

## **A ATUALIDADE PEDAGÓGICA DA CONTROVÉRSIA HISTÓRICA SOBRE A VERDADEIRA DEFINIÇÃO DA “FORÇA DE UM CORPO”**

Alexandre Medeiros  
Departamento de Física  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Av. Domingos Ferreira 3190. apto 604 Boa Viagem – Recife – PE CEP: 51020-40  
E-mail: med@hotlink.com.br

**Palavras-chave:** história da ciência no ensino, conceitos físicos, força, energia cinética, momento linear

### **RESUMO**

O século XVIII foi o palco para uma acirrada controvérsia a respeito da “*verdadeira*” definição da “*força de um corpo*”. A polêmica girava em torno das idéias de *vis viva* e de *momentum*, envolvendo os partidários de Leibniz e de Descartes. Embora a própria expressão “*força de um corpo*” possa parecer-nos, atualmente, como revestida de um certo anacronismo, a disputa interpretativa em questão, como este presente trabalho tenta mostrar, fazia completo sentido no momento histórico em que estava situada. Tomando a contribuição de D’Alembert para o estabelecimento da distinção entre as evoluções temporais e espaciais de uma força, somos tentados, por vezes, a crer que a questão da polêmica acima referida esteja completamente ultrapassada. Como procuramos mostrar nesta pesquisa, é comum encontrarmos, ainda hoje, professores de Física, com muitos anos de experiência profissional, apresentando dúvidas que relembram aquelas ocorridas no século XVIII. Para investigarmos esta questão, construímos um aparelho muito simples, apresentado neste trabalho, especialmente destinado a suscitar dúvidas sobre o tema em foco: a distinção conceitual entre a energia cinética e o momento linear. Com o auxílio de um tal aparelho, adotamos a abordagem de um estudo de caso, investigando as opiniões de três professores de Física com mais de dez anos de experiência. As suas respostas mostram como certos obstáculos epistemológicos, bem pertinentes no século XVIII, podem manter-se vivos ainda nos dias atuais.

### **ABSTRACT**

There was a strong dispute, in the XVIIIth century, about the “*true definition*” of “*force of a certain body*”. The controversy had to do with the ideas of *vis viva* and *momentum*, and involved the followers of Leibniz and Descartes. Despite the fact that the very idea of a “*force of a certain body*” may seem to us, nowadays, a little bit clumsy, that interpretative dispute was completely meaningful in that particular historical moment. If we consider D’Alembert’s contribution to make a distinction between the spatial and temporal evolution of force, we may sometimes be led to believe that the above mentioned controversy is completely overcome. As we demonstrate in this paper, some experienced teachers of physics are usually encountered

showing some doubts similar to those historical ones occurred in XVIIIth century. A simple piece of apparatus was constructed in order to investigate this issue. Its main goal was to provoke some doubts about the conceptual distinction between kinetic energy and linear momentum. A case study approach was adopted to investigate the opinions of three teachers of physics, all three with more than ten years experience. Their responses exhibit similar epistemological obstacles to those someone could encounter in the minds of XVIIIth century physicists.

## I. Introdução

Um dos grandes feitos da mecânica newtoniana foi o desenvolvimento de relações quantitativas entre as forças atuantes sobre um objeto e as mudanças no movimento do mesmo. Isso, contudo, não altera o fato de que a idéia de força existe independentemente das leis quantitativas do movimento e surge, inicialmente, a partir de experiências bastante subjetivas, como as que envolvem um esforço muscular na aplicação de um ‘puxão’ ou ‘empurrão’ (French & Ebison, 1986, p. 25). A concepção newtoniana de força, entretanto, está longe de ser óbvia, como as pesquisas têm documentado fartamente. Como destaca Warren (1984, p. 2): *“Nós estamos convencidos de forças são necessárias para causar o movimento e que o movimento ocorre na direção da força. Os físicos, porém, assumem um pressuposto completamente diferente de que forças são necessárias apenas para mudar o movimento – uma idéia que parece repugnante para o senso comum”*

Num artigo clássico, McCloskey (1982) já apontara a existência de certos sistemas de crenças entre estudantes que caracterizam uma teoria ingênua do movimento semelhante às concepções medievais do Impetus. McCloskey destacou a enorme resistência que tais concepções ingênuas apresentam à modificação, pelas vias da instrução tradicional e advogam a necessidade de que os professores de Física discutam com os seus estudantes a visão proposta pela teoria do Impetus, confrontando-a com a concepção Newtoniana do movimento. Em 1983, Watts & Gilbert assinalaram, na mesma linha, que as concepções de estudantes sobre as palavras força e energia apresentavam várias discordâncias em relação às visões cientificamente aceitas. Ainda em 1982, Clement assinalava que certas dificuldades manifestas na apreensão de conceitos científicos poderiam ser estudadas utilizando-se problemas de uma complexidade mínima que pudessem isolar as fontes dos possíveis equívocos interpretativos. McClelland (1985) levantou a questão de que as concepções alternativas dos estudantes poderiam ser evitadas definindo-se os termos e os conceitos empregados de uma forma não ambígua, utilizando-os consistentemente com largas exemplificações. Exemplificando com os conceitos de trabalho e variação do momento linear, McClelland alertou também para a necessidade de explicar aos estudantes os limites de aplicabilidade daquelas idéias.

Ainda que não se precise adotar a posição extremada de crer na existência de definições livres de quaisquer ambigüidades que possam evitar as concepções alternativas, há de se admitir que, efetivamente, parcela razoável de tais concepções parece ter sua origem na não compreensão dos limites de validade de certos conceitos físicos.

Sobolewski (1989), por seu lado, estudou as soluções propostas por uma população de 31 estudantes de nível médio para alguns problemas de Física envolvendo o conceito de energia cinética. Baseado nos dados coletados, ele advogou a tese de que uma das

dificuldades encontradas por iniciantes que não conseguem resolver a contento os problemas propostos, é a de que os mesmos costumam concentrar-se nos aspectos superficiais dos problemas, enquanto aqueles mais experientes mostram-se capazes de construir modelos mentais da situação física antes de iniciar a resolução propriamente dita. Para ele, os iniciantes focalizam suas atenções nas terminologias técnicas em lugar de analisarem os processos físicos subjacentes. Ele também enfatizou que o novo vocabulário utilizado confundia os iniciantes. Desta forma, para Sobolewski, as dificuldades inerentes a um tal vocabulário conceitual não seriam compartilhadas por estudantes mais experientes, já introduzidos nos meandros daquela terminologia. Há de se questionar, entretanto, se tais conclusões não estão revestidas de um exagerado otimismo e se mesmo estudantes mais experientes ou mesmo professores de Física não encontrariam sérias dificuldades que seriam, em verdade, inerentes à própria complexidade do processo evolutivo histórico de tais conceitos. Steinberg et al (1987), partindo da constatação de que sérias concepções alternativas sobrevivem ao ensino escolar e mesmo universitário, chamaram a atenção para o fato de que mesmo os grandes gênios construtores da Física enfrentaram problemas semelhantes. Os autores reportam-se aos trabalhos de Isaac Newton, enfatizando as suas crenças antes da publicação dos Principia, traçando um paralelo com as concepções alternativas encontradas entre estudantes contemporâneos relacionadas ao *impetus*. Tomando como referência o efeito retardador, vivenciado pelo próprio Newton, ao insistir em certos modelos bastante enraizados mentalmente, os autores concluem que os estudantes necessitam fazer um grande esforço de desenvolvimento conceitual, no sentido de construir os modelos empregados pelos físicos. Filonovich (1991) discutiu as vantagens e desvantagens do uso de analogias nas abordagens das idéias de momento linear e energia cinética. Barrow & Cook (1993), estudando as concepções alternativas de estudantes da escola secundária americana sobre as oscilações de um pêndulo, sugeriram a utilização de uma série de tarefas, apresentadas na forma de cartões, com o objetivo de que aqueles estudantes pudessem utilizá-las como pontos de partida na construção de um conhecimento mais sólido do conceito de energia cinética. Grimellini-Tomasini et al (1993) fizeram uma ampla revisão das pesquisas educacionais envolvendo a aprendizagem de estudantes sobre o fenômeno das colisões, destacando as diferenças encontradas entre os raciocínios espontâneos e as perspectivas paradigmáticas baseadas nas leis de conservação da energia e do momento linear. Eddington & Barufaldi (1995) mostraram, como resultado de uma pesquisa realizada entre físicos e professores de Física, que existe uma necessidade de integrar ao ensino e à aprendizagem da Física certas características da pesquisa científica. Em particular, no caso do estudo do pêndulo de Newton, os resultados da pesquisa mostraram que certos *insights* dos cientistas podem fornecer pistas a respeito das idealizações a serem buscadas. No tocante ao experimento com o referido pêndulo, todos os entrevistados relacionaram o fenômeno com os conceitos de energia e de momento linear, propondo, contudo, argumentos de diferentes níveis de complexidade e de profundidade. As principais diferenças estavam relacionadas: ao propósito e à natureza das explicações fornecidas; o diferente número de paradigmas requeridos como possíveis modos de descrever o fenômeno; a especificação e o exame dos pressupostos subjacentes às explicações elaboradas; a escolha das variáveis e das incógnitas envolvidas na descrição do fenômeno; a aplicação apropriada dos princípios científicos; assim como ao exame da argumentação geral,

como um todo, em relação à aceitabilidade do modelo subjacente e dos pressupostos envolvidos. Ehrlich (1996) enfatizou a importância da utilização de um pêndulo de Newton como forma de ilustrar as leis de conservação do momento linear e da energia mecânica, discutindo em detalhes certos aspectos comumente negligenciados nas análises, tais como os efeitos da elasticidade, do atrito e do alinhamento das bolas. Meningaux (1994) relatando os dados de uma investigação sobre as compreensões manifestas por estudantes a respeito dos fenômenos de translação e rotação assinala que os sujeitos parecem encontrar grande dificuldade ao apreciarem ocorrências simultâneas desses dois fenômenos. Sequeira & Leite (1991) estudando concepções de estudantes portugueses sobre questões de mecânica, advogaram a tese de que um melhor conhecimento por parte dos professores a respeito da evolução histórica de tais conceitos poderia contribuir para facilitar o ensino.

A íntima relação que o conceito de força guarda com os conceitos de momento linear e de energia cinética, não parece ser devidamente apreciada por muitos estudantes. No seio de toda essa dificuldade de assimilação conceitual parece residir o aspecto sutil do contexto espacial ou temporal no qual esteja sendo estudado o problema de atuação da força em causa. Conhecer um pouco melhor a controvérsia histórica ocorrida no século XVIII sobre este problema pode vir a contribuir para superar parte relevante das origens das dificuldades de aprendizagem apresentadas neste campo do conhecimento.

## II. A Controvérsia Histórica sobre a Conceituação e a Medida da Força

Os séculos XVII e XVIII foram palcos de acirradas disputas entre os seguidores de Descartes e de Leibniz a respeito da conceituação da idéia de força. Para aqueles crescidos, atualmente, dentro do paradigma Newtoniano, essa polêmica pode parecer um tanto sem sentido. Isso se deve ao fato de assumir-se, tacitamente, a força como uma grandeza física que atua sobre um corpo e pode, assim, causar-lhe uma aceleração. Deste modo, a expressão “*força de um corpo*”, na mecânica Newtoniana, é desprovida de qualquer significado. Como assinalam, porém, Westfall (1986), Forbes & Dijksterhuis (1963), Dugas (1988) e Mach (1989), este não era o entendimento vigente nos séculos XVII e XVIII. A conceituação dominante de força estava relacionada ao fato cotidiano de um corpo em movimento ter a capacidade de poder colocar outros corpos em movimento, assim como de vencer resistências. Esta capacidade de um corpo em movimento poder produzir esses efeitos era denominada a sua “*força*”. A questão imediata era determinar de que grandezas físicas dependeria esta força e como seria essa dependência. Galileu, por exemplo, utilizava o termo ‘*momentum*’ afirmando que o ‘*momentum*’ era aquela força (virtude) que dependia não apenas do peso, mas também da velocidade do movimento (Jammer, 1999, pp. 98-99). Descartes (1644), por seu turno, assumia que a força de um corpo era determinada por aquilo que na mecânica medieval havia sido denominado de “*impetus*”, ou seja, o produto da massa pela velocidade de um corpo em movimento. Descartes denominava tal grandeza de “*motus*”, ou alternativamente de “*vis motus*”, enquanto Newton a havia denominado de “*quantitas motus*”, embora, na prática, também a denominasse simplesmente de “*motus*” (Koiré, 1965). O postulado metafísico fundamental da concepção de mundo cartesiana, baseado na imutabilidade divina, estabelecia que em todos os

processos materiais a força total de todos os corpos envolvidos era constante. Em termos simbólicos, isso equivalia a afirmar que:  $\Sigma mv = \text{constante}$ .

Em 1686, Leibniz atacou esta concepção cartesiana argumentando que a “força de um corpo” não era determinada pelo produto “ $mv$ ” e que aquilo que se mantinha constante em todos os processos naturais não era  $\Sigma mv$ , mas sim  $\Sigma mv^2$ , ou como ele denominou: a “vis viva” total. A polêmica em torno das “forças vivas” teve, assim, o seu início e duraria por várias décadas do século seguinte. A essência do argumento de Leibniz estava baseada no fato de que quando um corpo de massa  $m$  desce de uma altura  $h$ , adquire uma “força” de tal forma que é capaz de voltar à altura  $h$  caso seu movimento seja invertido. De acordo com o princípio de Jordanus Nemorarius, a mesma força seria capaz de elevar um corpo de massa  $m/n$  a uma altura  $nh$  e ao cair este corpo tornaria a adquirir a mesma “força” que o anterior. Para Leibniz, isso poderia demonstrar que Descartes estava errado, ou seja, que a verdadeira medida da força deveria ser o seu  $mv^2$  e não o  $mv$  cartesiano. Com efeito, tomando o exemplo dos dois corpos de massas  $m$  e  $m/n$  que deveriam retornar com a mesma “força” ao ponto de lançamento, bastaria calcular esta força nos dois casos utilizando-se subsequentemente as duas conceituações e observar-se qual dessas conceituações obedeceria à igualdade das “forças”. Ora, segundo a cinemática de Galileu, os corpos obedecem à equação de Torricelli:

$$V^2 = V_0^2 - 2gh$$

O corpo A de massa  $m$ , sobe até a altura  $h$ , onde  $V = 0$ , logo:

$$0 = V_{0A}^2 - 2gh$$

$$V_{0A}^2 = 2gh$$

$$V_{0A} = \sqrt{2gh}$$

**1.1.1. Por seu lado, o corpo B de massa  $m/n$  subiria até a altura  $nh$  e assim sendo:**

$$0 = V_{0B}^2 - 2gnh$$

$$V_{0B}^2 = 2gnh$$

$$V_{0B} = \sqrt{2ghn}$$

$$V_{0B} = V_{0A} \sqrt{n}$$

Assim sendo, segundo as conceituações de Descartes e de Leibniz, teríamos, pelo princípio de Jordanus Nemorarius, os seguintes resultados, comparando-se os valores das “forças” dos dois corpos ao retornarem aos seus pontos de lançamento:

Segundo Descartes:

**Força do corpo A ao retornar ao chão/  
força do corpo B ao retornar ao chão =**

$$\frac{\frac{mV_{0A}}{mv_{0A}\sqrt{n}}}{n} = \sqrt{n}$$

Segundo Leibniz:

**Força do corpo A ao retornar ao chão/  
força do corpo B ao retornar ao chão =**

$$\frac{\frac{mV_{0A}^2}{mnV_{0A}^2}}{n} = 1$$

Assim sendo, o argumento de Leibniz parecia colocar a conceituação de Descartes em dificuldades, pois o resultado do quociente das “forças” era diferente de 1.

O escopo deste artigo não permite tratar em maiores detalhes a intensa polêmica travada entre os adeptos das duas escolas. Assinalemos, porém, numa forma contemporânea, a solução de compromisso proposta por D’Alembert, em seu *Traité de Dynamique* (1743), para esta controvérsia ao diferir a evolução temporal de uma força de sua evolução espacial: quando um corpo de massa  $m$  e velocidade  $v$  é submetido a uma resistência  $R$ , de modo que atinja o repouso após haver percorrido um deslocamento  $s$  e haver gasto um tempo  $t$ , aplicam-se as seguintes equações:

1.1.2. Por um lado:

$$Rs = \frac{1}{2}mv^2$$

1.1.3. Por outro lado:

$$Rt = mv$$

A grandeza  $\frac{1}{2}mV^2$ , portanto, determina *até onde* um corpo pode manter-se em movimento sob a ação da força  $R$  e a grandeza  $mV$  determina *até quando* ele pode manter-se em movimento sob a ação da mesma força. É importante notarmos que essa separação conceitual entre as evoluções espaciais e temporais de uma força dão origem aos conceitos de energia cinética e de momento linear. Entretanto, é igualmente importante assinalarmos que tendo esses dois conceitos nascido de uma mesma matriz, o conceito de *força de um corpo*, a sua separação enquanto aspectos distintos de uma mesma realidade, está longe de ser algo trivial. O domínio do formalismo que os envolve não corresponde, em absoluto, à compreensão mais profunda dos seus significados.

De todo modo, por volta de 1820, os tratados teóricos sobre a mecânica passaram a enfatizar o conceito de trabalho, definindo-o como medido pela integral da força em relação à distância percorrida, esclarecendo o seu relacionamento matemático com o conceito de *força viva*, mostrando que ele fornecia uma medida da ‘energia’ mecânica (Harman, 1985, pp. 36-37).

Até que ponto alguns professores de Física, com larga experiência de sala de aula demonstram ou não uma certa clareza da aludida separação conceitual é o alvo da nossa presente investigação.

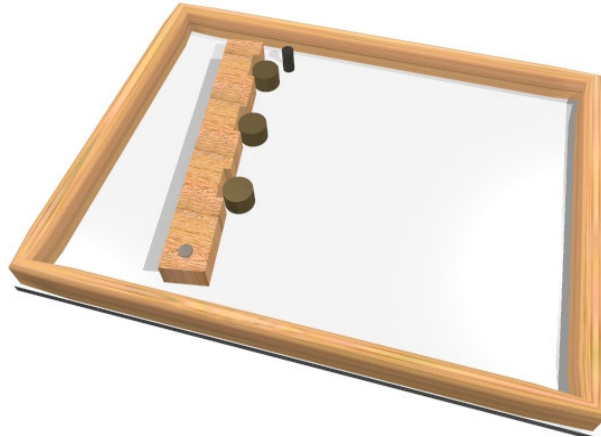
### III. Metodologia

Após esse necessário e breve retrospecto histórico, para situarmos o nosso problema de pesquisa, cabe-nos assinalar as delimitações de ataque à citada questão.

Adotando o paradigma qualitativo de pesquisa, optamos por desenvolver um estudo de caso no qual a profundidade da análise fosse o elemento essencial da investigação. Desta forma, renunciámos deliberadamente a quaisquer pretensões de abrangência das conclusões porventura alcançadas em relação a populações não estudadas. Para melhor caracterizar o tipo de objeto de estudo, decidimos estudar os discursos dos professores de uma certa escola particular da cidade de ##, tida como de bom nível face aos altos índices de aprovação dos seus alunos nos exames vestibulares. Depreende-se daí que os seus professores de Física, presumivelmente, costumavam fornecer aos seus estudantes os elementos básicos essenciais para as resoluções dos problemas, por vezes padronizados, adotados em tais exames de seleção universitária. Os três professores em causa, desta escola, tinham todos dez ou mais de dez anos de experiência docente, motivo pelo qual suas opiniões não poderiam ser creditadas a possíveis inexperiências profissionais.

Como forma de coleta dos dados foi adotada a entrevista semi-estruturada. Isso equivale a dizer que embora houvesse um foco bem nítido no tipo de informação a ser obtida – a clareza ou não da separação conceitual pós-D'Alembertiana dos conceitos de energia cinética e de momento linear – as entrevistas desenvolveram-se seguindo o curso das respostas fornecidas, adequando-se as perguntas, aqui e ali, às situações ocorridas.

Como instrumento detonador da entrevista foi construído um aparato que visava colocar os entrevistados diante de uma situação-problema a respeito do problema em foco. O aparato utilizado em nossa investigação sobre as interpretações dos professores de Física foi construído em madeira, bronze e fórmica, conforme mostra a figura a seguir. Trata-se de uma haste de madeira que gira de um determinado ângulo, empurrando três discos de bronze iguais em dimensões e massa. Ao atingir o pino, a haste para e os discos seguem em linha reta, percorrendo determinadas distâncias ao longo do plano.



A haste gira em torno de um eixo e ao longo dela foram feitos três cavas distantes do eixo 'd', '2d' e '3d'. Tais cavas são necessárias para obrigar os discos a percorrerem trajetórias circulares à medida em que a haste gira em torno do eixo mostrado na figura. A base foi construída em bloco de madeira e sua face superior foi, então, recoberta com fórmica, com o intuito de diminuir e uniformizar o atrito entre este plano e os discos. Tais discos foram torneados em bronze, onde procuramos torná-los praticamente iguais em dimensões e massa.

Nossa investigação centrou-se na análise dos pressupostos embutidos nos modelos explicativos utilizados pelos professores para prever o resultado do experimento. Em uma tal análise, buscamos desvendar os possíveis motivos norteadores do pensamento exposto pelos entrevistados. Para isso, na análise exposta a seguir, optamos pela tentativa de atribuição de significados às falas dos sujeitos à medida em que as mesmas eram exibidas. Deste modo, as conclusões advindas de tais análises constituem-se em uma síntese do material analítico exposto. As decorrências pedagógicas são comentadas e a validade, ou não, de tais conclusões para outras populações não estudadas é levantada apenas como um novo problema de pesquisa, fora do alcance da presente investigação.

#### IV. Análise das Entrevistas

##### IV.1 Entrevista 1

Professor de colégio particular (12 anos de experiência)

O aparato é mostrado ao entrevistado e a situação experimental a ser realizada é descrita.

P\_ Como você acha que os discos de bronze irão se mover após o braço de madeira colidir com o pino?

R\_ *Eles vão parar, mas não imediatamente. Vão percorrer ainda uma certa distância.*

P\_ Que distância?

R\_ *Depende da 'pancada'*

Risos ...



P\_ Tudo bem, mas eu pergunto num determinado caso, como é essa pancada e se isso tem algo a ver com a distância a ser percorrida, nesse caso.

R\_ *Há, claro! A pancada é a mesma para os três discos, porque todos eles estão sendo carregados ao mesmo tempo pelo pedaço de madeira e aí quando a madeira bate no pino eles vão em frente por igual.*

P\_ Explique isso melhor. O que você quer dizer com “eles vão em frente por igual”?

R\_ *Eu quero dizer que eles vão parar todos ao mesmo tempo, pois vão sofrer a mesma força de atrito.*

P\_ Por que?

R\_ *Aí é claro, né? Todos tem a mesma massa. É, péra aí ..., eu não tenho certeza que tenham a mesma massa, mas parece que sim. Se tiverem mesmo, vão parar igual sim, pois a força de atrito não depende da velocidade nem da área de contato, ela é igual a  $\mu N$  e o  $\mu$  é o mesmo já que é tudo bronze contra madeira.*

P\_ Entendi o seu argumento, mas eu gostaria ainda de saber algo mais sobre essa, como você disse, “parada por igual”. O que quer dizer “parar tudo por igual”?

R\_ *Parar tudo ao mesmo tempo, percorrer a mesma distância, tudo igual. A força num é a mesma e as velocidades iniciais também? Então, vai tudo ter que parar igual. Gire aí pra gente ver.*

P\_ Só mais uma perguntinha e a gente gira para observar o que ocorre. Você agora referiu-se às velocidades serem iguais, antes você só havia falado a respeito da força de atrito. Como é essa coisa das velocidades iguais? Quando e por que elas são iguais?

R\_ *Eu já havia falado nisso quando disse que iam pra frente por igual, quer dizer, saem todas com a mesma velocidade e daí tem que parar igual.*

P\_ Você já explicou o que significa “parar igual”, mas por que os discos saem todos com a mesma velocidade?

R\_ *Num tavam todos em contato com a madeira, o tempo todo? Então! A madeira faz a mesma força em todos eles; daí, eles saem todos por igual. O tempo de contato de cada um com a madeira é igual, não tem diferença. Vamos fazer a experiência.*

P\_ OK! Veja lá! Recuei todos os discos igualmente. Vou girar rapidamente. Vejamos o que vai acontecer.

Até este ponto o sujeito 1 havia concentrado sua atenção no fato da barra giratória estar simultaneamente em contato com os três discos de bronze. Isto levou-o a concluir, equivocadamente, que as velocidades lineares dos discos seriam iguais entre si. A igualdade, de fato, ocorre entre as velocidades angulares; mas, não entre as velocidades lineares. Admitindo, porém, que as velocidades iniciais eram iguais, ele prosseguiu concluindo que os três discos iriam parar em tempos iguais, após percorrerem distâncias iguais. Sua abordagem da situação-problema apresentada foi tão pouco elaborada que não lhe permitiu ao menos entrar em linha de consideração sobre questões relacionadas ao momento linear dos discos de bronze.

Prosseguindo a entrevista, o experimento é realizado. Os discos param a distâncias consideravelmente diferentes daquilo esperado pelo entrevistado.

P\_ E então?

R\_ *Faz de novo.*

P\_ *Faça você mesmo.*

O entrevistado faz o experimento corretamente, obtendo um resultado semelhante ao anterior. Para e observa atentamente.

R\_ *Deixa eu pensar. Eu acho que o atrito não é o mesmo, daí os discos não terem parado por igual.*

P\_ *Mas, por que o atrito não é o mesmo?*

R\_ *Não sei, mas talvez dependendo da velocidade ...*

P\_ *Como assim, “dependendo da velocidade”? Você não falou que o atrito não depende da velocidade? Será que é isso mesmo?*

R\_ *Não sei, agora você me pegou. Não estou acostumado a fazer experiências na sala de aula. Quando eu estudei também num tinha experiência, daí tenho uma certa dificuldade. Esse negócio de experimento é muito complicado, é uma faca de dois gumes, pode dar certo e pode dar errado.*

P\_ *Agora, por exemplo, deu certo ou errado?*

R\_ *Claro que deu errado!*

P\_ *Por que?*

R\_ *Porque eu não sei, mas alguma coisa não tá dando certo. Agora, como eu num tenho muita prática em experimento, fico assim apanhando, mas se for pra provar na matemática fica fácil. Quer dizer, fica mais fácil pra mim e pra você que conhecemos o assunto, não pra os alunos, que não têm base. Porque eu acho que um dos grandes problemas do ensino da física é a falta de base matemática, além do salário, é claro, que não dá condições da gente se reciclar.*

P\_ *Tudo bem, mas voltando à questão do nosso experimento, você acha que ele não deu certo ou, talvez, houvesse algo com a explicação anterior?*

R\_ *Como eu já disse, eu não tenho muita prática com experimentos, mas na teoria não. Na teoria, no domínio da turma, eu já tenho doze anos de ensino e isso ensina mais do que a faculdade. Aí eu não acho que tenha algo errado com a explicação. Deve ser algum problema no atrito, como eu disse antes, que eu não estou sacando bem qual é. Porque a coisa é como havíamos visto antes.*

P\_ *Mas, e o fato de haver um conflito entre a sua explicação e o que foi observado não lhe preocupa?*

R\_ *Não muito, porque como eu disse, eu num faço experimento, mas em compensação eu reforço bem na teoria, nos conceitos e na matemática.*

P\_ *Mais alguma coisa que você gostaria de acrescentar?*

R\_ *É só que esse negócio de experimento, como a gente viu, nem sempre é o auê que o pessoal faz. Porque se não tiver um laboratório bom, com instrumento bom, o que custa caro, como é que vai ser? E as escolas não tem recurso, né? O governo num tá nem aí, os políticos só querem o deles. Portanto, sem mudar a política num vai ter solução. Tudo começa por aí.*

P\_ *Muito obrigado pela sua colaboração.*

Para o sujeito 1, o atrito é o responsável aparente pelo desacordo observado entre a explicação teórica fornecida e o resultado do experimento. Ele reformula sua crença inicial sobre a independência da força de atrito entre sólidos em relação à velocidade na tentativa de contornar o impasse. Admite não ter vivência com situações experimentais. Diz que os experimentos podem “*dar errado*” e, na verdade, não percebe a natureza do conflito entre a teoria e o experimento como relacionada ao seu enquadramento teórico. Crendo estar de posse de uma boa explicação teórica, ele atribui o desacordo observado a possíveis falhas experimentais. Acredita dominar a teoria, talvez respaldado na resolução costumeira de um certo número de problemas padronizados do tipo exigido nos exames vestibulares. Ao final, conclui que a utilização de experimentos não é lá um grande recurso pedagógico. Em suas palavras: “*não é lá esse auê*”. Esta atitude conforta-o e livra-o de preocupações com o mencionado desacordo teoria-experimento. Ao final, apela para a questão salarial como justificativa para a situação de conflito vivenciada.

Em linhas gerais, o sujeito 1 nem ao menos chega a posicionar-se como um pré-D'Alembertiano, tal a simplicidade da solução que propõe para o problema apresentado.

## IV.2 Entrevista 2

Professor de colégio particular (11 anos de experiência)

O aparato é mostrado ao entrevistado e a situação experimental a ser realizada é descrita.

P\_ Como você acha que os discos de bronze irão se mover após o braço de madeira colidir com o pino?

R\_ *Vão se mover até parar. O da ponta vai mais longe que os outros dois.*

P\_ Explica isso melhor

R\_ *Quando o bastão bate no eixo, os discos saltam todos ao mesmo tempo, mas eles não param todos por igual porque o que estava mais afastado tinha uma maior velocidade. Esse, então vai mais distante. E o do meio vai mais longe que o primeiro. Esse deve parar mais perto. Não é isso?*

P\_ Depois, nós poderemos fazer o experimento, mas antes gostaria que me explicasse melhor essa história que falou. Por que os discos adquirem velocidades diferentes e como é que isso tem a ver com a forma deles pararem, posteriormente?

R\_ *Eu vejo assim: o braço, o bastão, tá preso aí nesse pino, certo? Quando você gira o bastão de madeira com ele levando os discos com ele, então os discos vão adquirir velocidades diferentes porque estão a distâncias diferentes do pino. Aquele que tá mais afastado do pino vai ganhar uma velocidade maior que os outros e o do meio maior que o primeiro.*

P\_ Mas, quanto maior?

R\_ *Aí é um movimento circular e a velocidade angular é igual, mas a velocidade mesmo depende do raio. É aquela relação:  $v = \omega r$ . Como o  $\omega$  é o mesmo, mas o  $r$  aumenta, então a velocidade aumenta do mesmo jeito.*

P\_ Quer dizer, então, que as velocidades aumentam de que maneira?

R\_ *Aumentam com o r, quer dizer, vai ser  $\omega r$ ,  $2\omega r$  e  $3\omega r$ . Desse jeito.*

P\_ *E como isso interfere com as paradas dos discos após a barra colidir com o pino?*

R\_ *Eu acho que os discos vão parar dessa forma também. O da ponta vai mais distante e os outros proporcionalmente menos.*

P\_ *O que você quer dizer com “proporcionalmente menos”?*

R\_ *Eu acho que as distâncias vão ser assim também, na relação 1, 2 e 3, pois o que está mais rápido vai mais longe.*

P\_ *De que modo o que está mais rápido vai mais longe? Como é que eles param?*

R\_ *Não entendi a pergunta.*

P\_ *Você falou que os discos vão parar na mesma proporção das suas velocidades. Que as distâncias percorridas pelos mesmos estarão nesta proporção, foi isso?*

R\_ *Foi!*

P\_ *Eu, então, gostaria que você explicasse porque os discos vão parar assim.*

R\_ *Eu acho que é uma consequência da quantidade de movimento  $mv$  de cada um. O da ponta, por exemplo, vai ter uma quantidade de movimento três vezes maior que o primeiro e então vai parar a uma distância três vezes maior. Claro, que tem o atrito, mas se os discos têm todos o mesmo peso, então a força de atrito vai ser igual, pois ela é  $\mu N$  e o  $\mu$  é o mesmo para os três discos.*

P\_ *OK, vamos fazer o experimento*

Até este momento o sujeito 2 já havia percebido, claramente, o aumento das velocidades lineares com a distância a ser percorrida e não com o tempo a ser gasto até parar. Associa, porém, a variação do momento linear com a distância a ser percorrida e não com o tempo a ser gasto até parar.

Experimento realizado. Os discos pararam a distâncias diferentes, mas não da forma esperada pelo entrevistado.

P\_ *E então, pararam como você havia previsto?*

R\_ *O da ponta foi mais longe e os outros menos.*

P\_ *Certo, mas as distâncias percorridas estão na proporção 1, 2, 3, que você esperava?*

R\_ *Não!*

P\_ *Faça você mesmo o experimento, com cuidado.*

O entrevistado faz o experimento corretamente, obtendo um resultado semelhante ao anterior. Para e observa atentamente.

P\_ *E então?*

R\_ *Eu acho que o atrito não está igual.*

P\_ *Por que você acha que o atrito não está igual?*

R\_ *Porque o da ponta e o do meio estão indo mais longe do que deviam ir. Talvez os discos não estejam polidos por igual e um deles esteja enganchando mais que o outro.*

P\_ *Existiria alguma maneira de testarmos isso?*

R\_ *Vamos trocar os discos da ponta*

Trocados os discos das extremidades. O experimento é mais uma vez realizado, apresentando um resultado semelhante.

P\_ E então?

R\_ *É, não deu certo! Deixa ver! Pode ser que a prancha não tenha sido polida por igual e do lado mais afastado esteja deslizando mais. Foi isso que mostrou ao trocarmos os discos.*

P\_ Mas, será que só existe essa possibilidade de explicação? Não poderá haver algum problema com a própria explicação? Será que o problema está, mesmo, no experimento?

R\_ *Não sei, não tenho muita prática com experimentos. Na escola não tinha quase experimentos e no colégio que eu ensino também não tem laboratório.*

P\_ Mas, pense na possibilidade, apenas na possibilidade, de poder haver algo com a própria explicação que você deu. Pense nela novamente.

### **Pausa**

R\_ *Não vejo nada de errado com a explicação. Não vou dizer que está certo, mas eu não vejo outra maneira, porque as velocidades são do jeito que a gente falou e daí a quantidade de movimento também. Nesse caso, os discos deveriam parar um após o outro.*

P\_ OK, isso nós já constatamos que eles fazem. O problema é que eles não estão parando, como você esperava, na mesma proporção das quantidades de movimento. Por que será que isso está acontecendo?

R\_ *Não sei mesmo! Deve ser o atrito, como falei. Não sei.*

P\_ Mas, com sua explicação não será que pode estar havendo algum problema?

R\_ *É como eu falei, eu acho que tá certa. O problema deve ser no experimento.*

P\_ O que você acha de utilizarmos experimentos nas aulas de Física?

R\_ *Eu acho bom, agora a gente não tem condições. Tem que ter um laboratório e as escolas não têm os recursos. Agora, se tivesse seria muito bom, porque incentivava mais o aluno.*

P\_ Você acha que o papel dos experimentos no ensino da Física é apenas o de incentivar os alunos?

R\_ *Não, mas dá uma motivação maior ver como as coisas acontecem na realidade.*

P\_ E quando as coisas “na realidade”, para usar a sua expressão, não acontecem como o previsto na teoria, o que fazer?

R\_ *Aí não sei, como falei não tenho base em experimentos, mas se o aluno dominar os conceitos e a teoria, ele vai entender onde é que deu errado.*

P\_ Nesse caso, no nosso experimento, você diria que ...

R\_ *Aí é diferente, não tem problema na teoria, eu falo quando o aluno não entender porque não tem base, principalmente base matemática, que é o que está faltando. Eles chegam que não sabem nem fração. Aliás, fração é muito, eles não sabem nem, como é? Não sabem nem as quatro operações. Aí fica difícil para qualquer um ensinar Física nessas condições.*

P\_ OK professor, muito obrigado pela sua colaboração.

O sujeito 2 tenta, logo após realizado o experimento, ver aquilo que havia previsto teoricamente. Premido, porém, pelas circunstâncias do resultado experimental, admite que as distâncias percorridas pelos discos não estão na relação esperada – 1, 2, 3. Entretanto, recorre ao atrito para tentar explicar tal desacordo. Engendra uma explicação imaginosa para contornar o problema e propõe, mesmo, um teste para tal hipótese. A falha experimental dessa hipótese –

atritos desiguais – não lhe leva a abandonar tal linha de raciocínio. Tal como em uma análise lakatosiana do procedimento científico, ele reformula sua explicação para manter o núcleo da sua argumentação intacto. Instado a questionar a teoria utilizada ou o experimento, não vê problemas com a teoria. Sua análise prende-se ao fato de não possuir familiaridade com os experimentos. Insiste no atrito como única explicação plausível. Não separa conceitualmente o momento linear da energia cinética e prossegue atribuindo a distância percorrida à variação do momento linear dos discos. Tenta escapar da situação incômoda em que se encontra conjecturando sobre o papel dos experimentos. Para ele, os experimentos são importantes, mas carregam a necessidade de um bom laboratório e de mais recursos materiais. Admite que os experimentos podem servir como incentivos para os estudantes, como um aspecto motivador. Questionado, vai mais além assumindo uma postura realista ingênua de que esses mesmos experimentos podem mostrar como as coisas são na realidade. Neste momento, não percebe a carga teórica interpretativa dos resultados. Crê que se o seu aluno tiver uma boa base teórica, poderá perceber os motivos das falhas experimentais, mas não questiona que teoria seja essa. Ele mesmo, não consegue alcançar tal intento. Afirma que o desacordo observado não está relacionado com a sua teoria, pois não vê na mesma qualquer falha. Para ele, apenas a teoria dos seus alunos é que pode apresentar tais fragilidades analíticas, pois eles não têm a devida base matemática.

Em linhas gerais, o sujeito 2 articula um discurso mais rico que o apresentado anteriormente pelo sujeito 1. Considera o papel da variação do momento linear, mas em nenhuma circunstância apela para a energia cinética na explicação das distâncias percorridas. Sua forma, portanto, de encarar o problema denota que atribui ao momento linear uma característica de ser algo indefinido que um corpo em movimento possui e que em nenhum momento esboça distinguir da energia cinética, que nem ao menos menciona. Na extensão em que as suas respostas para a situação-problema em causa permite-nos analisar, sua postura é pré-D'Alembertiana, no sentido de não separar com precisão tais conceitos, mas de tê-los – quando muito e se a tanto chegar – unidos em uma indefinida propriedade a ser atribuída ao movimento.

### IV.3 Entrevista 3

Professor de colégio particular (13 anos de experiência)

O aparato é mostrado ao entrevistado e a situação experimental a ser realizada é descrita.

P\_ Como você acha que os discos de bronze irão se mover após o braço de madeira colidir com o pino?

R\_ *Deixe ver. Os discos vão sair com velocidades diferentes. O mais afastado sai mais rápido, pois o raio é maior. Isso, porque estou imaginando que eles têm o mesmo peso. Não, tem nada a ver. Mesmo que tenham pesos diferentes eles vão sair com a mesma velocidade, quer dizer com a velocidade que se tivesse o peso igual. Entendeu?*

P\_ Dá prá explicar um pouco melhor, acho que ficou meio confuso.

R\_ *É que eu tou acostumado a ensinar escrevendo e fico, sei lá, quando tenho que dar uma entrevista...*

P\_ *Relaxe. Isso é só um bate-papo. O que eu quero é saber como as coisas irão acontecer e você estava indo bem, só queria entender melhor o seu pensamento.*

R\_ *Eu acho que os discos vão sair com velocidades diferentes porque os raios são diferentes. E isso não tem nada a ver com o peso. Foi aí que eu me atralhei. Agora, depois do impacto com o pino, eles vão percorrer distâncias, até parar, que dependem daquelas velocidades.*

P\_ *Como assim? Dependem como?*

R\_ *Os discos vão ter quantidades de movimento maiores que os outros do mesmo jeito que a velocidade e então vão parar desse jeito.*

P\_ *E como será esse jeito? Vai haver alguma relação matemática nesta forma deles pararem?*

R\_ *As velocidades vão estar na mesma proporção dos raios, isso é: 1, 2 e 3. Isso, se os raios no aparelho são esses mesmo.*

P\_ *OK! Façamos o experimento!*

Até este momento, o sujeito 3 denota uma clareza na distinção conceitual das velocidades angular e linear dos discos de bronze. Associa tais velocidades lineares distintas – na razão 1, 2, 3 – aos momentos lineares dos três corpos. Menciona que os corpos irão parar na mesma relação matemática das velocidades. Embora até então não haja afirmado explicitamente que esteja se referindo às distâncias percorridas, isso fica claro logo em seguida.

Experimento realizado. Os discos pararam a distâncias diferentes, mas não da forma esperada pelo entrevistado.

P\_ *E então, pararam como você havia previsto?*

R\_ *Não, andaram mais do que eu pensei. O da ponta foi parar lá na casa de ...*

Risos ...

P\_ *Por que?*

R\_ *Eu acho que deve ser o atrito.*

P\_ *Não poderia haver algo com a sua própria explicação?*

R\_ *Eu acho que não, pois os discos saem com velocidades na relação 1, 2 e 3 e isso determina que a quantidade de movimento esteja na mesma relação. Logo, eles vão parar uns após o outro desse jeito. Quer dizer, deveriam parar, mas não estão parando.*

P\_ *Quando você diz, “devem parar desse jeito”, você está se referindo ao que?*

R\_ *À distância que eles vão parar. À distância e ao tempo também.*

P\_ *Quer dizer que o tempo e a distância que os discos levam para pararem estarão na mesma proporção?*

R\_ *É isso aí! Quem tiver a maior velocidade para mais longe e, logo, demora mais prá parar.*

P\_ *Mas, não parece estar acontecendo isso.*

R\_ *É, mas a gente não sabe se o atrito não é maior do lado mais perto e menor do lado mais longe.*

P\_ *Mesmo que fosse, você não acha que as distâncias estão não apenas um pouco diferentes, mas muito diferentes umas das outras para podermos atribuir isso exclusivamente ao atrito? Você mesmo disse que o último disco ia parar na casa de ...*

Risos

R\_ *É, tem isso aí. É difícil que essa diferença seja só pelo atrito.*

P\_ OK! E se houver algo mais a ser considerado, o que poderia ser?

R\_ *Tem a energia cinética dos discos, que eles vão adquirir porque as velocidades são diferentes, mas isso dá no mesmo.*

P\_ Você falou na energia cinética, que antes não havia falado. Como é que ela é?

R\_ *É  $\frac{1}{2} mv^2$ . Quer dizer, o disco da ponta vai ter uma energia cinética bem maior que o primeiro.*

P\_ Tanto quanto a quantidade de movimento?

R\_ *Não, bem maior, do quadrado. É isso! O disco vai mais longe do que a gente esperava porque a energia cinética é maior pelo quadrado da velocidade. Acho que essa é a resposta.*

P\_ Mas, tem uma coisa que eu gostaria que você explicasse. Você antes falou que a quantidade de movimento era maior numa certa proporção, igual à das velocidades e atribuiu as distâncias diferentes a serem percorridas a isso. Disse também que o tempo e as distâncias percorridas para os discos pararem deveriam estar nas mesmas proporções, não foi?

R\_ *Foi, mas estava errado. Se a energia cinética é maior, o disco deve ir bem mais longe.*

P\_ Mas, afinal, quem manda nesse negócio de ir mais longe, a quantidade de movimento ou a energia cinética? O que é que você está chamando de ir mais longe, o tempo ou a distância?

R\_ *Tá meio enrolado, eu sei, mas eu acho que a energia cinética é que está fazendo o disco ir bem mais longe.*

P\_ Esse é o ponto. Eu quero que você me diga por que usar a energia cinética e não a quantidade de movimento, como estava fazendo antes?

R\_ *Tem alguma coisa a ver com o trabalho realizado pela força de atrito que é a variação da energia cinética.*

P\_ Tudo bem. Mas você poderia, igualmente, usar a quantidade de movimento para calcular essa distância a ser percorrida? Ou a quantidade de movimento não está diretamente relacionada com a distância a ser percorrida?

R\_ *Isso tá mesmo complicado; se eu pensar na energia cinética, o resultado é esse aí, mas, se pensar na quantidade de movimento, deveria ser aquele errado. Agora, porque eu não sei. Só sei que pode usar os dois e não está dando certo.*

P\_ Você conhece algo sobre a história de como esses conceitos de energia cinética e quantidade de movimento vieram a ser estabelecidos na Física?

R\_ *Não, eu nunca estudei nada de história da física.*

P\_ O que você acha do uso de experimentos nas aulas de Física?

R\_ *Acho legal; agora, não é fácil porque a gente não foi treinado usando experimentos; quer dizer, eu estudei só na teoria, me ensinaram assim.*

P\_ E qual a sua avaliação disso?

R\_ *Eu acho ruim, eu acho que seria legal fazer os experimentos. Daria mais motivação. Agora, tem que estar preparado porque, de repente, tem coisas que a gente não sabe explicar e pode pegar mal. Então, eu penso, que deveria haver um treinamento maior sobre essas questões. Deveria haver os experimentos e as discussões. Como essa aí que eu ainda estou encucado. Mas, eu vou pensar no assunto.*

P\_ Muito obrigado, mesmo, pela sua entrevista.



O resultado do experimento surpreende o sujeito 3. Ele observa atentamente que o corpo mais distante do centro de rotação foi parar a uma distância consideravelmente maior que os outros dois. Embora apele, como os dois outros sujeitos, inicialmente para o atrito como forma de explicar o aparente paradoxo, rapidamente reformula sua posição. Tal como Galileu que observava as diferenças nos tempos de queda dos corpos, mas não as atribuía às diferenças de peso, dadas as desproporções entre as enormes diferenças de peso e as pequeníssimas diferenças nas distâncias de queda, o sujeito 3 atenta para a desproporção das distâncias percorridas pelos discos e vacila em atribuí-las, exclusivamente, ao atrito.

Confunde, explicitamente, a evolução temporal com a evolução espacial da força aplicada aos corpos. Afirma que tanto as distâncias quanto os tempos de parada deveriam ser iguais. Ao considerar, porém, outros fatores além do atrito que pudessem ser responsáveis pelo aparente desacordo, o sujeito 3 menciona apropriadamente a energia cinética. Vislumbra, então, na energia cinética uma possibilidade explicativa. Afirma categoricamente que os discos vão mais longe dependendo dos quadrados das velocidades. Parece estar, portanto, diante da solução do aparente paradoxo. Questionado, porém, sobre qual o conceito decisivo, em tal caso da distância a ser percorrida, vacila. Expressa sua convicção de que o problema da distância precisa ser resolvido pelo recurso à variação da energia cinética, mas não compreende porque o recurso ao momento linear não forneça resposta semelhante. Aproxima-se de uma postura D'Alembertiana, mas não a atinge permanecendo indeciso sobre o caráter da energia cinética e o do momento linear. As duas idéias parecem confundir-se em sua mente, parecem conceitualmente unidas como algo misterioso e inseparável que os corpos em movimento possuem e que não ousa relacionar explicitamente com a distância e com o tempo. Aproxima-se, bem mais do que os seus dois outros colegas, do cerne da questão, mas não parece compreender o contexto espacial ou temporal que envolve o conceito a ser empregado. Eles, aparentemente, se fundem em sua mente de uma forma semelhante à “*força de um corpo*” tão debatida durante o século XVIII. Apesar de não separar com clareza os conceitos de momento linear e de energia cinética, no contexto do experimento proposto, o sujeito 3 assume uma postura muito positiva do ponto de vista da produção do conhecimento. Sua atitude é bem aberta: admite que não tem familiaridade com os experimentos; mas, admite também que eles não necessitam apenas ser realizados, necessitam também de terem os resultados discutidos. Diante do impasse a que chegou, assume humildemente a sua dúvida dizendo “*estar encucado*”, mas ressalva corajosamente: “*eu vou pensar no assunto*”.

Em linhas gerais, o sujeito 3 apresentou um discurso mais sofisticado do que os seus dois outros colegas. Mesmo sem desvencilhar-se do paradoxo no qual se viu enredado, assumiu posturas epistemologicamente bem mais abertas. Se as suas respostas não o livraram da condição pré-D'Alembertiana acima analisada, ao menos colocaram-no na rota de um questionamento necessário para que mudanças conceituais possam vir a ocorrer.

## V. Conclusões

Em primeiro lugar, é importante frisarmos que os perfis retratados dos três sujeitos entrevistados estão marcados pelas circunstâncias do experimento proposto. Não ousamos garantir que a não distinção conceitual observada entre a energia cinética e o momento linear

repita-se, necessariamente, em outros contextos. Isso parece uma simples questão de bom senso, que não necessita de nenhuma palavra nova para caracterizá-la. Mais ainda, não queremos afirmar que outros professores de Física tenham, necessariamente, posturas semelhantes às demonstradas pelos nossos sujeitos estudados. Entretanto, na extensão em que a análise dos dados coletados permite-nos afirmar, dentro das circunstâncias marcadas do experimento proposto, os sujeitos mostraram-se incapazes de distinguir conceitualmente a energia cinética do momento linear. E essa característica muito assemelha-se àquela traçada no nosso breve retrospecto histórico sobre a polêmica a respeito da “força de um corpo”. Ao menos para estes sujeitos, parece-nos que um conhecimento um pouco mais aprofundado da história da Física, mais especificamente da polêmica histórica acima mencionada, poderia auxiliar a colocar em perspectiva a problemática da situação conceitual em tela. A validade, ou não, das observações aqui analisadas para outros grupos de professores, em diferentes contextos, assim como a eficácia, ou não, de abordagens históricas que auxiliem a superar esse problema, são questões em aberto que transcendem os horizontes do presente trabalho e que se oferecem para outras pesquisas.

## Referências

- BARROW, L. & COOK, J. (1993). Swinging into Pendulums with a Background. *Science Activities*; vol30 n3 p37-39 Fall.
- CLEMENT, J. (1982). Students' Preconceptions in Introductory Mechanics. *American Journal of Physics*; v50 n1 pp.66-71 Janeiro.
- D'ALEMBERT, J. (1743). *Traité de Dynamique (Quantity of Motion)*. In Magie, W. (1963). *Source Book in Physics*. Oxford: Oxford University Press.
- DESCARTES, R. (1644). *Principles of Philosophy (Quantity of Motion)*. In Magie, W. (1963). *Source Book in Physics*. Oxford: Oxford University Press.
- DUGAS, R. (1988). *A History of Mechanics*. New York: Dover Publications Inc.
- EDINGTON, J. & BARUFALDI, J. (1995). How Research Physicists and High-School Physics Teachers Deal with the Scientific Explanation of a Physical Phenomenon. Paper presented at the *Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching* (San Francisco, CA, April 22-25).
- EHRlich, R. (1996). Experiments with "Newton' s Cradle." *Physics Teacher*; v34 n3 p181-83 Março.
- ELKANA, Y. (1974). *The Discovery of the Conservation of Energy*. London: Hutchinson Educational Ltd.
- FILONOVICH, S. (1991). The Power of Likeness: But Analogy Can Take Us Only So Far. *Quantum*; v2 n1 p22-27 Setembro-Outubro.
- FORBES, R. & DIJKSTERHUIS, E. (1963). *A History of Science and Technology: The Eighteenth and Nineteenth Centuries*. Londres: Penguin Books.
- FRENCH, A. & EBISON, M. *Introduction to Classical Mechanics*. Berkshire, Inglaterra: Van Nostrand Reinhold Co. Ltd., 1986.

- GRIMELLINI-TOMASINI, N. et al. (1993). Understanding Conservation of Laws in Mechanics: Students' Conceptual Change in Learning about Collisions *Science Education*; v77 n2 p168-89 Abril.
- HARMAN, P. *Energy, Force and Matter: The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- JAMMER, M. *Concepts of Force*. New York: Dover Publications, 1999.
- KOIRÉ, A. (1965). *Newtonian Studies*. Chicago: The University of Chicago Press.
- LEIBNIZ, G. (1686). Acta Eruditorum (Quantity of Motion). In Magie, W. (1963). *Source Book in Physics*. Oxford: Oxford University Press.
- MACH, E. (1989). *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of its Development*. La Salle, Illinois: The Open Court Publishing Company.
- McCLELLAND, J. (1985). Misconceptions in Mechanics and How to Avoid Them. *Physics Education*; v20 n4 p159-62 Julho.
- McCLOSKEY, M. (1982). Naive Conceptions of Motion; Paper presented at the *Annual Meeting of the American Educational Research Association* (New York, NY, 18 – 23 de Março).
- ROY, C. & SANNIGRAHI, A. (1979). Uncertainty Relation between Angular Momentum and Angle Variable. *American Journal of Physics*; v47 n11 p965-67 Nov.
- SEQUEIRA, M. & LEITE, L. (1991). Alternate Conceptions and History of Science in Physics Teacher Education. *Science Education*; v75 n1 p45-56 Janeiro.
- SOBOLEWSKI, S. (1989). The Effect of New Vocabulary on Problem Solving in Novice Physics Students. Paper presented at the *Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching* (62nd, San Francisco, CA, 30 de Março - 1 de Abril).
- STEINBERG, M. et al. (1987). *Genius Is Not Immune to Persistent Misconceptions: Conceptual Difficulties Impeding Isaac Newton and Contemporary Physics Students*. Massachusetts University, Amherst. Scientific Reasoning Research Institute.
- WARREN, J. (1984). *Understanding Force*. London: John Murray.
- WATTS, M. & GILBERT, J. (1983). Enigmas in School Science: Students' Conceptions for Scientifically Associated Words. *Research in Science and Technological Education*; v1 n2 p161-71.
- WESTFALL, R. (1986). *The Construction of Modern Science*. Cambridge: Cambridge University Press.