se verifica com a água do balde. Ou seja, estando a água em repouso ou em rotação, a Terra só a puxa para baixo.

Com relação às estrelas fixas, sabe-se que, ao relatar a experiência do balde nos Principia, Newton disse: “De início, quando o movimento relativo da água no recipiente era máximo, não havia nenhum esforço para afastar-se do eixo; a água não mostrava nenhuma tendência à circunferência, nem nenhuma subida na direção dos lados do recipiente, mas mantinha uma superfície plana, e, portanto, seu movimento circular verdadeiro ainda não havia começado. Mas, posteriormente, quando o movimento relativo da água havia diminuído, a subida em direção aos lados do recipiente mostrou o esforço dessa para se afastar do eixo; e esse esforço mostrou o movimento circular real da água aumentando continuamente, até ter adquirido sua maior quantidade, quando a água ficou em repouso relativo no recipiente. **E, portanto, esse esforço não depende de qualquer translação da água com relação aos corpos do ambiente, nem pode o movimento circular verdadeiro ser definido por tal translação.**” [Ref. 1, pág. 12, nossa ênfase]

Além disso, na Proposição XIV, Teorema XIV do livro III do Principia, Newton afirmou: “E como estas estrelas não estão sujeitas a nenhuma paralaxe perceptível devido ao movimento anual da Terra, elas não podem ter nenhuma força, devido a sua imensa distância, para produzir qualquer efeito perceptível em nosso sistema. Sem mencionar que as estrelas fixas, dispersas em todo lugar no céu de forma

⁶ Para simplificar a análise, as estrelas fixas estarão representando aqui o restante do Universo, compreendendo o conjunto de todas as estrelas que compõem a Via Láctea e todas as outras galáxias que se encontram ao redor do balde e da Terra.

desordenada, destroem suas ações mútuas devido a suas atrações contrárias, pela Prop. LXX, Livro I.”⁷

Newton sabia mais do que qualquer outra pessoa que utilizando a sua Lei da Gravitação Universal para calcular a força que uma casca esférica⁸ exerce sobre um corpo que se encontra em seu interior, o resultado era igual a zero, independentemente de o corpo estar em rotação ou não em seu interior⁹, já que a Lei da Gravitação Universal não depende da velocidade ou da aceleração entre os corpos interagentes.

Deste modo, a rotação em relação às estrelas fixas também não pode ser apontada como a causa do surgimento de qualquer força centrífuga exercida sobre a água do balde em rotação.

Isto mostra que, na Mecânica Newtoniana, a superfície côncava da água não pode ser explicada pela rotação entre a água e o balde, nem entre a água e a Terra, e nem entre a água e as estrelas fixas.

Para Newton, a mudança no formato da superfície da água era devida à rotação da água em relação ao espaço absoluto¹⁰.

Com a introdução deste novo conceito, parece que Newton estava querendo diferenciar entre referenciais ditos inerciais, ou seja, aqueles que se encontrassem em repouso ou em movimento retilíneo uniforme em relação ao espaço absoluto, daqueles referenciais ditos não-inerciais, ou seja, aqueles que se encontrassem acelerados em relação a esse ente abstrato chamado de espaço absoluto.

Isto porque ao se estudar o movimento dos corpos do ponto de vista de um referencial não-inercial, percebia-se o surgimento de efeitos dinâmicos que passavam a invalidar o Princípio Fundamental da Dinâmica, pois evidenciavam a presença de outras forças que aparentemente não apresentavam causa, agindo sobre os corpos materiais

⁷ “Se para cada ponto de uma superfície esférica tenderem forças centrípetas iguais, que diminuam com o quadrado das distâncias a partir desses pontos, afirmo que um corpúsculo localizado dentro daquela superfície não será atraído de maneira alguma por aquelas forças.” [Ref. 1, pág. 221, Seção XII - As forças atrativas de corpos esféricos, Proposição LXX. Teorema XXX, nossa ênfase]

⁸ Como ao olhar para o céu, percebemos a existência de estrelas e galáxias distribuídas mais ou menos uniformemente por todos os lados, pode-se entender todas essas estrelas e galáxias como sendo aproximadamente um conjunto de cascas esféricas com densidade constante de matéria.

⁹ Ver nota de rodapé nº 7.

¹⁰ Para Newton: “O espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre similar e imóvel.” [Ref. 1, pág. 7]

apenas pelo fato de o referencial em questão estar acelerado em relação ao espaço absoluto.

Assim, para Newton, referencial inercial é qualquer sistema de referência que se encontra em repouso ou em movimento retilíneo uniforme em relação ao espaço absoluto e portanto, qualquer sistema em que não se pode constatar quaisquer efeitos produzidos por forças sem agente causador aparente, as quais foram chamadas posteriormente de *forças inerciais*¹¹.

Sendo assim, pode-se afirmar que as três leis de Newton são válidas apenas em referenciais inerciais, por definição, pois não é necessário introduzir as forças inerciais para explicar qualquer fenômeno, já que todos os efeitos podem ser entendidos através de interações físicas reais do ponto de vista de um referencial inercial (o que aliás, foi o procedimento utilizado por Newton durante toda a sua vida).

Caso queiramos estudar o movimento de um corpo do ponto de vista de um referencial não-inercial, ou seja, que se encontra acelerado em relação ao espaço absoluto, então deveremos levar em consideração os efeitos causados pelas forças inerciais.

Portanto, a concavidade da água não surgia devido à interação do balde com ela, nem devido à sua rotação em relação à Terra e nem mesmo devido à sua rotação em relação ao Universo distante (conjunto das estrelas fixas). A forma côncava assumida pela superfície da água só podia ser entendida pelo movimento de rotação dela em relação ao espaço absoluto.

No entanto, devido à função atribuída ao espaço absoluto, Newton foi muito criticado, inicialmente pelo bispo anglicano G. Berkeley (1685-1753) e pelo filósofo alemão G. W. Leibniz (1646-1716) e mais fortemente no século passado pelo físico austríaco Ernst Mach (1838-1916) que afirmava ser inconcebível corpos interagirem com espaço, pois para ele, matéria só poderia interagir com matéria. Em seu trabalho *The Science of Mechanics (A Ciência da Mecânica)* [2], cuja 1ª edição é de 1883, ele diz: *“Para mim, só existem movimentos relativos. Não vejo, neste ponto, nenhuma diferença entre translação e rotação. Obviamente não importa se pensamos na Terra como em rotação em torno de seu eixo, ou em repouso enquanto as estrelas fixas giram em torno dela. O Princípio da Inércia deve ser concebido de tal forma que a segunda suposição leve exatamente aos mesmos resultados que a primeira. Torna-se então evidente que, na sua formulação, é preciso levar em conta as massas existentes no Universo.”*

¹¹Portanto, forças inerciais seriam aquelas que surgem em referenciais não-inerciais devido ao fato de eles se encontrarem acelerados em relação ao espaço absoluto e que recebem os nomes de força centrífuga, força de Coriolis e uma outra que não tem nome específico e que aparece quando a velocidade angular do referencial em rotação não é constante. Genericamente, essas três forças são mais conhecidas por forças fictícias.

Na Mecânica Newtoniana, se o balde e a água ficarem em repouso em relação à Terra e se o conjunto de estrelas que se encontram ao redor do balde forem giradas em relação à Terra, a superfície da água continuará plana. Para Mach, a água deverá ficar côncava, como na experiência original de Newton, já que do ponto de vista cinemático, as duas situações são equivalentes.

IV – O Princípio de Mach

Foi da idéia acima que surgiu o que chamamos hoje de *Princípio de Mach*. Este princípio diz que a inércia de um corpo existe devido à sua interação gravitacional com a matéria do restante do Universo ao seu redor.

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.

Vale lembrar que Albert Einstein (1879-1955), em seu trabalho intitulado *The Meaning of Relativity (O Significado da Relatividade)* [3], cuja 1ª edição é de 1922, mostrou que as idéias de Mach encontram confirmação, embora apenas qualitativa, na Teoria da Relatividade Geral.

É curioso notar que a noção de espaço absoluto (ou de referencial inercial desvinculado de qualquer corpo material) ficou tão enraizada entre os físicos que embora Einstein fosse simpatizante das idéias de Mach, o que ele acabou fazendo na prática, com sua Teoria da Relatividade Geral, foi dotar o espaço de propriedades físicas, preservando dessa maneira a idéia inicial de Newton sobre o espaço absoluto.

Apenas para citar um outro exemplo da forte influência do pensamento newtoniano sobre os físicos, para o físico alemão Werner Heisenberg (1901-1976), um dos criadores da Mecânica Quântica, a existência de forças inerciais em um sistema dotado de aceleração simplesmente prova a existência de propriedades físicas do espaço e permite estabelecer a distinção entre referenciais acelerados ou não. Ele diz, em sua obra *Physik und Philosophie (Física e Filosofia)* [4, pág. 92], cuja 1ª edição é de 1958:

“A existência de forças centrífugas, em um sistema dotado de um movimento de rotação, prova - no que diz respeito à teoria da relatividade de 1905 e 1906 - a existência de propriedades físicas do espaço que permitem estabelecer a distinção entre referenciais com e sem rotação.

Isso pode parecer pouco satisfatório de um ponto de vista filosófico, pois seria preferível se associar propriedades físicas somente a entidades físicas como corpos materiais e campos, e não ao espaço livre. Mas, pelo menos no que diz respeito à teoria dos processos eletromagnéticos e dos movimentos mecânicos, a existência de propriedades físicas do espaço vazio é simplesmente uma descrição de fatos irretorquíveis.”

Portanto, podemos perceber o quanto Heisenberg, um dos grandes físicos deste século, era pragmático com relação a esse assunto, diferentemente de Newton, Mach e Einstein, que sempre se preocuparam com as implicações filosóficas da Mecânica Newtoniana.

Agora, da mesma forma que a noção de espaço absoluto de Newton, o Princípio de Mach é apenas uma questão filosófica. Então, como provar a interação gravitacional entre um corpo material e o conjunto das estrelas e galáxias que se encontram distribuídas ao seu redor?

Para isso, é necessário que tomemos conhecimento de uma outra lei de força conhecida por *força de Weber*.

V – A Força de Weber

Em 1846, Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) publicou um trabalho no qual ele apresentava originalmente a sua famosa lei de força entre cargas elétricas. Esta lei é essencialmente a de Coulomb adicionada de termos que dependem da velocidade e da aceleração relativa entre as cargas interagentes.

A força de Weber foi a primeira a surgir na Física com dependência não apenas da distância entre os corpos, mas também de suas velocidades e acelerações relativas, ou seja, foi a primeira lei que apareceu do tipo completamente relacional, que assume o mesmo valor independentemente do referencial adotado.

Ela é extremamente poderosa, pois satisfaz os princípios da ação e reação na forma forte (pois a força está sempre ao longo da reta que une os dois corpos interagentes), da conservação da quantidade de movimento linear e angular e da conservação da energia (a soma da energia potencial de Weber com a energia cinética de duas partículas interagindo através da força de Weber é constante no tempo, ou seja, o trabalho realizado por esta força através de um caminho fechado é igual a zero). Além disso, com ela pode-se deduzir a força de Coulomb, a força entre elementos de corrente de Ampère e as quatro equações de Maxwell (lei de Gauss, lei da não existência de monopólos magnéticos, lei circuital de Ampère e lei de indução de Faraday).

Para uma apresentação detalhada do assunto, consultar a referência [5].

VI – A Força de Weber aplicada à Mecânica

Já em 1872, o astrônomo francês Tisserand (1845-1896) utilizava a Lei de Newton da Gravitação Universal com termos que dependiam da velocidade e da aceleração entre as massas de maneira análoga à lei de Weber e recentemente, em 1989, em seu trabalho intitulado *On Mach's Principle (Sobre o Princípio de Mach)* [6], André K. T. Assis, utilizando esta mesma lei, conseguiu implementar quantitativamente o Princípio de Mach.

Usando a lei de Weber para a Gravitação, Assis concluiu que a força que as estrelas e galáxias distribuídas uniformemente ao redor de um certo corpo exercem sobre ele não é mais igual a zero e sim igual a menos o produto da massa pela aceleração, no caso de não haver rotação relativa entre os corpos interagentes. Agora, diferentemente do Princípio Fundamental da Dinâmica, a massa é gravitacional e a aceleração do corpo é em relação às estrelas fixas.

No caso de haver rotação relativa entre os corpos, os cálculos de André Assis mostraram que a força de interação gravitacional entre as estrelas e o corpo em questão é igual a menos o produto da massa pela aceleração, mais dois termos conhecidos como força de Coriolis e força 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. Ou seja, o físico brasileiro mostrou que se houver uma rotação relativa entre o Universo e o balde de Newton, então surgirá a força que empurra a água em direção às paredes do balde, como queria Mach.

Deste modo, André Assis chegou aos seguintes resultados principais:

1^a) As forças inerciais surgem devido à interação gravitacional de um certo corpo com o restante do Universo.

2^a) A massa inercial é, na verdade, a própria massa gravitacional.

3^a) O espaço absoluto de Newton é identificado como o conjunto das galáxias e estrelas fixas.

4^a) Não é mais necessário diferenciar referenciais inerciais de referenciais não-inerciais.

5^a) Para se deduzir uma expressão análoga à 2^a 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.

Para uma análise detalhada destes e de outros resultados obtidos por André Assis, recomendamos fortemente a leitura do livro *Mecânica Relacional* [7] de sua própria autoria.

VII - Conclusão

Isaac Newton elaborou a melhor Mecânica de seu tempo. No entanto, ao sugerir a interação entre corpos materiais e o espaço absoluto (como na experiência do balde com água em rotação, entre outras), acabou sendo alvo de severas críticas, tanto de seus contemporâneos George Berkeley e Gottfried Wilhelm Leibniz, como de Ernst Mach quase duzentos anos mais tarde, quando afirmou em seu livro *The Science of Mechanics*: “Tente fixar o balde de Newton e girar o céu de estrelas fixas e então prove a ausência de forças centrífugas.” [Ref. 2, pág. 279], insinuando claramente que o responsável pelo afastamento da água de seu eixo de rotação só podia ser o conjunto das estrelas fixas.

O enigma aparentemente só pôde ser desvendado quando se utilizou uma lei de força entre corpos interagentes que dependesse não apenas da distância entre os corpos (como na Lei de Newton da Gravitação Universal), mas também da velocidade radial relativa e da aceleração radial relativa entre eles (como na força de Weber aplicada à Gravitação).

Esperamos com este trabalho ter esclarecido alguns conceitos fundamentais da Mecânica Newtoniana e ter apontado claramente uma possível explicação para a origem da inércia.

Agradecimentos

Agradeço ao professor André Koch Torres Assis pelos preciosos comentários e sugestões apresentados a este trabalho e por esclarecer todas as eventuais dúvidas surgidas durante a elaboração do presente artigo.

IX – Referências Bibliográficas

1. NEWTON, I.; *Principia - Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. Nova Stella/EDUSP, São Paulo, 1990, volume 1. Tradução de T. Ricci; L. G. Brunet; S. T. Gehring e M. H. C. Célia.
2. MACH, E.; *The Science of Mechanics - A Critical and Historical Account of Its Development*. Open Court, La Salle, 1960.
3. EINSTEIN, A.; *O Significado da Relatividade*. Editora Arménio Amado. Coimbra, 1984, 2ª edição. Tradução de Mário Silva.
4. HEISENBERG, W.; *Física e Filosofia*. Editora UnB, Brasília, 1995, 3ª edição. Tradução de J. L. Ferreira.

5. ASSIS, A. K. T.; *Eletrodinâmica de Weber - Teoria, Aplicações e Exercícios*. Editora da UNICAMP, Campinas, 1995.
6. ASSIS, A. K. T.; *On Mach's Principle*. Foundations of Physics Letters, Vol. 2, pp. 301-318, 1989.
7. ASSIS, A. K. T.; *Mecânica Relacional*. Coleção CLE, Vol. 22. Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência da UNICAMP, Campinas, 1998.