

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO PARA A
CIÊNCIA E O ENSINO DE MATEMÁTICA**

Luciano Carvalhais Gomes

**CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS E DIVULGAÇÃO: ANÁLISE DA
RELAÇÃO ENTRE FORÇA E MOVIMENTO EM UMA REVISTA DE
POPULARIZAÇÃO CIENTÍFICA**

Maringá
2008

Luciano Carvalhais Gomes

**CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS E DIVULGAÇÃO: ANÁLISE DA
RELAÇÃO ENTRE FORÇA E MOVIMENTO EM UMA REVISTA DE
POPULARIZAÇÃO CIENTÍFICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e o Ensino de Matemática da Universidade Estadual de Maringá, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Educação para a Ciência e o Ensino de Matemática”.

ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. Polônia Altoé Fusinato

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcos Cesar Danhoni Neves

Maringá
2008

Luciano Carvalhais Gomes

**CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS E DIVULGAÇÃO: ANÁLISE DA
RELAÇÃO ENTRE FORÇA E MOVIMENTO EM UMA REVISTA DE
POPULARIZAÇÃO CIENTÍFICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e o Ensino de Matemática da Universidade Estadual de Maringá, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Educação para a Ciência e o Ensino de Matemática”.

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dr^a. Polônia Altoé Fusinato (orientadora)

(Universidade Estadual de Maringá - UEM)

Prof. Dr. Marcos Cesar Danhoni Neves (co-orientador)

(Universidade Estadual de Maringá - UEM)

Prof. Dr. Roberto Nardi

(Univ. Est. Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP)

Maringá, 20 de março de 2008.

EPÍGRAFE

Tudo o que se ensina a uma criança, a criança não pode mais, ela mesma, descobrir ou inventar.

(Jean Piaget)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho àqueles que me são caros:

aos meus pais, Luiz e Lucinda, e às minhas irmãs Patrícia e Joice por compartilharem uma boa parte das alegrias e tristezas de minha vida;

a Cláudia, pelo incentivo, companhia, amizade e carinho e a Joanna de Ângelis por me fazer lembrar que um dia eu fui uma criança.

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que acreditaram em mim, em especial, à minha orientadora, professora Polônia Altoé Fusinato, ao meu co-orientador, professor Marcos Cesar Danhoni Neves, e à professora Luzia Marta Bellini.

A Cláudia por me ajudar a superar os contratemplos no percurso deste trabalho.

A Deus por me permitir chegar até aqui.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi fazer uma análise crítica das concepções alternativas sobre força e movimento na revista Superinteressante, já apontadas em pesquisas anteriores, subsidiada pelos procedimentos metodológicos da análise de conteúdo propostos por Bardin. Para embasar a análise teórica, fizemos um breve histórico sobre o tema, abrangendo desde a teoria dos movimentos naturais de Aristóteles até as três leis de Newton. Em seguida, fizemos uma comparação das concepções encontradas em várias pesquisas sobre este tema com as destes pensadores. Guiados por esta revisão bibliográfica, concluímos que muitas das concepções dos estudantes sobre força e movimento estão presentes na revista, mas com uma percentagem menor em relação as encontradas nestas pesquisas. Observamos, também, vários erros conceituais; imprecisão na utilização de conceitos científicos, principalmente, força e energia; definições de leis físicas de forma inadequadas; entre outros equívocos na revista. O que exige dos educadores interessados na aprendizagem significativa dos seus alunos, cuidados especiais em sua utilização como um meio didático. Para auxiliar o professor nesta tarefa, finalizamos o trabalho apresentando alguns exemplos de uso de revistas de divulgação científica em sala de aula.

Palavras-chave: concepções alternativas; força e movimento; análise de conteúdo; divulgação científica; ensino de física.

ABSTRACT

The main purpose of this research was a critical analysis of alternative concepts about force and movement shown by Superinteressante's magazine, already highlighted on previous researches, based on analysis methodology procedures proposed by Bardin. Founded theory analysis, it was shown a shortly history of science, beginning on Aristóteles's Natural Movement until Newton's Laws. Following, it was done comparison between conceptions shown on researches about this topic with the one shown by Aristóteles and Newton. Considered this bibliography revision, we concluded that student conceptions about force and movement are presented on magazine. It was observed some mistakes and imprecision on scientific concept, mainly, force and energy; inadequate definition about physical laws and others. These evidences request from educators some special cautions on your utilization as a didactic instrument. We finish with some recommendations about application of scientific magazines on science subjects.

Keywords: alternative concepts; force and movement; content analysis; scientific divulgation; physics teachy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Considerações iniciais	10
1.2	Qual a origem do conhecimento.....	11
1.3	Concepções alternativas: como tudo começou?	14
1.4	Justificativa.....	16
1.5	Objetivo	18
2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	19
2.1	Técnicas da análise de conteúdo.....	19
2.2	Pré-análise	20
2.3	Exploração do material.....	25
3	UM BREVE HISTÓRICO SOBRE A RELAÇÃO ENTRE FORÇA E MOVIMENTO	26
3.1	De Aristóteles a teoria do ímpetus.....	26
3.2	A revolução iniciada por Copérnico.....	28
3.3	Alguns defensores da mobilidade terrestre.....	31
3.4	Algumas contribuições de Galileu.....	36
3.5	As leis do movimento planetário de Kepler	46
3.6	A filosofia natural de Descartes	52
3.7	A consolidação da revolução copernicana com Newton	58
3.7.1	Alguns pensamentos anteriores ao Principia	58
3.7.2	O estabelecimento das três leis do movimento	66
3.7.3	Análise newtoniana da experiência do balde girante	78
3.7.4	Outras interpretações da experiência do balde girante.....	81
3.8	Em resumo	92
4	CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS SOBRE A RELAÇÃO ENTRE FORÇA E MOVIMENTO	93

5	ANÁLISE DOS ARTIGOS DA REVISTA SUPERINTERESSANTE COM FOCO NA RELAÇÃO ENTRE FORÇA E MOVIMENTO	104
5.1	Apresentação da revista.....	104
5.2	Tratamento dos resultados obtidos, inferência e interpretação	105
6	CONCLUSÕES.....	115
	REFERÊNCIAS	120

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Alguns alunos de licenciatura em Física acredita que após concluírem o curso estarão aptos a exercer a docência. No entanto, a profissionalização do professor não finda ao término do curso, mas prolonga-se ao longo de sua carreira, decorrente de toda a experiência adquirida enquanto aluno, bem como no transcorrer da prática profissional. Entende-se, portanto, que a formação do professor não se conclui ao final de quatro ou cinco anos na universidade. A formação inicial deveria ser avaliada como o primeiro passo rumo à formação contínua, mas, na maioria das vezes, o processo de desenvolvimento do sujeito é interrompido após o término do curso de graduação. Talvez esta interrupção corrobore com as dificuldades, preocupações, incertezas, crenças e inseguranças encontradas pelos professores durante seus primeiros anos de sala de aula, refletindo na aprendizagem de seus alunos.

Por exemplo, em consonância com as pesquisas realizadas por Fuller (1969), no início de nossa carreira docente, a preocupação com o ensino centrava-se mais no planejamento, no domínio e desenvolvimento dos conteúdos ministrados e na percepção que os alunos, os pais e direção da escola tinham sobre o nosso trabalho. Ou seja, as fontes das nossas apreensões docentes eram a indisciplina, a conduta dos alunos, a falta de motivação, a preparação dos planos de aula, os problemas particulares dos alunos e as relações com os colegas de profissão, direção da escola e com os pais. Ao longo dos anos, essas questões cederam lugar a outros problemas como: quais métodos são mais apropriados para trabalhar os conteúdos e como ajudar os alunos a construir o conhecimento físico? Na busca das respostas a estas perguntas, nos deparamos com o conceito das concepções alternativas. Considerando que boa parte dos cursos de licenciatura em Física apresenta uma discussão muito superficial sobre este tema, desejamos compartilhar com os futuros professores de Física, e demais interessados, o que aprendemos sobre o mesmo, apresentando a pesquisa teórica-empírica que fizemos.

Com este propósito, dividimos o trabalho em seis seções. Nesta, a primeira, fizemos um breve histórico das principais correntes epistemológicas, finalizando com o construtivismo

piagetiano, considerado o marco inicial dos estudos das concepções alternativas. Após alguns comentários sobre estes estudos, delimitamos a nossa pesquisa, dentro deste universo teórico, expondo a justificativa e os objetivos em realizá-la. Deixamos para a segunda seção a descrição dos procedimentos metodológicos adotados. Na terceira seção, embasando a análise teórica de nossa pesquisa, apresentamos um breve histórico sobre a relação entre força e movimento, indo da teoria dos movimentos naturais de Aristóteles até as três leis de Newton. Mostramos como o desenvolvimento da concepção científica sobre este assunto esteve repleto de controvérsias, muitas ainda não resolvidas. Na quarta seção, fizemos um paralelo das concepções alternativas sobre a relação entre a força e movimento encontradas em várias pesquisas com as concepções dos pensadores citados na seção anterior. Nesta comparação, ficou evidente que a concepção newtoniana do movimento é difícil de ser assimilada por tratar de situações idealizadas que não condizem com os experimentos cotidianos. Na quinta seção, expomos os resultados da análise crítica dos artigos veiculados na revista *Superinteressante*, enfocando os conceitos de força e movimento. Esta análise revelou que muitas concepções citadas nas pesquisas da seção anterior são reforçadas pela revista, exigindo dos educadores interessados em uma aprendizagem significativa dos seus alunos, cuidados especiais em sua utilização como um meio didático. Para auxiliar o professor nesta tarefa, na sexta seção, apresentamos as conclusões do trabalho junto com alguns exemplos de uso de revistas de divulgação científica em sala de aula.

1.2 QUAL A ORIGEM DO CONHECIMENTO?

Desde quando viemos ao mundo, até mesmo antes, estamos em constante processo de aprendizagem. Infelizmente, não nos lembramos o que aconteceu, em termos cognitivos, quando vimos, ouvimos, cheiramos, degustamos ou tateamos pela primeira vez os objetos em nossa volta. O que nos levou a dizer a primeira palavra, a diferenciar o cachorro da vaca, a andar, a ler, a escrever, enfim, como nasceram estes conhecimentos em nós. Esta foi uma preocupação presente nos estudos de vários filósofos desde a Antigüidade. Os primeiros estudos a este respeito são creditados aos gregos Sócrates (470 a.C. - 399 a.C.), Platão (428 a.C. - 347 a.C.) e Aristóteles (384 a.C. - 322 a.C.), e tem seu desenvolvimento propriamente dito na Idade Moderna, no século XVII. Entre os filósofos que se preocuparam com a questão do conhecimento na modernidade destacam-se: René Descartes (1596 - 1650), Francis Bacon (1561 - 1626), Gottfried Wilhelm Von Leibniz (1646 - 1716), Bento de Espinosa (1632 - 1677), John Locke (1632 - 1704), George Berkeley (1685 - 1753), David Hume (1713 - 1784)

e Immanuel Kant (1724 - 1804). Após os estudos experimentais de Galileu e da confirmação da astronomia de Copérnico, o homem europeu ficou dividido entre duas grandes vertentes epistemológicas:

[...] de um lado, a perspectiva **empirista** proposta por Francis Bacon, que preconizava uma ciência sustentada pela observação e pela experimentação, utilizando a indução na formulação de suas leis, partindo da consideração dos casos ou eventos particulares para chegar a generalizações, por outro, inaugurando o **racionalismo** moderno, René Descartes busca na razão os recursos para a recuperação da certeza científica. Assim, Bacon e Descartes propõem dois caminhos diferentes para a busca do conhecimento, o indutivo e o dedutivo e representam os dois pólos do esforço pelo conhecimento na idade moderna, o empírico e o racional (PORTUGAL, 2002, p. 3, grifo do autor).

O empirismo defende que todas as nossas idéias vêm de nossas percepções sensoriais, “[...] o espírito humano está por natureza vazio: é uma tábua rasa, uma folha em branco, onde a experiência escreve” (HESSEN, 1980, p. 68). Nada vem à mente sem ter passado pelos sentidos. Contra esta concepção, o racionalismo atribui exclusiva confiança na razão humana como instrumento capaz de conhecer a verdade. A experiência sensorial é uma fonte permanente de erros e confusões, somente a razão, com princípios lógicos, pode atingir o conhecimento verdadeiro. Os princípios lógicos fundamentais são inatos ao ser humano. Segundo Descartes, devemos duvidar do conhecimento sensível, pois este foi fonte de erro e de engano. Em busca do conhecimento verdadeiro, ele propôs um método universal inspirado no rigor matemático e em suas longas cadeias de razão. Em sua obra *Discurso sobre o método de conduzir bem a razão e procurar pela verdade nas Ciências (1637)*, também conhecida como *Discurso do método*, o filósofo expôs a essência de sua teoria em quatro passos:

O primeiro consistia em **nunca aceitar como verdadeira alguma coisa sem a conhecer evidentemente como tal**, isto é, evitar cuidadosamente a precipitação e a prevenção [...] O segundo era **dividir cada uma das dificuldades** que eu havia de examinar em tantas parcelas quantas fosse possível e necessário para melhor as resolver [...] O terceiro, conduzir meus pensamentos, **começando pelos objetos mais simples e mais fáceis de conhecer**, para subir pouco a pouco, gradualmente, até o conhecimento dos mais compostos. [o quarto] **fazer sempre enumerações tão íntegras e revisões tão gerais que tivesse certeza de nada omitir** (DESCARTES, 1999, p. 56-58, grifo nosso).

Suas idéias fundamentais foram retomadas por Augusto Comte (1798 - 1857) em seu Curso de filosofia positiva:

[...] indicarei a data do grande movimento impresso ao espírito humano [...], pela ação combinada dos preceitos de Bacon, das concepções de Descartes e das descobertas de Galileu, como o momento em que o espírito da filosofia positiva começou a pronunciar-se no mundo (COMTE, 1983, p. 8).

Comte combina os princípios do racionalismo e do empirismo sem estar interessado que tais princípios funcionem como componentes de uma teoria do conhecimento, “[...] mas como regras normativas do procedimento científico, o qual, por sua vez, define a ciência” (NEVES, 2002, p. 27). Esta filosofia científica ficou conhecida como Positivismo. Para os positivistas, não existe nenhum conhecimento legítimo fora das ciências e todos os enunciados precisam ser passíveis de verificação experimental. Deste modo, existe um método único e infalível para aquisição do conhecimento científico, baseado na observação, na experiência, no acúmulo de evidências e na formulação de hipóteses. Equilibrando esta disputa, Jean Piaget (1896 - 1980), “[...] não deposita a fonte do conhecimento, nem no sujeito, nem no objeto, mas afirma que ele se constrói na interação entre os dois elementos. Não é apenas um construtivismo, mas um construtivismo interacionista” (RAMOS, 2003, p. 22).

Nos tempos atuais, vários estudos têm demonstrado que a hipótese epistemológica para pensar a aquisição de conhecimento da maioria dos professores é empirista ou racionalista (BECKER, 2003; MASSONI, 2005; HARRES, 1999). O que é preocupante, pois a prática didático-pedagógica do professor é guiada de acordo com a sua concepção de conhecimento. Um professor empirista dissocia a teoria da prática e acredita que alguns experimentos ditos “cruciais” são a solução das “concepções errôneas” dos alunos, considerando-as totalmente ingênuas e descartáveis. Ou seja, ele não procura entender o porquê do argumento apresentado, simplesmente o rejeita. Repete até que os alunos memorizem, pois acreditam que estes sejam “folhas em branco” ansiosas por serem preenchidas. “Transmite” um conhecimento pronto e acabado. Acredita ser capaz de ensinar qualquer coisa a qualquer pessoa aplicando os estímulos e reforços adequados. Conseqüentemente, a escola formará verdadeiros “analfabetos científicos”, sem autonomia, criatividade ou senso crítico. A aula deste professor caracteriza o método tradicional de ensinar Física, segundo Megid Neto e Pacheco (2001, p. 17), é 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 (cf. PACHECO, 1983). Um ensino que apresenta a Física como uma ciência compartimentada, segmentada, pronta, acabada, imutável.

Qual seria a conduta esperada de um professor influenciado pela concepção de conhecimento piagetiana? De acordo com Ausubel (1980, p. iv): “[...] O fator isolado mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já conhece. Descubra o que ele sabe e baseie nisso os seus ensinamentos”. Ou seja, o professor deve investigar o que o aluno já conhece sobre o assunto com a intenção de escolher a melhor prática didática-pedagógica para a sua aprendizagem.

1.3 CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS: COMO TUDO COMEÇOU?

Podemos considerar que o interesse pelos conhecimentos prévios dos estudantes começou junto com o construtivismo, em 1919, quando Piaget aceita o convite para trabalhar no laboratório de Alfred Binet, auxiliando na investigação do desenvolvimento intelectual da criança a partir de testes de inteligência padronizados elaborados pelo investigador francês. A tarefa do pesquisador suíço consistia em classificar simplesmente as respostas em certas ou erradas, mas ele descobre de imediato que era muito mais interessante tentar descobrir as razões dos fracassos (FERREIRO, 2001, p. 108). Disposto a confirmar a sua hipótese, inicia um diálogo clínico com as crianças, afastando-se radicalmente das normas do teste, com a intenção de “[...] descobrir quais eram os processos de raciocínio que conduziam às respostas erradas e os que conduziam às respostas corretas” (FERREIRO, 2001, p. 108). Deste modo, descobre que raciocínios aparentemente simples apresentavam dificuldades, ainda desconhecidas, até a faixa etária de 10-11 anos.

Dessas primeiras experiências, surge uma metodologia e uma problemática nova: deixar de considerar as respostas erradas como um déficit, uma carência, e considerá-las em sua própria originalidade; **tentar descobrir uma lógica dos erros; questionar os processos subjacentes às respostas, em vez de se contentar em catalogá-las.** E, para consegui-lo, inventar uma metodologia adequada, que reúna as vantagens do controle experimental rigoroso com a flexibilidade dos interrogatórios utilizados na clínica psiquiátrica (FERREIRO, 2001, p. 108, grifo nosso).

Aproveitando-se dos estudos iniciados pelo psicólogo suíço e de suas conclusões, a partir da década de 70, observa-se “[...] entre os investigadores em ensino de ciências um grande

empenho em estudar mais profundamente as noções que os estudantes trazem para a sala de aula, previamente ao ensino formal” (NARDI; GATTI, 2005, p. 145). Apesar de a teoria piagetiana do conhecimento não ter cunho pedagógico, este não descartou a possibilidade dela ser utilizada para este fim:

O problema da educação interessa-me extremamente, porque tenho a impressão de que há muitíssimo que reformar e que transformar, mas penso que o papel do psicólogo é, antes de mais nada, mostrar os fatos que o pedagogo pode utilizar, e não se pôr em seu lugar para lhe dar conselhos. **Corresponde ao pedagogo ver como pode utilizar o que o psicólogo lhe oferece** (PIAGET apud FERREIRO, 2001, p. 98, grifo nosso).

De acordo com Nardi e Gatti (2005, p. 145), algumas das primeiras pesquisas em educação sobre as idéias prévias dos estudantes em relação aos fenômenos da natureza são creditadas à Doran (1972), Viennot (1979), Watts e Zylbertajn (1981) e Driver (1985). Estes estudos foram realizados na área de mecânica e mostraram que existem padrões de respostas a várias situações físicas em contradição com o conhecimento científico, tornando-se um obstáculo à sua assimilação. O que não causaria tanto espanto se não fosse o fato dessas concepções persistirem após anos de instrução, sendo encontradas, inclusive, entre professores em situação de ensino. No início, estas concepções receberam nomes variados, por exemplo, “pré-concepções” e “misconception”. Após as críticas de Driver e Easley (1978) a estas denominações, o termo concepções alternativas ficou como o preferido pelos pesquisadores. Pois, “pré-concepções” e “misconception” remetem à idéia de um conhecimento incompleto e errôneo que precisa a todo custo ser modificado, enquanto que concepções alternativas sugerem que estas têm toda uma estrutura lógica e são úteis para interpretar os fenômenos tanto quanto as concepções científicas.

Depois de inúmeras pesquisas, conhecemos uma gama enorme de concepções alternativas¹. Por exemplo, para ficarmos somente na Física, sabe-se que muitos estudantes acreditam que o conceito de movimento está associado à aplicação de uma força (POZO, 1987; DI SESSA, 1982); que a corrente elétrica é consumida em uma bateria (SAXENA, 1992), que o calor está contido nos corpos (ROGAN, 1988), entre outros exemplos. A origem destas concepções é

¹ Na década de 1970, Helga Pfundt iniciou a compilação de uma extensa lista de referências bibliográficas de artigos que tratam sobre concepções alternativas. A partir de 1984, Reinders Duit ficou responsável por dar continuidade a este trabalho. A versão mais atual desta compilação, março de 2007, consta de 7700 referências, ela está disponível, gratuitamente, no endereço eletrônico <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>.

atribuída à interação do sujeito com os fenômenos a sua volta, desde tenra idade, e ao convívio social.

No discurso diário e através dos meios de comunicação de massa, nossas crianças são confrontadas com suposições implícitas sobre como os objetos se movem, sua energia e suas propriedades, que podem estar em conflito direto com a explicação científica que aprendem na escola. Fora do laboratório escolar, esses adolescentes estão sendo continuamente socializados em um repertório completo de explicações não científicas. **Um exame de reportagens de jornal e da linguagem cotidiana torna clara a disseminação deste processo subversivo.** Segundo a autora, não haveria meios para extinguir as noções cotidianas, assinalando que **os estudantes deveriam ser capazes de pensar e operar em dois diferentes domínios de conhecimento e distinguir entre eles** (SOLOMON, 1983, p. 49 apud NARDI; GATTI, 2005, p. 157, grifo nosso).

Neste contexto surgiu a idéia de nossa pesquisa. Ao observarmos uma tendência crescente de utilização de textos de divulgação científica de jornais e de revistas nas aulas de Física, indagamo-nos: A revista “Superinteressante”² reforça ou induz as concepções alternativas sobre a relação entre força e movimento? Escolhemos a “Superinteressante” por ser a revista de divulgação científica de maior tiragem no país, sendo a mais conhecida e utilizada pelos professores do ensino médio. Deste modo, a nossa proposta foi fazer um levantamento bibliográfico sobre os principais trabalhos relacionados com as concepções alternativas sobre a relação entre força e movimento e, em seguida, com o auxílio dos procedimentos metodológicos da análise de conteúdo propostos por Bardin (1977), identificar nos artigos desta revista as formas de apresentação de situações envolvendo estes conceitos científicos que possam vir a reforçar ou induzir estas concepções alternativas em seus leitores.

1.4 JUSTIFICATIVA

Em nossa revisão bibliográfica acerca das concepções alternativas sobre força e movimento encontramos várias pesquisas realizadas com estudantes de todos os níveis de escolarização e com professores (por exemplo, Viennot, 1979; Watts e Zylbertajn, 1981; Boeha, 1990 e Neves e Savi, 2005). Em contrapartida, apenas uma pesquisa relacionada aos livros didáticos foi encontrada e não observamos nenhuma análise deste tema nas revistas de divulgação científica. À primeira vista, este fato talvez sugira que o tema não seja relevante, por ser

² A revista Superinteressante é uma revista de curiosidades culturais e científicas, publicada mensalmente no Brasil pela Editora Abril desde setembro de 1987.

evidente que as revistas de divulgação científica estão repletas de concepções alternativas. Não que discordemos disto, mas nem sempre as evidências são confirmadas. Em seu trabalho de mestrado, Silva (2003) surpreendeu-se ao realizar uma pesquisa para analisar as concepções de Ciência, Tecnologia & Sociedade (CTS) veiculadas nas revistas *Época*, *Galileu*, *Isto É*, *Superinteressante* e *Veja*. Segundo entrevista concedida a Santos (2004, p. 4, grifo nosso), Silva relata que:

Quando iniciou seu trabalho, tinha uma suspeita, **baseada na literatura existente**, de que os periódicos mantinham um discurso de sublimação da ciência, como se ela fosse a solução para todos os problemas da sociedade. O que a professora encontrou, porém, não corresponde a esse pensamento. “Nas revistas existem indicadores que fornecem uma visão mais ampla de C&T na tentativa de superar a visão empiricista”, analisa.

O nosso intento não foi apenas detectar a presença grosseira ou não destas concepções alternativas, mas analisamos como elas se manifestam. Algo parecido fizeram Silveira e Terrazan (1996) com alguns livros didáticos de Física do ensino médio. Optando por um tema para cada ano, assim distribuídos: “Força e Movimento”, referente ao 1º ano, o tema “Calor e Temperatura”, referente ao 2º ano e o tema “Circuitos Elétricos” referente ao 3º ano. Os pesquisadores concluíram que os livros didáticos pouco contribuem para a formação de conceitos científicos, por não discutirem com profundidade a Física nas situações trabalhadas. Deste modo, implicitamente acabam por colaborar com a manutenção das concepções alternativas dos estudantes. Na análise da relação entre “Força e Movimento”, os autores afirmam que os livros didáticos apresentam o esquema intuitivo $V = 0$ se $F = 0$ e $F = kV$, citando a seguinte passagem de um dos livros analisados para confirmarem sua tese: “[...] os carros e barcos movem-se devido à força do motor que lhes imprime uma velocidade [...]” (SILVEIRA; TERRAZAN, 1996, p. 508).

Em uma primeira leitura, não há nada de errado. Afinal, afirmar que um corpo adquire velocidade devido à ação de uma força, não implica, necessariamente, na confirmação do contrário, de que quando a força deixar de atuar o corpo irá parar. Mas, tendo em conta os resultados das pesquisas sobre concepções alternativas relacionadas com a força e movimento, esta passagem, sutilmente, reforça realmente o esquema intuitivo apresentado pelos autores da pesquisa. Um autor de livro didático ciente destas pesquisas tomaria mais cuidado ao redigir este tipo de afirmação, poderia dizer, por exemplo, que “[...] os carros e barcos movem-se contra a resistência do ar e da água devido à força do motor que lhes

imprime uma aceleração variando a sua velocidade [...]”. Agora a força trocou a relação de proporcionalidade que tinha com a velocidade pela aceleração, e a necessidade de sua aplicação para movimentar o corpo foi relacionada com a resistência que deve ser vencida. Nesta nova grafia, o risco da passagem reforçar a concepção intuitiva do aluno de que para haver velocidade há a necessidade de uma força, mesmo na ausência de resistências externas, é menor. Diante do exposto, a nossa pesquisa justificou-se para encontrar respostas às seguintes perguntas:

- A revista Superinteressante reforça ou induz as concepções alternativas sobre a relação entre força e movimento?
- Caso afirmativo, isto acontece de modo explícito ou implícito?

As respostas a estas perguntas serão muito úteis aos professores que quiserem utilizar esta revista em suas aulas.

1.5 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa foi fazer uma análise crítica das concepções alternativas sobre força e movimento da revista Superinteressante, já apontadas em pesquisas anteriores, subsidiada pelos procedimentos metodológicos da análise de conteúdo propostos por Bardin (1977).

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

2.1 TÉCNICAS DA ANÁLISE DE CONTEÚDO

A análise de conteúdo, do modo que a conhecemos hoje, tem a sua origem ligada a análise de material jornalístico no início do século XX nos Estados Unidos. Ocorrendo um avanço entre 1940 e 1945, período da Segunda Grande Guerra, quando “[...] o Governo americano exortou os analistas a desmascararem os jornais e periódicos suspeitos de propaganda subversiva (principalmente nazi)” (BARDIN, 1977, p. 16). Ela é utilizada para a análise de quaisquer materiais oriundos da comunicação verbal ou não-verbal, como cartas, cartazes, jornais, revistas, informes, livros, relatos autobiográficos, gravações, entrevistas, diários pessoais, filmes, fotografias, vídeos e outros. Para Bardin (1977, p. 42), a análise de conteúdo constitui:

Um conjunto de técnicas de análise das comunicações visando a obter, por procedimentos, sistemáticos e objetivos de descrição do conteúdo das mensagens, indicadores (quantitativos ou não) que permitam a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção/recepção (variáveis inferidas) destas mensagens.

Podemos dizer que o procedimento metodológico da análise de conteúdo leva-nos a uma nova compreensão do material textual, ultrapassando a leitura superficial em busca do que está escondido, latente, ou subentendido na mensagem. De acordo com Bardin (1977, p. 95-101), estes procedimentos podem ser divididos em três etapas, assim resumidas por nós:

- a) **pré-análise**: fase de organização e sistematização do material;
- b) **exploração do material**: fase em que os dados brutos do material são analisados;
- c) **tratamento dos resultados obtidos, inferência e interpretação**: nesta fase, os dados brutos são submetidos a operações estatísticas, para melhor orientarem o investigador em suas inferências e interpretações.

A maneira que o pesquisador conduz cada etapa depende do tipo de comunicação a ser analisada, do tipo de investigação, do corpo teórico adotado e das seis possíveis questões que podem ser feitas sobre o texto: 1) “Quem fala?” 2) “Para dizer o quê?” 3) “A quem?” 4) “De

que modo?” 5) ”Com que finalidade?” 6) “Com que resultados?” Dentro deste leque de possíveis caminhos a serem seguidos, existem várias técnicas desenvolvidas na análise de conteúdo que podem ser utilizadas pelo pesquisador, tais como: desmembrando do texto em categorias; análise estatística de indicadores; análise de co-ocorrências; análise da enunciação, entre outras. Em nossa pesquisa a questão que nos guiou na leitura dos textos foi “De que modo?” e a técnica que mais utilizamos foi a análise de co-ocorrências. Vejamos como foi feito.

2.2 PRÉ-ANÁLISE

Em um primeiro momento, fizemos uma revisão bibliográfica sobre o tema que nos ajudou a escolher quatro palavras-chaves: “força”, “velocidade”, “aceleração” e “movimento”. O nosso interesse era compreender “De que modo?” os artigos relacionavam força com os outros três conceitos. Então, pesquisamos estas palavras no corpo textual da revista, utilizando o sistema de busca presente na coleção em CDs com 18 anos de publicação. Nesta, constavam 296 exemplares – 81 edições especiais e 215 edições comuns – abrangendo desde setembro de 1987 até junho de 2005.



Figura 1 – Tela inicial da coleção com 18 anos da revista Superinteressante

Encontramos 1658 artigos com a palavra-chave “força”, 858 com a “velocidade”, 83 com a “aceleração” e 1238 com a “movimento”. A unidade de registro³ central de nossa pesquisa era a palavra-pólo “força”, então escolhemos apenas os artigos em que ela estava presente junto com alguma das outras três – velocidade, aceleração ou movimento –, perfazendo um total de 759 artigos, esta foi a nossa primeira amostra. Após uma “leitura flutuante”⁴, percebemos que em muitos destes artigos ou as palavras-chaves estavam em um contexto fora do interesse da pesquisa, ou não existia uma relação entre as mesmas, sendo, portanto, desconsiderados. Isto aconteceu, principalmente, pelo fato do sistema de busca da revista não encontrar apenas a palavra “força” isolada, incluindo todas palavras onde a grafia “força” estivesse presente. Destacamos, abaixo, alguns trechos dos artigos que não foram considerados para a amostra final por estes dois motivos:

1) Palavras-chaves em um contexto fora do interesse da pesquisa:

1.a) SINTO MUITO (CD 10 – JUN. 2005 – ED. 214 – PG. 76-81)

“Casos como o dele reforçam a teoria de que a percepção das coisas não depende [...]”.

“Oliver Sacks cita o caso de um professor de música com um processo degenerativo nas partes visuais do seu cérebro que foi aos poucos perdendo a capacidade de enxergar o todo de uma imagem. Identificava apenas os detalhes ou os movimentos”.

1.b) O QUE É QUE A CABALA TEM? (CD 10 – JUN. 2005 – ED. 214 – PG. 64-69)

“Hoje já não é mais assim. Alguns cabalistas têm se esforçado em traduzir [...]”.

“[...] diversos movimentos místicos emergiram nos últimos anos [...]”.

1.c) DEUS EXISTE? (CD 6 – JAN. 2001 – ED. 160 – PG. 60-65)

“Alguma transformação radical deve ter ocorrido para que a crença em Deus, assunto que havia se tornado tabu em laboratórios e universidades, renascesse com tanta força”.

³ “É a unidade de significação a codificar e corresponde ao segmento de conteúdo a considerar como unidade de base, visando a categorização e a contagem frequencial. A unidade de registro pode ser de natureza e de dimensões muito variáveis” (BARDIN, 1977, p. 104).

⁴ “A primeira actividade consiste em estabelecer contacto com os documentos a analisar e em conhecer o texto deixando-se invadir por impressões e orientações. Esta fase é chamada de leitura <<flutuante>>, por analogia com a atitude do psicanalista. Pouco a pouco, a leitura vai-se tornando mais precisa, em função de hipóteses emergentes, da projecção de teorias adaptadas sobre o material e da possível aplicação de técnicas utilizadas sobre materiais análogos” (BARDIN, 1977, p. 96).

“Ele mostrou que mesmo a mecânica de Newton não era determinística no sentido que se pensava. Aí, veio a mecânica quântica e introduziu o conceito de que é impossível se conhecer simultaneamente a posição e o movimento de uma partícula”.

1.d) OS DONOS DO MUNDO (CD 6 – NOV. 2000 – ED. 158 – PG. 55-59)

“Hoje, vários cientistas acreditam que os parasitas são uma força dominante [...]”.

“[...] talvez eles sejam uma das forças motrizes mais poderosas da natureza”.

“[...] estavam interferindo nos impulsos nervosos e forçando o peixe a se expor [...]”.

“[...] observava atentamente cada peixe durante meia hora, anotando seus movimentos”.

1.e) BACTÉRIAS EM PÂNICO (CD 6 – JUN. 2000 – ED. 153 – PG. 78-82)

“Outro componente, a dalfopristina, gruda no primeiro e reforça o bloqueio”.

“É que os micróbios procriam com enorme velocidade e cada vez que um se divide [...]”.

2) **Palavras-chaves sem relação entre si:**

2.a) EXPULSOS DO BERÇO (CD 5 – FEV. 2000 – ED. 149 – PG. 80-83)

“A força gravitacional dos asteróides também pode ter ajudado a tirar Netuno da órbita. Bilhões de rochas, dando pequenos puxões durante um tempo imenso, poderiam afastá-lo do Sol. Mas os cálculos indicam que a gravidade jupiteriana foi a força dominante do processo”.

“As simulações eletrônicas alteraram as concepções sobre a origem dos mundos. Antes se achava que eles tinham sido criados nas órbitas que ocupam atualmente. Mas, desde o início dos anos 70, o computador passou a contar uma outra história. Ele sugeriu que os planetas surgem em grupos. Com humor, os astrônomos dão a esse movimento de astros enormes, que aparecem coletivamente e dominam a formação de planetas menores, o nome de crescimento oligárquico”.

2.b) TÁ COM PRESSA? PASSA POR CIMA! (CD 5 – JUL. 1999 – ED. 142 – PG. 26-33)

“A 200 quilômetros por hora, as pequenas asas traseiras respondem por 28% da sustentação no ar. O restante é gerado pela força dos motores (10%), pelo fluxo de vento que passa sobre as turbinas (46%) e pela fuselagem do aparelho (16%)”.

“A tecnologia para isso já existe. Faltava aperfeiçoá-la. A idéia é colocar em órbita um conjunto de satélites que cubra toda a superfície do planeta. Cada Skycar enviará um sinal constante para o espaço. O satélite recebe a informação e a devolve à aeronave, indicando posição, altitude, velocidade e rota adequadas. O computador de bordo apenas obedece. O dono só precisará ligá-lo e dizer para onde quer ir”.

2.c) DELÍRIO DE VOAR (CD 5 – JUN. 1999 – ED. 141 – PG. 36-43)

“Em 1908, o marquês d’Ecquevilley-Montjustin construiu este estranho multiplano constituído de telas fixadas por uma armação de tubos de aço. Uma hélice de 2,5 metros de comprimento, movida por um motor de 7 cavalos, deveria produzir uma força ascendente e levá-lo. Segundo o inventor, o aparelho era sólido, leve, barato e maleável. Mas falhou no primeiro teste. Nunca voou”.

“Trajan Vuia (1872-1951) é o pioneiro aviador da Romênia. Engenheiro e aeronauta, começou a construir aviões em Paris em 1900. Em 1902, montou um veículo com rodas, movido por um motor de automóvel de 25 cavalos, que deveria decolar após forte aceleração. A máquina, entretanto, era muito pesada e não saiu do chão”.

2.d) A CURVA IMPOSSÍVEL (CD 5 – DEZ. 1998 – ED. 135 – PG. 76-79)

“Com a invenção dos chips, os circuitos ficaram minúsculos, reunindo milhões de fios quase microscópicos. Os elétrons seguem por eles tomando uma direção ou outra sob o comando de forças elétricas e trocam informações à taxa de 1 milhão de bits por segundo”.

“Daí para a frente, vai ser preciso esculpir canaletas cada vez mais refinadas para controlar todos os movimentos das partículas”.

2.e) TRENS A JATO (CD 1 – ABR. 1989 – ED. 153 – PG. 62-67)

“Alguns trechos, porém, foram especialmente reformados para comportar a passagem dos TGVs. Nesses locais, sua velocidade máxima cai para 200 quilômetros por hora. A versão final da primeira geração de TGVs saiu das oficinas em 1978. Ainda na fase de testes, em 1981, um dos trens bateu o recorde mundial de velocidade: 380 quilômetros por hora. Hoje em dia, os TGVs compõem-se de oito vagões, com capacidade para 386 passageiros, e duas unidades motrizes, nas pontas do trem. Cada uma delas leva seis motores com a potência total de 6 360 kW, que transmitem sua força a seis truques - as plataformas sobre rodas que sustentam o vagão”.

Depois desta longa e árdua pré-análise, sobraram 55 artigos para a amostra final. Comparados com a quantidade de artigos presentes nos 18 anos da revista, podemos dizer que se trata de uma amostra pequena. Mas, ao falar sobre a escolha da amostra em pesquisas que envolvem a análise de conteúdo, Bauer (2002, p. 197) faz o seguinte comentário: “Uma amostra pequena, sistematicamente selecionada, é muito melhor do que uma grande amostra de materiais escolhidos ao acaso”. Foi o que fizemos. A Tabela 1 apresenta os artigos selecionados.

Tabela 1 – Artigos selecionados para a análise final

Amostra final						
Ordem	CD	Mês	Ano	Edição	Páginas	Título
1	10	Maio	2005	213	78-83	Big Bang
2	10	Novembro	2004	206	72-76	Corra para não cair
3	10	Setembro	2004	204a (especial)	70-73	Em ritmo acelerado
4	9	Abril	2004	65 (especial)	38	Parto a jato
5	9	Abril	2004	65 (especial)	39	Para o infinito... e além
6	9	Janeiro	2004	196	68-72	O nada é quase tudo
7	9	Novembro	2003	62 (especial)	12	Por que os ciclistas usam roupas de lycra?
8	9	Agosto	2003	191	76-80	Nem tudo é relativo
9	9	Julho	2003	190	30-31	Como ficaria a F-1 sem as restrições no regulamento
10	6	Outubro	2001	169	92	Acelera, mané!
11	6	Julho	2001	166	55-61	Muito além do Big Bang
12	6	Junho	2001	165	40-41	Como funciona o fliperama?
13	6	Junho	2001	165	64-67	A arte de voar sem sair do chão
14	6	Novembro	2000	158	46	E se... A Terra tivesse a gravidade de Marte
15	5	Março	2000	150	62-67	Caçadores de explosão
16	5	Fevereiro	2000	149	26	Os rapidinhos do sistema solar
17	5	Fevereiro	2000	149	80-83	Expulsos do berço
18	5	Outubro	1999	145	12	Um átomo ajuda a bater recordes
19	5	Outubro	1999	145	20	É proibido virar cambalhotas no ar
20	8	Agosto	1999	27a (especial)	12-13	O caçador de galáxias
21	5	Agosto	1999	143	11	A ventania que breca o planeta
22	5	Maio	1999	140	46-51	Universo? Qual deles?
23	5	Março	1999	138	73	A crise do Big Bang
24	5	Janeiro	1999	136	21	Tem uma mosca no meu elevador
25	5	Dezembro	1998	135	90-93	Olha lá a europa
26	5	Novembro	1998	134	124	Sombra e água fresca para o coração no espaço
27	5	Junho	1998	129	38-43	Velocidade máxima
28	5	Junho	1998	129	91	Einstein acerta até quando erra
29	5	Março	1998	126	68-73	A dama dos anéis
30	5	Janeiro	1998	124	24	Pra baixo o santo ajuda, pra cima a coisa muda
31	4	Setembro	1997	120	75-79	Pinças de luz
32	4	Junho	1997	117	12	Einstein na corda bamba
33	4	Junho	1997	117	64-69	Você só enxerga 1% do universo
34	4	Setembro	1996	108	70	O irmão de Júpiter e seu Sol viajante
35	4	Abril	1996	103	26-29	Atletas de aço
36	4	Abril	1996	103	64-69	Supernovas, relógios cósmicos
37	4	Janeiro	1996	100	12	Não levita mas também "voa" sobre os trilhos
38	4	Dezembro	1995	99	46-55	A última cartada de Einstein
39	3	Dezembro	1994	87	25-29	Big Bang: Fechado para balanço
40	3	Julho	1994	82	18-23	Atenção, tripulação!
41	3	Julho	1994	82	78-81	Supermotores para superaviões
42	3	Junho	1994	81	34-38	Delta clipper: este foguete vai e volta
43	3	Abril	1994	79	16-23	Acima do céu
44	3	Março	1994	78	52-57	Tudo o que você queria saber sobre o Big Bang
45	3	Janeiro	1994	76	36-41	Ciência fora da sala de aula
46	3	Dezembro	1993	75	60-65	Inteligência em movimento
47	3	Outubro	1992	61	21-26	A implacável dinâmica dos carros
48	2	Agosto	1991	47	56-60	Supercargueiros no ar
49	2	Abril	1991	43	22-28	Das pistas para as estradas
50	2	Março	1991	42	54-58	O vaivém do bumerangue pelo tempo
51	2	Agosto	1990	35	50-55	Eletricidade sob suspeita
52	1	Janeiro	1989	16	18-23	A ciência vai ao parque
53	1	Setembro	1988	12	68-74	O mistério do grande atrator
54	1	Julho	1988	10	60-65	As imagens da relatividade
55	1	Janeiro	1988	4	84-87	A ciência do chute com efeito

2.3 EXPLORAÇÃO DO MATERIAL

Escolhidos os artigos, lemos cada um novamente de uma maneira mais minuciosa definindo as unidades de contexto⁵. Estas variaram muito de um texto para outro, indo desde do próprio parágrafo no qual estava a unidade de registo em alguns artigos, até o texto todo em outras situações. A revisão bibliográfica que norteou a análise crítica do material será apresentada na terceira e quarta seção. Mas podemos adiantar aqui que a análise visava categorizar a concepção entre força e movimento presente no texto em aristotélica, newtoniana ou indefinida. Entendemos por categorizar como:

[...] uma operação de classificação de elementos constitutivos de um conjunto, por diferenciação e, seguidamente, por reagrupamento segundo o género (analogia), com os critérios previamente definidos. As categorias são rubricas ou classes, as quais reúnem um grupo de elementos (unidades de registo, no caso da análise de conteúdo) sob um título genérico, agrupamento esse efectuado em razão dos caracteres comuns desses elementos (BARDIN, 1977, p. 117).

Preferimos explicar como foi feita a escolha destas categorias bem como o tratamento, a inferência e a interpretação dos resultados obtidos, na quinta seção, por precisar de conceitos que ainda não abordamos. Começamos analisando na História da Física o quê alguns grandes cientistas pensavam sobre a relação entre força e movimento.

⁵ “A unidade de contexto serve de unidade de compreensão para codificar a unidade de registo e corresponde ao segmento da mensagem, cujas dimensões (superiores às da unidade de registo) são óptimas para que se possa compreender a significação exacta da unidade de registo” (BARDIN, 1977, p. 107).

3 UM BREVE HISTÓRICO SOBRE A RELAÇÃO ENTRE FORÇA E MOVIMENTO

3.1 DE ARISTÓTELES A TEORIA DO ÍMPETUS MEDIEVAL

A busca pelos primeiros trabalhos organizados sobre este tema nos remete a Aristóteles no século IV a.C.. O seu modelo cosmológico dividia o universo em dois mundos (o “supralunar” e o “sublunar”), “[...] regradados por diferentes qualidades, no que concerne à natureza dos objetos e de seus movimentos” (ALBANESE; NEVES; VICENTINI, 2005, p. 66). Os corpos sublunares eram compostos de terra, água, ar e fogo, e os supralunares pelo éter. Para Aristóteles se os movimentos dos corpos que habitam o mundo supralunar são movimentos circulares e uniformes, os movimentos dos corpos que se encontram no mundo sublunar relacionam-se com a natureza dos corpos materiais, havendo dois tipos de movimentos: o movimento natural e o movimento forçado ou violento.

Os naturais fazem-se de acordo com a natureza dos corpos, vertical para baixo no caso dos corpos pesados e verticais para cima caso o corpo seja leve. Assim, os quatro elementos que compõem o mundo sublunar movem-se de acordo com seu peso ou leveza sempre em linha reta. Os violentos ocorrem por violação a esta tendência natural de movimento, sendo produzidos por forças em contato com o corpo. Portanto, cessada a força, cessa o movimento. Numa linguagem matemática moderna, podemos resumir a lei aristotélica de movimento pela equação:

$$\boxed{V \propto \frac{F}{R}} \quad (1)$$

- **No movimento natural:** F é o peso e R a resistência do meio;
- **No movimento violento:** F é a força motriz e R a resistência do meio;
- **No vácuo, R = 0:** como $V \rightarrow \infty$ é impossível, o movimento não pode existir no vácuo.

Mas, como explicar o movimento de uma pedra arremessada mesmo após ela ter perdido contato com as nossas mãos? Para resolver este problema, Aristóteles explica que nestes casos o próprio meio atua como motor por meio do estabelecimento de correntes de ar que é comprimido na parte da frente do objeto em movimento e, por isto, obrigado a deslocar-se

para a sua parte de trás empurrando novamente o objeto. Esta explicação, contudo, cria um paradoxo: o meio sustenta e resiste ao mesmo tempo o movimento. Este paradoxo incitará algumas críticas, como nos esclarece Neves (2005a, p. 166, grifo do autor):

[..] Aristóteles teve seus críticos, especialmente Hiparco, que acreditava em uma força impressa que passava do motor ao movente e que diminuía, enquanto o corpo se deslocava através de um meio dissipativo. Era uma espécie de impulso, **ímpetus** interno, uma noção absolutamente nova e que foi redescoberta, independentemente (acredita-se), no sexto século depois de Cristo, por Philoponus, e no século XIV, por Buridan.

Johannes Philoponus (475 d.C. - 565 d.C.) rejeita a teoria aristotélica de que o meio é o responsável pelo movimento violento. Para este filósofo, o meio desempenha apenas um papel resistivo. Desta forma, ele resgata a noção de força impressa para explicar este tipo de movimento. A velocidade, neste caso, seria proporcional à diferença entre a força motriz aplicada e a força resistiva do meio (BAPTISTA; FERRACIOLI, 1999; NEVES, 2005a). Embora ainda haja a necessidade de uma força para o corpo se movimentar, cria-se a possibilidade de um movimento no vácuo. A representação dessa idéia em linguagem atual seria:

$$\boxed{V \propto (F - R)} \quad (2)$$

Esta força impressa não é de natureza permanente, desaparecendo gradualmente, inclusive no vácuo. A causa desta diminuição é devida à resistência do meio e à tendência do corpo pesado de ir em busca de seu lugar natural. Assim, Philoponus permanece sustentando uma postura anti-inercial. Jean Buridan (1300 - 1358), no século XIV, retoma com maior intensidade a teoria do *ímpetus*, apesar de ser quase certo que este desconhecia a idéia original de Johannes Philoponus. A principal contribuição de Buridan à teoria do *ímpetus* foi associar a quantidade de matéria e a velocidade como meios para determinar a sua medida. Ele afirmava que quanto maior for a quantidade de matéria de um corpo mais *ímpetus* poderia receber, durando por mais tempo o seu movimento contra as resistências externas (NEVES, 2005a, p. 168). De acordo com Rosmorduc (1985, p. 78, grifo do autor), a teoria do *ímpetus* foi a causa de movimento e fonte de novas interrogações, por exemplo:

Buridan tenta aplicar sua teoria aos movimentos cósmicos. Albert de Saxe, tendo descoberto que a velocidade de queda dos corpos tende a crescer, quer

explicar este resultado pela doutrina do **ímpetus**. Nicole Oresme, com o mesmo estado de espírito, se aproxima da noção de movimento uniformemente acelerado e se interroga sobre a imobilidade da Terra. Nicolas de Cues imagina um Universo ao mesmo tempo infinito e limitado, e substitui a idéia do Primeiro Motor de Aristóteles pela de um **ímpetus** inicial dado por Deus. Leonardo da Vinci se interroga sobre vários problemas: movimentos dos corpos sobre os planos inclinados, ações conjugadas de muitas forças sobre um mesmo móvel etc. Dominique de Soto, Nicolas Tartaglia, Gerolamo Cardano se interrogam sobre a “queda dos graves”, e J. B. Benedetti introduz a física do **ímpetus** em todos os aspectos do movimento e do equilíbrio dos corpos. Acompanhando os progressos técnicos e os movimentos das idéias desenvolvidas acima, observa-se incontestavelmente uma espécie de eferescência que agita a mecânica.

Todavia, “Como cosmologia e mecânica estão intimamente ligadas, a revolução de uma acarreta obrigatoriamente a da outra” (ROSMORDUC, 1985, p. 79). Dando continuidade à teoria do *ímpetus*, a outra grande influência sobre a mecânica virá do novo sistema astronômico adotado por Copérnico. Façamos, deste modo, um pequeno resumo das principais conseqüências deste, com o foco na relação entre força e movimento.

3.2 A REVOLUÇÃO INICIADA POR COPÉRNICO

As perguntas e respostas sobre a natureza do Universo remontam aos tempos pré-históricos, por isso a astronomia é considerada a mais antiga das ciências. Os registros astronômicos mais antigos datam de aproximadamente 3000 a.C. e são atribuídos aos chineses, babilônios, assírios e egípcios, que tinham a necessidade de medir a passagem do tempo para escolher a melhor época de plantio e colheita. Embora nesta época as explicações dos eventos astronômicos possuíssem um caráter místico, devemos a estes povos o calendário, além dos registros de algumas estrelas, cometas, planetas, meteoros e meteoritos. Houve um grande avanço entre 600 a.C. a 400 d.C. com os antigos filósofos gregos, que introduziram os primeiros conceitos de Esfera Celeste. Muitos deles acreditavam que o Universo era uma esfera de material cristalino, incrustada de estrelas, com a Terra no centro. Apesar de Aristarco de Samos (310 a.C. - 230 a.C.) ter “[...] sugerido que a Terra poderia ter um movimento de rotação diário em torno do seu eixo e descrever simultaneamente uma revolução anual numa enorme órbita em volta do Sol” (COHEN, 1988, p. 46), o modelo arquitetado por Aristóteles de Estagira (384 a.C. - 322 a.C.) prevaleceu. Para Aristóteles, “cada planeta – e também o Sol e a Lua – era considerado fixo no equador de uma esfera que girava em torno de um eixo, permanecendo a Terra estacionária, no centro” (COHEN, 1988, p. 47).

Estas idéias foram aproveitadas por Ptolomeu (85 d.C. - 165 d.C.), o último astrônomo importante da antiguidade. Ele compilou uma série de treze volumes sobre astronomia, conhecida como o *Almagesto*, que é a maior fonte de conhecimento sobre a astronomia na Grécia. A contribuição mais importante de Ptolomeu foi uma representação geométrica do sistema solar, com círculos, epíclis e equantes, que permitia prever o movimento dos planetas com considerável precisão, e que foi usado até o século XVII. Estes quase dois mil anos de domínio da astronomia Aristotélica-Ptolomaica sofreu um duro golpe, em 1543, com a publicação da obra intitulada *De Revolutionibus Coelestium Orbium* (Sobre as Revoluções das Órbitas Celestes) de Nicolau Copérnico (1473 - 1543). Ao prefaciar o livro, Copérnico (apud LUCIE, 1977, p. 78) explica os motivos que levaram a escrevê-lo:

[...] Ora, tendo longamente meditado sobre a incerteza do ensinamento dos matemáticos em relação à composição dos movimentos das esferas do mundo, aborreceu-me o fato de que os filósofos que tinham estudado com tanto cuidado até as menores coisas relacionadas com este mundo, não ofereciam nenhuma explicação certa para os movimentos da máquina do Universo, que tinha sido construída para nós pelo melhor e o mais perfeito dos artistas.

Por essa razão, resolvi ler os livros de todos os filósofos que pudesse conseguir, para ver se alguns deles já tinham cogitado que os movimentos das esferas do mundo pudessem ser diferentes dos que os matemáticos ensinam nas escolas. E achei, primeiro em Cícero, que Nicetus pensava que a Terra se movia. Mais tarde encontrei também em Plutarco que alguns outros tinham tido a mesma opinião.

[...] Partindo daí, comecei também a pensar na mobilidade da Terra. E, embora a opinião parecesse absurda, posto que outros antes de mim tinham tido a liberdade de imaginar uns círculos a fim de deduzirem os fenômenos dos astros, pensei que também a mim seria permitido procurar ver se, ao admitir algum movimento da Terra, não seria possível encontrar uma teoria mais sólida da revolução dos orbes celestes.

Assim é que, dados os movimentos que mais adiante atribuo à Terra, achei finalmente, por meio de longas e numerosas observações que, se os movimentos dos outros astros errantes fossem relacionados ao movimento (orbital) da Terra, e que esse movimento fosse tomado por base da revolução de cada um dos astros, não somente se deduziriam os seus movimentos aparentes, como também a ordem e as dimensões de todos os astros e orbes, e que se encontraria no céu uma coesão tal que não se poderia mudar nada em nenhuma de suas partes sem produzir confusão nas outras e no Universo inteiro.

Copérnico declarava que a Terra cumpria uma revolução em torno do Sol, como qualquer outro planeta, como já havia afirmado Aristarco, mas a sua teoria contava com um desenvolvimento matemático mais elaborado. Usando deferentes e epíclis, o seu sistema

astronômico era capaz de prever as posições dos planetas tão precisamente quanto o de Ptolomeu, com a vantagem de ter uma explicação mais simples para o movimento retrógrado dos planetas. Mas faltava ao seu sistema heliocêntrico⁶, uma teoria física sólida que refutasse os argumentos contrários ao movimento da Terra, principalmente, os levantados por Aristóteles, em seu tratado *Sobre o Céu (De Caelo)*, há cerca de dois mil anos antes. Para Aristóteles, o movimento da Terra, tanto o de rotação como o de translação, era inconsistente com a sua teoria do movimento natural e violento dos corpos. Além disso, existiam algumas evidências empíricas inexplicáveis à luz da teoria do globo móvel. Então:

É claro, portanto, que a Terra deve estar no centro [do universo] e imóvel, não apenas pelas razões já indicadas, mas também porque **corpos pesados atirados forçadamente [violentamente] para cima, em [em direção] bem reta, retornam ao ponto de onde partiram, mesmo se forem atirados a uma distância infinita.** Dessas considerações torna-se claro que a Terra não se move e não está em um lugar diferente do centro (ARISTÓTELES apud MARTINS, 1986, p. 70, grifo nosso).

Embora muitos, na atualidade, considerem ingênua a visão de mundo de Aristóteles, este trecho mostra como a sua filosofia era lógica, coerente, sólida e rica em argumentos. Este do corpo lançado verticalmente, por exemplo, “[...] será repetido e ampliado por todos os defensores posteriores da imobilidade da Terra” (MARTINS, 1986, p. 70). Segundo Martins (1986), Ptolomeu, no *Almagesto*, também teceu argumentos contrários à mobilidade terrestre. Apesar de aceitar que as observações estelares não são conclusivas quanto a uma Terra estática, acreditou, como Aristóteles, que certos fenômenos terrestres são incompatíveis com o movimento desta. Assim ele se expressa:

[...] em relação aos fenômenos das estrelas, nada talvez impedisse que as coisas estivessem de acordo com essa simples conjectura [do movimento de rotação da Terra], mas à vista daquilo que ocorre em torno de nós no ar, tal noção parece completamente absurda (PTOLOMEU apud MARTINS, 1986, p. 70).

Ptolomeu prossegue informando quais seriam estas conseqüências absurdas do movimento terrestre:

⁶ O termo “heliocêntrico” não é apropriado, pois Copérnico admitiu que o Sol não estava exatamente no centro das órbitas planetárias, e sim próximo a ele. “Por esse motivo, pode ser preferível dar o nome de “heliostático” e não “heliocêntrico” para essa teoria” LOPES (2001, p. 196).

[...] **todas as coisas que não estivessem em repouso sobre a Terra pareceriam ter um movimento contrário a esse [ao movimento da Terra]**, e nunca se veria uma nuvem mover-se para leste, nem qualquer outra coisa que voasse ou que fosse atirada ao ar. Pois a Terra sempre as ultrapassaria em seu movimento para leste, e assim todos os corpos pareceriam ser deixados para trás e mover-se para oeste (PTOLOMEU apud MARTINS, 1986, p. 70, grifo nosso).

O leitor pode indagar-se: Como ele não conseguiu imaginar que a atmosfera seja arrastada junto com a Terra, levando consigo todos os corpos imersos nela? A resposta a esta pergunta é dada por Martins (1986, p. 70):

Ptolomeu descarta essa explicação, pois, nesse caso, se o ar tem o poder de arrastar os corpos, não poderia existir o movimento dos corpos ou projéteis através do ar: todos teriam de ficar parados em relação à Terra, podendo talvez, no máximo, cair, mais incapazes de se deslocar para leste ou para oeste. Como na prática é possível atirar-se projéteis para leste ou para oeste, vê-se que o ar não impede o movimento desses corpos e que não seria, portanto, capaz de arrastá-los, se a Terra girasse.

A tarefa de Copérnico não era fácil, romper com uma filosofia triunfante há séculos exigiria muitos mais do que artifícios matemáticos. Foi necessária a ajuda de outros grandes cientistas⁷ para completar a sua revolução. Nomes como Giordano Bruno (1548 - 1600), Johannes Kepler (1571 - 1630), Galileu Galilei (1564 - 1642), René Descartes (1596 - 1650) e Isaac Newton (1642 - 1727) estão envolvidos na consolidação da teoria heliocêntrica.

3.3 ALGUNS DEFENSORES DA MOBILIDADE TERRESTRE

Nicole Oresme (1316 - 1390), em 1377, escreveu um manuscrito comentando o tratado *Sobre o Céu* de Aristóteles, criticando os argumentos contrários ao movimento da Terra. O autor esforça-se em mostrar que nenhuma experiência permite provar que a Terra está em repouso (MARTINS, 1986, p. 71). Vejamos o que ele diz:

Não se poderia provar por experiência alguma que o Céu se move com movimento diário, e não a Terra. Mas, sob toda correção, parece-me que se poderia bem sustentar e dar cor à última opinião, a saber, que a Terra se move com movimento diário, e o Céu não. E, primeiramente, eu desejaria declarar que não se poderia mostrar o contrário por qualquer experiência; em segundo lugar, nem por razões; e, em terceiro lugar, dar a razão disso (ORESME apud MARTINS, 1986, p. 71).

⁷ A palavra “cientista” foi criada, em 1840, na cidade de Glasgow, pela Associação Britânica para o Progresso da Ciência (RONAN, 1987b, p. 7).

Em seguida, Oresme (apud MARTINS, 1986, p. 71, grifo nosso) relembra a experiência proposta por Aristóteles, descrevendo:

[...] quem estivesse em um navio que se movesse muito rapidamente para o oriente e atirasse uma seta bem reta para cima, ela não cairia na nave, mas bem longe do navio, para o ocidente; e de forma semelhante, se a Terra se move tão rapidamente girando do ocidente para o oriente, desde que lançássemos uma pedra bem reta para cima, ela não cairia no lugar de onde ela parte, mas bem longe para o ocidente; e o contrário é percebido, de fato.

Ao introduzir a experiência realizada em um navio, Oresme modificou um pouco a argumentação de Aristóteles e Ptolomeu. Talvez ele possa ter sido induzido ao erro ao ler a “[...] obra de algum comentador de Aristóteles (talvez Simplicio), a qual acabou sendo atribuída ao próprio Aristóteles ou a Ptolomeu, como aqui” (MARTINS, 1986, p. 71). Para responder aos três argumentos, Oresme procurou, primeiramente, mostrar que os movimentos relativos são os únicos que podem ser observados:

Então, eu suponho que o movimento local não pode ser percebido sensivelmente a não ser tanto quanto se percebe que um corpo esteja [em movimento] olhando-se para outro corpo. E por isso, se um homem está em um navio chamado A, que se move muito suavemente, rápida ou lentamente, e se esse homem não vê outra coisa, além de um outro navio chamado B, que seja movido de forma totalmente semelhante ao modo como [se move] A, no qual ele está, eu digo que parecerá a esse homem que um e outro [navios] não se movem; e se A está em repouso e B é movido, parece-lhe e assemelha-se que B é movido; e se A é movido e B fica em repouso, parece-lhe, como antes, que está em repouso e que B é movido (ORESME apud MARTINS, 1986, p. 72).

Oresme apresentou um argumento bem discutido e aceito na época, podemos chamar de relatividade óptica do movimento. Dito de outro modo, é muito difícil, visualmente, definir quem está em movimento, se o observador ou o objeto observado. Raciocínio que pode ser estendido para as observações astronômicas, ou seja, “[...] quando se tenta apenas prever as posições aparentes dos astros, é indiferente supor-se que a Terra se move ou que ela está parada” (MARTINS, 1986, p. 72). Oresme traz à tona, então, as experiências realizadas na própria Terra que se poderia descobrir se ela está em repouso ou em movimento:

À segunda [experiência] aparece a resposta por isso: segundo essa opinião, a Terra não é movida sozinha, mas com água e o ar, como é dito; embora a água e o ar daqui de baixo possam ser movidos de outra forma pelos ventos ou pelas outras causas; e é semelhante como se um navio se movesse e nele

houvesse ar guardado; pareceria àquele que estivesse em tal ar que ele não se move (ORESME apud MARTINS, 1986, p. 72).

A idéia de que a Terra, ao mover-se, leva consigo o ar e água, era unânime entre os defensores de seu movimento. A seguir, Oresme (apud MARTINS, 1986, p. 72, grifo nosso) aproveita esse argumento para discutir o movimento dos projéteis:

À terceira experiência, que parece mais forte, da seta ou pedra lançada para cima etc., dir-se-á que a seta atirada para o alto, com esse movimento, é movida para o oriente muito rapidamente com o ar através do qual ela passa e com toda a massa da parte baixa do Mundo, antes indicada, que se move com movimento diurno; e por isso a seta recai no lugar da Terra de onde partiu.

E tal coisa parece possível por semelhança; pois, se um homem estivesse em um navio movido para o oriente muito rapidamente sem que ele percebesse esse movimento e esticasse sua mão fazendo-a descer e descrever uma linha reta contra o mastro do navio, **parecer-lhe-ia que sua mão não se moveu a não ser com um movimento reto; e assim também, segundo essa opinião, parece-nos da seta que desce ou sobe reta para baixo ou para cima.**

Martins chama a nossa atenção para o fato de que Oresme acreditava na possibilidade da composição de movimentos de um corpo, contrário ao que afirma a teoria do movimento aristotélica. Sendo que o “[...] único movimento observável pela pessoa que está na Terra (ou no navio) é o movimento do qual ele não participa” (MARTINS, 1986, p. 72). Generalizando a sua idéia:

Igualmente, dentro do navio assim movido como foi dito, **podem existir movimentos longitudinais, transversais, para o alto, para baixo, de todas as maneiras, e pareceriam ser em tudo como se o navio repousasse. ...;** e de modo semelhante, no caso colocado antes, todos os movimentos aqui em baixo pareceriam ser como se a Terra repousasse (ORESME apud MARTINS, 1986, p. 73, grifo nosso).

Deste modo, como era de seu desejo, Oresme conclui:

[...] portanto, que não se poderia por experiência alguma mostrar que o céu tem um movimento diário e que a Terra não é movida assim (ORESME apud MARTINS, 1986, p. 73).

Oresme chegou perto do que denominamos de princípio de relatividade de Galileo⁸. Faltou desvincular-se da necessidade dos objetos serem arrastados com ar, para continuarem o seu movimento junto com a Terra. Enfim, como todo homem de seu tempo, não conseguiu imaginar um movimento sem uma causa. O que demonstra que o conceito de inércia não é tão natural quanto muitos imaginam. Buridan também conhecia a relatividade óptica do movimento, como podemos observar na seguinte passagem de uma de suas obras:

Se alguém está se movendo em um navio e imagina que está em repouso, então, se observar um outro navio, que na realidade está em repouso, parecer-lhe-á que o outro navio se move (...) E assim nós também pressupomos que a esfera do Sol está sempre em repouso e a Terra carregando-nos estaria girando. Como, no entanto, nós imaginamos que estamos em repouso, tal como o homem localizado no navio que está se movendo rapidamente não percebe seu próprio movimento nem o movimento do navio, **então é claro que o Sol pareceria para nós levantar-se e pôr-se, tal como faz quando ele se move e nós permanecemos em repouso** (BURIDAN apud NEVES, 2004, p. 31, grifo nosso).

Mas, com relação ao movimento dos projéteis, tinha argumentos próximos ao de Ptolomeu, discordando com Oresme (MARTINS, 1986, p. 73). O próximo defensor da mobilidade da Terra será Copérnico. Um de seus argumentos será, novamente, a experiência do navio:

E porque não havemos de admitir que a rotação diurna é aparente no céu mas real na Terra? E é assim que as coisas se passam na realidade (...) **Na verdade, quando um navio navega com bonança, tudo o que está fora dele parece aos navegantes mover-se pelo reflexo daquele movimento e, por outro lado, pensam que estão imóveis com todos os objetos juntos deles.** Naturalmente, a mesma coisa acontece com o movimento da Terra, de maneira que todo o Universo parece rodar (COPÉRNICO apud NEVES, 2004, p. 31, grifo nosso).

Em resposta aos questionamentos de que o Sol não poderia ser o centro do universo, pois os corpos não caem em sua direção, Copérnico fez algumas modificações na teoria de movimento natural de Aristóteles. Para ele, “[...] se os graves vão para o centro da Terra, não é que se dirijam para o centro do Universo; é simplesmente por que querem retornar para a Terra onde se encontra os seus semelhantes, os outros graves; e isto acontecerá qualquer que seja o lugar da Terra no Universo” (LUCIE, 1977, p. 116).

⁸ “Denomina-se comumente “princípio de relatividade de Galileo” a afirmação de que é impossível detectar-se algum efeito físico de um movimento uniforme de translação de um sistema físico, por experiências internas a esse sistema; ou seja: para experiências realizadas dentro de um sistema, seu movimento de translação, se for uniforme, não pode ser notado” (MARTINS, 1986, p. 70).

Esta não foi a única mudança que fez. Para explicar por que os projéteis insistem em cair no mesmo lugar de que é lançado verticalmente para cima, Copérnico considera que o ar, de alguma maneira, está ligado à Terra, obrigando os corpos que estão ao seu redor a participarem de seus movimentos. Deste modo, repetindo Oresme, afirma que o movimento dos projéteis é composto de movimento vertical e horizontal (circular):

Devemos confessar que em relação ao universo o movimento de corpos que caem ou sobem é duplo e é, em geral, composto do retilíneo e do circular (COPÉRNICO apud MARTINS, 1986, p. 74).

Segundo Martins (1986, p.74), “[...] não há em Copérnico a idéia de um movimento por inércia mas algum tipo de acompanhamento de um movimento natural”. Martins continua nos esclarecendo que o gérmen do conceito de inércia está na obra *Ceia dos penitentes* de Giordano Bruno, escrita em forma de diálogo. Após defender o sistema copernicano, Bruno (apud MARTINS, 1986, p. 74) coloca nos lábios de um dos personagens a seguinte resposta:

(Teófilo:) Todas as coisas que estão na Terra movem-se com ela. Se, portanto, de um lugar fora da Terra fosse lançada alguma coisa à Terra, pelo movimento desta aquela [coisa] perderia a retidão [isto é, não cairia verticalmente]. Como se verifica no navio AB, o qual, passando pelo rio, se alguém, que se encontra na sua margem C, lhe atirar diretamente uma pedra, errará sua mira, por quanto vale a velocidade da corrida. Mas se alguém, colocado sobre o mastro do dito navio, que corra com a velocidade que se queira, [o fizer] sua mira não falhará, de modo que a pedra ou outra coisa lançada irá diretamente do ponto E, que está no topo do mastro, ou na gávea, ao ponto D que está na raiz do mastro, ou a qualquer parte do corpo do navio. Assim, se do ponto D alguém que está dentro do navio atira ao ponto E diretamente uma pedra, ela retornará para baixo pela mesma linha, mova-se o navio quanto se queira, desde que ele não se incline.

Até aqui não há muita diferença nos argumentos apresentados por Oresme e Copérnico. O mais importante é compreender como o movimento do navio (ou da Terra) era “transferido” para os corpos em seu interior, não influenciando nos fenômenos internos. Esta é a grande inovação de Bruno, a sua explicação exclui a influência do ar, tão defendida pelos seus antecessores (MARTINS, 1986, p. 74). Vamos a ela:

(Teófilo:) Ora, para voltar ao assunto, supõe-se que haja então duas [pessoas], das quais uma se encontra dentro do navio que corre, e a outra, fora dele, e que tanto uma quanto a outra tenham a mão perto do mesmo ponto do ar e, que do mesmo lugar, ao mesmo tempo, um deixe cair uma pedra e o outro outra; sem que lhe dêem qualquer empurrão, a do primeiro, sem perder um ponto nem desviar sua linha, atingirá o lugar prefixado, e a

do segundo irá encontrar-se deslocada para trás. **O que não ocorre senão que a pedra que sai da mão daquele que é sustentado pelo navio, e que conseqüentemente move-se segundo o movimento dele, tem uma virtude impressa, que não tem a outra, que procede da mão daquele que está fora; e isso apesar de as pedras possuírem a mesma gravidade, atravessarem o mesmo ar, partirem (se tal fosse possível) do mesmo ponto e possuírem o mesmo empurrão.** Não podemos dar outra razão a essa diversidade a não ser a de que as coisas que estão fixas ou que de forma semelhante pertencem ao navio movem-se com ele; e **uma pedra leva consigo a virtude do motor que se move com o navio, e a outra, a daquele que não tem tal participação.** Disso se vê manifestamente que a virtude de andar em linha reta não é obtida nem do ponto de onde se parte, nem do ponto para onde se vai, nem do meio no qual se move, mas da eficácia da virtude impressa primeiramente, da qual depende toda a diferença (BRUNO apud MARTINS, 1986, p. 75, grifo nosso).

Bruno deu um passo a mais que Oresme e Copérnico em direção à inércia. Menos aristotélico que estes, acreditava que a pedra ao ser solta em um navio em movimento, cai em linha reta, logo abaixo do ponto em que foi largada, por receber do mesmo uma “*virtude impressa*”, e não por ser arrastada pelo ar. Estendendo o raciocínio para a Terra, a teoria do movimento natural circular dos corpos, criada por Oresme e Copérnico, não tem mais utilidade. Martins (1986, p. 75) ainda ressalta que “[...] ao usar a palavra ‘virtude impressa’, ele está utilizando o mesmo termo que Newton depois veio a utilizar, em latim (*vis*), para indicar a inércia (*vis inertiae*)”.

3.4 ALGUMAS CONTRIBUIÇÕES DE GALILEU

Encontramos em Martins (1986, p. 77) uma curiosidade a respeito de Galileu. No início de sua carreira como professor universitário, em Pádua, ele escreveu um livro denominado *Tratado da esfera ou cosmografia*, defendendo as idéias de Aristóteles e Ptolomeu sobre o universo. Apenas, em 1597, cerca de cinco anos depois, é que passou a defender, pelo menos de forma privada, o sistema de Copérnico (MARTINS, 1986, p. 77; COHEN, 1988, p. 77). Uma de suas primeiras contribuições, em defesa do sistema copernicano, foi demonstrar que uma “supernova”, surgida em 1604 na constelação da Serpente, estava localizada além da esfera da Lua. Tycho Brahe, em 1572, já havia visto outra “supernova” na constelação de Cassiopéia. Como Aristóteles afirmava que o céu era imutável podendo ocorrer mudanças apenas na região entre a Terra e a Lua, considerada uma região de transição entre o mutável e o eterno, essas descobertas foram um forte revés para o seu sistema físico (COHEN, 1988, p. 78).

Mas Galileu não parou por aí. Cohen afirma que ao ficar entusiasmado com a notícia da fabricação do telescópio por certo flamengo, resolveu fazer o seu. Embora não tenha sido o único observador a apontar o novo instrumento para os céus, foi o primeiro cientista a usá-lo para fins astronômicos. As suas descobertas foram relatadas no livro *Sidereus nuncius*, ou seja, “O mensageiro sideral” ou “O mensageiro das estrelas”. Dentre os fenômenos relatados encontram-se a superfície irregular da Lua, a reflexão da luz solar pela Terra, a considerável distância entre os planetas e as estrelas fixas e as luas de Júpiter. Para Cohen (1988, p. 80-81, grifo nosso),

É impossível exagerar os efeitos das descobertas telescópicas na vida de Galileu, tão profundas elas foram. E tal é verdade não só na vida pessoal e no pensamento de Galileu como é igualmente verdadeira a sua influência na história do pensamento científico. Galileu experimentou observar, talvez pela primeira vez, os céus como eles na realidade são; e **para onde olhava descobria provas para sustentar o sistema copernicano contra o ptolomaico ou, pelo menos, para enfraquecer a autoridade dos Antigos.**

Restava agora estabelecer uma nova ciência do movimento que fosse condizente com a mobilidade da Terra. Assim, Galileu teve que explicar o comportamento dos graves na Terra móvel, que parecem cair exatamente como cairiam se a Terra estivesse em repouso, e formular novos princípios para o movimento dos graves em geral (COHEN, 1988, p. 107). Nesta tarefa árdua, o caminho que percorreu não foi contínuo. Foi marcado por vários erros (NEVES, 2005a; COHEN, 1988; ROSMORDUC, 1985; RONAN, 1987a; THUILLIER, 1994; KOYRÉ, 1991; LUCIE, 1977, MARTINS, 1986, 1994a). Alguns foram revistos pelo próprio autor; outros permaneceram. As primeiras idéias de Galileu sobre os argumentos contrários e a favor do movimento da Terra, de acordo com Martins (1986, p. 77-79), foram encontradas anotadas ao longo de uma cópia do livro, *Discurso contra o movimento da Terra*, de Ludovico delle Colombe, datado de 1610, que estava em sua biblioteca pessoal. Neste livro, Ludovico repete os argumentos de Aristóteles e Ptolomeu e acrescenta outros utilizados por Tycho Brahe (1546 - 1601). Após refutar os argumentos apresentados por Ludovico, Galileu imagina outra experiência envolvendo um navio em movimento:

Estando um barco parado, coloque-se uma superfície plana em equilíbrio, como, por exemplo, um espelho, e acima dele, em repouso, uma bola perfeitamente redonda; ver-se-á sobre o mesmo espelho a mesma bola ficar parada, apesar de o barco mover-se velozmente; **argumento claro de que o ímpeto recebido pela bola daquele que a coloca, que está no barco quando ele se move muito velozmente, não se aniquila ou diminui**; pois, se fosse diminuindo, a bola, depois de ser colocada sobre o espelho,

começaria a correr ao contrário do movimento do barco, se não houvesse algum propulsor que a empurrasse e obrigasse a seguir o movimento do barco (...) Mas essa bola correria para trás, se aquele que a coloca [sobre o espelho] estivesse fora do barco e, quando passasse diante dele, colocasse a bola sobre o espelho; sem dúvida alguma ela correria contra o movimento do barco (GALILEU apud MARTINS, 1986, p. 78, grifo nosso).

Esta experiência é muito parecida com a descrita por Bruno. Ambos imaginam duas pessoas em sistemas referenciais diferentes: um em movimento e outro parado. Ambos atribuem o repouso da bola, em relação ao barco, ao ímpeto (ou virtude impressa) recebido pela bola por aquele que a coloca, ou seja, a velocidade relativa entre a bola e o barco é nula. Mas Martins nos esclarece que, apesar dos argumentos utilizados por Galileu serem muito parecidos aos de Bruno, não há uma única referência em suas obras a este autor (MARTINS, 1986, p. 75). Ainda sobre o livro de Ludovico, Galileu ao comentar a experiência do tiro para o céu “[...] respondeu que todos os corpos pesados possuem um ‘movimento natural, congênito e simultâneo’, que é circular em torno do centro da Terra, com duração de 24 horas, e que por esse motivo a bala atirada para cima acompanha a Terra” (MARTINS, 1986, p. 79).

Resposta semelhante foi dada por Oresme e Copérnico, o que demonstra que as idéias de Galileu sobre a inércia ainda são confusas. Quando a análise restringe-se ao um movimento local (dentro de um navio, por exemplo), o seu raciocínio aplica, adequadamente, a noção de inércia. Mas, ao extrapolar para a Terra, “[...] ele acabava recaindo em raciocínios aristotélicos sobre movimentos circulares naturais e dava importância a efeitos produzidos pelo arrastamento do ar, que não são centrais” (MARTINS, 1986, p. 79).

Outro documento importante que mostra a evolução do pensamento de Galileu sobre a relação entre força e movimento é a carta-reposta a Francesco Ingoli. Encontramos em Mariconda (2005) um resumo das circunstâncias que levaram Galileu a escrever este documento. De acordo com Mariconda, Galileu fez uma viagem a Roma, em 1615, com a intenção de defender e tentar impedir que a Igreja condenasse a astronomia de Copérnico. Lá permaneceu entre 11 de dezembro de 1615 e 4 de junho de 1616, visitando prelados e pessoas influentes e participando de debates. Um destes debates foi com Francesco Ingoli⁹. Mas como Ingoli

⁹ “[...] um jurista de Ravena, a quem conhecia da época (1597-1610) em que foi professor de matemática da Universidade de Pádua e que acabava de ser nomeado secretário da Sagrada Congregação para a Propagação da Fé (Sacra Congregatio de Propaganda Fide) como prêmio pela criação da tipografia na qual se imprimiam os textos para a difusão do catolicismo (cf. EN, 5, p. 395)” (MARICONDA, 2005, p. 443).

utilizou de um argumento de paralaxe pouco usual, Galileu pediu que ele expressasse-o por escrito, para analisá-lo mais claramente e dar uma resposta.

Assim Ingoli o fez, entregando o escrito em janeiro de 1616¹⁰. Mas, além de expor o argumento da paralaxe, “[...] decidi acrescentar outros argumentos retirados de Aristóteles, Ptolomeu e Tycho Brahe, para que Galileu pudesse mais fácil e claramente chegar à verdade” (MARICONDA, 2005, p. 444). Um mês depois, Galileu, antes de ter tido tempo de responder a carta, foi chamado à presença do cardeal Roberto Bellarmino e admoestado “[...] a não defender, nem ensinar, o sistema de Copérnico, respeitando assim a decisão da Sagrada Congregação do Índice, tomada no dia anterior, de censurar e proibir o *De revolutionibus orbium coelestium* (Das revoluções dos orbes celestes) de Copérnico” (MARICONDA, 2005, p. 444). Sem alternativa, Galileu absteve-se de responder a Ingoli naquele momento.

No entanto, em 6 de agosto de 1623, o cardeal Maffeo Barberini, com o qual Galileu tinha boas relações, foi eleito papa. Sentindo um ambiente menos hostil, Galileu voltou a Roma, em 1624, para prestar as suas homenagens ao novo papa e fazer novas tentativas de defesa a Copérnico. Mais cauteloso, preferiu, com oito anos de atraso, responder à carta de Ingoli “[...] para certificar-se até que ponto ia a tolerância e o ceticismo do pontífice e o quanto se podia avançar na defesa da opinião copernicana” (MARICONDA, 2005, p. 447). As objeções levantadas por Ingoli contra as hipóteses de Copérnico da centralidade do Sol e do movimento da Terra são de três tipos: astronômicas, físicas e teológicas. A análise das astronômicas e teológicas foge ao escopo deste trabalho, ficamos somente com as físicas. Galileu (2005, p. 502, grifo nosso), ao respondê-las, faz a seguinte introdução:

Quanto ao movimento diurno, ou seja, o movimento sobre si mesma em 24 horas de ocidente para oriente, das muitas razões e experiências que foram formuladas por Aristóteles, Ptolomeu, Tycho e outros, vós passais por elas bastante ligeiramente acenando para apenas duas, isto é, **aquela usadíssima dos corpos graves que caem perpendicularmente sobre a superfície da Terra e a outra dos projéteis, os quais sem qualquer diferença movem-se por espaços iguais tanto para levante quanto para poente e tanto para o sul quanto para o norte [...]**.

Tycho Brahe, em defesa da imobilidade da Terra, adaptou os argumentos de Aristóteles e Ptolomeu, que falavam em pedras e setas, para balas lançadas de canhão. Com a modificação, o argumento da pedra lançada verticalmente para cima em um navio se transformou em:

¹⁰ Uma tradução deste documento encontra-se INGOLI (2005).

Os que acreditam que uma bala lançada para o alto no interior do navio em movimento retorna ao mesmo lugar como se o navio estivesse em repouso, eles se enganam fortemente. De fato, a bala ficará para trás, tanto mais quanto mais rapidamente se desloque o navio (BRAHE apud MARTINS, 1986, p. 76).

Aquele de Ptolomeu que falava de setas também ganhou uma nova versão:

A experiência nos mostra que balas de mesmo peso e tamanho, lançadas em um e um outro sentido [leste e oeste] por uma mesma quantidade de pólvora de canhão de mesma força, atingem aproximadamente o mesmo espaço da superfície terrestre, tanto para o Oriente quanto para o Ocidente, se forem, como já disse, atiradas com a mesma inclinação do canhão, e desde que o ar esteja bastante tranqüilo e não haja causa acidental favorecendo ou impedindo esse impulso; ora, no entanto, pelo movimento extremamente rápido da Terra (se ele existisse), a bala atirada para o oriente não poderia jamais percorrer um espaço igual sobre a superfície da Terra, que por seu movimento avança diante dela, quanto aquela que da mesma maneira fosse lançada para o Ocidente ... (BRAHE apud MARTINS, 1986, p. 76).

Quanto à experiência do navio, Galileu declara que esta não era capaz de afirmar quanto à imobilidade ou não da Terra. Critica os aristotélicos que a citam como prova de uma Terra estática, sem jamais tê-la feito. Garante que se fizessem encontrariam o seguinte resultado:

Digo-vos, portanto, Sr. Ingoli, que, enquanto o navio está em curso, com igual ímpeto move-se também aquela pedra, cujo ímpeto não se perde porque aquele que a segurava abra a mão e a deixe em liberdade, mas antes nela se conserva indelevelmente, de modo que **esse [ímpeto] é suficiente para fazer a pedra seguir o navio**; e pela própria gravidade, não mais impedida por aquele [que a segurava], vem para baixo, **compondo com ambos um só movimento transversal e inclinado (e talvez mesmo circular)** para onde caminha o navio; e, assim, vem cair naquele mesmo ponto do navio em que caía quando o todo estava em repouso. A partir disso podereis compreender como as mesmas experiências produzidas pelos adversários contra Copérnico estão bastante mais a favor dele do que a favor deles; porque, se o movimento comunicado pelo curso do navio à pedra, o qual é para essa pedra indubitavelmente acidental, nela todavia de tal modo se conserva que se percebe precisamente o mesmo efeito tanto no repouso quanto no movimento do navio, que dúvida deverá restar de que a pedra, levada sobre a sumidade da torre com a mesma velocidade que todo o globo terrestre, conserve a mesma [velocidade] quando vem depois para baixo? A mesma, digo, a qual não lhe é, como aquela do navio, acidental mas é a sua inclinação natural primária e co-eterna (GALILEI, 2005, p. 504-505, grifo nosso).

Novamente, há uma semelhança na resposta fornecida por Bruno, mas Galileu não abre mão de considerar que o ímpeto fornecido pelo navio (ou pela Terra) faz com que o objeto continue com a tendência de se movimentar circularmente ao redor da Terra, sendo que a sua

trajetória nos parece uma queda retilínea, apenas por compartilhamos com ele deste movimento “horizontal”. Com relação ao argumento das balas de canhão lançadas para leste e para oeste, Martins acredita que Galileu não possuía uma teoria convincente para contrapô-la. Deste modo, ele fugiu de “[...] uma análise detalhada e escapou ao mesmo tempo ao argumento dos tiros, propondo o princípio da relatividade” (MARTINS, 1986, p. 80), o que pode ser resumido em uma única frase: O movimento comum é como inexistente. Para demonstrá-lo, Galileu (2005, p. 505-506, grifo nosso) descreve a seguinte experiência:

No maior compartimento existente sob a cobertura de um grande navio, fechai-vos com algum amigo, e fazei que aí existam moscas, borboletas e semelhantes animaizinhos voadores; tomai também um grande recipiente com água, contendo pequenos peixes; acomodai ainda ao alto algum vaso que vá gotejando em um outro, de boca estreita, colocado por baixo; e, estando em repouso o navio, observai diligentemente como aqueles animaizinhos voadores com igual velocidade vão para todas as partes do ambiente; ver-se-ão os peixes nadar indiferentemente para qualquer parte do vaso; as gotas cadentes entrarem todas no vaso posto embaixo; e vós, lançando uma fruta para o amigo, não a deveis lançar com mais força para esta que para aquela parte, quando [548] as distâncias sejam iguais; e saltando, como se diz, com os pés juntos, transporteis espaços iguais para todas as partes. **Assegurai-vos de ter todas essas coisas, e fazei mover o navio com quanta velocidade desejardes; porque (sempre que o movimento seja uniforme e não flutuante de lá para cá) não reconhecereis uma mínima mudança em todas as mencionadas coisas, nem de nenhuma delas, nem mesmo de algo que esteja em vós mesmos, podereis assegurar-vos se o navio caminha ou está parado [...].** E se de todos esses efeitos me perguntardes a razão, responder-vos-ei por ora: **“porque o movimento universal do navio, sendo comunicado ao navio e a todas as coisas que nele estão contidas, e não sendo contrário à inclinação natural delas, nelas indelevelmente se conserva”;** em outra oportunidade, ouvireis respostas particulares e difusamente explicadas. Ora, quando tiverdes visto todas essas experiências, e como esses movimentos, ainda que acidentais [549] e adventícios, mostram-se exatamente iguais tanto quando o navio se mova quanto se ele está parado, não deixareis toda dúvida de que o mesmo deva acontecer a respeito do globo terrestre, sempre que o ar acompanhe o globo? E tanto mais, quanto aquele movimento universal, que no navio é acidental, nós o pomos, na Terra e nas coisas terrestres, como seu natural e próprio. Acrescentai mais, que, no navio, ainda que cem vezes o tenhamos posto em movimento e o façamos estar parado, nem por isso pudemos aprender a conhecer das coisas internas aquilo que ele faz: como será possível conhecer isso na Terra, a qual a temos tido sempre em um mesmo estado?

Essa discussão feita até o momento sobre as idéias de Galileu a respeito da mobilidade da Terra, e por extensão a possibilidade de um corpo continuar o seu movimento sem a aplicação de uma força, voltaram à baila no seu penúltimo trabalho, publicado em 1632, a saber, o livro *Dialogo supra i due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano* (Diálogo sobre os

dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomaico e Copernicano). Sabiamente, por ainda não possuir conclusões definitivas a favor da teoria heliocêntrica, ele escreveu um livro em forma de uma conversa entre três personagens: Salviatti (porta-voz das idéias de Galileu), Simplicio (simpatizante de Aristóteles e Ptolomeu) e Sagredo (homem inteligente e culto sem partido na discussão). Neste livro, Galileu (apud NEVES, 2004, p. 35-37) acrescenta a seguinte passagem aos seus argumentos anteriores da experiência “imaginária” do navio¹¹:

[...]

(Salviati:) Parece-me, portanto, até aqui, que vós me haveis explicado os acidentes de um móvel sobre dois planos diferentes; e que no plano inclinado o móvel pesado espontaneamente desce e vai continuamente acelerando-se, e que, para retê-lo em repouso, é necessário usar força; mas sobre o plano ascendente é necessário força para fazê-lo avançar e também para pará-lo, e que o movimento que lhe foi impresso vai continuamente enfraquecendo, até que finalmente se anula. Dizeis ainda mais, que em um e em outro caso nasce uma diferença, dependendo se a declividade ou aclividade do plano for maior ou menor; de modo que a uma inclinação maior corresponde uma maior velocidade e, ao contrário, sobre o plano em aclive o mesmo móvel lançado pela mesma força move-se a uma distância maior quanto menor seja a elevação. Dizei-me agora o que aconteceria com o mesmo móvel sobre uma superfície que não estivesse nem em aclive nem em declive.

(Simplicio:) [...] parece-me, portanto, que ele deveria ficar naturalmente em repouso [...]

(Salviati:) Assim acredito, quando alguém colocasse parado, mas se lhe fosse dado um ímpeto em direção a alguma parte, o que aconteceria?

(Simplicio:) Continuará a mover-se em direção daquela parte.

(Salviati:) Mas com que espécie de movimento? Por um movimento continuamente acelerado, como nos planos em declive, ou por um movimento sucessivamente retardado, como nos aclives?

(Simplicio:) Eu não consigo perceber causa de aceleração nem de retardamento, não existindo nem declividade nem aclividade.

(Salviati:) Sim. Mas se não existisse causa de retardamento, muito menos deveria existir de repouso: quanto acreditais, portanto, que duraria o movimento do móvel?

(Simplicio:) Tanto quanto durasse o comprimento daquela superfície que não é nem subida, nem descida.

¹¹ Koyré (1991) nos informa que o primeiro registro da realização desta experiência é a do engenheiro francês Jean Gallé, a bordo de uma galera veneziana, no Mar Adriático, por volta de 1625, sendo reproduzida depois pelos físicos franceses Jean Baptiste Morin (1583-1656), no Rio Sena, em 1634, e Pierre Gassendi (1592-1655), em Marselha, em 1641.

(Salviati:) Portanto, se esse espaço fosse ilimitado, o movimento nele seria igualmente sem fim, ou seja, perpétuo?

(Simplicio:) Parece-me que sim, sempre quando o móvel fosse de matéria duradoura.

(Salviati:) Isso já foi suposto, quando se disse que se removiam todos os impedimentos acidentais e externos, e a fragilidade do móvel, nesse caso, é um dos impedimentos acidentais. Dizei-me então: qual estimais que seja a razão do movimento espontâneo daquela bola pelo plano em declive, e do movimento que se faz sem violência pelo plano em aclave?

(Simplicio:) Porque a tendência dos corpos pesados é a de mover-se para o centro da Terra, e, somente por violência, para cima em direção à circunferência; e a superfície inclinada é aquela que se aproxima do centro, enquanto o aclave afasta-se dele.

(Salviati:) Portanto, uma superfície que não fosse nem declive nem aclave deveria necessariamente ser, em todas as suas partes, igualmente afastada do centro. Mas existe alguma superfície assim no mundo?

(Simplicio:) Não faltam: existe aquela de nosso globo terrestre, se ela fosse, porém, polida, e não como é, áspera e montanhosa; mas existe aquela da água, quando está calma e tranqüila.

Apesar de tentar se libertar das teorias aristotélicas, Galileu ainda não possuía uma teoria de gravitação consistente. Deste modo, acreditava que os corpos ou tinham a tendência de permanecer em repouso ou em movimento circular uniforme. Ele não concebia um movimento retilíneo uniforme perpétuo, pois afirmava que um corpo não pode simplesmente *afastar-se de um lugar*, mas apenas mover-se *em direção a um lugar*. Assim, não há como mover-se em direção a um lugar onde é impossível chegar (COHEN, 1988, p. 155). Caso um móvel estivesse em uma horizontal, afastando-se do centro da Terra pela tangente a esta em algum ponto A, conforme representado na Figura 2, aos poucos sua velocidade diminuiria. Em B, por exemplo, por estar mais afastado do centro da Terra do que em A, o corpo teria a “inclinação” a descer de B para A (LUCIE, 1977, p. 131-132).

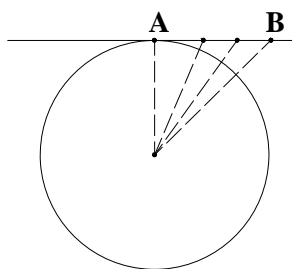


Figura 2 – Sobre um plano horizontal, um grave não permaneceria “indiferente” ao movimento ou ao repouso. Com efeito, em B ele está mais afastado do centro da Terra que em A. Ele teria portanto “inclinação” a descer de B para A.

Fonte: Adaptado de LUCIE (1977, p. 133)

De outra maneira, continuando com o raciocínio de Galileu, ao darmos um pequeno impulso a uma bola perfeitamente redonda, polida e rígida, sem impedimentos acidentais ou externos, sobre uma superfície livre de quaisquer irregularidades, centrada na Terra e rígida, esta continuaria perpetuamente em movimento circular uniforme, pois não se afasta e nem se aproxima do centro. É o que acontece com o navio que se move por um mar calmo e também com a pedra que está no alto do mastro. Ao ser solta, a pedra acompanha o movimento circular uniforme do navio enquanto cai. Sendo que estes dois movimentos não podem ser considerados contrários. Contrários seriam os movimentos de afastamento e aproximação do centro, o que não ocorre aqui. Como nós nos movimentamos circularmente junto com a pedra, não percebemos este movimento e a enxergamos em queda retilínea, indo de encontro à base do mastro do navio (NASCIMENTO, 1990, p. 36-39).

Falta agora responder a outra pergunta em que se apegavam os aristotélicos: Por que não somos atirados para fora da Terra, como ocorre numa plataforma em rotação? A explicação de Galileu, que se encontra no *Diálogo*, partia do princípio de que “[...] se um corpo em movimento circular se solta do vínculo que o mantém nesse movimento, é ao longo da tangente (e não do raio) que o corpo continuará a mover-se” (LUCIE, 1977, p. 137). A Figura 3 mostra isso no caso de uma pedra girando na extremidade de uma corda.

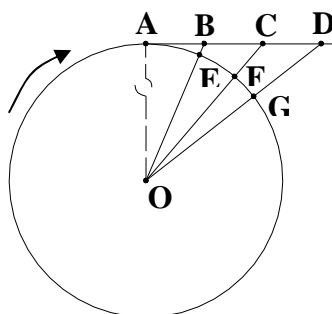


Figura 3 – Uma pedra gira, amarrada na extremidade de uma corda. Seguindo Galileu, diríamos que:

1. Se a corda quebra no instante em que a pedra passa por A, é ao longo da tangente que a pedra continua o seu movimento.
2. O afastamento da pedra em relação à circunferência, muito pequeno no início (BE, por exemplo), cresce mais rapidamente que o espaço percorrido pela pedra. Por exemplo, se $AD = 3AB$, $DG > 3BE$.

Fonte: Adaptado de LUCIE (1977, p. 137)

A este fenômeno de o corpo sair pela tangente, Galileu chamou de “tendência centrífuga”. Para ele a gravidade do corpo é capaz de anular este efeito, pois o seu movimento para o centro supera o distanciamento sofrido ao longo da tangente. De acordo com Martins, até aqui, a resposta qualitativa de Galileu está correta, no entanto, “[...] sob o ponto de vista

quantitativo, sua visão é totalmente inadequada, pois ele acreditava que, por menor que fosse essa gravidade, ela seria suficiente para reter os corpos na superfície da Terra” (MARTINS, 1994a, 199).

Mas este não foi o único erro de Galileu perpetuado no *Diálogo*. Outro muito lembrado surgiu na sua explicação da teoria das marés. O principal objetivo de Galileu ao escrever esse livro era responder às objeções contra o movimento da Terra. Boa parte do tempo, Galileu discutiu famosas experiências da torre e do navio, tentando mostrar “[...] que não se pode perceber efeitos do movimento de um sistema [se o movimento for retilíneo e uniforme] através de experimentos feitos dentro do próprio sistema” (MARTINS, 1994a, p. 206). No entanto, Galileu deixou para o final do livro a discussão das marés, por acreditar que estas “[...] são um fenômeno decorrente dos movimentos da Terra e que seria impossível de explicar se a Terra estivesse em repouso” (MARTINS, 1994a, p. 206). Era a “carta na manga” contra os defensores de Aristóteles e Ptolomeu. De acordo com Galileu, o período diário das marés é uma consequência de diferentes acelerações e retardamentos periódicos que sofrem as partes da Terra como resultado da composição de movimentos de sua rotação diurna e translação anual (MARICONDA, 2004; MARTINS, 1994a; NEVES, 2005a; NASCIMENTO, 1990).

O principal problema desta teoria é que ela prevê o fluxo e refluxo apenas uma vez por dia, e, na prática, na maior parte das regiões, ocorre o dobro do previsto. Galileu tentou salvar a teoria alegando que as condições locais (profundidade, tamanho, tipo de costa marinha, etc.) interferiam no processo reduzindo os fluxos e refluxos para uma média de 6 horas. Como era de se esperar, os seus críticos não concordaram com a sua defesa, o mesmo acontecendo com as incongruências encontradas no período mensal e anual das marés. Diante de tudo que foi exposto, concordamos com Martins (1994a, p. 210) ao dizer que:

[...] Galileu não conseguiu defender o sistema de Copérnico nem derrubar o de Ptolomeu. A revolução copernicana não se completou com Galileu. Se for possível indicar uma época e um nome, deve-se dizer que a revolução copernicana se completou com Newton, 35 anos depois. Mas isso é uma outra história.

Galileu fez o que pôde dentro das preocupações e limitações de seu tempo. Mas o seu exemplo é muito ilustrativo para mostrar que na história da ciência não existem atalhos. Teorias triunfantes, como a de Aristóteles e Ptolomeu, não são descartadas sem um lento e profundo amadurecimento das idéias novas. Felizmente, “os deuses da ciência” planejaram

um substituto a altura de Galileu, e no ano de sua morte, natal de 1642, nasce Isaac Newton¹². Apesar de ter tido uma infância conturbada, em 8 de julho de 1661, ainda com dezoito anos, é matriculado na universidade de Cambridge. Para compreendermos melhor o que veio depois, vejamos alguns aspectos da Obra de dois autores que, a nosso ver, além dos já comentados nas seções anteriores, contribuíram para as profundas reflexões de Newton sobre a relação entre força e movimento. A saber: Kepler e Descartes.

3.5 AS LEIS DO MOVIMENTO PLANETÁRIO DE KEPLER

A dívida de Newton para com Kepler deve-se principalmente às suas leis do movimento planetário que explodiram, contra a vontade de Kepler, com o dogma pitagórico-platônico do movimento circular. Kepler era um astrônomo teórico, por não possuir uma boa visão, dedicava-se na análise de dados coletados por outros astrônomos. Tinha uma personalidade mística aliada a um grande conhecimento matemático. Ao ter contato com as idéias de Copérnico pelas aulas de Michael Maestlin, um dos primeiros astrônomos a defender o sistema copernicano, abraçou-as de imediato. Afinal, elas se encaixavam com as suas concepções do Universo, principalmente com a teoria do fogo central imaginada por Filolau de Crótona¹³ (MEDEIROS, 2002).

O seu primeiro livro, *Precursor dos Tratados Cosmográficos, contendo o Mistério Cósmico das admiráveis proporções entre as órbitas celestes e as verdadeiras e corretas razões dos seus Números, Grandezas e Movimentos Periódicos*, conhecido popularmente apenas como *Mistério Cosmográfico*, foi publicado em 1596. A obra era uma defesa clara e aberta do sistema copernicano. Para mostrar que ele fazia sentido, que havia uma ordem divina subjacente ao mesmo, Kepler, sob forte influência neo-platônica, afirmava que as distâncias dos planetas até o Sol, neste sistema, poderiam ser determinadas pelos cinco poliedros regulares de Platão. Ele supôs que a órbita de cada planeta estava circunscrita sobre um sólido e inscrita em outros seguintes, deste modo, os valores daquelas órbitas não seriam aleatórios,

¹² “A rigor, somente o protestantismo inglês permitiu esta formidável coincidência numerológica, pois o calendário inglês, por divergências teológicas com o Catolicismo, estava dez dias atrasados em relação ao calendário gregoriano oficial do continente europeu, no qual era 4 de Janeiro de 1643 quando Newton nasceu” (PONCZEK, 2002, p. 101).

¹³ “O motivo para colocar um fogo no centro do universo, e não a Terra, parece ter sido filosófico: o centro seria o lugar mais nobre, e o fogo é mais nobre do que a terra. Filolau supunha que somente o fogo central era gerador de energia. O Sol, segundo ele, era de natureza vítrea e porosa, capaz de absorver a luz invisível do Olimpo e do fogo central, tornando-se visível aos nossos olhos” (LOPES, 2001, p. 33).

mas guardariam entre si uma relação estética e harmoniosa. Mas, as órbitas de Mercúrio e de Júpiter não encaixavam na sua teoria, então Kepler atribuiu essas discrepâncias aos erros nas tabelas de Copérnico. Convicto de que com dados melhores poderia encontrar a ordem implícita na organização do Universo, aceitou o convite de Tycho Brahe, o melhor astrônomo observacional de seu tempo, para trabalhar em seu observatório em Praga, aonde chegou em janeiro de 1600 (BASSALO, 1996; COHEN, 1988; LUCIE, 1977; MEDEIROS, 2002).

Tycho foi criado por um tio rico, almirante da armada dinamarquesa. Este morreu de pneumonia após salvar o rei Frederico II, de seu país, que havia caído em um lago gelado. Então, junto com a fortuna do tio, Tycho herdou a gratidão do rei, que, alguns anos depois, lhe ofereceu uma ilha, situada entre a Dinamarca e a Suécia, e muitos recursos materiais para construir um castelo e um observatório, do modo que desejasse. Assim, foi construído Uraniborg, o “Castelo dos Céus”, um imenso palácio de três andares especialmente projetado por um arquiteto, sob supervisão do próprio Tycho para ser o maior observatório astronômico do mundo. Ele tinha uma ótima biblioteca e uma grande quantidade de instrumentos de madeira e bronze, como quadrantes, astrolábios, réguas de paralaxe, esferas armilares e relógios dos mais precisos. Tudo gigantesco e em dobro (MEDEIROS, 2001). Ao falar sobre Tycho, Lucie (1977, p. 98, grifo do autor) afirma que:

Graças a seus instrumentos e às suas refinadas técnicas de observação (que incluíam, pela primeira vez, correções para a refração atmosférica), Tycho Brahe levantou as posições de 777 estrelas e dos cinco planetas, **com maior precisão que quatro minutos de arco**. Para que se aprecie melhor essa proeza, é bom recordar que essas observações eram feitas a **olho nu**.

Segundo Medeiros (2001), embora as suas medidas mostrassem enormes falhas nos cálculos das posições dos astros efetuados por Ptolomeu, Tycho relutava em aceitar o modelo de Copérnico na íntegra. Como alternativa, inspirado no antigo modelo de Heráclides do Ponto, criou o seu. Neste, os planetas giravam em torno do Sol, não mais da Terra, como queria Copérnico, no entanto, o Sol e os planetas com ele, giravam todos juntos ao redor da Terra. Após anos de observações, o seu modelo provou ser mais preciso do que o de Copérnico, mas, mesmo assim, havia problemas com os dados observacionais da órbita de Marte que não encaixavam com a sua teoria. Após estabelecer residência em Praga, surgiu a idéia de se aproveitar dos dotes matemáticos de Kepler para resolver estes problemas, convidando-o para trabalhar em seu observatório. Sobre esta parceria, Lucie (1977, p. 102, grifo nosso) tece o seguinte comentário:

Os dois homens eram diferentes em quase todos os aspectos: Tycho era nobre, Kepler plebeu; Tycho era rico, Kepler paupérrimo; Tycho tinha uma saúde exuberante, gostava de festas e de banquetes, Kepler era de saúde periclitante e tinha um temperamento hipocondríaco. Havia, no entanto alguns traços comuns entre eles: ambos eram irascíveis, cáusticos, sempre dispostos a discussões violentas; ambos eram teimosos; **ambos tinham paixão pela Astronomia e tinham uma brilhante inteligência.**

Ainda de acordo com Medeiros (2001), após a morte de Tycho, em 1601, Kepler foi nomeado o novo matemático imperial, pelo imperador Rodolfo II, apossando-se da maior e mais cuidadosa coleção de observações astronômicas da época, como era de seu interesse. Ao analisar os dados da órbita de Marte, percebeu que o Sol estava situado em um ponto a uma distância de um terço do centro do círculo e que a velocidade de Marte variava ao longo de sua órbita, sendo mais rápida quando o planeta estava próximo do Sol e mais lenta quando estava mais afastado do mesmo. Preso às suas convicções platônicas, Kepler indagou-se: como poderia o movimento de Marte ser descrito por algum tipo de movimento uniforme? Supôs, desta maneira, “[...] que o planeta tinha uma velocidade angular uniforme em relação a um equante E, simétrico do Sol S em relação ao centro O da órbita” (LUCIE, 1977, p. 106), conforme mostra a Figura 4.

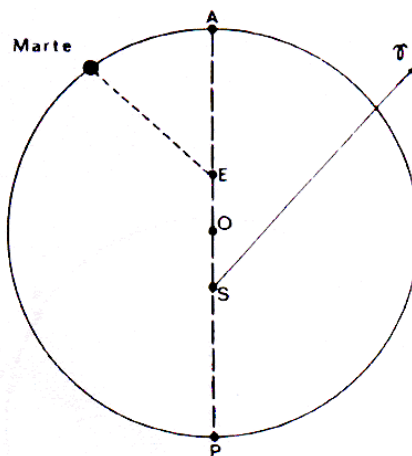


Figura 4 – A órbita de Marte nas primeiras tentativas de Kepler. A órbita é circular, excêntrica em relação ao Sol S, o planeta se move com velocidade angular uniforme em torno do equante E. A e P são respectivamente o afélio e o periélio.

Fonte: LUCIE (1977, p. 106)

Das doze posições conhecidas de Marte, quatro coincidiam exatamente com a circunferência centrada no meio O de SE, sete tinha uma precisão da ordem de dois a três minutos de arco – dentro dos limites de precisão das observações de Tycho Brahe – e uma divergência de oito minutos. Vejamos, nas palavras de Lucie (1977, p. 102, grifo nosso), as considerações de Kepler sobre este erro:

Oito minutos de arco: pouco mais de um oitavo de grau! Um Ptolomeu, um Copérnico, poderiam ter desprezado essa pequena diferença. Mas, dizia Kepler, “se a divina bondade nos deu um observador como Tycho Brahe, devemos agradecer essa dádiva e fazer bom uso dela”. **Tycho Brahe nunca poderia ter errado oito minutos.**

Como o equante violentava o dogma platônico dos movimentos celestes, Kepler já se sentia incomodado em ter que utilizá-lo. Da mesma maneira, ele se recusava a “[...] utilizar epiciclos, artifícios destinados a salvar as aparências, que consistiam em círculos menores centrados nas órbitas circulares dos planetas. [...] criados pelo Hiparco [...] haviam sido fartamente utilizados por Ptolomeu [...] e até mesmo pelo Copérnico” (MEDEIROS, 2002, p. 31). Deste modo, Kepler viu-se forçado a buscar outra solução.

Abandonando, provisoriamente, a perseguição à órbita de Marte, “[...] voltou a uma das suas primeiras idéias fixas: qual é a relação que existe entre a distância de um planeta ao Sol e sua velocidade?” (LUCIE, 1977, p. 107). Após uma sucessão de raciocínios errados, e por uma “[...] fantástica coincidência que fez com que todos esses erros se cancelassem no final [...]” (LUCIE, 1977, p. 109), em 1602, dois anos após os primeiros contatos com os dados observacionais de Tycho Brahe sobre a órbita de Marte, observou que o planeta varria áreas iguais a uma velocidade constante. Ali estava o movimento uniforme que procurava: – o movimento de varredura das áreas percorridas por um raio que saia do Sol até o planeta. Essa foi a 1ª lei que descobriu e que veio a ser denominada, posteriormente, de sua 2ª lei ou lei das áreas (MEDEIROS, 2002). Deixemos que Lucie (1977, p. 109-110, grifo do autor) nos faça um resumo do que veio depois:

Tendo descoberto a relação entre velocidade e posição de um planeta, voltou ao problema da órbita de Marte.

Três anos seriam necessários para resolver o problema, três anos de intenso labor em que vemos Kepler hesitar várias vezes na iminência da descoberta, recuando cada vez para refugiar-se em estranhas obsessões, perseguindo uma realidade que lhe escapava e mesmo no final, com a solução nas mãos – uma elipse – não sabendo reconhecê-la e recomeçando tudo de novo e sendo novamente surpreendido com a volta da elipse pela “porta dos fundos”, conforme sua própria expressão.

Finalmente em 1605 Marte estava vencido e Kepler tinha obtido o que chamamos hoje a sua 1ª lei ou **lei das órbitas**:

As órbitas dos planetas são elipses, com o Sol ocupando um dos focos.

Mais um duro golpe foi desferido na teoria aristotélica, “[...] depois do geocentrismo, depois do movimento uniforme, o último dos mitos aristotélicos, o mito pseudo-sagrado da circunferência devia também ser abandonado” (LUCIE, 1977, p. 107). Em 1609, Kepler escreveu o livro *Astronomia Nova*, onde apareciam as duas primeiras leis do movimento planetário. Mas, essas leis não satisfaziam a Kepler, “[...] faltava-lhe ainda descobrir as famosas ‘harmonias’ que perseguia desde a juventude e que, segundo ele, deviam necessariamente existir no Universo” (LUCIE, 1977, p. 110).

Como a tentativa de construir o Universo baseado nos cinco sólidos platônicos não se mostrou frutífera, Kepler decidiu perseguir uma abordagem pitagórica ainda mais fundamental, ou seja, tentou construir o Universo a partir das harmonias musicais da escala pitagórica¹⁴. Até chegar à solução final, Kepler verificou se existia harmonia nas razões entre: os períodos de revolução dos planetas; os volumes dos planetas; as menores e maiores distâncias de cada planeta; as velocidades extremas dos planetas; entre as variações de tempo necessárias para o planeta percorrer uma unidade de comprimento de sua órbita, etc (MEDEIROS, 2003). Depois de anos de tentativas, Kepler (apud LUCIE, 1977, p. 110-111, grifo nosso) diz ao mundo:

[...] após achar os verdadeiros intervalos das esferas pelas observações de Tycho Brahe, graças a um trabalho contínuo e demorado, finalmente a razão certa entre os períodos e [os raios das] esferas, embora tardiamente... se apresentou e, se você quiser saber a data exata, foi concebida mentalmente em 8 de março deste ano 1618, porém submetida a cálculos infelizes e rejeitada como falsa, finalmente chamada de volta em 15 de maio, com nova tentativa; **rasgaram-se então as trevas do meu espírito diante da prova magna, fruto do meu trabalho e das minhas meditações de 17 anos sobre as observações de Brahe**, e tal foi o impacto da descoberta que no início pensei estar sonhando, e que eu incluía a tese entre as minhas hipóteses.

É porém absolutamente certo e exato que a razão entre os períodos de dois planetas quaisquer é precisamente igual à razão entre as potências $3/2$ [dos raios] das esferas.

Finalmente, Kepler descobriu a sua 3ª lei, ou lei harmônica, que em termos modernos se enuncia: “A razão entre os quadrados dos períodos (T) e os cubos dos semi-eixos maiores (a)

¹⁴ Atribui-se a Pitágoras a construção de uma escala de notas a partir da divisão de uma corda em frações de números inteiros. Ou seja, “[...] a harmonia entre dois sons musicais (de um monocórdio, por exemplo) depende de proporções numéricas simples, como $1/2$, $2/3$ e $3/4$. Essa relação entre número e som parece ter sido o ponto de partida que levou os pitagóricos a tratarem os números como a base ou modelo de tudo. Pensaram que essa relação numérica simples não era privativa da música, deveria ser um princípio fundamental da natureza e que poderia se estender a todos os fenômenos” (LOPES, 2001, p. 27).

das órbitas dos planetas é constante, ou: $T^2/a^3 = \text{Cte}$ ”. Ao analisar esta lei, Cohen (1988, p. 176-177, grifo nosso) nos esclarece:

O significado desta terceira lei é que é uma lei de necessidade; isto é, diz que é impossível em qualquer sistema de satélites que estes se movam a qualquer velocidade ou a qualquer distância. Uma vez escolhida a distância, a velocidade está determinada. **No nosso sistema solar esta lei implica que o Sol forneça a força que governa e mantém os planetas em movimento. De nenhum outro modo podíamos explicar que a velocidade se relacione com tanta precisão com a distância do Sol.**

Mas, segundo Medeiros (2003), Kepler não parou por aí, depois de entender a cinemática do sistema planetário, buscou respostas para a sua dinâmica, o que era uma novidade na astronomia. De início, quando percebeu que a velocidade dos planetas variava ao longo de suas órbitas, imaginou que espíritos arrastassem os planetas ao longo das suas trajetórias, publicando esta teoria, em 1596, no seu primeiro livro (*Mistério Cosmográfico*). Entre 1619 e 1621, cerca de vinte e cinco anos depois, ele substituiu aqueles espíritos pela idéia de uma força que emana do Sol como tentáculos e arrasta os planetas. Afirmando que esta força repele o planeta quando este está próximo do Sol, reduzindo a sua velocidade, e o atrai quando ele está mais afastado, o que justifica as mudanças de velocidades planetárias. Chegou à conclusão de que uma força com essas características era, sem dúvida, a força magnética. Bassalo (1996, p. 57, grifo do autor), complementando a informação, diz:

Assim, influenciado pelo físico inglês William Gilbert (1544-1603), que havia mostrado no livro *De Magnete*, de 1600, ser a Terra um imenso imã (também nesse livro, Gilbert defendeu a infinitude do Universo), Kepler supôs que o Sol exercia uma influência magnética sobre os planetas, a chamada **anima motrix**. Como a função dessa força magnética é mover os planetas e como estes se situam quase todos no plano da eclíptica, Kepler admitiu que a **força solar** não agia em todas as direções e sim, apenas, na direção do raio eclíptico, e que a mesma era proporcional ao inverso da distância. Essas idéias foram apresentadas em seu livro *Epítome da Astronomia Copernicana*, escrito em três partes, e publicadas naquele período.

Mais uma vez a História mostra-nos que o ser humano sempre comete erros e tem o seu limite, por mais genial que seja. Kepler não fugiu à regra. Ele não foi capaz de explicar o porquê dos planetas possuírem órbitas elípticas, perfazendo áreas iguais em tempos iguais. Além de não nos dizer por que é válida a relação particular distância-período que ele descobriu. Lucie (1977, p. 113-114, grifo nosso), refletindo sobre as razões do insucesso de Kepler, dá a seguinte explicação:

É também verdade que Kepler não teve forças suficientes para elevar-se, das três leis, até a teoria geral que as contém. Várias são as razões do seu insucesso: em primeiro lugar, “geometrizou” a teoria errada, a dos poliedros regulares. Em segundo lugar, **não poderia ter passado das leis à teoria sem uma Física do movimento**. E a física de Kepler, com seu Universo finito, **seu conceito errado de forças como produtoras de velocidade e não de acelerações, era ainda aristotélica**; e finalmente, admitindo-se que esses obstáculos fossem vencidos, **Kepler não possuía a desenvoltura matemática necessária para conseguir aquele objetivo**.

De modo que Kepler não poderia ter chegado à *Lei da Gravitação Universal*. **Em contrapartida podemos nos perguntar – gratuitamente – se Newton, sem as Leis de Kepler, a teria descoberto.**

Acreditamos que não, Kepler passou boa parte de sua vida envolvido nas análises dos dados de Tycho Brahe até encontrar as suas três leis. Do mesmo modo, Newton, mesmo apoiando-se nas leis de Kepler, precisou de alguns anos para desenvolver a versão final da Lei da Gravitação Universal. O que nos leva a deduzir que Newton não daria conta de fazer a sua parte mais a de Kepler sozinho. Jamais saberemos.

3.6 A FILOSOFIA NATURAL DE DESCARTES

A decadência da filosofia natural de Aristóteles abriu caminho para que novas maneiras de pensar o mundo se firmassem. Neste cenário, surgiu a figura de René Descartes, essencialmente racionalista, acreditava que a origem da natureza estava na perfeição divina, sendo uma máquina perfeita regida por leis matemáticas exatas. Em sua obra *Discurso do Método* (1637), propõe um método universal inspirado no rigor matemático e em suas longas cadeias de razão para alcançar o conhecimento verdadeiro. E, em um dos seus apêndices, *A Geometria*, mostrou como escrever curvas geométricas em termos de equações algébricas, e vice-versa. Estabelecendo, assim, “[...] um novo ramo da Matemática, a Geometria Analítica, de fundamental importância para o desenvolvimento da Física e, em particular, da Mecânica. Orgulhoso, afirmou: *Toda a minha Física nada mais é que Geometria*” (PONCZEK, 2002, p. 88). Em 1644, publicou os *Princípios da Filosofia*, dividido em quatro partes: *Os princípios do conhecimento humano*; *Os princípios das coisas materiais*; *Do mundo visível* e *A Terra*. Na primeira parte, as suas doutrinas filosóficas são formalmente repetidas, nas outras três, ele faz uma ampla tentativa de dar uma explicação lógica dos fenômenos naturais em um único sistema de princípios mecânicos. Para Barra (2003, p. 300):

Os Princípios podem ser encarados como a mais pretensiosa tentativa empreendida nas primeiras décadas do século XVII de suplantar o aristotelismo escolástico enquanto uma explicação abrangente da totalidade dos mecanismos causais presente na natureza.

Descartes não aceitava a teoria do movimento natural de Aristóteles, para ele a matéria é desprovida de inteligência e incapaz de decidir qual caminho seguir. Da mesma maneira, recusava as chamadas “qualidades ocultas” da matéria, assim como qualquer forma de “simpatia ou antipatia”, que eram argumentos utilizados por alguns para explicar a gravidade e o magnetismo. Na concepção do filósofo francês, a matéria é caracterizada exclusivamente pela extensão (comprimento, largura e profundidade) e pelo movimento. A extensão e o movimento das partículas ou corpúsculos de matéria são qualidades primárias (inerentes à própria matéria) e todo o resto – cor, sabor, frio, quente, som... – são qualidades secundárias, derivadas em consequência dos efeitos que as qualidades primárias provocam nos observadores.

Entre estas duas qualidades, “[...] só seriam confiáveis as idéias ‘claras e distintas’ como a da extensão, intimamente ligada à matemática - a geometria. Os sentidos ou ‘acidentes’ seriam enganadores, mesmo que existissem em nossa experiência diária” (SAPUNARU, 2006, p. 61). Ainda de acordo com Descartes, o espaço é totalmente preenchido por matéria contínua, cuja densidade é sempre a mesma em todas as direções. Não há átomos e nem vácuo. Ele argumentava que para Deus nada é impossível, então Ele pode dividir a matéria indefinidamente. O movimento e a divisibilidade da matéria são responsáveis por “[...] todas as propriedades que percebemos distintamente na matéria do universo, cuja diversidade de formas depende do movimento local de suas partes” (BARRA, 2003, p. 302). Movimento para Descartes é apenas aquele que se realiza de um lugar a outro, ele não considerava o movimento como um processo de mudança, como os escolásticos faziam. Sobre a sua definição de movimento, ele nos diz:

Mas se em vez de ficarmos naquilo que não tem outro fundamento senão a utilização comum, nós desejamos saber o que é o movimento segundo a verdade, nós diremos, a fim de lhe atribuir uma natureza que seja determinada, que **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**. Por um corpo, ou melhor, por uma parte da matéria eu quero dizer tudo o que é transportado junto ao que quer que seja talvez composto de várias partes que, no entanto empregam sua agitação para fazer outros movimentos. E eu digo que ele [o movimento] é o transporte e não a força ou a ação que transporta a

fim de mostrar que o movimento está sempre na coisa que se move, e não naquele que causa o movimento; pois me parece que não se tem o hábito de distinguir essas duas coisas com bastante cuidado. Além do mais, **eu compreendo que ele [o movimento] é uma propriedade do corpo que se move e não uma substância: assim como a figura é uma propriedade da coisa que é figurada e o repouso [é uma propriedade] da coisa que está em repouso** (DESCARTES apud SAPUNARU, 2006, p. 70, grifo nosso).

Mas, se a matéria é provida de apenas qualidades inertes, quais seriam as causas dos movimentos dos corpos para a filosofia cartesiana? Descartes afirmava que o movimento teria duas causas distintas: a causa primária e universal, que produz geralmente todos os movimentos que existem no mundo e as causas secundárias e particulares, que fazem com que cada parte da matéria adquira o movimento que antes não possuía. A causa primeira não seria outra senão “Deus, que pela sua Onipotência criou a matéria com o movimento e o repouso, e que conserva agora no universo, por seu concurso ordinário, tanto movimento e repouso quanto colocou nele ao criá-lo”¹⁵ (DESCARTES apud BARRA, 2003, p. 306). A respeito das causas secundárias, Descartes (apud BARRA, 2003, p. 306) assim se expressa:

[...] em virtude de que Deus não está absolutamente sujeito a mudanças e que ele age sempre da mesma forma, podemos chegar ao conhecimento de certas regras, que eu chamo de leis da natureza, e que são as causas segundas dos diversos movimentos que observamos em todos os corpos; o que as torna muito dignas de consideração aqui.

Em outras palavras, desde o momento da Criação, a quantidade de movimento total do Universo se conserva, seguindo certas leis criadas por Deus. Estas leis são as seguintes:

[Primeira Lei:] **que cada coisa em particular continua no mesmo estado tanto quanto lhe seja possível, e que jamais ela o modifica a não ser pela colisão com outras coisas.** Assim, observamos cotidianamente que, quando alguma parte dessa matéria é quadrada, ela permanece sempre quadrada, se não sobrevém algo de outra parte que mude sua figura; e que, **se está em repouso, ela não começa a se mover por si mesma.** (...) De modo que, **se um corpo tenha começado a mover se,** devemos concluir que continuará a mover-se em seguida, e que **ele jamais interrompe seu movimento por si mesmo.**

[Segunda Lei:] **que cada parte da matéria, em sua particularidade, não tende jamais a continuar a se mover segundo linhas curvas, mas segundo linhas retas,** ainda que várias de suas partes sejam constantemente obrigadas a se desviar, porque elas encontram outras em seus caminhos e

¹⁵ Nesta fala de Descartes, está o germen da definição da conservação da quantidade de movimento, que ainda não está completa, pois não existe grandeza vetorial em sua mecânica.

porque, tão logo um corpo se move, forma-se um círculo ou um anel de toda a matéria que é movida conjuntamente.

[Terceira Lei:] que, se um corpo que se move encontra-se com um outro e possui menos força para continuar a se mover em linha reta do que esse último para resistir-lhe, então ele perde sua determinação sem nada perder de seu movimento; e que, se ele possui mais força do que o outro, ele move consigo esse outro corpo e perde tanto de seu movimento quanto ele atribui ao outro (DESCARTES apud BARRA, 2003, p. 306-307).

As duas primeiras leis juntas podem ser consideradas como o “princípio de inércia” de Descartes. Que avançou em relação ao “princípio de inércia” de Galileu ao afirmar que a matéria tende a se movimentar em linha reta¹⁶, mas ainda está distante ao de Newton, por ainda não relacionar força com a mudança do movimento. Corroborando o nosso comentário, vejamos o que pensa Jammer (apud NEVES, 2005a, p. 175, grifo nosso) sobre este assunto:

Sobre o terreno do princípio de inércia, Descartes pensava que fosse possível eliminar a força enquanto conceito físico isolado. Ele sustentava que todos os fenômenos físicos deviam ser deduzidos de somente duas suposições fundamentais de tipo cinemático: a lei da conservação da quantidade de movimento – que, para ele, não era um corolário do princípio de inércia, mas sim o seu real conteúdo físico – e a sua teoria dos vórtices de éter girantes. De fato, refutando toda possibilidade de ação à distância, Descartes construiu a teoria dos vórtices para render inteligibilidade aos distantes movimentos celestes. Ele sustentava que assumir uma ação à distância para explicar estes movimentos equivalia a atribuir a partículas materiais uma forma de conhecimento e a torná-las efetivamente divinas, “quase como se pudessem ser conscientes, sem intermediações, do que ocorre em lugares muito distantes daquelas.” **O conceito de força não encontrava lugar na física de Descartes...**

Neste caso, qual é o significado atribuído por Descartes à expressão “força” que aparece na sua terceira lei. O próprio filósofo nos responde:

[...] é preciso observar que a força com que um corpo age sobre um outro ou resiste à sua ação consiste apenas nisto: cada coisa persiste tanto quanto possa no mesmo estado em que se encontra, em conformidade com a primeira lei que expus acima. De modo que um corpo que se encontra unido a um outro corpo possui alguma força para impedir que seja separado desse outro; e que, quando ele está separado, possui alguma força para impedir que seja ligado a outro; e também que, quando ele está em repouso, possui uma força para permanecer nesse repouso e para resistir a tudo aquilo que pudesse fazê-lo mudar. Da mesma

¹⁶ “Sobre a razão por que Deus conserva o movimento em linha reta e não em qualquer outra trajetória, Descartes apenas declara que “ele conserva o movimento por meio de uma operação muito simples”; o que pode sugerir que a trajetória retilínea seja, para o autor, a mais simples das trajetórias possíveis” (BARRA, 2003, p. 307).

forma, quando ele se move, possui uma força para continuar a se mover com a mesma velocidade e para o mesmo lado. Mas deve-se avaliar a quantidade dessa força pela grandeza do corpo no qual ela se encontra e pela superfície através da qual esse corpo se encontra unido a um outro, bem como pela velocidade do movimento e as formas contrárias em que os vários corpos diferentes se chocam (DESCARTES apud BARRA, 2003, p. 311-312, grifo nosso).

Complementando, Gabbey (apud GAUKROGER, 1999, p. 305-306, grifo nosso) resume o significado da palavra “força” na época de Descartes:

Tomando a dinâmica do século XVII como um todo, na medida em que isso é permissível, pode-se dizer que **a grande maioria de seus praticantes entendia a força, em seu sentido funcional, como o estado concomitante de um corpo – expresso em termos de toda a sua velocidade e massa corporal** – passível de ser identificado com a capacidade relativa deste corpo de superar uma força de resistência entendida de maneira similar, fosse ela potencial ou real, independentemente da velocidade e da massa corporal em cujos termos se expressasse a força contrária. As interações dos corpos eram vistas como competições entre forças opostas, sendo as maiores as vencedoras e as menores as perdedoras: uma concepção de origem evidentemente antropomórfica.

Concluimos que, na maioria das vezes, quando Descartes atribui “força” aos corpos, sobretudo, “força de resistência”, é somente uma “forma de falar”, isto “[...] não significa atribuir qualquer coisa real aos corpos que estivesse abaixo ou acima do fato que Deus conserva seu movimento e, por conseguinte, eles obedecem a uma lei de conservação do movimento” (GARBER apud BARRA, 2003, p. 314). Outras vezes, a palavra “força” é empregada como a medida da quantidade de movimento do corpo – “ $m.v$ ” – e vice-versa. Não há, ainda, o conceito de força como interação entre dois corpos. Uma dúvida natural aos iniciantes na filosofia mecânica de Descartes seria: Se a transferência de movimento se dá apenas por contato, como explicar as ações entre dois corpos à distância, tal como ocorre com os ímãs e com os planetas em órbita do Sol? Para responder a esta questão, Descartes teve que criar a sua própria cosmologia. Segundo Ponczek (2002, p. 90), ele imaginou:

[...] um universo infinito inicialmente constituído por um único bloco sólido de uma matéria parecida com o cristal, sem luz, estrelas, cometas ou planetas, no qual Deus provoca uma imensa quantidade de turbilhões (vórtices) giratórios em pontos distribuídos ao acaso e ao largo de toda a sua extensão. Os turbilhões girariam tais quais liquidificadores, em grandes velocidades, em torno de seus centros, fragmentando a matéria sólida e criando três tipos de elementos: o primeiro elemento seria uma espécie de matéria incandescente, constituída por pequenas partículas girando a altas velocidades, produzindo um “fogo” central; o segundo elemento seria

constituído por partículas maiores e arredondadas, que girariam como um fluido em torno do “fogo” central, e o terceiro elemento seria constituído por partículas sólidas e mais pesadas.

Dando seqüência ao raciocínio de Descartes, devida à rotação da matéria, as partículas do primeiro elemento concentram-se no centro de grandes turbilhões, de dimensões semelhantes ao nosso sistema solar, originando as estrelas. O segundo elemento é composto por esferas menores e outras maiores em uma gradação contínua, ocupando quase todo o volume do turbilhão, sendo que as esferas menores ficam mais próximas do centro. As partes que compõem os turbilhões não giram com a mesma velocidade, esta diminui do centro para as bordas (MARTINS, 1994b).

Com o tempo, pedaços ou blocos do terceiro elemento podem desprender-se do centro, ficando enganchados em torno do fogo central, criando uma espécie de crosta, fazendo com que a estrela torne-se opaca. Em conseqüência desta opacidade, o redemoinho ao seu redor diminui gradualmente de rotação. Deste modo, ela é capturada por outro turbilhão vizinho, no centro do qual existe outra estrela, dependendo de sua consistência e do movimento que adquirir, pode tornar-se um planeta ou um cometa. Se ela parar a certa distância do centro, girando juntamente com a matéria do segundo elemento em torno da estrela central, se transformará em um planeta. Caso contrário, se ela não ficar presa ao turbilhão, por ser muito sólida não conseguindo ser arrastada pelo movimento do segundo elemento, se transformará em um cometa (MARTINS, 1994b). A órbita elíptica dos planetas pode ser explicada da seguinte maneira:

Cada planeta gira em torno da estrela central (ou do Sol) em uma região na qual as partículas do segundo elemento possuem o mesmo grau de “força” que o planeta. Se o planeta se aproxima um pouco mais do centro, ele entra em contato com partículas menores e que possuem uma agitação mais forte. Adquire, então, um movimento maior, e se afasta do centro. Mas, ao se afastar do centro, entra em uma região na qual entra em contato com partículas maiores, e mais lentas, que também tornam o seu movimento menor. Então, ele perde movimento e se aproxima novamente do centro. Assim, além de girar em torno do centro, o planeta pode se aproximar e afastar do centro, oscilando em torno de uma distância média. Este seria um dos modos de explicar por que motivo a órbita dos planetas em torno do Sol não é exatamente circular, mas elíptica (MARTINS, 1994b, p. 84).

Para explicar a origem de todo o sistema solar, Descartes imagina que existia mais de dez turbilhões próximos uns dos outros, de diferentes tamanhos. Aos poucos a estrela central do

turbilhão menor, ao ficar opaca, foi capturada pelos turbilhões próximos, e assim, sucessivamente, até que formasse todos os planetas. Martins nos presenteia com um resumo da cosmogonia cartesiana – também conhecida como “Teoria dos Vórtices” ou “Teoria dos Turbilhões” –, mostrando as causas do seu sucesso:

A proposta de Descartes adota a teoria de Copérnico, colocando a Terra como um dos planetas do sistema solar; considera cada estrela como sendo semelhante ao Sol e podendo ter também planetas girando ao seu redor; explica a coincidência dos movimentos de todos os planetas serem no mesmo sentido; explica as diferenças de períodos dos movimentos dos diferentes planetas, levando em conta que o turbilhão tem diferentes velocidades a diferentes distâncias do centro; explica os cometas, como planetas que passam de um turbilhão para outro; explica as manchas solares; explica a formação de planetas e de satélites; explica fenômenos que ocorrem na Terra, como vulcões, terremotos e formação do relevo terrestre. É uma teoria muito mais rica do que qualquer das propostas antigas, e os mecanismos propostos para cada fenômeno são bastante compreensíveis e aceitáveis, para a época. Por tudo isso, o modelo cosmogônico de Descartes teve enorme sucesso, no século XVII (MARTINS, 1994b, p. 86).

Apesar de todo este sucesso, Martins (1994b, p. 86) afirma que a “Teoria dos Turbilhões” tinha um grave defeito apontado por Newton. Ela não tinha uma base matemática, embora o próprio Descartes fosse um importante matemático, sua física era qualitativa. Isso deixou muitos pontos fracos em seu modelo dos turbilhões. Mas, por ironia do destino, o maior crítico da filosofia mecânica cartesiana, Isaac Newton, foi quem deu realidade ao sonho de Galileu, Kepler e Descartes de completar a revolução científica iniciada por Copérnico.

3.7 A CONSOLIDAÇÃO DA REVOLUÇÃO COPERNICANA COM NEWTON

3.7.1 ALGUNS PENSAMENTOS ANTERIORES AO PRINCIPIA

Cento e quarenta e quatro anos depois da publicação do *Das Revoluções dos Corpos Celestes* (Copérnico); cinquenta e cinco anos depois da publicação do *Diálogo sobre os dois Principais Sistemas do Mundo, o Ptolomaico e o Copernicano* (Galileu); sessenta e seis anos depois da duplicação do *Epítome da Astronomia Copernicana* (Kepler) e quarenta e três anos depois da publicação dos *Princípios da Filosofia* (Descartes), Isaac Newton publica, em 1687, a primeira edição dos *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*. Apoiando-se sobre os ombros de seus antecessores, ele tem o caminho aberto para dar a sua contribuição para o desenvolvimento da Ciência. Parafraseando Rutherford (apud COHEN, 1988, p. 136):

Não está na natureza das coisas que um só homem faça repentinamente uma descoberta tremenda; a ciência avança passo a passo e todos dependem do trabalho dos seus predecessores. Quando é anunciada uma descoberta súbita e inesperada – como um raio caído dos céus – podeis sempre ter a certeza de que ela tomou um vulto pela influência mútua que torna possível o maravilhoso avanço da ciência. Os cientistas não dependem da idéia de um só homem, mas da sabedoria combinada de milhares de homens, todos debruçados sobre o mesmo problema e cada um acrescentando um pouco de si ao grande edifício do conhecimento que se vai erguendo a pouco e pouco.

Embora todos os esforços dos pensadores anteriores para a mecânica aristotélica ser totalmente suplantada, ainda faltavam respostas quantitativas convincentes para as órbitas fechadas dos planetas (elípticas ou circulares) e para a queda dos corpos. Newton sempre será lembrado por ter sido o cientista que conseguiu montar as peças deste grande enigma. Segundo Cohen (1988, p. 185):

A publicação dos *Principia* de Isaac Newton, em 1687, foi um dos acontecimentos mais notáveis de toda a história da física. Nessa obra encontramos o clímax de milhares de anos de esforços para compreender o sistema do mundo, os princípios da força e do movimento e a física dos corpos em movimento através de meios diferentes. É um testemunho significativo do gênio científico de Newton o facto de, embora a física dos *Principia* tenha sido alterada, aperfeiçoada, e até contestada, ainda solucionarmos hoje muitos problemas de mecânica celeste e de física dos corpos comuns procedendo, no essencial, como Newton fez há cerca de 300 anos.

Escrever um panorama sobre todas as influências que o levaram a desenvolver a sua filosofia natural é uma tarefa hercúlea, e foge do horizonte deste trabalho. Vejamos, então, alguns aspectos da trajetória trilhada por Newton até a publicação dos *Principia*. Apesar de estarmos cientes de que qualquer “[...] abordagem que se escolha será obviamente apenas parcial e sempre deixará de lado aspectos mais ou menos relevantes, que algum outro recorte destacaria” (BARBATTI, 1999, p. 153).

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). Newton identificou-se com estas idéias novas e, como era de seu costume, escreveu um conjunto de especulações que as leituras despertaram sobre os fenômenos da natureza. Cohen e Westfall (2002, p. 19-20) revelam que:

O conjunto inicial de especulações foram as “*Questiones quaedam philosophicae*” [Algumas questões filosóficas], denominação que ele deu ao grupo de anotações que iniciou em algum momento de 1664. Acima do título ele grafou o lema “*Amicus Plato amicus Aristoteles magis amica veritas*”, cuja tradução livre poderia ser: “Platão é meu amigo, Aristóteles é meu amigo, porém minha maior amiga é a verdade”. Nas páginas seguintes, Platão e Aristóteles não voltaram a aparecer; a melhor amiga de Newton foi a nova filosofia natural, que Robert Boyle passara a chamar, pouco tempo antes, de *filosofia mecânica*.

Estas especulações versavam, entre outros assuntos, sobre a natureza da matéria, a natureza da luz, a existência de átomos, a existência do vácuo, além de tentativas de explicação de alguns fenômenos como a coesão dos sólidos, a rarefação dos gases, o calor, o frio e a gravidade. Percebe-se em suas reflexões que ele “[...] oscilava entre várias hipóteses, dialogando mentalmente com autores conflitantes, como Descartes – que negava a possibilidade do vácuo e de átomos – e Boyle, um dos principais defensores da ‘filosofia corpuscular’ na Grã-Bretanha” (MARTINS, 1998, p. 80). Mas, as suas primeiras idéias sobre a gravidade pendiam para o lado cartesiano. Newton acreditava que a gravidade poderia ser explicada por uma espécie de corrente de éter que viria do espaço em direção à Terra com grande velocidade, impulsionando os corpos para baixo. Pensando no acúmulo de éter que poderia ocorrer no interior da Terra, ele imaginava que esta o devolveria para o espaço em uma corrente ascendente com características diferentes da descendente para que os efeitos das duas sobre os corpos não se anulassem. Esta explicação de Newton não é restrita aos *Quaestiones*; ela permeia várias de suas obras, diferenciando apenas nas características físicas do éter e na maneira como ele empurra os corpos para baixo. Por exemplo, por volta de 1669, após um intenso estudo da alquimia, seu éter passa a ter características de um éter vital, que nos séculos XVI e XVII, fazia parte da literatura neoplatônica e alquímica¹⁷. Nesta época, ele escreveu um tratado conhecido por *Das leis e processos óbvios da natureza na vegetação*, vejamos o que diz a respeito do éter:

[...] o éter é pressionado e, com isso, é continuamente forçado a descer para a Terra, de onde veio o ar, e ali é gradativamente condensado e entremeado com os corpos que lá encontra, e promove as ações deles, sendo um fermento suave. Mas, em sua descida, ele se esforça por carregar os corpos

¹⁷ Ao analisar as influências metafísicas sobre o pensamento de Newton, Forato tece o seguinte comentário: “É importante compreender Newton não como um cientista no sentido atual, mas como um pensador inglês do século XVII, um filósofo natural envolvido com saberes característicos de seu tempo. Além de física, matemática, filosofia e astronomia, ele estudou também alquimia, astrologia, cabala, magia e teologia, e era um grande conhecedor da Bíblia. **Ele e vários outros filósofos naturais do século XVII consideravam que todos esses campos do saber poderiam contribuir para o estudo dos fenômenos naturais**” (FORATO, 2006, p. 192, grifo nosso).

que atravessa, isto é, torna-os pesados, e essa ação é promovida pela tenaz constituição elástica mediante a qual ele exerce maior controle sobre as coisas que estão em seu caminho; e também por sua imensa rapidez. Tem que descer tanto éter quanto ar e exalações sobem, e, portanto, sendo o éter muitos graus mais fino e ralo do que o ar (como é o ar, comparado com a água), ele deve descer com muito mais rapidez e, por conseguinte, ter muito mais eficácia para empurrar os corpos para baixo do que tem o ar para empurrá-los para cima. E isso é perfeitamente compatível com os métodos da natureza para produzir a circulação de todas as coisas. Assim, esta Terra assemelha-se a um grande animal, ou melhor, a um vegetal inanimado, que suga o sopro etéreo para seu revigoramento diário e seu fermento vital, e torna a transpirá-lo com grandes exalações. E, de acordo com a situação de todos os outros seres vivos, deve ter seus tempos de início, juventude, velhice e perecimento. Esse é o espírito sutil que vasculha os recônditos mais ocultos de toda a matéria mais espessa, que penetra em seus mais ínfimos poros e os separa mais sutilmente do que qualquer outra força material que exista. [...] Esse é o agente universal da natureza, sua chama secreta, fermento e princípio único de toda a vegetação. É a alma material de toda a matéria, que, sendo constantemente inspirada de cima, permeia-a e se consolida com ela numa forma, e depois, se incitada por um calor suave, ativa-a e lhe dá vida, mas é tão delicada e sutil, além disso, que desaparece ao menor excesso e (depois de começar a agir) pára de agir para sempre e se congela na matéria na falta de calor, a menos que receba vida nova de um novo fermento. [...] a Terra precisa de um suprimento constante e renovado de éter. [...] é mais provável que o éter seja apenas um veículo de algum espírito mais ativo. [...] Esse espírito talvez seja o corpo da luz [...] nenhuma substância permeia todas as coisas de maneira tão indiscriminada, sutil e veloz quanto à luz [...] (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p. 369-370).

Seis anos depois, em 1675, Newton escreveu uma carta direcionada a Henry Oldenburg (1618 - 1677), secretário da Royal Society, para acompanhar e explicar seu conjunto de observações sobre os anéis coloridos (anéis de Newton) numa fina película de ar entre uma lente e uma placa de vidro (COHEN; WESTFALL, 2002, p. 30). A carta tinha como título *A hipótese da luz: uma hipótese explicativa das propriedades da luz sobre as quais discorrem meus diversos artigos*, e encontramos nela novas considerações de Newton sobre o éter. Ele supõe que exista um meio etéreo, exatamente com a mesma constituição do ar, porém muito mais ralo, mais sutil e mais fortemente elástico. Mas este meio não seria de matéria uniforme, parte dele seria composto do corpo fleumático do éter e a outra parte de outros diversos espíritos etéreos, como os eflúvios elétricos, os eflúvios magnéticos e o princípio da gravitação (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p. 32). Para exemplificar, ele cita um experimento que fez com um bastão de vidro atritado que fazia movimentar vários pedacinhos de papel, dando a seguinte explicação:

Ora, não posso imaginar de onde viriam todos esses movimentos irregulares, a menos que seja de algum tipo de matéria sutil que fique condensada no vidro e seja rarefeita pela fricção, tal como a água é rarefeita em vapor pelo calor, e que, nessa rarefeição, seja difundida pelo espaço em torno do vidro a uma grande distância, e levada a se mover e a circular de várias maneiras e, por conseguinte, a acionar os papéis, até retornar novamente para o vidro e ser recondensada nele. E, assim como essa matéria condensada, rarefazendo-se num vento etéreo (pois, por sua penetração e circulação fácil no vidro, estimo que seja etéreo), pode provocar esses movimentos estranhos e, ao se condensar novamente, pode fazer com que a atração elétrica, com seu retorno para o vidro, ocorra em lugar do que é continuamente recondensado ali, também a atração gravitacional da Terra pode ser causada pela condensação contínua de algum outro espírito etéreo semelhante, não do corpo principal do éter fleumático, mas de algo muito fino e sutilmente difundido através dele, talvez de natureza untuosa ou viscosa, tenaz e elástica, e que tenha com o éter a mesma relação que tem o ar o espírito aéreo vital¹⁸ que é necessário à conservação da chama e dos movimentos vitais. Pois, se um tal espírito etéreo pode ser condensado nos corpos em fermentação ou em combustão, ou coagulado de alguma outra maneira nos poros da terra e da água, numa espécie de matéria ativa úmida para os usos contínuos da natureza, aderindo aos lados desses poros à maneira como os vapores se condensam dos lados de um recipiente sutilmente montado, o vasto corpo da Terra, que talvez esteja em perpétuo funcionamento por toda parte, até seu próprio centro, pode condensar continuamente uma quantidade tão grande desse espírito, que o faça descer do alto com grande celeridade para abastecê-la. Nessa descida, é possível que ele traga consigo para baixo os corpos que perpassa, com uma força proporcional às superfícies de todas as partes deles sobre as quais atua; a natureza promove uma circulação, pela ascensão lenta, de uma quantidade igual de matéria, saída das entranhas da Terra, sob uma forma aérea, a qual, durante algum tempo, constitui a atmosfera, mas, sendo mantida em contínua flutuação pelo novo ar, exalações e vapores que se elevam de baixo pra cima, acaba (com exceção de uma parte dos vapores, que retorna na chuva) tornando a desaparecer nos espaços etéreos, onde, com o tempo, talvez se abrande e se atenua em seu primeiro princípio. [...] E, assim como a Terra, talvez o Sol se impregne abundantemente desse espírito para conservar seu brilho e para impedir que os planetas se afastem mais dele. E que assim o desejo também poderá supor que esse espírito proporciona ou carrega consigo para lá o combustível solar e o princípio material da luz; e que os vastos espaços etéreos entre nós e as estrelas são um repositório suficiente desse alimento do Sol e dos planetas (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p. 33-34).

Ainda mais uma vez, em 1679, oito anos antes de publicar a primeira edição dos *Principia*, em uma carta enviada a Robert Boyle, Newton refere-se a um novo modelo de éter para explicar a gravidade:

Vou apresentar mais uma conjectura, que veio à minha mente enquanto estava escrevendo esta carta; é sobre a causa da gravidade. Para isso, suporei que o

¹⁸ Alguns experimentos, feitos aproximadamente nessa época, mostravam que havia algo no ar que mantinha a vida e a combustão, e que era chamado de diversas maneiras, inclusive “espírito aéreo vital”.

éter consiste em partes que diferem uma da outra em sutileza, por graus indefinidos; que nos poros dos corpos há menos do éter grosseiro, em proporção ao mais fino, do que nos espaços abertos; e conseqüentemente que no grande corpo da Terra há muito menos do éter grosseiro, em proporção ao mais fino, do que nas regiões do ar; e que o éter mais grosseiro no ar afeta as regiões superiores da Terra, e o éter mais fino na Terra as regiões mais baixas do ar, de tal modo que do topo do ar até a superfície da Terra, e da superfície da Terra até o seu centro, o éter é insensivelmente cada vez mais fino. Imagine agora qualquer corpo suspenso no ar ou jazendo sobre a Terra, e o éter sendo por hipótese mais grosso nos poros que estão nas partes superiores do corpo do que naqueles [poros] que estão em suas partes inferiores, e esse éter mais grosseiro sendo menos apto a se alojar naqueles poros do que o éter inferior mais fino, ele tentará sair e dar lugar ao éter mais fino de baixo, o que não pode ocorrer sem que os corpos desçam para dar lugar acima deles para que ele [o éter mais grosseiro] saia (NEWTON apud GARDELLI, 2004, p. 27)

Após várias tentativas de encontrar uma explicação mecânica para a gravidade, Newton viu-se forçado a adotar o modelo de interação à distância. Afinal, os modelos anteriores tinham um conjunto de problemas que ele não tinha sido capaz de resolver. De acordo com Martins (1998, p. 84):

Em qualquer hipótese mecânica da gravitação, o éter deveria preencher o espaço entre os planetas e deveria resistir ao movimento dos astros. No entanto, o movimento periódico e regular dos planetas, de seus satélites e dos cometas não mostrava nenhum sinal dessa resistência. [...] Além disso, a gravidade deveria poder ser influenciada por diversos fatores [...], mas esses efeitos pareciam não existir.

Em paralelo a estes questionamentos, Newton já havia rompido com a filosofia cartesiana em muitos outros aspectos. Por volta 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 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 lugar¹⁹. 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 movimento²⁰ 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 dá 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. Continuando a analisar as ambigüidades que a definição de movimento de Descartes gerava, Newton (1996a, p. 307, grifo nosso) apresenta mais o seguinte exemplo que nos chamou a atenção:

Em terceiro lugar: das teses de Descartes infere-se que **o movimento pode ser gerado onde não existe nenhuma força em ação**. Por exemplo, se Deus fizesse com cessasse repentinamente a revolução do nosso turbilhão, sem aplicar à Terra nenhuma força que pudesse fazê-la parar simultaneamente, Descartes diria que a Terra se estaria movendo no sentido filosófico – devido ao seu deslocamento em relação à proximidade do fluido contíguo – ao passo que anteriormente havia afirmado que a Terra está em repouso, no mesmo sentido filosófico.

Newton considera uma incoerência haver modificação do estado de movimento sem a aplicação de uma força. “Este ponto é importante, pois nos mostra que o conceito de força está bem amadurecido para Newton, e, ainda, que ele não está simplesmente negando a teoria cartesiana. Ele está contrapondo à sua” (BARBATTI, 1997, p. 61).

¹⁹ Barbatti (1997, p. 64) citando Westfall, afirma que estas definições são provenientes do *Syntagma Philosophicum* de Gassendi.

²⁰ Vale a pena dar uma olhada em Barra (2003) para entender melhor alguns aspectos filosóficos mais sutis da definição de repouso para Descartes.

Outro conceito em Descartes que não agrada a Newton 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 afirmava que Deus, por ser um agente inteligente, intervinha na natureza a todo o momento (NEWTON, 1996a; SAPUNARU, 2006; BARBATTI, 1997). Após esta discussão inicial, Newton volta a sua proposta original de analisar as propriedades de fluidos em equilíbrio, definindo antes o conceito de força. Na Definição V ele diz:

Força é o princípio causal que produz o movimento e o repouso. A força é ou externa – a que gera ou destrói, ou altera de uma forma ou de outra o movimento impresso em algum corpo; ou então é um princípio interno, em força do qual um movimento ou um repouso existente é conservado em um determinado corpo, e em virtude do qual todo ser tende a continuar no seu estado e opõe resistência (NEWTON, 1996a, p. 326).

Esta definição é uma mistura do novo com o velho. Vemos Newton inovar não enxergando a força apenas como aquilo que surge na colisão entre os corpos, nem como uma quantidade de movimento que é transferida nesta colisão, ela é qualquer “coisa” que altera o estado de movimento de um corpo. Mas, parece que ainda cerca de quinze anos antes da primeira edição do *Principia*, Newton não concebia a força como uma interação entre dois corpos. Isso fica evidente pela definição que ele dá para a gravidade:

DEFINIÇÃO X

Gravidade ou peso é **uma força que existe em um corpo** e que o impulsiona a ir para baixo. Todavia, com o termo “ir para baixo” não se entende aqui exclusivamente o movimento em direção ao centro da Terra, mas também em direção a qualquer ponto ou região, ou mesmo a partir de qualquer ponto (NEWTON, 1996a, p. 327, grifo nosso).

Esta talvez seja a primeira vez que Newton tenta “explicar” a gravidade sem utilizar o éter. Se bem que, neste caso, ele fez apenas uma denominação sem se preocupar com a origem da gravidade, ao contrário das outras vezes. Aqui fica claro também que, ao atribuir força a um

corpo, Newton não demonstra visualizar a interação que existe entre este corpo e a Terra. Mesmo assim, segundo Barra (1994, p. 4), ao considerar a possibilidade de uma força externa modificar o estado de movimento de um corpo, Newton provoca uma ruptura no cartesianismo que “[...] sustentava que todos os processos naturais deveriam ser explicados exclusivamente através dos princípios da matéria, entendida como extensão geometricamente definida, e do movimento, entendido como um modo da matéria extensa”.

3.7.2 O ESTABELECIMENTO DAS TRÊS LEIS DO MOVIMENTO

Há muitas controvérsias entre os comentadores de Newton sobre a origem do seu conceito de força, alguns acreditam que se “[...] originou exclusivamente das investigações mecânicas de seu autor, outros o vinculam a outros campos distintos da mecânica, sobretudo à alquimia, que lidava com ‘atrações’, ‘princípios ativos’, ‘qualidades ocultas’ etc” (BARRA, 1994, p. 4). O fato é que, 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.

O *Principia* está 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. Vejamos alguns comentários que Newton (apud COHEN; WESTFALL, 2002, p. 276) faz no prefácio explicando os objetivos de cada livro:

[...] examino sobretudo as coisas que se relacionam com a gravidade, a leveza, a força elástica, a resistência dos líquidos e forças similares, sejam elas de atração ou impulsivas; e assim, ofereço este trabalho como constituindo os princípios matemáticos da filosofia, pois toda a tarefa parece consistir nisto: investigar, a partir dos fenômenos dos movimentos, as forças da natureza, e a partir dessas forças, demonstrar os outros fenômenos; e é a

esse objetivo que se dirigem as proposições gerais dos Livros I e II. No Livro III, forneço um exemplo disso na explicação do sistema do mundo, pois, pelas proposições matematicamente demonstradas nos dois livros anteriores, deduzo no terceiro, a partir dos fenômenos celestes, as forças de gravidade com que os corpos tendem para o Sol e para os diversos planetas. Em seguida, a partir dessas forças, mediante outras proposições que também são matemáticas, deduzo os movimentos dos planetas, dos cometas, da Lua e do mar.

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 essa 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 (apud COHEN; WESTFALL, 2002, p. 279) define quantidade de movimento como “[...] a medida do mesmo, provindo da velocidade e da quantidade de matéria, tomadas em conjunto”. 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 (apud COHEN; WESTFALL, 2002, p. 279) 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”. Em seguida, 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 dificuldade 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 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 *ímpetus* medieval. A primeira é responsável apenas pela manutenção do estado de repouso ou do movimento retilíneo uniforme, enquanto que o *ímpetus* é responsável pelo movimento do corpo, quando ele cessar o corpo pára. Na Definição IV, Newton (apud COHEN; WESTFALL, 2002, p. 279) 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”. Ao comentar esta definição, Newton (apud COHEN; WESTFALL, 2002, p. 279, grifo nosso) dá o golpe mortal na teoria do *ímpetus*:

Essa força consiste apenas na ação e não mais permanece no corpo quando 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.

A crença de que um *ímpetus* passa do movente para o móvel foi derrubada. 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 (apud COHEN; WESTFALL, 2002, p. 280) 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”. 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. Os comentários de Newton sobre a força centrípeta foram um dos mais longos de todo o livro. Para não termos uma citação muita extensa, vamos apresentá-la em três partes. Na primeira parte, Newton (apud COHEN; WESTFALL, 2002, p. 280) apresenta vários exemplos ilustrativos de força centrípeta de uma maneira bastante didática:

Desse tipo são a gravidade, pela qual os corpos tendem para o centro da Terra, o magnetismo, pelo qual o ferro tende para o imã, e a força, seja ela qual for, pela qual os planetas são continuamente afastados dos movimentos retilíneos que de outro modo descreveriam, e levados a girar em órbitas curvilíneas. Uma pedra, se girada numa funda, esforça-se por se afastar da mão que a gira e, mediante esse esforço, distende a correia, e o faz com força tão maior quanto maior for a velocidade com que é girada, e voa para longe

assim que é solta. A força que se opõe a esse esforço e pela qual a correia puxa continuamente a pedra de volta para a mão, e que a retém em sua órbita, por ser dirigida para a mão como o centro da órbita, é o que chamo de força centrípeta. E o mesmo se deve entender de todos os corpos girados em qualquer órbita. Todos se esforçam por se afastar dos centros de suas órbitas e, não fosse pela oposição de uma força contrária, que os impede de fazê-lo e os retém em suas órbitas, e que portanto chamo de centrípeta, eles voariam para longe em linha retas, com um movimento uniforme.

Newton afirma que se os planetas giram em órbitas curvilíneas é por que existe uma força centrípeta, embora desconhecida, que os obrigam a se comportarem de tal maneira. Apesar dele já conhecer esta força misteriosa, preferiu apresentá-la ao leitor no Livro III, depois de inúmeras demonstrações provando a sua existência matemática, pois, fisicamente, não foi possível chegar a nenhuma conclusão. O exemplo da pedra girando numa funda foi apresentado por Descartes em seus *Princípios da Filosofia*, com os mesmos argumentos de Newton, exceto pela introdução da força centrípeta como a responsável pela trajetória circular da pedra. Na segunda parte, temos alguns experimentos de pensamento:

Um projétil, não fosse pela força da gravidade, não se desviaria para a Terra, mas se afastaria dela em linha reta e com um movimento uniforme, se a resistência do ar fosse retirada. É por sua gravidade que ele é continuamente afastado de seu curso retilíneo e levado a desviar-se para a Terra, em maior ou menor grau, de acordo com a força de sua gravidade e com a velocidade de seu movimento. Quanto menor é sua gravidade, ou a quantidade de sua matéria, ou quanto maior é a velocidade com que ele é projetado, menos ele se desvia de um curso retilíneo e maior é a distância que atinge. Se uma bola de chumbo, projetada do alto de uma montanha pela força da pólvora, com uma dada velocidade e numa direção paralela ao horizonte, é transportada numa linha curva até uma distância de duas milhas, antes de cair no chão, essa mesma bola, se fosse retirada a resistência do ar, voaria, com o dobro ou décuplo da velocidade, até duas ou dez vezes mais longe. E, aumentado a velocidade, poderíamos aumentar à vontade a distância a que ela seria projetada, e diminuir a curvatura da linha que ela descreveria até finalmente cair, a uma distância de 10, 30 ou 90 graus, ou até contornar a Terra inteira antes de cair, ou, por último, até que nunca mais caísse na Terra, mas prosseguisse para os espaços celestes e continuasse em seu movimento *in infinitum* (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p. 280).

A explicação do comportamento dos projéteis sobre a influência da gravidade é muito parecida com a de Galileu, com exceção da frase final “[...] até que nunca mais caísse na Terra, mas prosseguisse para os espaços celestes e continuasse em seu movimento *in infinitum*”. Assim, diferentemente de Galileu, Newton mostrou que o movimento inercial se dá ao longo de uma reta e não de um círculo, pois este último requer a ação da força centrípeta.

Para Galileu, o movimento ainda significava uma translação de um lugar para outro. Se pudesse responder a esta afirmação de Newton, diria:

Além disso, sendo o movimento rectilíneo por natureza infinito (porque uma linha recta é infinita e indeterminada), **é impossível que alguma coisa possa ter por natureza o princípio do movimento rectilíneo**; ou, por outras palavras, que se mova em direcção a um lugar onde é impossível chegar, não havendo fim finito. Porque a natureza, como com razão Aristóteles diz, nunca procura fazer o que não pode ser feito, nem objectiva mover para onde é impossível chegar (GALILEU apud COHEN, 1988, p. 155, grifo nosso).

Na última parte dos comentários, Newton prepara o terreno para as demonstrações que fará envolvendo a Lua:

E, da mesma maneira que um projétil, pela força da gravidade, pode ser levado a girar numa órbita e a contornar a Terra inteira, também a Lua, seja pela força da gravidade, se for dotada de gravidade, seja por qualquer outra força que a impulsione para a Terra, pode ser continuamente puxada em direcção à Terra, sendo retirada da via retilínea que seguiria por sua força inata, e levada a girar na órbita que hoje descreve; e sem uma força desse tipo, tampouco a Lua poderia ser mantida em sua órbita. Se essa força fosse pequena demais, ela não afastaria a Lua suficientemente de um curso retilíneo; se fosse excessivamente grande, afastá-la-ia demais e arrancaria a Lua de sua órbita, fazendo-a cair para a Terra. 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; e, inversamente, compete-lhes determinar a trajetória curvilínea em que um corpo, projetado de um dado lugar com uma dada velocidade, pode ser levado a se desviar de sua trajetória retilínea natural, mediante uma determinada força.

A quantidade de qualquer força centrípeta pode ser considerada como sendo de três tipos: absoluta, aceleradora e motriz. (NEWTON apud COHEN; WESTFALL, 2002, p. 280-281).

Primeiro, Newton faz o leitor se acostumar com a força centrípeta e 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 no trecho acima, “[...] 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 [...]”, 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 ímã, 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 (apud COHEN; WESTFALL, 2002, p. 282, grifo nosso) 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 [...].

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

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.

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 propriedades, causas e efeitos dos movimentos verdadeiros. Entre as propriedades ele cita três:

Uma propriedade do descanso é que os corpos verdadeiramente em repouso estejam parados em relação um ao outro. [...]

[...]

Uma propriedade do movimento é que as partes que guardam as posições dadas em relação a seus todos participam dos movimentos desses todos. [...]

[...]

Uma propriedade vizinha da anterior é que, movendo-se o lugar, juntamente se move o conteúdo, e, por isso, um corpo que se move de um lugar em movimento participa também do movimento do seu lugar [...] (NEWTON, 1996b, p. 27-28).

Com relação às causas, Newton (1996b, p. 27-28) afirma que:

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 [...].

Se a causa é a força aplicada, quais serão os efeitos? Newton (1996b, p. 28) 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.

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. Então, vamos a elas:

[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, p. 69) 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”.

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 (2005, p. 692) 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.

Traduzindo em linguagem algébrica moderna temos: $\vec{v} \propto \frac{\vec{F} \cdot \Delta t}{m}$. 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 (apud SAPUNARU, 2006, p. 148): “[...] 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”.

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. Segundo Barra (1994, p. 20, nota 10):

Newton não faz qualquer crítica direta a essas regras, embora em suas análises das colisões ele considere freqüentemente as velocidades relativas dos corpos, algo que Descartes não considerou. Os depoimentos de Huygens a esse respeito são os mais significativos, pois, sendo um dos mais fieis adeptos da física de Descartes e, ao mesmo tempo, possuindo uma capacidade incomum na sua época de analisar matematicamente os experimentos, ele viveu a incômoda situação de ter que criticar seu mestre. Numa carta a Sluse, em 2 de novembro de 1657, Huygens diz: "Eu suspeitei inicialmente [das regras dos choques de Descartes] observando que elas estavam em desacordo com a experiência. Em seguida, observei que a quinta regra contradiz a segunda... Eu conheço regras certas e nada me agradou mais do que verificar que estão de acordo com a experiência. Por outro lado, eu mostrei que um corpo em repouso, por maior que ele seja, é posto em movimento pelo choque com um outro corpo, por menor que ele seja. [isto é, o contrário do que afirma a terceira regra de Descartes]" (citado por Dugas 1954:286) Desencorajado por seus interlocutores cartesianos, Huygens somente tornou publica suas idéias sobre as colisões em 1660, diante da Royal Society de Londres, onde manteve contato com Wren e Wallis. O debate que se sucedeu à visita de Huygens na Royal Society pode ter chegado ao conhecimento de Newton e, conseqüentemente, também contribuído para despertar seu interesse pelo estudo das colisões.

Subseqüente ao enunciado da Terceira Lei, Newton (apud COHEN; WESTFALL, 2002, p. 286-287) 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.

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).

Após haver mostrado que a Terceira Lei é comprovada para os impactos e reflexões, Newton analisa dois casos de atrações. No primeiro caso, ele argumenta que ao colocarmos um obstáculo entre dois corpos, A e B, que se atraem mutuamente, o mesmo deverá ficar em equilíbrio. “Dessa forma, conclui-se que os corpos devem pressionar igualmente o obstáculo, e ser igualmente atraídos um pelo outro” (NEWTON, 1996b, p. 42-43). No segundo caso, ele estende a conclusão do exemplo anterior à gravitação entre a Terra e as suas partes afirmando sê-la mútua. E para demonstrar que isto é verdade, Newton representa a Terra de acordo com a Figura 5.

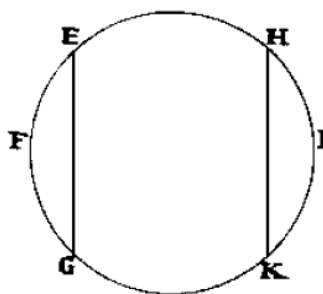


Figura 5 – A Terra é representada por Newton pela esfera FI, que é cortada pelos planos EG e HK.

Fonte: NEWTON (1996b, p. 43)

Com o auxílio desta figura ele afirma que a parte central EGKH, por não se deslocar em direção a nenhum dos extremos EGF ou HKI, recebe destes a mesma intensidade de força. Logo, as partes EGF e HKI são igualmente atraídas uma pela outra.

3.7.3 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 ver 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 (1996b, p. 27, grifo nosso) 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**”.

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 (1996b, p. 29) admite ser “[...] difícilimo [...] conhecer os verdadeiros movimentos de cada um dos corpos, distinguindo-se efetivamente dos aparentes [...]”. 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 (1996b, p. 28, grifo nosso) 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.

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.

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.

3.7.4 OUTRAS INTERPRETAÇÕES DA EXPERIÊNCIA DO BALDE GIRANTE

Façamos, agora, uma análise crítica de outras interpretações deste experimento. Fitas (1996) imagina uma experiência análoga à descrita por Newton, mas, ao invés de a 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 outro artigo, Neves (2005b, p. 189) afirma que este experimento foi apresentado por Newton “[...] para estabelecer a idéia de um espaço absoluto [...]”. 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, p. 53-54, grifo nosso) 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 corrompem "a matemática e a filosofia aqueles que confundem as quantidades verdadeiras com as relações e as medidas vulgares das mesmas.

Mais a frente, Neves (2005b) sugere que Newton considerava a superfície côncava da água como uma conseqüência de um *conatus centrífugo* – 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, 2005b, p. 193). Novamente não pactuamos com o autor, primeiro por que Newton em momento algum falou em *conatus centrífugo* 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 à 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 (2005b) fundamentou os seus argumentos, principalmente, em Mach (1960) e Assis (1989; 1998; 1999). Vamos mostrar as principais idéias destes dois pesquisadores ligadas à explicação da experiência do balde de Newton em um primeiro momento. 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 círculo 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 densidade²¹. 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, p. 49, grifo nosso):

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**²².

²¹ 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).

²² 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 [...]”.

Baseado nessa sua concepção de massa inercial, Mach (apud ASSIS, 1999, p. 70, grifo nosso) 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.

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 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, p. 63): “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) afirma que não foi somente Newton que se enganou ao 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*²³, não conseguiu implementá-lo. Para justificar este seu argumento, Assis (1999) 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

²³ 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.

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 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).

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.

Outro aspecto interessante levantado por Assis (1999, p. 99) 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 oco animado 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, p. 100-102), 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, para Assis (1999, p. 103):

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.

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. Segundo Assis (1999, p. 112), estes conceitos teóricos “[...] desempenham o mesmo papel que os epículos na teoria ptolomaica”, e a *Mecânica Relacional* seria um novo paradigma para a física, que evitaria todos estes epículos de maneira simples, além de estar baseada em concepções filosóficas mais intuitivas, razoáveis e palpáveis. Assis (1999, p. 116) 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.

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, p. 118) 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”. Para Assis (1999), 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, p. 51) enumera outras cinco conclusões a que Assis 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.

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

[...] 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 [...].

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

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.

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 tinha 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 científicas estão sob forte influência do status acadêmico de um grupo de cientistas, da pressão social, de interesses econômicos, editoriais, entre outros. 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.

3.8 EM RESUMO

Após esta breve análise histórica da relação entre força e movimento, percebemos o quão complexo é o assunto. Da física dissipativa de Aristóteles à física de Newton, passaram-se cerca de dois milênios repletos de controvérsias, e ainda há inúmeras perguntas sem respostas. Vimos que a descrição do movimento dos corpos terrestres sempre esteve divorciada dos corpos celestes. Enquanto o foco das questões estava na Terra, a física aristotélica predominou, mas quando os olhos inquiridores se voltaram para o céu um novo mundo foi sendo descoberto. O que obrigou o surgimento de novos esclarecimentos.

Mas, não é fácil unir conceitos intuitivos e contra-intuitivos. Aqui na Terra é óbvio que após deixarmos de fazer força sobre um objeto ele vai reduzindo a sua velocidade até parar. No entanto, uma pessoa comum dificilmente se indaga sobre o que aconteceria se a superfície fosse infinita e sem atrito. Esta é uma preocupação filosófica, restrita àqueles que não se contentam com explicações isoladas, e gostam de extrapolar os limites do senso comum.

Na próxima seção, veremos algumas pesquisas sobre as concepções de estudantes que nunca tiveram contato com as Leis de Newton. Com base neste breve histórico, tentaremos identificar em qual época entre Aristóteles e Newton as suas concepções se inserem. Nas outras pesquisas com aqueles que já conhecem estas leis, procuraremos entender as dificuldades que levam as pessoas a abandonarem as suas concepções e adotarem a da mecânica newtoniana.

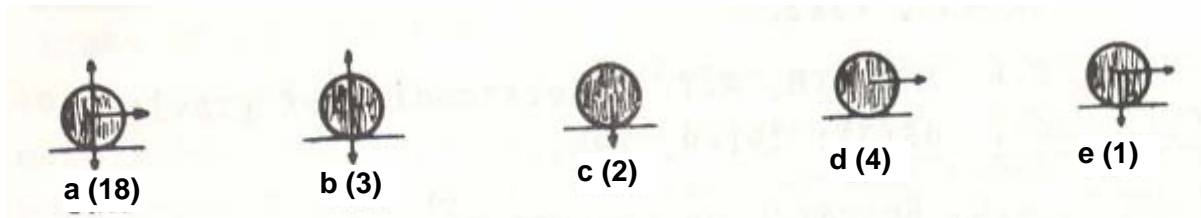
4 CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS SOBRE A RELAÇÃO ENTRE FORÇA E MOVIMENTO

O estudo sistemático das concepções alternativas iniciou-se com a mecânica, com destaque para a relação entre força e movimento. Uma das primeiras pesquisas nesta área, muito citada em artigos, é a da pesquisadora francesa Laurence Viennot. Viennot (1979) investigou a maneira de pensar a relação entre força e movimento de um conjunto de 709 estudantes franceses, belgas e britânicos. A amostra incluía alunos do último ano do nosso correspondente ensino médio até o terceiro ano da universidade. Entre os testes escritos que os pesquisados tinham que analisar e responder, um deles mostrava a figura com cinco bolas em uma mesma altura, mas com velocidades em direções diferentes, sendo que uma delas era nula. Estas bolas tinham sido lançadas para cima e a resistência do ar era desprezível. Os estudantes tinham que responder se as forças que agiam sobre as bolas, naquele instante, eram iguais ou diferentes. Aproximadamente 50% responderam que as forças eram diferentes, prevalecendo a visão aristotélica de que a velocidade é proporcional à força e de que está sempre no sentido do movimento. Neste caso, se $V = 0$, então, $F = 0$, concepção relacionada à resposta errada que não atribuiu força à bola no instante em que invertia o seu movimento. Um fato interessante observado pela pesquisadora é que em situações em que se exigiam raciocínios quantitativos (uso de “fórmulas”) os estudantes utilizavam corretamente o conceito de força expresso pela segunda lei de Newton. Mas, quando a força era mostrada oposta à velocidade ou atuando na altura máxima de uma trajetória vertical em que a velocidade era momentaneamente nula, eles recorriam à lei aristotélica do movimento.

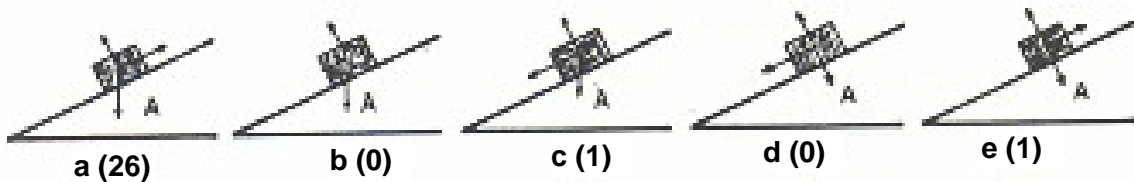
Outra pesquisa muito citada na área de ensino de ciência é a do pesquisador britânico Michael D. Watts e do brasileiro Arden Zylbersztajn. Watts e Zylbersztajn (1981) aplicaram um teste de múltipla escolha a 125 estudantes ingleses de 14 anos de idade. Seis questões, do total de doze, eram para analisar as concepções dos estudantes sobre a relação entre força e movimento. As questões 1, 2, 3 perguntavam sobre as forças que atuavam em uma pedra ao ser lançada verticalmente para o alto, e as 4, 5 e 6 sobre as forças que atuavam em uma bala de canhão ao ser atirada seguindo uma trajetória parabólica. As respostas indicaram que 85% dos estudantes associaram uma força no sentido do movimento ascendente e descendente da pedra e uma força agindo ao longo da tangente à trajetória da bala de canhão no sentido do movimento. Mais uma vez os resultados confirmaram a dificuldade dos estudantes em

visualizar uma força contrária à velocidade. Peduzzi e Peduzzi (1985a) fizeram uma pesquisa semelhante com 28 alunos de Química e Matemática, após eles terem revistos no ensino superior as leis de Newton e suas aplicações. Reproduziremos abaixo as perguntas e as figuras utilizadas. Ao lado de cada letra está indicada a quantidade numérica de alunos que a assinalou como correta.

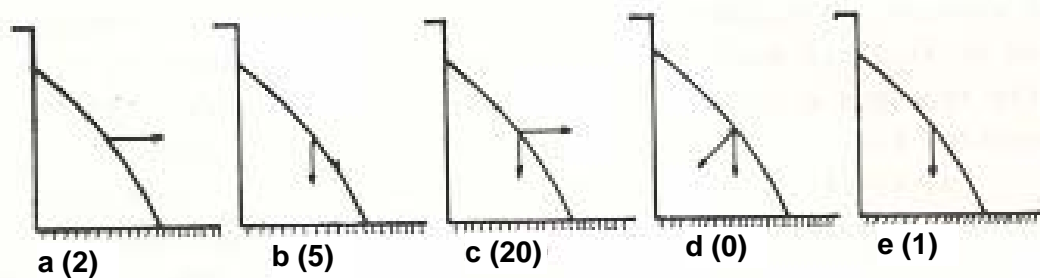
1) Um jogador de snooker dá uma tacada numa bolinha com o objetivo de colocá-la numa caçapa. Marque qual das alternativas abaixo mostra a(s) força(s) que age(m) sobre a bolinha um pouco antes de chegar ao seu alvo. Despreze o atrito.



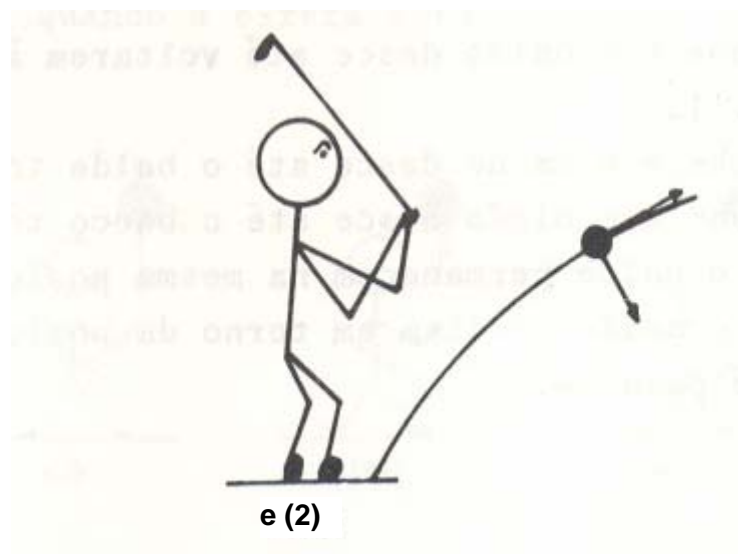
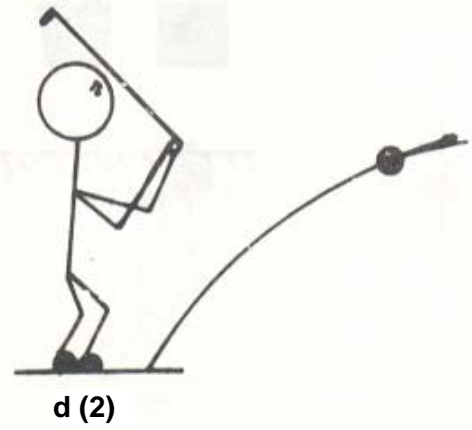
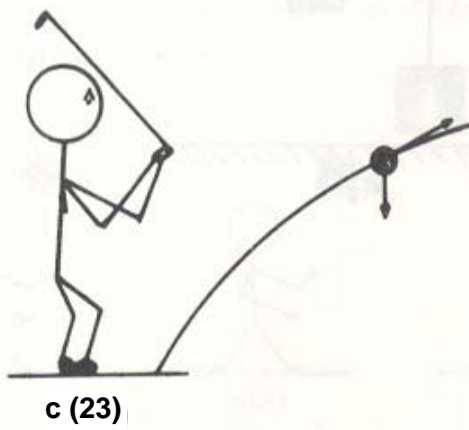
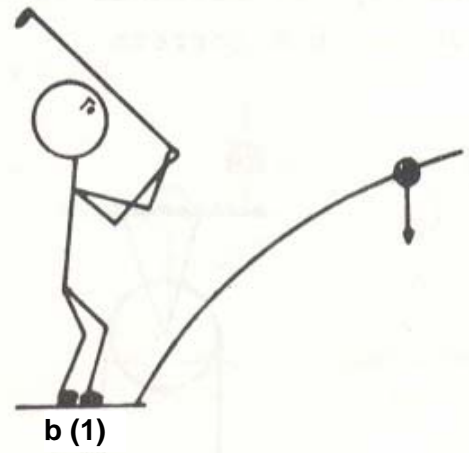
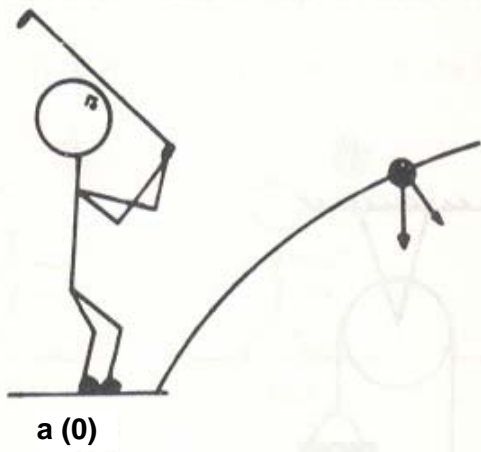
2) Um bloco é jogado de baixo para cima ao longo de um plano inclinado liso. Marque a opção que melhor representa a(s) força(s) que age(m) sobre ele, ao passar pelo ponto A, ainda subindo. Despreze o atrito.



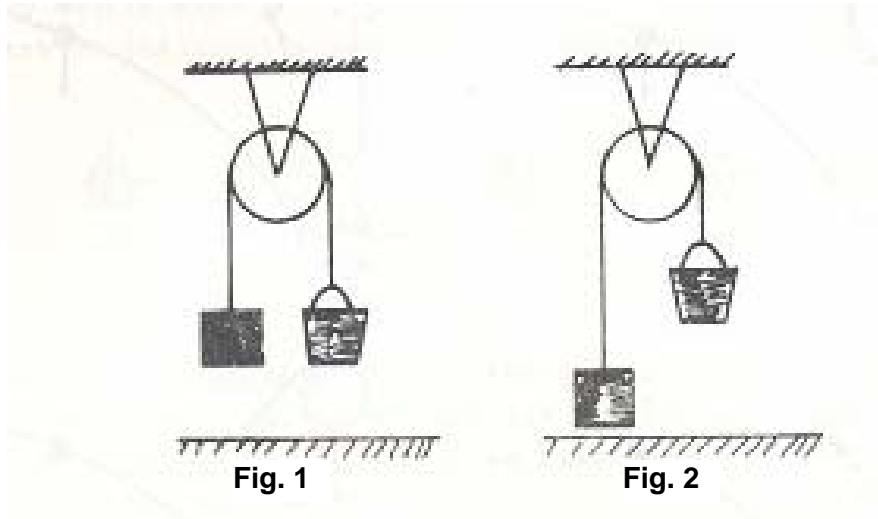
3) Uma pedra é lançada horizontalmente da janela de um edifício. Desprezando a resistência do ar, indique a figura que representa a(s) força(s) que age(m) sobre a pedra.



4) Assinale qual dos quadros abaixo representa a(s) força(s) que age(m) sobre a bolinha arremessada pelo golfista. Despreze a resistência do ar.



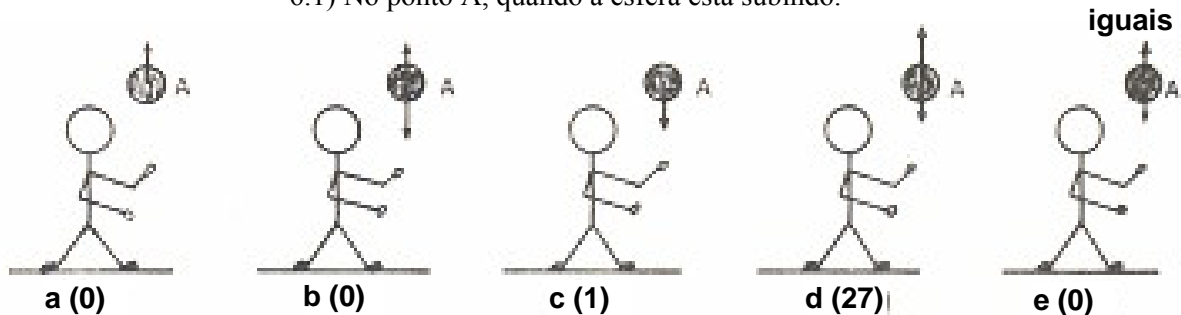
5) Um bloco de madeira e um balde com areia pendem livremente de uma polia estando ambos a uma mesma altura do solo (fig. 1). O bloco é então puxado para baixo e mantido na posição mostrada na fig. 2. Soltando-se o bloco, assinale qual das afirmativas abaixo é a correta.



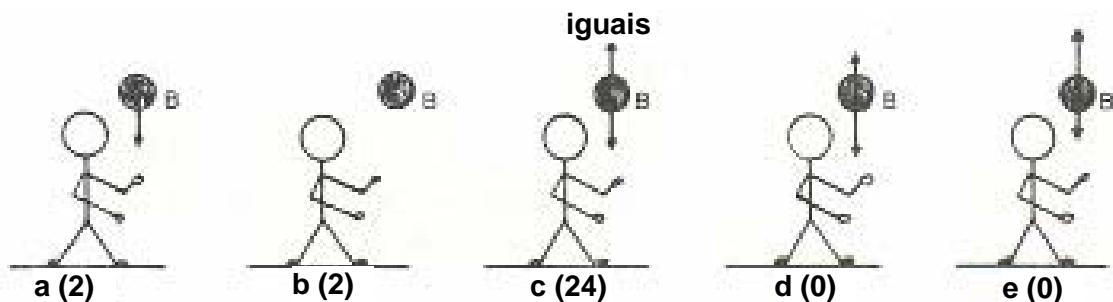
- (2) O bloco sobe e o balde desce até voltarem à posição descrita na fig. 1.
- (3) O bloco sobe e o balde desce até o balde tocar o solo.
- (2) O balde sobe e o bloco desce até o bloco tocar o solo.
- (7) O bloco e o balde permanecem na mesma posição.
- (13) O bloco e o balde oscilam em torno da posição mostrada na fig. 1 até pararem.

6) Um menino lança verticalmente para cima uma pequena esfera. Desprezando a resistência do ar, assinale a alternativa que representa a(s) força(s) que age(m) sobre a esfera em cada uma das seguintes situações.

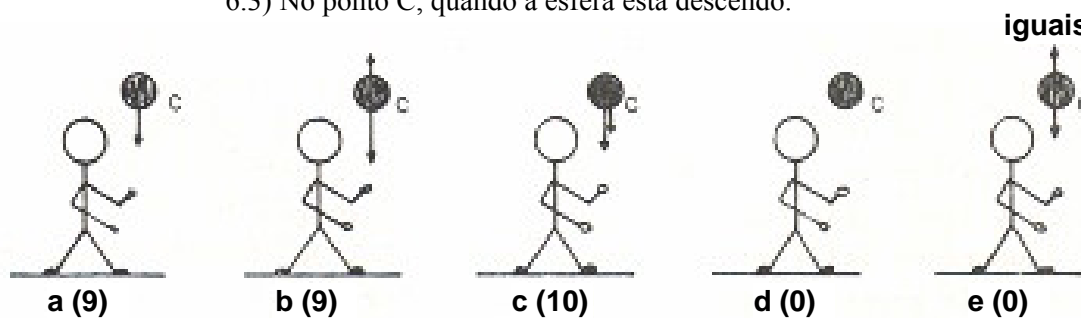
6.1) No ponto A, quando a esfera está subindo.



6.2) No ponto B, quando a esfera atinge o ponto mais alto de sua trajetória.



6.3) No ponto C, quando a esfera está descendo.



(PEDUZZI; PEDUZZI, 1985a, p. 12-15).

Com exceção da questão 5, as situações simuladas por estas perguntas são clássicas nas pesquisas sobre este tema, as variações ocorrem apenas nos objetos envolvidos nos problemas. Na questão 1, 85% dos estudantes foram atraídos pelas letras que mostravam uma força no sentido do movimento, valor que aumentou para 96% na questão 2. Na questão 3, 71% optaram por uma força na horizontal acompanhando o movimento do projétil juntamente com a força peso. No entanto, na questão 4, 82% identificaram uma força tangente à trajetória acompanhando com a força peso o movimento da bolinha. Dando a impressão que os pesquisados visualizam a velocidade inclinada no lançamento oblíquo, mas não no lançamento horizontal. As respostas assinaladas nos itens da questão 6 sugerem que cerca de 86% dos avaliados associam uma força para cima que decresce à medida que o projétil sobe até se igualar à força peso, quando inverte o sentido do seu movimento. Para averiguar como, sob a ótica dos estudantes, a(s) força(s) atuante(s) em um projétil varia(m) ao longo de toda a sua trajetória, os autores elaboraram um novo teste fornecendo mais alternativas de resposta a cada questão. A amostra agora era composta por 31 alunos dos cursos de Química e Matemática. A análise das respostas os levaram a seguinte conclusão:

Na subida de um projétil lançado verticalmente, os estudantes associam uma força para cima que decresce à medida que o projétil sobe. Para muitos, quando esta se iguala ao peso, o corpo inverte o sentido do seu movimento. Na descida, outras forças são relacionadas ao movimento: uma força para cima (decrescente) e uma para baixo (crescente), além da força peso (PEDUZZI; PEDUZZI, 1985b, p. 120).

Conclusão semelhante chegaram Clement (1982), Sebastia (1984), McDermott (1984) e Di Sessa (1988), apenas para citar algumas das várias pesquisas realizadas com este enfoque. Esta concepção é a mesma do astrônomo Hiparco de Nicéia (190 a.C. - 120 a.C.) e do filósofo grego Johannes Philoponus (475 d.C. - 565 d.C.) considerados precursores da teoria do ímpetus medieval (PEDUZZI; PEDUZZI, 2006, p. 50-52). Em outra pesquisa, Cunha e

Caldas (2001) também verificaram modos de raciocínio baseados na teoria do ímpetus, desta vez para um movimento horizontal. Os pesquisados foram 115 estudantes da 8ª série do ensino fundamental, 124 estudantes do 1º ano do ensino médio e 23 professores de física em exercício nestas séries. Eles tiveram que responder a seguinte questão:

Uma caixa de fósforos está em cima de uma mesa. Se você dá um “peteleco” nela, a caixa de fósforos entra em movimento e depois de um certo tempo pára.

- a) Porque ela pára se ninguém fez ela parar?
- b) Quais são as forças que estão agindo na caixa de fósforos durante o tempo em que ela está em movimento?
- c) Desenhe, na figura 1, as forças que estão agindo na caixa de fósforos durante o movimento dela e indique o que cada uma delas representa (CUNHA; CALDAS, 2001, p. 95).

Apenas 8,7% dos estudantes da 8ª série e 12,1% dos estudantes do 1º ano do ensino médio identificaram a força de atrito como a única causa responsável por parar a caixa. Cerca de 50% dos alunos das duas séries deram respostas do tipo:

Porque a força que ela usou para entrar em movimento acabou.

Porque a força que foi exercida sobre a caixa foi enfraquecendo, assim faz com que a caixa pare.

Porque a força I (impulso) colocada nela acaba.

A força do peteleco acaba.

Ela vai perdendo a potência do peteleco que a faz mover, e assim o peso dos palitos vai impedindo de continuar em movimento (CUNHA; CALDAS, 2001, p. 96).

O motivo pelo qual a “força acaba” não é citado pelos alunos, o que nos remete à Nicole Oresme (1316 - 1390) que afirmava ser auto-extinguível o ímpetus cedido a um corpo. Com relação aos professores, todos afirmaram ser a força de atrito a responsável por parar o objeto. Porém, 30,5% deles desenharam a “força do peteleco” ao longo do movimento da caixa. Ou seja, apresentaram a mesma visão de Jean Buridan (1300 - 1358) que acreditava ser permanente o ímpetus adquirido por um corpo, só podendo ser dissipado por influências externas. Outra pesquisa nesta direção foi realizada pelos sul-coreanos Jinwoong Song, Sook-Kyoung Cho e Byung-Hoon Chung. Song, Cho e Chung (1997) fizeram uma investigação com 736 estudantes de Seoul com idades variando de 11 aos 17 anos. O objetivo era encontrar

um paralelo entre as respostas dos alunos e as dadas por Aristóteles, Buridan, Galileu e Newton, por exemplo, em questões que envolviam o conceito de inércia. Com este fim, os autores elaboraram questões sobre o movimento natural dos corpos, o movimento de uma lança e a queda de uma pedra em um navio em movimento.

O enunciado da primeira questão afirma que o movimento pode ser classificado em dois tipos, o natural, em que nenhuma força externa é aplicada, e o não-natural, em que há a existência de alguma força externa. Logo após, é pedido aos respondentes que escolham dentre as quatro opções dadas a(s) que não atua(am) nenhuma força(s) externa(s). As opções eram o movimento diário das estrelas ao redor da Terra (concepção aristotélica); a queda livre de um objeto (concepção aristotélica); o movimento retilíneo e uniforme de uma bola após descer por um plano inclinado (concepção galilaica-newtoniana) e um objeto em repouso (concepção newtoniana). Mais da metade dos estudantes consideraram os quatro movimentos como naturais, o que é um indicativo de que a questão não foi adequada ao objetivo almejado. Em nossa opinião, ela teria o êxito desejado se tivesse acompanhada de figuras em cada item juntamente com a obrigatoriedade de justificar a resposta. A segunda questão não teve esta falha, pois mostrava a figura de um homem arremessando uma lança seguida de uma pergunta que pedia para explicar como a lança pode voar após deixar a mão do homem. Mais da metade das respostas (57,6%) consideravam raciocínios similares à teoria do ímpetus medieval. A terceira questão inicia afirmando que alguém deixou uma pedra cair de um mastro de um navio que estava em movimento no oceano. Em seguida, mostra a figura indicada abaixo com a observação de que a resistência do ar poderia ser desprezada.

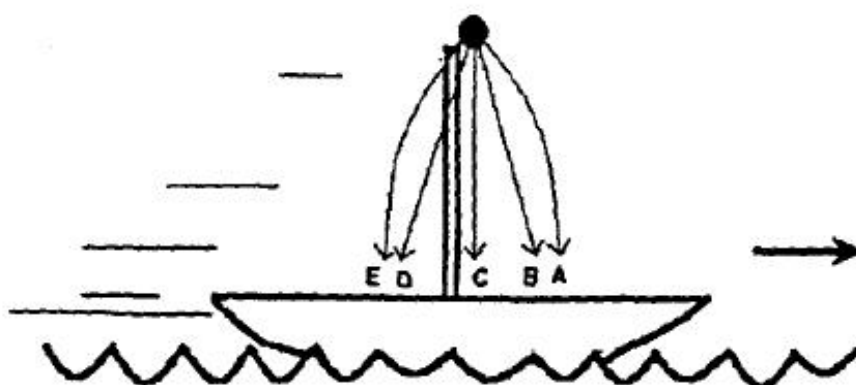


Figura 6 – Pedra caindo de um mastro de navio em movimento em uma situação em que a resistência do ar é desprezível.

Fonte: SONG, CHO e CHUNG (1997, p. 95)

Os estudantes tinham que indicar qual caminho (A, B, C, D ou E) a pedra percorreria ao cair e explicar o porquê de sua escolha. No total, 43,3% optaram pelas letras D ou E. Destes, a metade justificou a sua resposta afirmando que assim deveria ser, pois o navio está se movimentando para frente. Saltiel e Malgrange (1980) e McCloskey (1983) analisaram situações análogas a esta e obtiveram as mesmas respostas, sendo as justificativas apresentadas pelos alunos baseadas no fato do objeto perder contato físico com o suporte que o mantinha em movimento horizontal, deixando, deste modo, de continuar com esta velocidade. Argumento semelhante foi dado pelos aristotélicos da idade média, cessada causa, cessa o movimento.

Por estas pesquisas, percebemos que quando a pergunta refere-se a um determinado instante de um movimento a lei aristotélica $F = kV$ é verificada no raciocínio da maioria dos alunos. Todavia, quando o questionamento leva em consideração vários pontos da trajetória, a maior parte das respostas é semelhante às de Hiparco e Philoponus, se o movimento for vertical, e de Buridan e Oresme, se o movimento for horizontal. Em outras palavras, para a maioria dos estudantes destas e de outras pesquisas há a necessidade de uma força no sentido da velocidade para manter um corpo em movimento, caso não haja esta força, o corpo tem que estar em repouso. E a recíproca é verdadeira, se o corpo tem velocidade nula então não há força atuando. Entretanto, uma vez em repouso o objeto entra em movimento após a aplicação de uma força que o acompanha, mesmo não havendo mais contato com o agente movedor, parando lentamente com a extinção desta causa motora. Deste modo, concordamos com Saltiel e Viennot (1985) e com Rezende e Barros (2001) de que não é possível enquadrar as concepções dos alunos em aristotélica ou newtoniana, pois, dependendo do questionamento, um modo de raciocínio é acionado. O que está de acordo com a história da ciência que mostra entre a física aristotélica e a mecânica newtoniana várias e diferentes propostas para dar conta das relações sobre força e movimento. Esta diversidade de pensamentos foi muito bem documentada por Harres (2002). Após introduzir as idéias de Aristóteles sobre o movimento aos seus alunos, propôs a seguinte situação-problema:

Tendo analisado as idéias de Aristóteles sobre força e movimento e tendo contrastado estas idéias com as suas, vamos agora tentar avançar na discussão sobre as noções de força e suas implicações sobre os movimentos. Para isso, considere a seguinte situação: uma pessoa lança com grande velocidade uma bola sobre uma superfície horizontal bastante rugosa, isto é, com muito atrito. A figura abaixo ilustra o movimento descrito pela bola. Os

pontos A, B e C são pontos da trajetória da bola após o lançamento. No ponto C a bola está finalmente parada.



- Identifique ou desenhe a(s) força(s) que atua(m) sobre a bola em cada uma das três posições segundo a interpretação de Aristóteles.
- Identifique ou desenhe novamente a(s) força(s) segundo a sua interpretação (HARRES, 2002, p. 96).

Os sujeitos da pesquisa eram 53 estudantes da graduação de Física, Química e Matemática que cursavam a disciplina de Física II a qual tratava da introdução aos conceitos de Mecânica. De acordo com Harres (2002, 97):

[...] somente três alunos expressaram concepções não intermediárias. Um deles apresentou uma explicação genuinamente aristotélica, devido à gravidade [o corpo] vai perdendo sua intensidade (sujeito 23) e os outros dois expressaram uma concepção claramente newtoniana, corpo pára apenas devido ao atrito (sujeito 24) e o corpo pára devido ao atrito (sujeito 53).

Ou seja, cerca de 94% apresentaram concepções que não se encaixavam na física aristotélica ou newtoniana, suas idéias estavam mais para o que Peduzzi e Zylberstajn (1997), entre outros autores, denominam de “física da força impressa”. De modo perspicaz, Harres (2002) dividiu estas idéias em três grandes grupos, ímpetus inicial, ímpetus médio e ímpetus avançado. A categorização das respostas foi feita com o auxílio de três perguntas sobre as mesmas: a) Atua uma força “impressa” sobre o corpo após o lançamento?; b) O atrito é considerado no problema? e c) O atrito exerce alguma influência sobre a força “impressa”? Se as respostas fossem sim, não e não a idéia era classificada como ímpetus inicial, se fossem todas sim, ímpetus médio, e se fossem sim, sim e não, ímpetus avançado. Foram incluídos 14 (26%) estudantes na categoria ímpetus inicial, 22 (41,5%) na categoria ímpetus médio e 14 (26%) na ímpetus avançado. Para se enquadrar na categoria ímpetus inicial, o estudante deveria referir-se apenas a fatores internos ao corpo na explicação de sua parada. Assim, nessa categoria foram encontradas respostas como:

O corpo recebe uma força do impulso (armazenada) que faz andar um certo tempo [...]; a força aplicada vai diminuindo até parar [...]; a força para a frente diminui até parar [...] (HARRES, 2002, p. 96).

Na próxima categoria, ímpetus médio, “[...] aparece uma evolução importante pela inclusão do atrito nas explicações. [...] mas essa consideração ainda é bastante inadequada por considerá-lo variável ou exercendo algum efeito sobre a força de impulso” (HARRES, 2002, p. 98). Exemplos dessa categoria são:

A força do atrito aumenta e se iguala à força a favor parando [...]; a força de atrito ficou maior que a velocidade [...]; a força recebida se gasta devido ao atrito [...]; a força a favor diminui, tem atrito, em C não há forças [...] (HARRES, 2002, p. 98).

Na última categoria da “física da força impressa”, ímpetus avançado, encontram-se aqueles sujeitos que outorgam um papel cada vez maior ao atrito como causa da extinção do movimento, mas não é feita menção de variação, por influência mútua, entre o atrito e a força impressa. Nesta categoria tem-se, por exemplo:

A força de atrito é contrária ao impulso fazendo parar [...]; a força a favor e contra deixam de existir em C, onde há apenas gravidade [...]; foi aplicada uma força e devido ao atrito o corpo parou [...] (HARRES, 2002, p. 98).

Não existe uma causa única para estas concepções, os investigadores da área consideram que as primeiras idéias alternativas, talvez as mais sólidas, desenvolvem-se na mais tenra idade. Ao observar os fenômenos naturais, as crianças buscam relações causais e elaboram modelos explicativos e de predição. Neste processo de conhecimento, elas atribuem vida aos objetos inanimados e realidade física as ações, por exemplo, ao dizer que um bloco em repouso em um plano inclinado faz força para não cair e que força é algo que está dentro do objeto que se move. Além disso, de acordo com Solis Villa (1984, p. 85):

Los alumnos tienen dificultad para el razonamiento abstracto. Tienen a considerar el aspecto concreto de la situación y ello les lleva a conclusiones intuitivas, basadas en la inducción a partir de la observación de la realidad inmediata. La explicación intuitiva más evidente es, a menudo, equivocada, (Einstein e Infeld, 1963). La realidad inmediata a menudo enmascara parte del fenómeno natural, que sólo se desvela en su totalidad por su proceso de abstracción hipotético-deductivo, que facilita la interpretación correcta del fenómeno. El ejemplo (iii) es ilustrativo: La observación diaria induce a pensar que un cuerpo se detiene cuando la fuerza que lo empuja deja de actuar. Este esquema alternativo, que relaciona la fuerza con la velocidad (si

$F = 0$, entonces $V = 0$), es el resultado de un proceso de razonamiento basado en la inducción desde la realidad inmediata. Hay que abstraerse de ésta, eliminando las fuerzas de rozamiento, para llegar a la formulación de la 1ª y 2ª ley del movimiento de Newton (si $F = 0$, entonces $V = \text{cte.}$). Fue precisamente el uso de la capacidad de abstracción, permitiendo el experimento ideal, lo que posibilitó el tránsito de la Física aristotélica a la Física de Galileo y Newton y ello llevó siglos. No es de extrañar que los alumnos adquieran y retengan estas ideas intuitivas pre-galileanas acerca del movimiento, que dificultan el aprendizaje de la Dinámica.

Somando às causas psicogenéticas temos a influência do meio social, principalmente dos meios de comunicação. Os filmes, desenhos animados e revistas estão repletos de concepções alternativas que reforçam as já existentes nos alunos. Como exemplo, segue a análise que fizemos da revista Superinteressante.

5 ANÁLISE DOS ARTIGOS DA REVISTA SUPERINTERESSANTE COM FOCO NA RELAÇÃO ENTRE FORÇA E MOVIMENTO

5.1 APRESENTAÇÃO DA REVISTA

Presencia-se uma era rica em invenções e descobertas científicas e tecnológicas, as quais se têm expandido rapidamente do meio acadêmico e dos laboratórios para a sociedade em geral pela difusão científica. Segundo Bueno (1985, p. 1421), difusão científica é “[...] todo e qualquer processo ou recurso utilizado para a veiculação de informações científicas e tecnológicas.” Por exemplo, os bancos de dados, sistemas de informação de institutos de pesquisas, serviços de bibliotecas, reuniões científicas, periódicos especializados, páginas de ciência e tecnologia dos jornais e revistas, programas de rádio e televisão dedicados à ciência e à tecnologia e filmes sobre temas científicos. Ainda de acordo com este autor, a difusão científica divide-se em dois ramos de acordo com a linguagem e o público alvo ao qual se destina a informação. Quando voltada a um público especializado, é denominada disseminação científica, apresentando dois níveis, a intrapares e a extrapares. Ao ser direcionada ao público em geral é chamada de divulgação científica.

De acordo com esta terminologia, a revista Superinteressante é considerada de divulgação científica. Ela completou em outubro de 2007 vinte anos de publicação, sendo o veículo de comunicação científica mais longevo da história nacional e, atualmente, a segunda maior publicação mensal do país com vendagem em torno de 412 mil exemplares/mês. Neste longo tempo de existência, sofreu várias modificações. Concebida nos moldes da revista espanhola *Muy Interesante*, que teve os direitos comprados pela editora Abril, tinha a preocupação inicial de divulgar a Ciência, contemplando assuntos não abordados pelo currículo escolar. A partir de 1994, as páginas da revista ficaram mais coloridas com a inclusão de infográficos. Temáticas de comportamento, religião e misticismo também passaram a ser abordadas com mais frequência, caracterizando uma clara distinção em relação aos anos anteriores. Contudo, a grande mudança editorial ocorreu entre 2000 e 2007, com um grande aumento de assuntos de História, religião, comportamento, misticismo e cultura, e pela redução de temas da área das Ciências Naturais (MIRANDA, 2005).

Esta mudança editorial refletiu na amostra final selecionada para a nossa análise²⁴. De 2000 a 2005 escolhemos 17 artigos (cerca de 31% do total), todavia, no mesmo período de tempo, de 1994 a 1999, selecionamos 28 artigos (cerca de 51% do total). Outra característica marcante da revista é que a maioria dos artigos relacionados à Física tem como tema a Astronomia e/ou Cosmologia. Por exemplo, dos 55 artigos de nossa amostra final, 32 (aproximadamente 58%) são sobre estes assuntos. Na segunda seção deste trabalho, mostramos como foi feita a escolha desta amostra e adiantamos que a análise visava categorizar a concepção entre força e movimento presente no texto em aristotélica, newtoniana ou indefinida. No entanto, não explicamos como foi feita a escolha destas categorias. É o que faremos aqui, junto com o tratamento, a inferência e a interpretação dos resultados obtidos. Como vimos na segunda seção, esta é a terceira e última etapa dos procedimentos metodológicos da análise de conteúdo, de acordo com Bardin (1977).

5.2 TRATAMENTO DOS RESULTADOS OBTIDOS, INFERÊNCIA E INTERPRETAÇÃO

A nossa intenção inicial era seguir o exemplo de Harres (2002) e dividir as concepções sobre a relação entre força e movimento encontradas na revista em cinco categorias: aristotélica, ímpetus inicial, ímpetus médio, ímpetus avançado e newtoniana. Adotando como metodologia para a divisão das categorias do ímpetus as mesmas três perguntas utilizadas pelo autor. Infelizmente, não foi possível pôr esta idéia em prática. A relação entre força e movimento encontrada nos artigos é pontual, ou seja, refere-se a determinados instantes da trajetória do corpo. Reforçando o que dissemos na quarta seção, quando isto acontece, as únicas concepções que podem se manifestar são a aristotélica e a newtoniana. A concepção da “física da força impressa”, para ser percebida, exige uma explicação do início ao fim do movimento. Deste modo, escolhemos categorizar a concepção entre força e movimento presente no texto em aristotélica, newtoniana ou indefinida. Esta última categoria foi necessária, pois, em muitas reportagens analisadas, apesar do texto mostrar uma relação entre a força e o movimento, não fica claro se o autor considera a força proporcional à velocidade ou à aceleração.

Outra dificuldade encontrada foi não podermos utilizar de indicadores e codificadores, muito comuns em pesquisas que empregam os procedimentos metodológicos da análise de

²⁴ Ver Tabela 1, página 15.

conteúdo, para auxiliar, estatisticamente, na interpretação e inferência dos dados. Por exemplo, dos 759 artigos em que apareciam a palavra-chave “força”, encontramos em 410 deles a palavra-chave “velocidade”, e em 52 a palavra-chave “aceleração”. Uma análise estatística superficial diria que cerca de 54% dos artigos da revista Superinteressante apresenta a relação $F = kV$, pois, força e velocidade aparecem juntas no mesmo texto. Pelo o que já explicamos ao longo do trabalho, fica evidente que esta é uma conclusão completamente equivocada. Para ilustrar como categorizamos os artigos, selecionamos trechos de alguns deles. Limitaremos-nos a analisar apenas o foco de nossa pesquisa, imprecisão no uso de termos científicos e interpretação errônea de outras teorias físicas, por exemplo, deixaremos como sugestões para pesquisas futuras.

a) **Concepção aristotélica:**

a.1) COMO FICARIA A F-1 SEM AS RESTRIÇÕES NO REGULAMENTO? (CD 9 – JUL. 2003 – ED. 190 – PG. 30-31)

“O baque de uma freada brusca numa velocidade dessas é cruel. A pressão faria o corpo do sujeito ser jogado para a frente com uma força seis vezes maior que a da gravidade (ou ‘de 6 g’, como dizem os técnicos). Isso pode dar num desmaio ou numa parada cardíaca”.

Comentários: Ao afirmar que em uma freada brusca o corpo do motorista é “jogado para a frente”, a reportagem passa a mensagem subliminar de que o movimento do motorista é provocado por uma força. O correto seria dizer que por inércia o corpo mantém a mesma velocidade que tinha no instante da freada.

a.2) OS RAPIDINHOS DO SISTEMA SOLAR (CD 5 – FEV. 2000 – ED. 149 – PG. 26)

“A 58 milhões de quilômetros da sua estrela, Mercúrio equilibra a gravidade que o puxa girando à alta velocidade de 173 000 quilômetros por hora. Isso gera a força oposta capaz de mantê-lo em sua órbita”.

Comentários: Mercúrio não equilibra a força gravitacional do Sol, senão ele não estaria em órbita. O planeta está apenas em uma eterna queda livre em direção a esta estrela. Esta maneira de se expressar remete a idéia de que se a força é proporcional à velocidade, então, uma “alta velocidade” é capaz de gerar uma “força”.

a.3) O CAÇADOR DE GALÁXIAS (CD 8 – AGO. 1999 – ED. 27a – PG. 12-13)

“A pergunta seguinte era inevitável. Se as galáxias estão cada vez mais longe umas das outras, qual é a força que impulsiona o seu movimento? Só poderia ser a tal explosão sugerida, em 1927, pelo cosmologista belga Georges Lemaître (1894-1966), precursor da teoria do Big Bang. Graças a Hubble, essa explicação sobre a origem do Universo se tornava convincente”.

Comentários: O artigo fala da descoberta empírica de Hubble de que o universo está em expansão. Em nenhum momento é dito que esta expansão é acelerada, deste modo, a pergunta proposta sugere fortemente a relação de que $F = kV$ para quem a lê. As galáxias podem estar cada vez mais longe uma das outras simplesmente pelo movimento inercial surgido com o Big Bang.

a.4) TEM UMA MOSCA NO MEU ELEVADOR (CD 5 – JAN. 1999 – ED. 136 – PG. 21)

“Quando o elevador começa a descer, há uma variação de velocidade que gera uma pequena força para cima.

1. Na hora em que o impulso aparece, os órgãos do abdome do homem sobem, causando um ‘frio na barriga’. A mosca, como é muito leve, nem deve sentir nada”.

Comentários: Este texto foi encontrado em uma seção da revista denominada “Superintegrante”, que consiste na apresentação de perguntas e respostas sobre os mais variados assuntos. Neste caso, a pergunta era: “Por que, quando um elevador desce, um inseto que está dentro dele não bate no teto?”. O argumento apresentado diz que, no instante que o elevador começa a descer, a tendência de movimento dos órgãos do abdome do homem gera uma força puxando-os para cima. Ou seja, implicitamente, o movimento relativo entre os órgãos internos e a parte externa do corpo em contato direto com o elevador é associado a uma força. Na realidade, enquanto a parte externa se movimenta, os órgãos internos, por inércia, permanecem em repouso.

a.5) NÃO LEVITA, MAS TAMBÉM "VOA" SOBRE OS TRILHOS (CD 4 – JAN. 1996 – ED. 100 – PG. 12)

“É que o trem japonês corre sobre um conjunto de bobinas que são como ímãs invertidos: em vez de atrair, elas empurram o trem para cima. Ele flutua 10 centímetros sobre o solo. Além disso, as bobinas também empurram a máquina para a frente, dando-lhe velocidade. O difícil é construir a rede ferroviária eletrificada, necessária ao projeto. Por isso, o trem americano, criado pelos Laboratórios Sandia, não flutua. Corre sobre rodas em trilhos comuns. Do

maglev, ele herdou apenas a força magnética, gerada por bobinas que ficam dentro da locomotiva, e não no chão”.

Comentários: A expressão “[...] as bobinas também empurram a máquina para a frente, dando-lhe velocidade.”, sutilmente, permite a seguinte leitura: “[...] as bobinas exercem uma força empurrando a máquina para a frente, dando-lhe velocidade”. O leitor que apresenta a concepção alternativa de que a velocidade é proporcional à força, terá a concepção reforçada por esta passagem. Pensando nestes leitores em potencial, o autor do artigo poderia dizer: “[...] as bobinas também empurram a máquina para a frente, alterando-lhe a velocidade”. Para alterar a velocidade precisa-se de uma força, para manter a velocidade, nem sempre.

b) **Concepção newtoniana:**

b.1) BIG BANG (CD 10 – MAIO 2005 – ED. 213 – PG. 78-83)

“No final dos anos 1990, por exemplo, descobriu-se que o Universo não só aumenta, como está acelerando. Alguma força - até agora chamada de "energia escura" - está empurrando o cosmo, mas ninguém sabe muito bem o que é, nem o que ela fez desde o big-bang”.

Comentários: Diferente do artigo “O caçador de galáxias”, a força está corretamente associada com a expansão acelerada do Universo. É necessária uma força para acelerar a expansão do Universo, mas, para manter esta expansão, esta exigência não é obrigatória.

b.2) COMO FUNCIONA O FLIPERAMA? (CD 6 – JUN. 2001 – ED. 165 – PG. 40-41)

“Esse brinquedo desafia a lei da gravidade, exigindo que se controle o movimento sempre acelerado de uma bola metálica em um plano inclinado”.

Comentários: Escolhemos este trecho por acreditarmos que ele induz, implicitamente, a concepção newtoniana de movimento, por causa da afirmativa de que o movimento da bola metálica durante o plano inclinado é “sempre acelerado”. Isto inclui o instante em que a bola pára no ponto mais alto da trajetória. Pelas pesquisas que vimos na quarta seção, a maioria dos alunos acredita que neste instante não existe aceleração, pois, velocidade nula implica em força nula e sem força não tem como alterar a velocidade. Deste modo, o trecho analisado contraria este esquema de raciocínio.

b.3) PRA BAIXO O SANTO AJUDA, PRA CIMA A COISA MUDA (CD 5 – JAN. 1998 – ED. 124 – PG. 24)

“Quando a máquina acelera na descida, por inércia, o corpo do passageiro tende a continuar no alto, compensando a atração para baixo da gravidade. Daí, a balança acusa um peso menor que o real. Quando o elevador está quase chegando, na freada, o corpo do passageiro tende a continuar descendo: essa aceleração soma-se à da gravidade e a balança marca um peso maior. Na subida acontece o contrário: a balança marca um peso maior durante a aceleração da máquina e menor na freada. Quando o elevador está parado ou movendo-se numa velocidade constante, a balança marca o peso correto”.

Comentários: Mais um texto da seção de perguntas e respostas “Superintegrante”. Desta vez, a pergunta era: “Quando descemos num elevador, nosso peso diminui?”. Uma possível resposta aristotélica seria dizer que a variação de velocidade gera uma força puxando o corpo do passageiro para cima aliviando o peso na balança. Sobre a óptica da concepção newtoniana de movimento, a explicação está correta.

b.4) O IRMÃO DE JÚPITER E SEU SOL VIAJANTE (CD 4 – SET. 1996 – ED. 108 – PG. 70)

“Primeiro, eles notaram uma tênue mudança na velocidade com que Lalande viaja em direção ao Sol. Ela está acima do plano da Galáxia e desce para cá como um elevador, a 306 000 quilômetros por hora [...] Depois, viram que, de trinta em trinta anos, essa velocidade é sutilmente desacelerada, como se algo estivesse puxando a estrela para trás. Isso é um indício de que existe um corpo girando ao seu redor. Quando esse corpo está do lado oposto ao sentido do movimento, sua força breca a estrela. Gatewood e seus colegas vão agora tentar ‘chegar mais perto’ do distante sistema solar, usando o grande telescópio Keck, no Havaí. Entre outras coisas, eles querem calcular com precisão a órbita do novo Júpiter”.

Comentários: A expressão “[...] essa velocidade é sutilmente desacelerada, como se algo estivesse puxando a estrela para trás [...]”, pode ser interpretada como “[...] essa velocidade é sutilmente desacelerada, como se algo estivesse fazendo uma força na estrela para trás [...]”. Induzindo a uma concepção newtoniana de movimento.

b.5) CIÊNCIA FORA DA SALA DE AULA (CD 3 – JAN. 1994 – ED. 76 – PG. 36-41)

“Qualquer corpo em queda, na ausência de ar, alcança 36 quilômetros por hora, no primeiro segundo, e incrementa sua velocidade a cada segundo. Descoberta pelo sábio italiano Galileu Galilei (1564-1642), essa lei não vale para os pica-paus de brinquedo que escorregam num arame esticado. Eles caem com velocidade praticamente constante porque sobre eles atuam duas forças: a gravidade, para baixo, e a força de atrito do seu “pé” com a haste, para cima. Desse modo, a força resultante do movimento é nula e não há variação de velocidade. Por isso

mesmo, os pica-paus podem ser usados no cálculo da velocidade média (constante). Basta medir o tempo que o pica-pau demora na queda, e dividir o comprimento da régua pelo tempo. Na prática, a velocidade tem um valor próximo dos 7 quilômetros por hora, ou quase 2 metros por segundo”.

Comentários: Contrariando o raciocínio aristotélico de que cessada a força, cessa o movimento, a reportagem afirma que mesmo quando a força resultante sobre o brinquedo é nula, ele continua caindo, embora não varie a sua velocidade. Implicitamente, a relação $F = kV$ é contestada e a relação $F = ka$ é confirmada.

c) **Concepção indefinida:**

c.1) POR QUE OS CICLISTAS USAM ROUPAS DE LYCRA? (CD 9 – NOV. 2003 – ED. 62e – PG. 12)

“Uma roupa de superfície lisa é fundamental para o desempenho do ciclista, em especial nas modalidades que exigem alta velocidade. ‘Esse tipo de tecido diminui o atrito com o ar e evita ‘turbulência’ no movimento. Assim, não é necessária muita força para atingir grandes velocidades’, diz o professor Mauro Catani, do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP). Segundo Filipe Chauvin, proprietário de uma confecção especializada em uniformes para o esporte, os fios de elastano (chamados comumente de Lycra, marca registrada da DuPont) são microfibras de borracha e representam de 7% a 20% da composição do tecido. ‘Há tecidos de alta performance nos quais os fios são ocos, a fim de facilitar a transpiração’, diz. Nas provas longas, que exigem resistência, os atletas costumam optar por camisetas de poliéster. ‘Como não estão preocupados com a relação entre força e velocidade, eles preferem um tecido que facilite a transpiração e proporcione conforto’, diz Chauvin”.

Comentários: O texto relaciona a força com a velocidade em duas passagens, uma quando diz “[...] não é necessária muita força para atingir grandes velocidades [...]” e a outra quando explica que os ciclistas “[...] não estão preocupados com a relação entre força e velocidade, eles preferem um tecido que facilite a transpiração e proporcione conforto”. Acreditamos que estes dois trechos não deixam claro se a força é proporcional à velocidade ou à variação da velocidade, por isto, definimos a concepção presente na reportagem como indefinida.

c.2) UNIVERSO? QUAL DELES? (CD 5 – MAIO 1999 – ED. 140 – PG. 46-51)

“Desde 1997 se desconfia que há, mesmo, uma força no espaço empurrando as galáxias para longe umas das outras (veja Velocidade máxima, na SUPER número 6, ano 12). Este ano, o efeito foi confirmado pelo astrofísico Saul Perlmutter, do Laboratório Nacional Lawrence Berkeley, nos Estados Unidos”.

Comentários: Não classificamos esta reportagem dentro da categoria de concepção aristotélica por afirmar que há uma força no espaço empurrando as galáxias para longe uma das outras sem questionar a necessidade da existência desta força para que isto aconteça. Ela também não foi categorizada como newtoniana pelo fato de não explicitar se o afastamento das galáxias ocorre de modo acelerado.

c.3) E SE... A TERRA TIVESSE A GRAVIDADE DE MARTE? (CD 6 – NOV. 2000 – ED. 158 – PG. 46)

“Para completar, o próprio homem se tornaria um gigante - pelo menos em força. ‘Uma pessoa que consegue segurar ou erguer um objeto de 40 kg na gravidade normal, poderia com igual esforço, fazer o mesmo com um objeto de 100 kg’, afirma Martins. ‘Um jogador de futebol num mundo desses, desde que com condições de respirar normalmente, daria um chute que forneceria exatamente a mesma velocidade à bola. A diferença é que ela poderia ir 60% mais longe.’ Ou seja: uma patada de fazer inveja a qualquer Nelinho ou Éder Aleixo”.

Comentários: A expressão “[...] daria um chute que forneceria exatamente a mesma velocidade à bola.”, pode ser interpretada como “[...] daria um chute, exercendo uma força que forneceria a mesma velocidade à bola.” A bola estava parada, não há como movimentá-la sem a aplicação de uma força, isto não significa que o movimento da bola é seguido por esta força, muito menos que cessada a força, cessa o movimento. Ou seja, a existência da velocidade não está condicionada a da força. Mas, para a concepção ser newtoniana, o autor deveria ter dito “[...] daria um chute que forneceria exatamente a mesma variação de velocidade à bola”. Deste modo, a concepção de movimento está indefinida.

c.4) VELOCIDADE MÁXIMA (CD 5 – JUN. 1998 – ED. 129 – PG. 38-43)

“O problema é que, ao estudar esse processo, os cosmologistas ignoravam a aceleração. Eles consideravam que, desde o Big Bang, não haveria aceleração nenhuma, quer dizer, a velocidade de expansão do Universo seria imutável. Supunham que ela acontecesse sob o domínio de apenas duas forças antagônicas. A primeira é o estilingue do Big Bang, que tende a afastar as galáxias entre si. A segunda é a força da gravidade, com a qual os grandes grupos de estrelas se atraem uns aos outros, resistindo ao crescimento. Mas, daqui para a frente, conhecendo a existência da aceleração, é inevitável admitir que há um terceiro personagem participando da evolução cósmica”.

Comentários: Neste parágrafo, encontramos indícios das concepções aristotélica e newtoniana. O texto afirma que antes os cientistas acreditavam que a expansão do Universo dava-se com velocidade constante, pois uma força devida ao Big Bang equilibrava a força de

atração universal. Na realidade, a força de atração universal apenas detém o movimento inercial de expansão do Universo após o Big Bang. Ou seja, o movimento de afastamento das galáxias devido ao Big Bang foi indevidamente associado a uma força, seguindo a tradição aristotélica. Considerando-se agora que a expansão ocorre de uma maneira acelerada, é inevitável que exista uma força que supere a força de atração universal. Neste caso, implicitamente, a passagem associa a força com a aceleração, conforme ensinou-nos Newton. Devida esta ambigüidade, preferimos classificar a reportagem como concepção de movimento indefinida.

c.5) A CIÊNCIA VAI AO PARQUE (CD 1 – JAN. 1989 – ED. 16 – PG. 18-23)

“Mas o que aconteceria com o corpo se, no lugar do impulso, fosse empurrado continuamente? Essa força produziria um aumento progressivo na sua velocidade. É a aceleração, descrita na Segunda Lei de Newton. No parque de diversões, em queda livre, o vagão sofre a ação da força da gravidade, portanto acelera. No entanto, não cai na vertical, mas percorre um longo plano inclinado, disfarçado pelos vales e picos do trajeto”.

“O problema é que, quando o vagão entra em alta velocidade num círculo perfeito, a subida é muito brusca, gerando uma força centrífuga de tal intensidade que pressiona os passageiros violentamente contra o assento. No topo ocorre o inverso: o carro desacelera subitamente e se a velocidade cair abaixo de certo limite, a gravidade irá puxar os passageiros de seus assentos, quando estiverem de cabeça para baixo”.

Comentários: O artigo possui uma concepção de movimento indefinida, pois, no primeiro trecho, há uma associação direta entre a força e a aceleração, de acordo com Newton. Mas, no segundo trecho, encontramos novamente a idéia aristotélica de que se a força é proporcional à velocidade, então, uma “alta velocidade” é capaz de gerar uma “força”. Corroborando a nossa análise, quando o autor afirma que “no topo ocorre o inverso”, está implícito em seu raciocínio a relação $F = kV$, ou seja, “alta velocidade” gera “força elevada”, “baixa velocidade” gera “força fraca”.

Diferente da revista Ciência Hoje, em que todos os artigos são escritos por cientistas da área, a Superinteressante utiliza de jornalistas. Estes, muitas vezes, apóiam-se em opiniões de cientistas para escreverem a matéria, deste modo, a maioria das reportagens é uma mescla de conceitos. Talvez isto explique o porquê de tantas concepções de movimento indefinidas que encontramos. Por causa desta mistura de concepções, acreditamos que o tipo de análise que fizemos não permitiria chegar a uma conclusão definitiva sobre a concepção alternativa deste

ou daquele autor. Precisaria, por exemplo, de alguns dos instrumentos de aquisição de dados apresentados na quarta seção. Deste modo, podemos apenas estimar a probabilidade de um leitor da revista ser influenciado pela concepção alternativa aristotélica de movimento. Para auxiliar-nos nesta tarefa, apresentamos a Tabela 2 com as concepções encontradas em cada artigo de nossa amostra final.

Tabela 2 – Concepções encontradas em cada artigo da amostra final

Concepções da amostra final							
Ordem	CD	Mês	Ano	Edição	Páginas	Título	Concepção
1	10	Maio	2005	213	78-83	Big Bang	Newtoniana
2	10	Novembro	2004	206	72-76	Corra para não cair	Newtoniana
3	10	Setembro	2004	204a (especial)	70-73	Em ritmo acelerado	Newtoniana
4	9	Abril	2004	65 (especial)	38	Parto a jato	Aristotélica
5	9	Abril	2004	65 (especial)	39	Para o infinito... e além	Newtoniana
6	9	Janeiro	2004	196	68-72	O nada é quase tudo	Newtoniana
7	9	Novembro	2003	62 (especial)	12	Por que os ciclistas usam roupas de lycra?	Indefinida
8	9	Agosto	2003	191	76-80	Nem tudo é relativo	Newtoniana
9	9	Julho	2003	190	30-31	Como ficaria a F-1 sem as restrições no regulamento	Aristotélica
10	6	Outubro	2001	169	92	Acelera, mané!	Aristotélica
11	6	Julho	2001	166	55-61	Muito além do Big Bang	Newtoniana
12	6	Junho	2001	165	40-41	Como funciona o fliperama?	Newtoniana
13	6	Junho	2001	165	64-67	A arte de voar sem sair do chão	Indefinida
14	6	Novembro	2000	158	46	E se... A Terra tivesse a gravidade de Marte	Indefinida
15	5	Março	2000	150	62-67	Caçadores de explosão	Newtoniana
16	5	Fevereiro	2000	149	26	Os rapidinhos do sistema solar	Aristotélica
17	5	Fevereiro	2000	149	80-83	Expulsos do berço	Indefinida
18	5	Outubro	1999	145	12	Um átomo ajuda a bater recordes	Newtoniana
19	5	Outubro	1999	145	20	É proibido virar cambalhotas no ar	Aristotélica
20	8	Agosto	1999	27a (especial)	12-13	O caçador de galáxias	Aristotélica
21	5	Agosto	1999	143	11	A ventania que breca o planeta	Indefinida
22	5	Maio	1999	140	46-51	Universo? Qual deles?	Indefinida
23	5	Março	1999	138	73	A crise do Big Bang	Newtoniana
24	5	Janeiro	1999	136	21	Tem uma mosca no meu elevador	Aristotélica
25	5	Dezembro	1998	135	90-93	Olha lá a europa	Indefinida
26	5	Novembro	1998	134	124	Sombra e água fresca para o coração no espaço	Aristotélica
27	5	Junho	1998	129	38-43	Velocidade máxima	Indefinida
28	5	Junho	1998	129	91	Einstein acerta até quando erra	Newtoniana
29	5	Março	1998	126	68-73	A dama dos anéis	Indefinida
30	5	Janeiro	1998	124	24	Pra baixo o santo ajuda, pra cima a coisa muda	Newtoniana
31	4	Setembro	1997	120	75-79	Pinças de luz	Indefinida
32	4	Junho	1997	117	12	Einstein na corda bamba	Indefinida
33	4	Junho	1997	117	64-69	Você só enxerga 1% do universo	Aristotélica
34	4	Setembro	1996	108	70	O irmão de Júpiter e seu Sol viajante	Newtoniana
35	4	Abril	1996	103	26-29	Atletas de aço	Indefinida
36	4	Abril	1996	103	64-69	Supernovas, relógios cósmicos	Aristotélica
37	4	Janeiro	1996	100	12	Não levita mas também "voa" sobre os trilhos	Aristotélica
38	4	Dezembro	1995	99	46-55	A última cartada de Einstein	Newtoniana
39	3	Dezembro	1994	87	25-29	Big Bang: Fechado para balanço	Aristotélica
40	3	Julho	1994	82	18-23	Atenção, tripulação!	Indefinida
41	3	Julho	1994	82	78-81	Supermotores para superaviões	Indefinida
42	3	Junho	1994	81	34-38	Delta clipper: este foguete vai e volta	Newtoniana
43	3	Abril	1994	79	16-23	Acima do céu	Newtoniana
44	3	Março	1994	78	52-57	Tudo o que você queria saber sobre o Big Bang	Aristotélica

45	3	Janeiro	1994	76	36-41	Ciência fora da sala de aula	Newtoniana
46	3	Dezembro	1993	75	60-65	Inteligência em movimento	Aristotélica
47	3	Outubro	1992	61	21-26	A implacável dinâmica dos carros	Aristotélica
48	2	Agosto	1991	47	56-60	Supercargueiros no ar	Newtoniana
49	2	Abril	1991	43	22-28	Das pistas para as estradas	Aristotélica
50	2	Março	1991	42	54-58	O vaivém do bumerangue pelo tempo	Newtoniana
51	2	Agosto	1990	35	50-55	Eletricidade sob suspeita	Newtoniana
52	1	Janeiro	1989	16	18-23	A ciência vai ao parque	Indefinida
53	1	Setembro	1988	12	68-74	O mistério do grande atrator	Aristotélica
54	1	Julho	1988	10	60-65	As imagens da relatividade	Newtoniana
55	1	Janeiro	1988	4	84-87	A ciência do chute com efeito	Indefinida

Os resultados mostram um equilíbrio entre as concepções aristotélicas e newtonianas, 17 artigos (aproximadamente 31%) apresentaram a primeira concepção e 22 (cerca de 38%) a segunda. Completando a amostra, temos 16 artigos (aproximadamente 31%) com concepção indefinida. Desconsiderando estes últimos, temos, aproximadamente, 44% dos artigos com concepção aristotélica e 56% com concepção newtoniana. Diante destes dados, podemos responder as duas perguntas que guiaram a nossa pesquisa:

- A revista Superinteressante reforça ou induz as concepções alternativas sobre a relação entre força e movimento?
- Caso afirmativo, isto acontece de modo explícito ou implícito?

A maioria das reportagens, talvez por não aprofundarem muito na questão do porquê do movimento, apresentaram uma concepção newtoniana. Nesse caso, a probabilidade do leitor ser influenciado pelas concepções alternativas sobre a relação entre força e movimento existe, mas em proporções menores do que não ser influenciado. Além disso, cerca de 80% das vezes esta influência está implícita. Os trechos dos artigos que mostramos nesta seção exemplificam esta nossa afirmação. O que nos auxiliou muito a perceber a relação implícita que havia foi a revisão bibliográfica que fizemos, tanto a que abordou os aspectos históricos, quanto a que mostrou as principais pesquisas sobre o tema. Entretanto, esta interpretação não deve ser generalizada, pois, na leitura dos 759 artigos selecionados na primeira amostra, notamos vários outros tipos de concepções alternativas de maior incidência e mais explícitas do que a que pesquisamos, com destaque para a origem, estrutura e evolução do Universo e o conceito de energia. Observamos, também, vários erros conceituais; imprecisão na utilização de conceitos científicos, principalmente, força e energia; definições de leis físicas de forma inadequadas; entre outros equívocos. Nas nossas conclusões finais apresentaremos alguns exemplos de como aproveitar estas deficiências da revista como material didático.

6 CONCLUSÕES

Dentro de nossa proposta original, podemos concluir que a probabilidade de um leitor desta revista ter as suas concepções alternativas sobre a relação entre força e velocidade reforçadas ou induzidas é de, aproximadamente, 30% (cerca de um a cada três artigos). Esta porcentagem abaixo dos 50% – média encontrada nas pesquisas de Viennot (1979), Watts e Zylbersztajn (1981), Peduzzi e Peduzzi (1985a), Clement (1982), Sebastia (1984), McDermott (1984) e Di Sessa (1988) – pode ser explicada pelas particularidades dos instrumentos de aquisição dos dados. Ou seja, para que esta concepção seja identificada com mais intensidade, há a necessidade de formular situações que permitem ao investigado relacionar as grandezas força e velocidade, ou força e movimento de uma maneira mais incisiva. Isto é fácil de ser atingido com questionários e questões abertas, mas difícil em textos com temáticas diversas. Acreditamos que esta dificuldade seja menor quando a relação entre duas ou mais grandezas físicas não está em questionamento, por exemplo, em concepções que envolvam definições do tipo “O que é energia?” e “O que é força?”. Sugerimos, para uma pesquisa futura, verificar a validade desta afirmação.

Outra sugestão seria comparar a análise que fizemos com as de outros professores que não têm familiaridade com as pesquisas sobre concepções alternativas deste tema. Por estarem implícitas, entendemos que muitas delas passariam despercebidas. Seria interessante, também, uma pesquisa com a mesma finalidade desta em outras revistas de divulgação científica mais conceituadas pela comunidade acadêmico-científica, como a revista *Ciência Hoje* e a revista *Pesquisa Fapesp*. Pelo fato dos artigos destas revistas serem escritos por autores reconhecidos por sua sólida formação científica, a tendência é que se verifique uma porcentagem menor de concepções alternativas comparadas com a nossa pesquisa.

Quanto à utilidade da divulgação científica para a sociedade, muitos autores como Almeida (1984), Hernandez-Cañadas (1987) e Ziman (1979), concordam que a formação de um cidadão crítico e atuante está intimamente ligada à sua formação científica. De acordo com Petrucci (apud Alvetti, 1999, p. 59):

A forma e o grau de intensidade de participação da população no processo de desenvolvimento e de transformações que vêm ocorrendo na sociedade,

assim como a possibilidade de usufruir e de se apropriar dos resultados e avanços da ciência e tecnologia, depende, em grande parte, do grau de informação e compreensão que o Estado, os pesquisadores, a classe política, professores, profissionais da comunicação, trabalhadores em geral, e demais segmentos da sociedade tenham sobre o processo científico e tecnológico.

Além desta preocupação, adicionamos o papel educacional da divulgação científica, por isto, não poderíamos encerrar este trabalho sem falar um pouco das potencialidades do uso das revistas de divulgação científica como um material didático. Antes, contudo, lembramos que qualquer recurso didático para ser bem aproveitado não pode prescindir do planejamento e de uma formação de conteúdo sólida por parte do professor. Caso contrário, corre o sério risco de tornar-se apenas uma aula divertida sem vínculo com a aprendizagem significativa. Após satisfazer estes requisitos, encontramos seis razões, sugeridas por Carli (1988), para o uso em sala de aula destes materiais pelo professor: motivar os alunos para o estudo de um tema pouco interessante; mudar o comportamento em relação à aprendizagem de ciências; compreender os mecanismos de funcionamento e de produção do conhecimento científico; ilustrar o conteúdo formal; atualizar conhecimentos em ciência e avaliar socialmente a ciência. Na mesma linha de raciocínio, Silva (2005, p. 52) considera que as revistas de divulgação científica podem ser utilizadas não só para ensinar conceitos científicos:

[...] mas também para discutir aspectos relativos ao processo de produção do conhecimento científico e tecnológico, suas relações com o contexto político-econômico e sócio-cultural em que as atividades científica e tecnológica estão inseridas e até mesmo os interesses envolvidos na difusão destes conhecimentos.

O autor ainda destaca que este tipo de material não é produzido com fins didáticos, o que indica a necessidade de uma análise criteriosa por parte do professor durante a seleção dos artigos. Para auxiliar nesta análise, Silva (2005) construiu um instrumento para identificar, nos artigos de revistas de divulgação científica, elementos que possam proporcionar ao educando uma ampla compreensão das diversas inter-relações entre ciência, tecnologia e sociedade. Por coincidência, outra autora de mesmo sobrenome, citada no início deste trabalho, Hosana Salette Curtt Silva, apresentou, em setembro de 2003, na Faculdade de Educação da Universidade Estadual de Campinas o seu trabalho de mestrado, “Artigos de divulgação científica e o ensino de ciências: concepções de ciência, tecnologia, sociedade”, orientada pelo professor Jorge Megid Neto. A pesquisa teve como objetivo identificar as concepções de ciência, tecnologia e sociedade presentes nos artigos de divulgação científica brasileiros e discutir suas implicações para o ensino de ciências.

De acordo com a autora, foram selecionados 393 artigos de cunho científico, publicados em 2001, e que abordavam temas como saúde, ambiente, astronomia, dentre outros. Mas para a análise foi considerada uma amostra de 199 artigos. Ela priorizou revistas encontradas facilmente em bancas de jornais e de linguagem acessível tanto para estudantes de ensino fundamental e médio, como para a população em geral, são elas: *Época*, *Galileu*, *Isto É*, *Superinteressante* e *Veja*. A partir de 18 variáveis e cinco codificadores adaptados da metodologia desenvolvida para avaliação de livros didáticos de Amaral et al (1999), Silva (2003) utilizou tabelas e métodos estatísticos para considerar a ideologia constante no conteúdo dos artigos. A análise crítica dos dados obtidos permitiu verificar que os artigos “[...] apresentam uma concepção da C&T como atividade social, sujeita a mudanças estruturais, fatores econômicos, interesses políticos, implicações sociais e éticas, entre outros aspectos [...]” (SILVA, 2003, p. 97). Por outro lado, Silva (2003) observou que as cinco revistas escolhidas embutem em seu conteúdo aspectos que indicam uma preocupação muito forte com o mercado de consumo e são marcadas pelo caráter empresarial, ou seja, as mídias pesquisadas preocupam-se demasiadamente com a ampliação de seu público-alvo e com a transformação da notícia em espetáculo.

Por estas duas pesquisas, percebemos que a utilização das revistas de divulgação científica em sala de aula não deve estar restrita a explicação de determinado conteúdo científico, como se fosse um livro didático. Uma das utilidades destas mídias é mostrar aos alunos que a ciência não é “[...] uma bolha que se destacou do mundo e paira, hoje, sobre esse mundo do qual nasceu (ou deveria ter nascido), desvinculando-a das contingencialidades do mundo confuso da natureza e de sua humanidade” (NEVES, 2002, p. 17). Outras formas de utilização foram encontradas no trabalho realizado por Sousa, Pereira Filho e Leal (1996). Para avaliar de que maneira a revista *Ciência Hoje das Crianças* estava sendo recebida, difundida e utilizada em sala de aula como recurso paradidático, os autores fizeram uma pesquisa em 15 escolas com 45 professores de 2ª a 8ª séries do antigo 1º grau. Eles constataram vários tipos de usos, tais como: leitura de um artigo seguido de debate; escolha livre de artigo e apresentação para a turma; desenhos sobre um tema escolhido fazendo uma apreciação sobre o conteúdo; realização de jogos e experimentos. Os autores ainda observaram que para os professores, mais importante do que a revista ser um bom e útil material paradidático, é ela ser um elemento inovador eficaz para a quebra de rotina das aulas.

Além destas aplicações, as revistas de divulgação científica podem ser aproveitadas para introduzir assuntos que normalmente não são abordados de maneira adequada pelos livros didáticos, por exemplo, a física moderna e contemporânea. Este foi um dos objetivos da pesquisa realizada por Alvetti (1999), verificar as potencialidades pedagógica, epistemológica ou metodológica dos artigos da revista *Ciência Hoje*, para trabalhar conceitos da física moderna e contemporânea no ensino médio. O autor chegou à conclusão de que as revistas de divulgação científica podem ser utilizadas de “[...] forma dirigida e sistemática no âmbito escolar, contrariando concepções do senso comum de que apenas serviriam para ‘ilustrar’ aulas de ciências ou simplesmente complementar conteúdos do ensino tradicional” (ALVETTI, 1999, p. 134-135).

Apesar de todas estas vantagens, alguns professores resistem em utilizar as revistas de divulgação científica por elas apresentarem textos conceitualmente incorretos. Argumento contraditório, pois os livros didáticos padecem do mesmo mal e não são rejeitados por causa disto. Claro que estes erros não são desejáveis, mas já que eles existem, uma opção seria utilizá-los em atividades didáticas, como as sugeridas por Campanario (2003). Este elencou 22 atividades didáticas baseadas em erros, imprecisões e outras deficiências encontradas em livros didáticos de física. Para o professor interessado, que não puder ter acesso ao artigo original, selecionamos, com pequenas adaptações, as 9 mais interessantes:

1. Leitura de um texto e comparação com outro texto sem o erro ou a imprecisão que contém o primeiro;
2. Enumeração pelos alunos dos erros e imprecisões que podem ser cometidos na interpretação de um fenômeno ou um conceito e comparação posterior com algum artigo sobre o tema;
3. Redação de uma nova versão do texto com as definições e conteúdos melhorados de forma a não conter o erro ou a imprecisão;
4. Supor que o erro ou a imprecisão esteja certa e obter alguma consequência disto;
5. Análise das diferenças entre a linguagem comum e a científica que explicam algumas das definições defeituosas ou imprecisas;
6. Realização de experimentos para comprovar o erro ou a imprecisão encontrada;
7. Formulação de contra-exemplos que sirvam para demonstrar que a definição formulada está errada ou imprecisa;
8. Comparação com outras fontes de meios de comunicação para verificar se o erro ou a imprecisão é comum;
9. Substituição de termos ou conceitos pelas definições errôneas ou imprecisas para comprovar se estas definições inadequadas possuem rigor em diferentes contextos.

Os erros e imprecisões também podem servir para detectar as concepções alternativas dos alunos. Foi o que fizeram Souza e Souza (2005a, 2005b). Eles elaboraram dois textos próximos ao formato encontrado em revistas e jornais, um sobre o problema do racionamento de energia elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e o outro relacionado à campanha de conscientização para o respeito às faixas de pedestres. Nestes textos, estavam incluídos vários erros, desde unidades incorretas até violações de leis físicas. Ao receberem os textos, os alunos eram orientados a lê-los e redigirem algumas observações. Em seguida, eram informados que os textos continham erros conceituais de Física. Eram, então, solicitados a fazerem uma segunda leitura, destacando e comentando estes erros. Os autores concluíram que:

[...] a utilização de textos tratando assuntos do dia-a-dia e contendo erros conceituais de Física, pode se tornar uma grande ferramenta no auxílio ao reconhecimento de concepções espontâneas, e má formação conceitual, apresentadas pelos alunos em suas argumentações. E, a partir do conhecimento das mesmas, é possível explorá-las a fim de se corrigir a má formação conceitual, apresentada pelos alunos, e também evitar a superposição de estruturas de conhecimentos pelos mesmos (SOUZA; SOUZA, 2005a, p. 4).

Carrascosa (2005) vai além e afirma que as concepções alternativas só podem ser superadas quando os alunos mudarem a metodologia de análise dos fenômenos. A metodologia utilizada por eles tende a tirar conclusões precipitadas e superficiais baseando-se em observações meramente qualitativas. Esta deve ser substituída por outra que supere as aparências. Deste modo, ele sugere a análise crítica de artigos de revistas de divulgação científica em busca de erros conceituais como uma sugestão de atividade para promover esta mudança. No entanto, o autor adverte que não se trata de os alunos encontrarem os diversos erros que, inevitavelmente, existem nestas revistas, mas se concentrarem naqueles que podem reforçar as concepções alternativas mais sólidas e resistentes à mudança.

Acreditamos que a nossa pesquisa contribui para este tipo de atividade. Observando o nosso percurso metodológico para verificar a incidência das concepções alternativas sobre a relação entre força e movimento nos artigos da revista *Superinteressante*, o professor, ou qualquer pessoa interessada, poderá adaptar a metodologia para outros temas e mídias, e antever as dificuldades que podem ser encontradas.

REFERÊNCIAS

ALBANESE, A.; NEVES, M. C. D.; VICENTINI, M. **Concepções de estudantes sobre equilíbrio, atrito e dissipação**. In: NEVES, M. C. D.; SAVI, A. A. (Orgs.). De Experimentos, Paradigmas e Diversidades no Ensino de Física. Maringá, PR: Massoni, 2005. p. 65-84.

ALMEIDA, G. **Ciência para todos**. Ciência e Cultura, v. 36, n. 9, p. 1576-1577, 1984.

ALVETTI, M. A. S. **Ensino de física moderna e contemporânea e a revista ciência hoje**. 1999. 169 f. Dissertação (Mestrado em Educação Científica e Tecnológica) – Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

AMARAL, I. A. et al. **Algumas tendências de concepções fundamentais presentes em coleções didáticas de ciências de 5ª a 8ª série**. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 2., 1999, Valinhos. Atas... Valinhos: ABRAPEC, 1999.

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.

AUSUBEL, D. P., NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. **Psicologia educacional**. Tradução de Eva Nick. Rio de Janeiro: Interamericana, 2 ed., 1980.

BAPTISTA, J. P.; FERRACIOLI, L. **A construção do princípio de inércia e do conceito de inércia material**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 22, n. 2, p. 272-280, 2000.

_____. **A evolução do pensamento sobre o conceito de movimento**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 21, n. 1, p. 187-194, 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.

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 1977.

BARRA, E. S. O. **Omnis Philosophiæ Difficultas: o conceito de força na filosofia natural de Newton**. São Paulo, 1994. 193 f. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Faculdade de Filosofia, Ciências Humanas e Letras, Universidade de São Paulo, 1994.

_____. **A metafísica cartesiana das causas do movimento: mecanicismo e ação divina.** *Scientiae Studia*, v. 1, n. 3, p. 299-322, 2003.

BASSALO, J. M. F. **Nascimentos da Física (3500 a.C. – 1900 a.C).** Belém: Editora Universitária UFPA, 1996.

BAUER, M. W. **Análise de conteúdo clássica: uma revisão.** In: BAUER, M. W.; GASKELL, G (Ed.). *Pesquisa qualitativa com texto, imagem e som: um manual prático.* 3. ed. Tradução de Pedrinho A. Guareschi. Petrópolis (RJ): Vozes, 2002. p. 189-217.

BECKER, F. **A epistemologia do professor: o cotidiano da escola.** Petrópolis: Vozes, 1993.

BOEHA, B. **Aristotle, alive and well in Papua New Guinea science classrooms.** *Physics Education*, v. 25, n. 5, p. 280-283, 1990.

CAMPANARIO, J. M. **De la necesidad, virtud: cómo aprovechar los errores y las imprecisiones de los libros de texto para enseñar física.** *Enseñanza de las ciencias*, v. 21, n. 1, p. 161-172, 2003.

CARLI, E. B. **Jornalismo Científico e o ensino de ciências no Brasil: a utilização de notícias científicas no ensino de Biologia, Física e Química no 2º grau.** São Bernardo do Campo, 1988. 200 f. Dissertação (Mestrado em comunicação), Instituto Metodista de Ensino Superior, 1988.

CARRASCOSA, J. **El problema de las concepciones alternativas en la actualidad (Parte I). Utilización didáctica de los errores conceptuales que aparecen en cómics, prensa, novelas y libros de texto.** *Revista Eureka sobre la Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, v. 2, n. 2, p. 183-208, 2005.

CLEMENT, J. **Student's preconceptions in introductory mechanics.** *American Journal of Physics*, v. 50, n. 1, p. 66-71, 1982.

COHEN, I. B. **O nascimento de uma nova Física.** Lisboa: Gradiva, 1988.

COHEN, I. B.; WESTFALL, R. S. **Newton: textos, antecedentes, comentários.** Tradução de Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: EdUERJ – Contraponto, 2002.

COMTE, A. **Curso de filosofia positiva.** São Paulo: Editora Abril, 1983.

CUNHA, A. L.; CALDAS, H. **Modos de raciocínio baseados na teoria do Ímpetus: um estudo com estudantes e professores do Ensino Fundamental e Médio.** *Revista brasileira de ensino de física*, v. 23, n. 1, p. 93-103, 2001.

DESCARTES, R. **Discurso do método.** São Paulo: Nova Cultural, 1999.

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.

DI SESSA, A. **Unlearning aristotelian Physics: A study of knowledge-based learning.** *Cognitive Science*, v. 6, p. 37-75, 1982.

DORAN, B. G. **Misconceptions of selected science concepts held by Elementary School students**. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 9, n. 2, p. 127-137, 1972.

DRIVER, R. **Student's conceptions and the learning of science**. *International Journal of Science Education*, v. 11, special issue, p. 481-490, 1989.

DRIVER, R.; EASLEY, J. **Pupils and paradigms: A review of literature related to concept development in adolescent science students**. *Studies in Science Education*, v. 5, p. 61-84, 1978.

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.

FERREIRO, E. **Atualidade de Jean Piaget**. Porto Alegre: ArtMed, 2001.

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.

FORATO, T. C. M. **Isaac Newton, as profecias bíblicas e a existência de Deus**. In: SILVA, C. C. (Org.). *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*: Editora Livraria da Física, 2006. p. 191-206.

FULLER, F. **Concerns of Teachers: a developmental conceptualization**. *American Educational Research Journal*, v. 6, n 2, p. 207-226, 1969.

GALILEI, G. **Carta de Galileu Galilei a Francesco Ingoli**. Tradução de Pablo Rubén Mariconda. *Scientiae Studia*, v. 3, n. 3, p. 477-516, 2005.

GARDELLI, D. **A origem da inércia**. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 16, n. 1, p. 43-53, 1999.

_____. **Concepções de interação física: subsídios para uma abordagem histórica do assunto no ensino médio**. São Paulo, 2004. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências – Modalidade Física) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 2004.

GAUKROGER, S. **Descartes – uma biografia intelectual**. Rio de Janeiro: EdUERJ – Contraponto, 1999.

HARRES, J. B. S. **Concepções de professores sobre a natureza da ciência**. Porto Alegre, 1999. 284 f. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 1999.

_____. **Desenvolvimento histórico da dinâmica: referente para a evolução das concepções dos estudantes sobre força e movimento.** Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, v. 2, n. 2, p. 89-101, 2002.

_____. **A física da força impressa: queres que responda o que eu sei ou o que me explicaram na escola?** In: Atas do XV Simpósio Nacional de Ensino de Física. Curitiba: CEFET-PR, p. 1369-1379, 2003.

HESSEN, J. **Teoria do conhecimento.** Coimbra: Armênio Amado, 1980.

HERNÁNDEZ-CAÑADAS, P. L. **Os periódicos: Ciência Hoje e Ciência e Cultura e a divulgação da ciência no Brasil.** Rio de Janeiro, 1987. 190 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Informação) - IBICT/UFRJ/ECO, Rio de Janeiro, 1987.

INGOLI, F. **Discussão a respeito da posição e do repouso da Terra contra o sistema de Copérnico.** Tradução de Adriano Machado Ribeiro e Letizio Mariconda. Scientiae Studia, v. 3, n. 3, p. 467-476, 2005.

KOYRÉ, A. **Estudos de história do pensamento científico.** Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1991.

LOPES, M. H. O. **A retrogradação dos planetas e suas explicações: os orbes dos planetas e seus movimentos, da Antiguidade a Copérnico.** São Paulo, 2001. 232 f. Dissertação (Mestrado em História da Ciência) – Centro Simão Mathias de Estudos em História da Ciência, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 2001.

LUCIE, P. **Física básica: A gênese do método científico.** Rio de Janeiro: Campus, v. 1, 1977.

MACH, E. **The science of Mechanics – A critical and historical account of its development.** La Salle: Open Court, 1960.

MARICONDA, P. R. **O alcance cosmológico e mecânico da carta de Galileu Galilei a Francesco Ingoli.** Scientiae Studia, v. 3, n. 3, p. 443-465, 2005.

_____. **A quarta jornada do "Diálogo" e a teoria das marés.** In: GALILEI, G. Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano. Tradução, introdução e notas de Pablo Rubén Mariconda. São Paulo, Discurso/Imprensa Oficial, 2004. p. 843-68. Disponível em: < <http://www.scientiaestudia.org.br/associac/pablo.asp> >. Acesso em: 14 jul. 2007.

MARQUES, A. **Crítica e bom uso do idioma.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 23, n. 4, Cartas ao Editor, 2001.

MARTINS, R. A. **Descartes e a impossibilidade de ações à distância.** In: FUKS, S. (Org.). Descartes 400 anos: um legado científico e filosófico. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 1998. p. 79-126.

_____. **Galileo e a rotação da Terra.** Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 11, n. 3, p. 196-211, 1994a.

- _____. **O Universo: teorias sobre sua origem e evolução**. São Paulo: Moderna, 1994b.
- _____. **Galileo e o princípio da relatividade**. Cadernos de História e Filosofia da Ciência, n. 9, p. 69-86, 1986.
- MASSONI, N. T. **Estudo de caso etnográfico sobre a contribuição de diferentes visões epistemológicas contemporâneas na formação de professores de Física**. Porto Alegre, 2005. 275 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- McCLOSKEY, M. **Intuitive Physics**. Scientific American, v. 248, n. 4, p. 122-130, 1983.
- McDERMOTT, L. C. **Research on conceptual understanding in Mechanics**. Physics Today, v. 37, n. 7, p. 24-32, 1984.
- MEDEIROS, A. **Continuação da entrevista com Kepler: A descoberta da terceira lei do movimento planetário**. Física na Escola, v. 4, n. 1, p. 19-24, 2003.
- _____. **Entrevista com Kepler: Do seu nascimento à descoberta das duas primeiras leis**. Física na Escola, v. 3, n. 2, p. 19-33, 2002.
- _____. **Entrevista com Tycho Brahe**. Física na Escola, v. 2, n. 2, p. 19-30, 2001.
- MEGID NETO, J.; PACHECO, D. **Pesquisas sobre o ensino de Física no nível médio no Brasil: concepção e tratamento de problemas em teses e dissertações**. In: NARDI, R. (Org.). Pesquisas em Ensino de Física. 2. ed. rev. São Paulo: Escrituras, 2001.
- MIRANDA, A. S. **Superinteressante: das bancas para a escola**. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 5., 2005, Bauru. Atas... Bauru: ABRAPEC, 2005.
- NARDI, R.; GATTI, S. R. T. **Uma revisão sobre as investigações construtivistas nas últimas décadas: concepções espontâneas, mudança conceitual e ensino de ciências**. Ensaio, v. 6, n. 2, p. 145-166, 2005.
- NASCIMENTO, C. A. R. **Para ler Galileu Galilei: Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo**. São Paulo: Nova Stella - Educ, 1990.
- NEVES, M. C. D. **Uma investigação sobre a natureza do movimento ou sobre uma história para a noção do conceito de força**. In: NEVES, M. C. D.; SAVI, A. A. (Orgs.). De Experimentos, Paradigmas e Diversidades no Ensino de Física. Maringá, PR: Massoni, 2005a. p. 163-187.
- _____. **“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, 2005b. p. 189-196.
- _____. **Do infinito, do mínimo e da inquisição em Giordano Bruno**. Ilhéus, Ba: Editus, 2004.

_____. **Lições da escuridão ou revisitando velhos fantasmas do fazer e do ensinar Ciências.** Campinas: Mercado de Letras, 2002.

NEVES, M. C. D.; SAVI, A. A. **A sobrevivência do alternativo: uma pequena digressão sobre mudanças conceituais que não ocorrem no ensino de Física.** In: NEVES, M. C. D.; SAVI, A. A. (Orgs.). De Experimentos, Paradigmas e Diversidades no Ensino de Física. Maringá, PR: Massoni, 2005. p. 23-33.

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.

PACHECO, D. **Tarefa de escola.** Campinas: Papirus, 1983.

PEDUZZI, L. O. Q.; PEDUZZI, S. S. **O conceito de força no movimento e as duas primeiras leis de Newton.** Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 2, n. 1, p. 6-15, 1985a.

_____. **Força no movimento de projéteis.** Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 2, n. 3, p. 114-127, 1985b.

_____. **Física Básica A.** Florianópolis: UFSC / EAD / CED / CFM, v. 1, 2006.

PEDUZZI, L. O. Q.; ZYLBERSTAJN, A. **La Física de la fuerza impresa y sus implicaciones para la enseñanza de la mecánica.** Enseñanza de las Ciencias, v. 15, n. 3, p. 351-359, 1997.

PONCZEK, R. L. **Da Bíblia a Newton: uma visão humanística da Mecânica.** In: ROCHA, J. F. (Org.). Origem e evolução das idéias da física. Salvador: EDUFBA, 2002. p. 16-135.

PORTUGAL, C. A. **Discussão sobre empirismo e racionalismo.** Diálogos & Ciência: revista eletrônica da Faculdade de Tecnologia e Ciências de Feira de Santana. Feira de Santana, ano I, n. 1, dez. 2002. Disponível em: < <http://www.ftc.br/revistafsa> >. Acesso em: 08 jan. 2007.

POZO, J. I. **La historia se repite: Las concepciones espontáneas sobre el movimiento y la gravedad.** Infancia y Aprendizaje, v. 38, p. 69-87, 1987.

RAMOS, M. G. **Epistemologia e Ensino de Ciências: Compreensões e Perspectivas.** In: MORAES, R. (Org.). Construtivismo e Ensino de Ciências: reflexões epistemológicas e metodológicas. 2. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2003.

REZENDE, F.; BARROS, S. S. **Teoria aristotélica, teoria do Ímpetus ou teoria nenhuma: um panorama das dificuldades conceituais de estudantes de Física em Mecânica básica.** Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, v. 1, n. 1, p. 43-56, 2001.

ROGAN, J. M. **Development of a conceptual framework of heat.** Science Education, v. 72, p. 103-113, 1988.

RONAN, C. A. **História Ilustrada da Ciência.** São Paulo: Círculo do Livro S.A., v. III, 1987a.

_____. **História Ilustrada da Ciência.** São Paulo: Círculo do Livro S.A., v. IV, 1987b.

ROSMORDUC, J. **Uma história da física e da química: De Tales a Einstein.** Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1985.

SALTIEL, E.; MALGRANGE, J. L. **Spontaneous ways of reasoning in elementary kinematics.** European Journal of Physics, v. 1, n. 2, p. 73-80, 1980.

SALTIEL, E.; VIENNOT, L. **¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes?** Enseñanza de las ciencias, v. 3, n. 2, p. 137-144, 1985.

SANTOS, R. C. **Pesquisa avalia divulgação científica feita por revistas.** Jornal da Unicamp, ed. 255, p. 4, 2004.

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, 2006.

SAXENA, A. B. **An attempt to remove misconceptions related to electricity.** International Journal of Science Education, v. 14, p. 157-162, 1992.

SEBASTIA, J. M. **Fuerza y movimiento: la interpretación de los estudiantes.** Enseñanza de las Ciencias, v. 2, n. 3, p. 161-169, 1984.

SILVA, H. S. C. **Artigos de divulgação científica e ensino de ciências: concepções de ciência, tecnologia, sociedade.** Campinas, 2003. 136 f. Dissertação (Mestrado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade de Campinas.

SILVA, M. J. **O ensino de CTS através de revistas de divulgação científica.** 2005. 148 f. Dissertação (Mestrado em Educação Científica e Tecnológica) – Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

SILVEIRA, L. M.; TERRAZZAN, E. A. **Concepções alternativas e livros didáticos.** In: Anais do V Encontro de Pesquisadores em Ensino de Física. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Física, p. 504-511, 1996.

SOLIS VILLA, R. **Ideas intuitivas y aprendizaje de las ciencias.** Enseñanza de Las Ciencias, v. 2, n. 2, p. 83-89, 1984.

SOLOMON, J. **Learning about energy: how pupils think in two domains**. European Journal of Science Education, v. 5, n. 1, p. 49-59, 1983.

SONG, J.; CHO, S. K.; CHUNG, B. H. **Exploring the parallelism between change in students' conceptions and historical change in the concept of inertia**. Research in Science Education, v. 27, n. 1, p. 87-100, 1997.

SOUSA, G. G.; PEREIRA FILHO, J. P.; LEAL, M.C. **Revista ciência hoje das crianças – como professores a utilizam em sala de aula**. In: ENCONTRO DE PESQUISADORES EM ENSINO DE FÍSICA, 5., 1996, Águas de Lindóia. *Atas...* Águas de Lindóia: SBF, 1996. p. 72-76.

SOUZA, R. R.; SOUZA, P. H. **Utilizando Textos com Erros Conceituais no Ensino de Física**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 16., 2005, Rio de Janeiro. *Painéis...* Rio de Janeiro: CEFET-RJ, 2005a, painel P098.

_____. **Utilizando Textos com Erros Conceituais de Física Térmica e Eletricidade no Ensino de Física**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 16., 2005, Rio de Janeiro. *Painéis...* Rio de Janeiro: CEFET-RJ, 2005b, painel P099.

THUILLIER, P. **De Arquimedes a Einstein: a face oculta da invenção científica**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1994.

VERAS JÚNIOR, J. S de. **Da informação ao conhecimento: o jornalismo científico na contemporaneidade**. Rio Grande do Norte, 2005. 191 f. Dissertação (Mestrado em Educação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Sociais Aplicadas, 2005.

VIENNOT, L. **Spontaneous reasoning in elementary dynamics**. European Journal of Science Education, v. 1, n. 2, p. 205-222, 1979.

WATTS, D.; ZYLBERSZTAJN, A. **A survey of some children's ideas about force**. Physics Education, v. 16, n. 6, p. 360-365, 1981.

ZIMAN, J. **Conhecimento Público**. São Paulo: Itatiaia, v. 8, 1979.

ZYLBERSZTAJN, A. **Concepções espontâneas em física: exemplos em dinâmica e implicações para o ensino**. Revista de Ensino de Física, v. 5, n. 2, p. 3-16, 1983.