

A Construção do Princípio de Inércia e do Conceito de Inércia Material

(The Construction of the Principle of Inertia and the Concept of Inertia)

José Plínio Baptista e Laércio Ferracioli

Departamento de Física

Universidade Federal do Espírito Santo

Campus de Goiabeiras, 29060-900, Vitória, ES

plinio@cce.ufes.br, laercio@cce.ufes.br

Recebido em 16 de janeiro, 2000

Neste trabalho é apresentado uma visão das fases da construção do Princípio de Inércia contendo os aportes dos principais pensadores do Renascimento até o alvorecer do século XX. Como uma questão inerentemente ligada a esse Princípio, são também examinadas as principais teorias que tratam objetivamente da origem e natureza da Inércia Material. É proposto também um enfoque moderno do problema visando fornecer uma visão didática da questão.

This paper presents a view about the steps the constructing the Principle of Inertia based on the contribution of main thinkers from the Renaissance as far as those from the dawn of the XX century. It is also analysed the main theories about the origin and nature of Inertia for its inherent relation to the Principle of Inertia. The focus is on a modern view to the problem aiming at an educational contribution to the theme.

I Introdução

O estudo da evolução do conceito de movimento através de sua evolução histórica, desde os primórdios da ciência ocidental até o estabelecimento definitivo da ciência moderna, fornece um interessante histórico do esforço e da criatividade humana na construção do conhecimento.

Desde a elaborada e peculiar teoria aristotélica, a construção e aprimoramento do conceito de movimento percorreu um longo caminho passando pela elaboração da teoria do *impetus* até a concepção da existência de movimento sem a influência motora do meio, admitindo, no entanto, sua ação resistiva [1]. A proposição de Philiponos (c.475- 565) introduziu uma nova mecânica a partir da lei que pode ser traduzida matematicamente pela expressão,

$$V \propto (F - R)$$

onde V é a velocidade do móvel, F é a força motora e R a força resistiva do meio. Esta proposição representou o primeiro passo naquela direção, uma vez que nesta teoria o vácuo não se constitui numa impossibilidade, como o era na concepção de Aristóteles (c.384-322 a.C.).

No limiar da fase moderna da ciência, a importante contribuição de Buridan (1297-1358) e Oresme (1320-1382) com suas conjecturas a respeito do movimento eterno e uniforme das esferas celestes provocado por um único impulso inicial [1], é um forte indicativo da natureza das questões que o estudo do movimento iria abordar.

As pesquisas de Galileu Galilei (1564-1642) e, posteriormente, as conjecturas de René Descartes (1596-1650) e de Pierre Gassendi (1592-1655), construíram um cenário perfeito para Isaac Newton (1642-1727) formular o Princípio da Inércia [2], cujo enunciado,

‘Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta, a menos que seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele.’¹

à luz da nova mecânica, pode ser matematicamente expresso por ²

$$\frac{dv}{dt} = 0$$

¹ Op. cit. p. 15, Lei I.

² É adotado aqui a seguinte convenção: denomina-se Princípio de Inércia à proposição descrevendo o movimento de um corpo que não se encontra submetido a nenhuma ação externa e Lei da Inércia à expressão matemática do Princípio de Inércia que decorre da Primeira Lei de Newton.

sendo v a velocidade do corpo dada num referencial inercial. A interpretação da solução desta equação, representativa da *Lei da Inércia*, como é bem sabido, é que a velocidade do corpo permanece constante ou nula no referencial escolhido. Como será visto mais adiante, a expressão conceitual e matemática do Princípio da Inércia foi levada a uma formulação com alto grau de abstração e, sob muitos aspectos, jamais suspeitada pelos pensadores do final do século passado e início do presente. Finalmente devemos ressaltar que, se no final da idade média os pensadores muito contribuíram para a revolução conceitual do ‘por quê’ para o ‘como’ [1], as conquistas modernas, sobretudo a teoria da relatividade geral [3], permitiram, com muita clareza, se especular sobre o ‘por quê’ do Princípio da Inércia. Assim, esse questionamento pode ser expresso através de duas questões básicas:

- Por que um corpo permanece em seu estado de repouso ou de movimento, a não ser que alguma força o obrigue a mudar de estado?
- Qual seria a natureza desta propriedade, inerente a todos os corpos, de resistir a qualquer alteração de seu estado de movimento?

Foi o filósofo positivista austríaco Ernst Mach (1838-1916), o precursor desta mudança no paradigma científico [4], que promoveu a retomada do conceito de inércia, a qual pode ser modernamente enunciada por,

A inércia de um corpo é gerada pela ação total das massas do universo.

Um estudo do fenômeno de inércia, pode ser desenvolvido a partir da estruturação de respostas às duas questões apresentadas acima, e que será tratado neste artigo em duas partes:

- **Primeira parte:** estudo do conceito de inércia e da expressão matemática da Princípio da Inércia;
- **Segunda parte:** exame das causas da inércia de um corpo.

Dessa forma, inicialmente será abordada a questão da origem do Princípio da Inércia seguido da apresentação das teorias existentes sobre a Inércia propriamente dita.

II A Lei da Inércia

II.1 Galileu Galilei

O paradigmático trabalho de Galileu (1564-1642), abrindo as portas para a ciência moderna, mostrou claramente que a ação da gravidade produz aceleração e não está diretamente associada à velocidade conforme a antiga concepção clássica.

A análise dos eventos que ocorrem na experiência do movimento num plano inclinado permitiu que Galileu formulasse as leis deste movimento:

- Sob a ação de uma força constante (a gravidade), o espaço percorrido por um corpo é proporcional ao quadrado do tempo empregado;
- Sob a ação de uma força constante, um corpo se desloca de modo que a sua velocidade, em todo instante, é proporcional ao tempo empregado.

Estas leis, tão familiares nos dias de hoje, representam uma verdadeira revolução científica, que para Kuhn (1922-1996), representam a própria mudança de paradigma [5]. Porém, a ação revolucionária de Galileu não se limitou a nos revelar estas leis, mas foi também estendida à análise do movimento em várias situações, principalmente naquela que ocupou mentes esclarecidas por séculos de estudos: a existência de movimento de um corpo sem a presença de motor algum a provocá-lo.

Assim, visando o estudo desta situação, Galileu retomou a análise do movimento de um corpo num plano inclinado, procedendo com tamanha minúcia que a metodologia utilizada por ele provoca em Ernst Mach [4] a seguinte observação:

*‘Galileu segue, em todas as suas deduções, um princípio de grande fecundidade científica, que podemos justamente chamar de Princípio de Continuidade e que consiste em modificar gradualmente, tanto quanto possível, as circunstâncias de um caso particular qualquer do qual se tem um claro entendimento, mantendo-se sempre tão próximo quanto possível da idéia anteriormente conhecida’.*³

Esta expressão admirativa do filósofo refere-se principalmente à análise do experimento do movimento no plano inclinado representado na Fig. 1. Galileu, após deduzir que um corpo atingirá na subida de um plano inclinado OB a mesma altura inicial do plano de descida AO, foi gradualmente considerando planos de inclinações cada vez menores OC, OD, até deparar com a importante questão do movimento do corpo a partir de O na trajetória horizontal, OH. Como disse Mach, Galileu deduz, por continuidade, que o corpo, após a descida do plano inclinado se moverá na horizontal com a velocidade indestrutível⁴ adquirida em O.

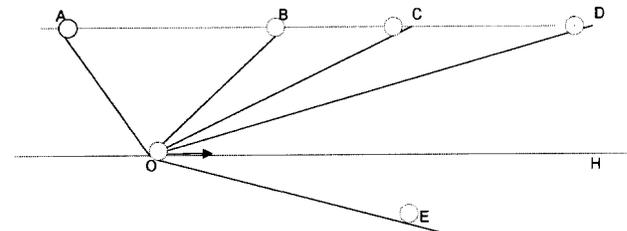


Figura 1. Representação do Experimento do Plano Inclinado de Galileu.

³Op.cit. p.131.

⁴Op. cit. p. 181.

Indestrutível porque se conserva, pois em OH não existe nenhuma ação resultante não nula atuando no corpo, que poderia modificar sua velocidade, excetuando-se a ação do atrito que é aqui abstraído.

Neste ponto, Galileu se vê em face do fenômeno cuja existência vai de encontro aos resquícios de suas anti-gas convicções centradas na existência do Impetus, intimamente ligado ao conceito de movimento sem causa motora aparente. Como afirma E. Wohlwill, citado por Mach [4] ‘...os predecessores e os contemporâneos de Galileu e o próprio Galileu não abandonaram, senão muito lenta e gradualmente as idéias aristotélicas para chegar ao Princípio da Inércia’.⁵

Assim, Galileu não chega a uma concepção perfeitamente clara da lei [6]. O que efetivamente constata Galileu é que ao atingir o ponto O, animado de velocidade v , o corpo poderá percorrer basicamente três caminhos com distintas características:

Primeiro: com velocidade diminuindo progressivamente se a inclinação do plano for positiva (*plano ascendente*);

Segundo: com velocidade aumentando progressivamente se a inclinação do plano for negativa (*plano descendente*);

Terceiro: e, por continuidade, no dizer de Mach, conclui que o movimento no plano horizontal, (*inclinação nula*), se processará com a mesma velocidade com que o corpo atinge o ponto O, mantendo constante este estado de movimento, a menos que alguma ação o obrigue a mudar de estado.

É aqui que reside o ponto fulcral entre dois paradigmas: *a longa trajetória da física aristotélica chegou ao seu final*, quando foi, pela primeira vez, seriamente constatada a existência real de movimento de um corpo sem que seja necessária a ação contínua de um motor.

Galileu, entretanto, não deu o passo final para formular o princípio geral da inércia. Contrariamente, sentiu necessidade de explicar este fenômeno extraído da análise de suas próprias experiências. Assim, argumenta: o que é uma horizontal, senão uma porção limitada da circunferência da Terra? [7]. Posto desta

forma, para Galileu torna-se possível compreender o fenômeno, pois o movimento segundo a horizontal se processa, na verdade, de modo que o corpo se mantém, constantemente, à mesma distância do centro da Terra, isto é, do centro da gravidade. Ora, argumenta ainda Galileu [7], somente o movimento circular pode ser uniforme⁶ e pode ser perpetuamente mantido. Contrariamente, o movimento retilíneo não pode ser naturalmente perpétuo⁷. Pode-se compreender, a partir desta argumentação, a grande dificuldade de Galileu em aceitar as idéias astronômicas de Kepler (1571-1630).

Finalmente deve-se destacar que a contribuição de Galileu ao Princípio de Inércia não se limitou aos resultados da análise acima mencionada, mas também, devido ao seu profundo sentimento da busca científica, ele acrescenta, mediante a análise da independência dos movimentos e dos movimentos relativos, conceitos fundamentais que muito iriam contribuir para o estabelecimento da Princípio da Inércia sob sua forma mais geral.

II.2 Pierre Gassendi

Gassendi, sacerdote e filósofo francês, influenciado por Giordano Bruno⁸ (1548-1600) na aceitação da infinitude do universo, identificou o espaço do mundo real com o espaço euclidiano, abstrato, infinito e homogêneo. Por outro lado, adotando a concepção de Demócrito (c.460-370 a.C.), onde a matéria atômica evolui no vazio e a idéia de Kepler que considera a gravidade como uma força externa, Gassendi, em sua obra *De motu impresso a motore translato*, publicada no ano de 1642, afirma explicitamente e pela primeira vez o Princípio da Inércia. Em resumo, as principais idéias podem ser expressas como apresentado abaixo:

- o mundo é infinito e não apresenta nenhum ponto ou direção privilegiada; não há centro nem periferia, nem acima nem abaixo;
- para que seja possível observar e analisar os movimentos dos corpos do universo é necessário que se possa medir distâncias, ângulos, assim como outras grandezas geométricas e, por conseguinte, sob este aspecto, é conveniente admitir que o universo real tem a estrutura do espaço euclidiano, infinito e homogêneo;

⁵Op. cit. p.132.

⁶Segundo Galileu, o movimento circular uniforme é o único que pode coexistir com a perfeita ordenação do Cosmo [7, p. 259-260] e o movimento circular dos corpos celestes, uma vez adquirido, se manteria indefinidamente constante [8, p. 31-32].

⁷Galileu, apesar de suas idéias avançadas ainda se encontrava sob influência de Aristóteles; para ele o universo é finito e fechado e assim nenhum movimento retilíneo poderia ser perpétuo. Por outro lado, no universo aberto e infinito de Kepler, as órbitas celestes são elipses.

⁸Giordano Bruno adota o heliocentrismo de Copérnico (1473-1543) a partir do qual concebe um universo infinito e infinitamente ocupado por outros mundos. O copernicanismo de Bruno é exposto em seu livro *La Cena delle Ceneri* (A Ceia das Cinzas) publicado em 1584, que desde o título denuncia seu caráter teológico ao mencionar a última Ceia e portanto o dogma da Eucaristia. Nessa perspectiva, converteu uma teoria astronômica em uma doutrina religiosa. A adoção de uma filosofia natural que reivindicava o heliocentrismo copernicano era apenas, para Bruno, um passo anterior a uma proposta de reforma radical da teologia, ética, sociedade e política. Assim, rejeitou o dogmatismo da teologia católica e a ditadura de suas instituições e optou pela liberdade de uma filosofia que a igreja católica não poderia aceitar. Carente de seguidores e de pessoas influentes a apoiá-lo, sem recursos financeiros próprios nem a proteção de mecenas, acabou por ser considerado um perigoso subversivo e toda a Europa cristã o abandonou à sua própria sorte. Dessa forma, em 1592 foi acusado de blasfêmia e heresia pela Inquisição e, na hora de seu julgamento, seu copernicanismo teve um peso moderado face as suas opiniões heréticas sobre teologia católica. Recusando a se retratar perante a igreja católica foi condenado à fogueira em 1600.

- como mostraram Gilbert⁹ e Kepler, a gravidade que atua num corpo é gerada por outro corpo, distinto do primeiro, sendo portanto uma força externa e não um atributo essencial do primeiro corpo;
- a dinâmica do mundo parece se desenvolver semelhantemente às idéias de Demócrito; a matéria, átomos e agregados de átomos, se movimentam no espaço vazio, o **vácuo**. [7]

A partir destes pontos, Gassendi explicita o seu entendimento sobre o Princípio de Inércia, que pode ser escrito como:

Um corpo que se mova por si mesmo no vácuo, não sendo afetado pela gravidade e, tendo em vista que este espaço não tem ação nenhuma sobre os corpos, contrariamente ao que acontece no espaço de Aristóteles e de seus vestígios no espaço de Galileu, o corpo continuará sempre em linha reta em seu movimento uniforme.[7]

É claro, para Gassendi, que o movimento que um corpo tende a conservar indefinidamente é um movimento retilíneo e uniforme e que toda mudança deste estado de movimento só se dará por ação de uma força externa. Enfim, o Princípio de Inércia assume sua forma quase definitiva.

II.3 Renè Descartes e a Contribuição de Isaac Beekman

Descartes procede ao arremate final da Princípio de Inércia aprimorando ainda mais a matematização do mundo. Fiel ao método por ele proposto, Descartes inicia postulando a existência de um espaço fundamental de base e no qual seria possível extrair consequências compatíveis com as últimas conquistas. É neste espaço ideal, matemático, que Descartes inicia a reconstrução do mundo segundo suas próprias idéias.

No dizer de Koyré [7], passando-se do estudo das idéias de Galileu, expressas no seu *Diálogo Acerca dos Dois Principais Sistemas do Mundo*,¹⁰ à obra *Tratado do Mundo e da Luz*¹¹ de Descartes, tem-se a curiosa sensação de se mudar bruscamente de atmosfera espiritual. Esta sensação é mais que natural, uma vez que a atitude cartesiana face ao mundo é quase sempre friamente objetiva, enquanto que em Galileu temos o calor humano sem que, no entanto, haja algum divórcio do

rigor científico. Descartes tem a sua própria cosmologia e partindo de sua concepção básica sobre o atributo fundamental dos objetos reais, ele cria uma nova imagem do universo.

Para Descartes o que é essencial na matéria é **extensão e movimento**, e, conseqüentemente, o universo, que é uma entidade extensa e infinita e, por força deste postulado, é uma entidade **plena**, não vazia. Descartes postula então:

- Deus quando criou o universo de extensão infinita lhe conferiu também um movimento. A quantidade de movimento total criada é imutável, não podendo aumentar nem diminuir; porém, localmente o movimento de um corpo pode ser alterado pela troca com outro e enquanto um deles perde movimento o outro ganha a mesma quantidade;
- Cada corpo permanece em seu estado de movimento retilíneo - que é a forma geométrica mais simples, criada por Deus ao dar partida ao movimento geral - permanecendo neste estado até que o corpo seja afetado por alguma força externa.

Dessa forma, para Descartes o mundo passa a ser meramente **geometria realizada** e o movimento, simplesmente, como uma **translação geométrica**. O tempo para ele seria uma dimensão geométrica de mesma natureza que o espaço.

Vemos com certa facilidade que a formulação final do Princípio de Inércia retira seu conteúdo de Gassendi e de Descartes, embora contraditoriamente Descartes, na sua concepção cosmológica crie uma impossibilidade, uma vez que o movimento retilíneo e uniforme só existe no vácuo. É importante lembrar que para Descartes o vácuo não existe!

Sem perigo de se cometer exageros pode-se também afirmar que é nestas idéias de Descartes que repousa o estabelecimento do contexto teórico moderno das ciências: *é baseado neste mundo cartesiano que as leis da mecânica são formuladas*. Estas leis são válidas em todo referencial inercial e o mundo de Descartes é infinitamente povoado por corpos animados de velocidade retilínea e uniforme de tal modo que cada um constitui um referencial inercial, *pelo fato de se encontrarem em um estado de movimento inercial*. A relatividade de Giordano Bruno, Gassendi e Galileu é levada a um alto grau de sofisticação na formulação científica moderna pois, ao se estabelecer que todos os sistemas inerciais são equivalentes para a descrição das leis da Mecânica,

⁹William Gilbert (1544-1603) físico e médico inglês conhecido por seus estudos sobre eletricidade e magnetismo, foi o primeiro a utilizar termos tais como força elétrica, atração elétrica e pólo magnético, sendo sua maior contribuição a demonstração experimental da natureza magnética da Terra. Foi o principal divulgador, na Inglaterra, do Sistema Copernicano de Mecânica Celestial, postulando que as estrelas fixas não estavam todas à mesma distância da Terra.

¹⁰Em 1624 Galileu iniciou a escrita do livro, por ele intitulado *Diálogo sobre as Marés*, onde ele discutia as hipóteses ptolomaicas e copernicanas sobre a física das marés. Em 1630 os censores da Igreja Católica concederam a licença de publicação alterando, entretanto, o título para *Diálogo Acerca dos Dois Principais Sistemas do Mundo*, sendo finalmente publicado em 1632. Apesar da licença de publicação, no ano seguinte, Galileu foi intimado pela Inquisição a responder pelo processo de 'suspeita de grave heresia', o que lhe custou a sentença de prisão perpétua domiciliar e a ordem de que o livro fosse queimado.

¹¹Em 1628 Descartes fixa residência na Holanda quando dedica-se à composição de uma obra que deveria abarcar o conjunto da física, intitulada *Tratado do Mundo e da Luz*, também referenciado como *Tratado do Mundo*. Em 1634, quando o trabalho já estava pronto para impressão, Descartes renuncia à publicação do mesmo, após tomar conhecimento da condenação de Galileu, motivada por uma tese que ele também havia aderido: o movimento da Terra.

reviveu-se a ontologia cartesiana do movimento: *o repouso e o movimento são estados de uma mesma entidade.*

O pleno sucesso da Teoria da Relatividade Restrita de Einstein (1879-1955)[3] corrobora as idéias de Descartes quanto a este aspecto da questão. Quanto à Dinâmica, sabemos que Descartes não foi tão feliz pois, eliminando o vazio de sua cosmologia, tentou interpretar o movimento curvilíneo dos planetas por ações de contacto, mediante a ação de turbilhões que arrastariam os corpos em suas trajetórias. A inadequação desta teoria foi demonstrada por Newton com sua teoria gravitacional de ação à distância.

É interessante notar a curiosa colaboração ocorrida entre Descartes e o médico holandês Isaac Beeckman (1588-1635)¹² [7]. Este, explicando o fenômeno da queda de corpos, postula:

- os corpos caem porque são atraídos pela Terra de acordo com a teoria de Gilbert e de Kepler;
- na queda os corpos se aceleram porque são, a cada instante do movimento, atraídos de novo pela Terra, e estas novas atrações conferem-lhes, a cada instante, um novo grau de movimento, enquanto o movimento de que estavam já animados permanece.

Nesta descrição objetiva da ação da gravidade na geração de aceleração, o *Impetus* é totalmente ignorado, revelando-se inclusive desnecessário para se compreender o movimento de queda livre [7]. Beeckman, em 1613, conhecedor da física do processo, pediu o auxílio de Descartes para a solução matemática do problema da queda livre. O resultado prático, porém, é que Beeckman acabou fornecendo a física fundamental que permitiu a Descartes elaborar a sua formulação do Princípio de Inércia.

Finalmente, seria oportuna uma observação sobre o fato de Descartes atribuir à criação divina, a existência de um mundo preenchido de corpos em perpétuos movimentos e cuja quantidade de movimento total é constante em conformidade com a imutabilidade divina. Ora, não é de se estranhar, pois que, qualquer que seja sua origem, um postulado é um postulado. Aqueles que ensinam ou realizam palestras sobre a cosmologia moderna, são freqüentemente alvos das clássicas perguntas relativas ao Big Bang: 'E antes da explosão, o que havia? De onde saiu a energia liberada para a explosão?' Alguns, em um rompante de sinceridade, respondem com um 'não sei', outros se arriscam e dizem: Deus!

III A Inércia da Matéria

A elaboração do Princípio de Inércia envolveu esforços e contribuições no âmbito exclusivo da Cinemática, no

sentido moderno do termo. As conjecturas, e mesmo teorias relativas à própria natureza da Inércia, assumem um caráter muito mais inquisitivo do que tinha sido até os inícios do século XX. Atualmente a Física atingiu um tal grau especulativo que veicula em suas recentes, e não muito recentes publicações, questões nunca dantes verbalizadas. Um exemplo ilustrativo é o caso de Dirac (1902-1984)¹³, que admitindo não ser coincidência a ocorrência curiosa de relações entre constantes fundamentais da física, formulou a hipótese de que a própria 'constante de gravitação' seria uma quantidade variável com o tempo. Dessa hipótese frutificaram teorias, ditas 'teorias a potencial escalar', que abriram novo 'filão' na pesquisa da moderna gravitação.

Questões do mesmo quilate foram formuladas a respeito da Inércia. Qual é a origem deste comportamento generalizado da matéria? Que campo poderia gerar uma força de tamanha importância e universalidade? As questões foram formuladas, desde Newton até o presente, e constantemente fazem apelo à elementos 'cósmicos', isto é, envolvendo o universo em sua totalidade e mesmo conduzindo à uma reformulação conceitual desta grandeza newtoniana que é a *massa*.

III.1 Isaac Newton

O estudo do movimento em toda a sua generalidade ocorreu conjuntamente à proposta da nova mecânica de Isaac Newton. Conforme já mencionado, Galileu, Gassendi, Descartes e também Giordano Bruno contribuíram fundamentalmente para a construção do cenário onde Newton iria desenvolver e apresentar sua nova teoria.

Visando a descrição do movimento com maior precisão e exatidão matemática, Newton utiliza de um longo discurso introdutório em sua obra *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, publicada em 1687 [2], para as primeiras definições e outras considerações lógicas a propósito do movimento. Assim, inicia pela definição e estabelecimento do contexto onde os movimentos se realizarão e onde as leis que regem estes movimentos têm validade formal e matemática:

Espaço Absoluto sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre similar e imóvel. Espaço Relativo é alguma dimensão ou medida móvel do espaço absoluto, a qual nossos sentidos determinam por sua posição com relação aos corpos e é comumente tomado por espaço imóvel;

*Tempo Absoluto flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa e é também chamado de duração. Tempo Relativo, aparente e comum, é alguma medida de duração perceptível obtida através do movimento e que é normalmente usada em lugar do tempo verdadeiro.*¹⁴

¹²Por volta de 1618 Descartes ingressa na carreira militar e vai para os Países Baixos onde estabelece forte amizade com Isaac Beeckman, médico e estudioso da física-matemática, quem muito influenciou o desenvolvimento do pensamento racional cartesiano.

¹³Paul Adrien Maurice Dirac, físico inglês, contribuiu para o desenvolvimento da Mecânica Quântica incorporando a relatividade na teoria quântica gerando a equação que predizia a existência de anti-partículas, sendo laureado, em conjunto com Erwin Schrödinger (1887-1961), com o Prêmio Nobel em 1933.

¹⁴Op.cit. 6, Escolios.

Apesar do fato de que o Espaço e o Tempo Absolutos não nos sejam acessíveis, o espaço e tempo relativos têm a mesma natureza que aqueles e através destes é que descrevemos os movimentos e suas conseqüências. Segundo Newton:

- As forças imprimidas nos corpos produzem acelerações verdadeiras (ou absolutas) que têm o mesmo valor tanto num sistema referencial do espaço aparente e em movimento retilíneo e uniforme quanto no referencial absoluto;
- Existem forças que imprimem movimentos e movimentos que geram forças, e neste último caso, se o movimento for um movimento verdadeiro ou absoluto as forças correspondentes também serão verdadeiras. Estas forças são denominadas de Forças Inerciais¹⁵.

Movimentos relativos podem estar associados a forças que, no entanto, podem ser eliminadas por uma simples mudança de referencial e neste caso estas forças são forças fictícias, não verdadeiras.

Por exemplo, um corpo sólido ou líquido em movimento de rotação verdadeira é atuado interiormente por uma força que impele suas partes para a periferia do corpo de modo a afastar estas partes do eixo de rotação. Num líquido, a superfície do mesmo, inicialmente horizontal (em estado de repouso), quando em rotação assume a forma côncava, pois as partículas são afastadas do eixo de rotação e impelidas na direção da periferia do vaso que o contém¹⁶. Esta é uma força inercial denominada de força centrífuga. É uma força verdadeira porque o corpo, ou o recipiente com o líquido, está animado de um movimento de *rotação em relação ao espaço absoluto*.

Como exemplo do outro tipo de força, força fictícia, consideremos um carrossel de raio r qualquer e em rotação em torno do eixo que passa por seu centro. Suponhamos que seja lançada no solo uma esfera, uma bola de gude, por exemplo, que vai se deslocar durante um pequeno intervalo de tempo, animada de um movimento retilíneo e uniforme para todo o observador plantado no solo. Entretanto, um observador sentado no carrossel e participando da sua rotação, observará que a bola de gude se deslocará percorrendo uma trajetória curvilínea, indício de que estaria *sendo acelerada por alguma força*. Esta é uma Força Fictícia pois podemos eliminá-la simplesmente mudando do referencial do carrossel para um referencial no solo.

Forças inerciais são geradas também por acelerações verdadeiras de translação. Suponhamos um recipiente cheio de um líquido, como por exemplo, um aquário em forma de paralelepípedo e repousando no solo. Aplicando uma força horizontal perpendicular a duas faces do aquário imprimindo-lhe uma aceleração, verificamos que internamente aparece uma força que ‘empurra’ todo o líquido contra a face posterior do aquário. A

pressão do líquido neste caso será tanto maior quanto mais intensa for a aceleração imprimida e a superfície do líquido, inicialmente horizontal, passa a assumir uma inclinação com tendência a se orientar na direção ortogonal à direção do movimento: é a força inercial na translação.

Segundo Newton, conforme já mencionamos, estas forças são geradas exclusivamente devido ao fato de que estes corpos sofrem uma aceleração em relação ao espaço absoluto. Por outro lado, no caso do carrossel, a aceleração imprimida na bola de gude era uma aceleração relativa e não verdadeira.

Newton, procurando consolidar suas idéias a respeito, analisa outro exemplo.

‘Por exemplo, se dois globos, mantidos a uma dada distância um do outro por meio de uma corda que os ligue, forem girados em torno do centro comum de gravidade, poderíamos descobrir a partir da tensão da corda a tendência dos globos de se afastar do seu eixo do movimento e a partir daí calcular a quantidade de seus movimentos circulares e assim poderíamos encontrar tanto a quantidade como a determinação deste movimento circular, mesmo em um imenso vácuo, onde não existisse nada externo ou sensível com o qual os globos pudessem ser comparados.’¹⁷

Em última análise, segundo Newton, esta extraordinária propriedade da matéria, de sempre se opor a toda mudança de movimento, tem sua *origem* na aceleração da matéria em relação ao espaço *absoluto*. Isto é, em linguagem moderna, Newton atribui à inércia de um corpo a interação do mesmo com esta entidade universal que é o Espaço Absoluto, apesar dele ter disposto em seus Princípios que o Espaço Absoluto é ‘...sem relação com qualquer coisa externa...’.

III.2 Ernst Mach

O filósofo positivista austríaco Ernst Mach teceu elaborada e contundente crítica à teoria de Newton, sobretudo com referência à definição de massa inercial de um corpo, a medida desta grandeza e principalmente sobre a origem das forças inerciais.

O tema principal de Mach em toda a sua obra [4] concentra-se invariavelmente na afirmativa de que, na ciência da Mecânica, a medida de qualquer grandeza só pode ser determinada através dos corpos vizinhos ou corpos afastados. Assim, de acordo com Mach, Princípio de Inércia deveria ser enunciado como:

‘Todo corpo tende a se manter no seu estado de movimento retilíneo e uniforme em relação às estrelas fixas, a menos que alguma força o obrigue a mudar seu movimento.’

¹⁵ Op. cit. p.2, Definição III

¹⁶ Newton ilustra suas idéias dando o exemplo de um balde cheio de água e suspenso por uma corda previamente retorcida. Ao se liberar o balde este gira em rotação relativa ao líquido que apresenta sua superfície plana. Ao cabo de um certo tempo o balde comunica ao líquido o movimento de rotação e a superfície do mesmo assume a forma côncava.

¹⁷ Op. cit. p. 13, Escólios.

Afirmando que Newton se contradiz ao declarar que iria se ater aos fatos, quando define a massa de um corpo¹⁸, Mach propõe um procedimento para se determinar a medida da massa de um corpo, usando a massa de outro corpo como unidade: é um método que figura em muitos manuais de física básica de nossas universidades e decorre da medida das acelerações mútuas que dois corpos de massas diferentes possam exercer entre si.

Então segundo a concepção machiana das interações mecânicas, como veremos logo a seguir, esta incrível força resistiva que todo corpo opõe-se a qualquer alteração do seu estado de movimento é devida à ação de todas as massas do universo sobre o corpo em questão. Em suma, todos os corpos que não estiverem submetidos à ação de forças se encontram animados de velocidade retilínea e uniforme, ou em repouso, em relação ao centro de gravidade das massas que preenchem o universo e as acelerações a que são submetidos quando atuados por alguma força, devem ser referidas a este centro de massas universal.

Finalmente, a respeito das forças inerciais, a derradeira e final opinião de Mach está registrada no trecho abaixo [4]:

‘Segundo minhas idéias, e em última análise, existem apenas movimentos relativos e eu não vejo a este respeito nenhuma distinção entre a rotação e a translação. Uma rotação em relação às estrelas fixas faz nascer em um corpo forças de afastamento do eixo; se a rotação não for relativa às estrelas fixas, estas forças de afastamento não existirão. Eu não me oponho a que se dê à primeira rotação o nome de absoluta desde que não seja esquecido que ela não passa de uma rotação relativa às estrelas fixas. Nós poderíamos fixar o balde de água de Newton e fazer em seguida com que o céu das estrelas fixas gire e provar então que estas forças de afastamento estão ausentes? Esta experiência é irrealizável e esta idéia é desprovida de sentido, porque os dois casos são indistinguíveis um do outro pela percepção sensível. Eu considero pois, estes dois casos como um único e a distinção que faz Newton é ilusória.’¹⁹

Do que já foi exposto vemos que a questão da inércia faz sempre apelo a soluções cósmicas, seja envolvendo o Espaço Absoluto ou considerando todas as massas do universo como fator importante. A questão da inércia da matéria não se encerra com estas idéias de Mach. Ele apenas deu início a uma generalização notável e a extraordinárias conjecturas.

III.3 A Lei da Inércia de Einstein

A análise machiana da mecânica inspirou Einstein a usá-la na construção da nova teoria da gravitação que ficou conhecida como a Teoria da Relatividade Geral. A idéia central de Einstein se fundava em uma de suas próprias proposições que afirmava que, localmente, os efeitos inerciais seriam indistinguíveis dos efeitos gravitacionais. Esta afirmativa ficou sendo conhecida como *Princípio de Equivalência*.

Por outro lado Einstein constatou que o estudo dos movimentos acelerados numa certa região do espaço, assim como sua representação formal, seria bastante simplificado se fosse adotada a hipótese de que esta região, em vez de ser uma região do espaço euclidiano plano, fosse uma região do espaço dotado intrinsecamente de uma curvatura. E para se estudar o movimento neste espaço curvo, o uso dos operadores matemáticos, tais como a derivada em relação ao tempo, seria inadequado. A situação exigiu a adoção de operadores tais como o operador que figura na equação da aceleração abaixo,

$$\frac{\nabla v}{ds} = a$$

onde o operador ∇/ds é uma derivada e é denominada de derivada covariante. Na expressão matemática desta derivada figuram fatores que representam a curvatura da região onde esta derivada é aplicada e são construídos de tal maneira que se a curvatura do espaço for nula (espaço euclidiano) este operador acima se reduz a uma simples derivada em relação ao tempo.

Einstein, com estas conclusões, identificou uma relação estreita entre as idéias de Mach e o problema que ele tratava. Este fato teórico novo foi por ele enunciado sob a forma conhecida por *Princípio de Mach* [3]:

‘As massas do universo determinam a geometria do espaço’²⁰

O significado profundo da adoção deste princípio tem conseqüências notáveis reveladas na teoria de Einstein. Nesta teoria, fundamentada no Princípio de Mach, um corpo de massa m gera nas suas circunvizinhanças uma geometria não-euclidiana, denominada Geometria Riemanniana, e os corpos que gravitarem em torno de m se deslocarão como se estivessem em movimento inercial em torno do mesmo, se movimentando livres de ação de qualquer força e percorrendo trajetórias de comprimentos mínimos denominadas de geodésicas. A condição matemática deste movimento, nesta teoria, é uma tradução relativística da Lei da Inércia:

$$\frac{\nabla v}{ds} = 0$$

¹⁸ Newton define a massa de um corpo como a quantidade de matéria obtida pelo produto de sua densidade pelo volume ocupado pelo corpo. (Op. cit. p. 1, Definição I).

¹⁹ Op. cit. p.231.

²⁰ Vide ADLER, R.; BAZIN, M. & SCHIFFER, M. (1965) *Introduction to General Relativity*. New York: McGraw-Hill Book, p. 338-371.

onde v é a velocidade do corpo neste espaço [12]. É o movimento inercial no espaço curvo, porém, em conformidade com as idéias fundamentais de Mach, interpretadas por Einstein. É o que poderíamos designar como *Lei da Inércia Einsteiniana*.

III.4 Inércia Generalizada

Com o advento das teorias de Einstein, a questão da inércia não fica limitada ao uso do Princípio de Mach no entendimento da mudança de geometria. Einstein provou que o fóton, partícula por ele mesmo assim batizada, tem massa nula mas apresenta também uma propriedade inercial²¹.

É também sabido que a luz (os fótons), no vácuo e livre de toda ação da vizinhança, se propaga em linha reta e com velocidade constante em todos os referenciais inerciais. O movimento inercial do fóton, neste caso, satisfaz a Lei da Inércia representada pela equação escrita no início deste artigo. Porém, quando o fóton se movimenta nas proximidades de um corpo de massa m , ele percorre uma trajetória curvilínea, mas o seu movimento satisfaz a equação da Lei da Inércia Generalizada escrita mais acima! Em outras palavras o fóton descreve, como os outros corpos atraídos gravitacionalmente por m , um movimento inercial no espaço (curvo) riemanniano. Este fato sugere a inclusão de partículas de massa nula no conjunto das partículas de massa não nula e que gozam da propriedade de resistir à toda mudança do seu movimento como resultado da ação de todas as massas do universo! A consequência desta nova leitura do Princípio de Inércia vem corroborar um famoso resultado da teoria da relatividade de Einstein, segundo o qual a massa de um corpo seria apenas um ‘apelido’ para a grandeza fundamental a ele associada: sua *energia própria*!

Os anos 60 conheceram uma cópia de proposições tratando do Princípio de Mach. Muitos artigos foram escritos, teorias novas apareceram, alguns incluindo projetos de se tentar medir a ação de uma enorme massa ôca giratória em torno de um balde d’água em seu interior. A intenção era de comprovar as idéias de Mach. Estas experiências não se concretizaram porque se revelaram inexecutáveis!

Uma curiosa proposta partiu de dois pesquisadores, Cocconi & Salpeter [10] e [11]. Estes pesquisadores argumentam que:

- As massas do universo mais próximas da Terra não se distribuem isotropicamente no espaço, como é o caso de nossa galáxia espiral;
- A anisotropia desta distribuição deveria induzir uma modificação na própria expressão formal da massa que figura na equação fundamental da dinâmica de Newton.

Como consequência do Princípio de Mach e dos argumentos acima, Cocconi & Salpeter propuseram uma lei modificada da dinâmica:

$$\frac{d}{dt}(m_{ij}v^j) = F_i$$

onde agora a massa, em vez de uma grandeza escalar, é representada matematicamente por uma matriz m_{ij} tal que o seu valor numérico (medida da massa) dependerá da direção em que o corpo está sendo acelerado. Entretanto esta teoria não pôde ser implementada, pois experiências realizadas com altíssima precisão não detectaram nenhum efeito de anisotropia [12].

Um pesquisador brasileiro, Assis [14], surgiu nos anos 80 com uma proposta original introduzindo termos nas equações da mecânica representando a interação com as massas do universo: adotou, como postulado de uma nova mecânica, uma lei de força que leva em conta, na influência gravitacional mútua de dois corpos, não só sua distância relativa como suas velocidades relativas. Este cientista usou de uma analogia com uma lei de força proposta por Weber (1804-1891)²² para o eletromagnetismo. É uma teoria de ação à distância, e como tal, carrega muitos dos inconvenientes normalmente atribuídos à teoria newtoniana.

A teoria newtoniana por sua vez é também uma teoria de ação à distância formulada sobre espaço e tempo absolutos. Porém, se revela como o limite inferior (baixas velocidades) natural tanto da teoria relatividade especial quanto da teoria da relatividade geral de Einstein. Em termos técnicos se diz que “a teoria da relatividade ‘recobre’ a teoria newtoniana”. Sob este aspecto a teoria de Assis também satisfaz esta exigência epistemológica imposta a toda teoria física que se propõe generalizar teorias vigentes: ela contém, como caso particular, a teoria de Newton.

Em algumas aplicações esta nova lei de força machiana obtém relativo sucesso. Trata-se do cálculo do efeito que uma esfera ôca, em rotação relativa às estrelas fixas, induziria num referencial situado no interior da casca (é um efeito puramente machiano). Obtém-se como resultado a evidência da ocorrência de uma rotação induzida no referencial interno semelhante ao obtido no clássico trabalho de Lense & Thirring, citado por C. Moeller [13]. Todavia, tal como neste último caso, a magnitude do efeito é praticamente fora do alcance da verificação experimental.

IV Conclusão

A julgar pelo exame da evolução e encadeamento das propostas relacionadas com a construção do Princípio de Inércia e do conceito de Inércia Material, desde

²¹ É bem conhecida a experiência com o radiômetro ou molinete ótico feitas em nossas universidades onde é demonstrado que os fótons, ao colidirem com objetos sólidos, lhes transferem quantidade de movimento ou momento linear.

²² Wilhelm Eduard Weber, físico alemão que estudou o magnetismo terrestre em conjunto com Carl Friedrich Gauss (1777-1855) os quais inventaram o primeiro telégrafo. Seu trabalho sobre unidades elétricas contribuiu para o desenvolvimento da teoria eletromagnética, sendo que a unidade internacional de fluxo magnético recebe seu nome. Formulou a lei de força denominada *Força de Weber*, a qual inclui, além da dependência com a distância entre os corpos, a dependência com as velocidades e acelerações relativas entre os corpos.

a concepção cinemática do Princípio da Inércia até a dinâmica das forças inerciais, a busca da verdadeira interação de um corpo isolado com o universo envolve considerações de ordem mais profunda do que se julgava inicialmente. Um dos aspectos curiosos é que a *energia própria* do corpo, em vez da sua massa, é que desempenha o papel de constante de acoplamento entre a partícula e o campo de interação inercial. A Lei da Inércia por sua vez, como a expressão matemática daquele princípio pode, na visão einsteiniana, ser enunciada numa expressão formal mais geral.

Agradecimento

Este trabalho foi financiado parcialmente pela CAPES e pelo FACITEC/CMT/PMV - Fundo de Apoio à Ciência e Tecnologia do Conselho Municipal de Ciência e Tecnologia do Município de Vitória, ES.

References

- [1] BAPTISTA, J.P. & FERRACIOLI, L. (1999) A Evolução do Pensamento Sobre o Conceito de Movimento. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, **21**(1): 187-194.
- [2] NEWTON, I. (1990) *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. São Paulo: Nova Stella & Editora da USP.
- [3] EINSTEIN, A.; MINKOWSKI, H.; WEYL, H. & LORENTZ, H.A. (1923) *The Principle of Relativity*. New York: Dover Publications Inc.
- [4] MACH, E. (1930) *La Mécanique*. Paris: J. Hermann Editeurs.
- [5] KUHN, T. (1970) *A Estrutura das Revoluções Científicas*. São Paulo: Perspectiva.
- [6] FRANKLIN, A. (1976) *Principle of Inertia in the Middle Ages*. *American Journal of Physics*, New York, **44**(6): 529-545.
- [7] KOYRÉ, A. (1986) *Estudos Galilaicos*. Lisboa: Dom Quixote.
- [8] GALILEU, G. (1967) *Dialogue Concerning the Two Chief World Systems*. 2nd rev. ed. San Francisco: University of California Press.
- [9] CROMBIE, A. C. (1959) *História de la Ciencia: de San Augustín a Galileu*. Madrid: Alianza Editorial.
- [10] COCCONI, G. & SALPETER, E.E. (1958) A search for Anisotropy of Inertia. *Il Nuovo Cimento*, Roma, **10**(4): 646-651.
- [11] COCCONI, G. & SALPETER, E.E. (1960) Upper Limit for the Anisotropy of Inertia from the Mössbauer Effect. *Phys. Rev. Let.*, New York, **4**(4): 176-177.
- [12] TONNELAT, M.A. (1971) *Histoire du Principe de Relativité*. Paris: Flammarion.
- [13] MOELLER, C. (1962) *The Theory of Relativity*. Oxford: Clarendon Press.
- [14] ASSIS, K.T. (1998) *Mecânica Relacional*. Campinas: Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, Unicamp.