

APRENDIZAGEM DOS PRINCÍPIOS DE CONSERVAÇÃO EM ENTREVISTAS DIDÁTICAS

L. Orquiza de Carvalho¹

Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista
Campus Ilha Solteira, SP, Brasil.

A. Villani²

Instituto de Física, Universidade de São Paulo
Rua do Matão, Travessa R, São Paulo, SP, Brasil.

Resumo

O artigo apresenta os resultados de uma pesquisa qualitativa com estudantes de segundo grau sobre a evolução, durante uma série de entrevistas didáticas, de suas idéias referentes aos princípios de conservação em mecânica. É salientado o mecanismo de assimilação das novas idéias juntamente com a relação entre as dificuldades dos estudantes e as situações experimentais. Também são discutidas algumas conseqüências didáticas.

Palavras-chave: leis de conservação, evolução conceitual, entrevistas didáticas.

Abstract

The article concerns the results of a qualitative research with secondary school students on the evolution of their ideas about conservation laws in mechanics, during a series of didactical interviews. We focus on the mechanism of attainment of new ideas and on the relationship between the resistencies to change and the experimental situations. Some implications for teaching are also discussed.

Key-words: conservation laws, conceptual evolution, didactical interviews.

Introdução

As pesquisas recentes sobre concepções alternativas e mudança conceitual têm enfrentado o problema de encontrar estratégias eficientes que favoreçam uma aprendizagem significativa e estável dos conhecimentos científicos (por ex. Nussbaum & Novick, 1982; Rowell & Dawson, 1985; Grimellini et al., 1989; Dreyfus et al., 1990; Duschl & Gitomer, 1991; Brown & Clement, 1992). Os resultados obtidos, no entanto, têm sido inferiores às expectativas iniciais, revelando que o processo de mudança conceitual é muito complexo (Scott et al., 1992). Um dos pontos considerados como de relativa defasagem é a caracterização da evolução do conhecimento dos estudantes, com os mecanismos gerais e/ou específicos que regulam o processo (Niedderer, 1992). Acompanhando passo a passo a mudança do modo de ver dos estudantes envolvidos, estes trabalhos deveriam fornecer algumas pistas sobre os possíveis caminhos de menor resistência e sobre uma eventual assimilação parcial (per es. Grimellini et al., 1989; Dykstra, 1992) que favoreça uma aprendizagem significativa dos conteúdos científicos. O problema torna-se particularmente agudo no caso daqueles conteúdos que constituem a síntese de uma grande quantidade de

¹ Com auxílio parcial da CAPES/ PICD

² Com auxílio parcial do CNPQ

informações, representando de maneira significativa o modo de ver da disciplina. Em tais casos seria muito importante ter informações detalhadas sobre o processo de aglutinamento e de articulação dos novos conhecimentos (Niedderer & Schester, 1992), assim como da interferência das concepções antigas.

A possibilidade de desenvolver uma pesquisa significativa neste campo supõe, da parte dos pesquisadores, um conhecimento detalhado das representações dos estudantes antes e depois da instrução, de maneira a poder detectar as pequenas e as grandes mudanças e também perceber se o sentido da evolução de suas idéias ao longo do processo se aproxima ou se afasta da direcção pretendida.

Nossa escolha de realizar um trabalho de tipo qualitativo, envolvendo estudos detalhados de casos, sobre colisões foi devida à confluência de dois fatores fundamentais. De um lado, as colisões constituem protótipos de interações geralmente analisadas mediante os princípios de conservação da quantidade de movimento e da energia, que por sua vez representam a síntese mais moderna do conteúdo de mecânica proponível no segundo grau. De outro lado, estávamos trabalhando sobre as representações dos estudantes referentes às colisões há vários anos, tendo conseguido muitos resultados sobre as dificuldades na aprendizagem das leis de conservação da quantidade de movimento e da energia (Mariani & Villani, 1985; Mariani, 1987; Grimellini et al, 1988 e 1989; Villani & Pacca, 1990a e 1990b, Grimellini et al, 1993). Além disso estavam disponíveis outros resultados importantes sobre o mesmo assunto (Ricci, 1987; Lemeignan & Weil-Barais, 1988, 1989; Weil-Barais & Lemeignan, 1990) apontando para a necessidade de um aprofundamento do tema.

A PESQUISA E SEUS RESULTADOS GLOBAIS

A Metodologia

A pesquisa, realizada como requerimento parcial para um doutoramento em Educação (Orquiza, 1994) consistiu em seqüências de sete ou oito entrevistas individuais (com duração entre 70 e 90 minutos), numa amostra de seis estudantes de segundo grau. As entrevistas com cada estudante eram realizadas com um intervalo variável entre três e dez dias e tinham uma perspectiva didática: visavam simultaneamente levantar as idéias dos estudantes e modificá-las na direcção do conhecimento científico. Durante as entrevistas-didáticas a entrevistadora alternadamente mostrava ou convidava o estudante a realizar experimentos simples sobre colisões, pedia previsões e possíveis explicações sobre os resultados, questionava as respostas e, às vezes, dava informações para auxiliar o trabalho dos estudantes. Informações mais detalhadas sobre as atividades desenvolvidas durante as entrevistas podem ser encontradas em Villani & Orquiza, 1994

A Amostra

Os estudantes entrevistados tinham uma idade que variava entre quinze e vinte dois anos, e foram escolhidos entre os estudantes conhecidos da entrevistadora com o compromisso de realizar uma serie completa de oito entrevistas sobre Física, de maneira a garantir a continuidade do trabalho. Os dados utilizados preferencialmente foram os referentes a três estudantes (FE, NA, PA), cujas entrevistas tinham sido totalmente gravadas em vídeo;

entretanto, quando oportuno, será feita referência também às outras três estudantes, cujas entrevistas foram gravadas somente em áudio (CE e THA) ou não foram gravadas completamente (DA).

Do ponto de vista do conhecimento inicial, CE, DA, THA e NA já haviam estudado ou, pelo menos, visto o assunto na escola; ao contrário PA e FE nunca tinham tido contacto, sendo que FE nunca tinha estudado Física anteriormente. PA, CE e DA durante as entrevistas mostraram uma capacidade de raciocinar e aprender o conteúdo semelhante aos estudantes médios de nossas escolas particulares, NA e THA podem ser considerados brilhantes e FE com grandes dificuldades

A Revisão Bibliográfica

Na literatura de pesquisa as idéias alternativas (Duit, 1993) dos estudantes sobre colisões são caracterizadas sinteticamente da seguinte forma.

a) Utilização de conceitos espontâneos (Viennot, 1979; Mariani, 1987; Ricci, 1987; Grimellini et al., 1988 e 1989)

- Equivalência entre força e movimento, entre velocidade e aceleração, entre choque e perda de movimento, entre força de impacto e massa incidente
- Variação do peso durante o movimento, atrito como variável sempre significativa, choque como evento instantâneo, colisão como fenômeno ‘natural’.

b) Utilização de modelos incompletos (Mariani, 1987; Grimellini et al., 1993; Lemeignan & Weil-Barais, 1990)

- Focalização do movimento no alvo, desprezando as correspondentes modificações no movimento do projétil.
- Interpretação da colisão como transmissão somente total ou parcial do movimento.
- Referência à ação e à reação como a forças independentes.

c) Utilização de modos de raciocínio espontâneos (Viennot, 1989; Villani & Pacca, 1990a)

- Preferência para as grandezas perceptíveis em detrimento das teóricas
- Raciocínio monoconceitual (focalização de uma única variável quando outras também são significativas)
- Raciocínio linear causal (ignorando a presença e os efeitos de feed-back)

d) Dificuldades na aceitação e uso das leis de conservação (Grimellini et al., 1989 e 1993; Lemeignan & Weil-Barais, 1994)

- Ignorância das condições de contorno (escassa atenção ao grau de isolamento do sistema)
- Pouca familiaridade com as grandezas vetoriais
- Preferência na utilização de raciocínio causais ao invés de esquemas de conservação (sobretudo na ausência de detalhes sobre o estado intermediário)
- Incapacidade de coordenação dos princípios de conservação.

A Estratégia Didática

As entrevistas iniciais confirmaram, para a entrevistadora, a presença generalizada destas idéias e das correspondentes dificuldades para a aprendizagem. Foi escolhida como estratégia dominante a ênfase na análise e discussão de experimentos simples de colisões com as seguintes características (V. Apêndice):

- a) O alvo podia estar em **repouso** ou em **movimento**
- b) O projétil podia apresentar um movimento de **translação** (nos pêndulos o deslizando sobre uma canaleta) ou de **rotação e translação**.
- c) O choque podia ser **central** (nos pêndulos, na canaleta e sobre a guia) ou **bidimensional** (sobre uma mesa ou no aparelho do PSSC)
- d) As massas dos corpos que interagiam podiam ser **iguais**, **diferentes** ou **muito diferentes** (com alvo fixo, com uma parede horizontal ou vertical)
- e) A deformação durante o choque podia ser **visível** (com bolas de borracha ou de massa de modelar) ou **invisível**(com bolas de aço ou de vidro)
- f) O tempo de interação podia ser **breve** ou **longo** (no caso dos carrinhos com mola)
- g) Os choques podiam envolver materiais **elásticos** ou **anelásticos** (bolas de massinha)
- h) O sistema podia estar suficientemente **isolado** ou **pouco isolado** (com o alvo parcialmente preso a seu suporte)

Os Resultados Gerais

Houve uma modificação das representações dos estudantes, mediante um processo “em espiral”, composto de domínios, resistências e mudanças. Os **domínios** conceituais foram caracterizados pela **estabilidade** das representações que **tendiam** a serem aplicadas sem limites. Se a interação com os experimentos e a intervenção da entrevistadora questionassem sua validade, os estudantes passavam a oferecer **resistências**, tendendo a **desprezar** essas perturbações. Somente uma nova **conquista**, alcançada geralmente com a descoberta ou a assimilação de uma nova informação, **diminuía** a resistência anterior e tendia a se transformar em domínio, mas em várias situações as mudanças permaneciam associadas unicamente a situações **específicas** .

A rapidez e a estabilidade das mudanças dependia, de fato, da maior ou menor intensidade dos “**distratores**”, elementos característicos das situações analisadas, que chamavam a atenção do estudante em detrimento das variáveis cientificamente significativas. A conquista de um novo domínio podia **preservar**, parcial ou totalmente, as conquistas anteriores: nestes casos o **progresso** cognitivo era evidente. No caso de conquistas estritamente localizadas a evolução somente reaparecia depois de atingida uma **familiaridade** com elas.

A evolução das representações mentais referentes às colisões foi subdividido em duas etapas: a mudança das representações **fenomenológicas** e das representações **formais**. Chamamos de fenomenológicas as representações referentes aos experimentos e aos correspondentes modelos espontâneos que os interpretavam; chamamos de formais as representações teóricas construídas pelos estudantes a partir da introdução, por parte da entrevistadora, das várias formulações dos princípios de conservação da quantidade de movimento e da energia cinética.

Os dois processos, apesar das semelhanças estruturais (modificações em espiral, dependência de distratores, etc.) apresentam características próprias que, em nossa opinião, merecem um destaque específico. Por isso serão apresentados em separado.

Os resultados referentes às representações fenomenológicas já foram apresentados em outro trabalho (Villani & Orquiza, 1995). Sua evolução pode ser resumida como a **perseguição**, continuamente renovada ao passar de um experimento para o outro, de três conquistas conceituais essenciais :

- a) **Isolamento** do choque das variáveis contextuais (principalmente o atrito e a gravidade), que em geral deveriam ser desprezadas.
- b) Descoberta de uma **relação** entre as mudanças nas velocidades dos corpos interagentes (percepção da existência de várias regularidades)
- c) Caracterização da colisão mediante uma **deformação** nos corpos interagentes, associada às modificações em seus movimentos (compreensão das forças de interação).

Os resultados referentes à **evolução**, ao longo das entrevistas, das **representações formais** dos estudantes sobre colisões serão o objeto específico deste trabalho.

Poder-se-ia pensar que a caracterização do processo de aprendizagem referentes às colisões em duas etapas, com a correspondente distinção entre a evolução das representações fenomenológicas e formais, tenha sido o resultado de uma estratégia específica de ensino: privilegiar nas primeiras entrevistas as discussões qualitativas sobre os fenômenos e nas últimas as discussões sobre os princípios de conservação. Duas considerações nos convenceram tratar-se de uma distinção muito mais significativa e profunda.

· Em primeiro lugar a entrevistadora não adotou esta estratégia de forma sistemática, sobretudo com as primeiras estudantes (CE e THA): já na segunda ou terceira entrevista a conservação da quantidade de movimento e/ou da energia cinética tornou-se objeto de discussão, mas sua assimilação era extremamente frágil, pois o discurso dos estudantes geralmente não fazia referência às informações formais elaboradas com a ajuda da entrevistadora. Em particular, um dos estudantes (FE), cuja cultura científica inicial era extremamente limitada, de fato conseguiu completar, ao longo das oito entrevistas, unicamente o processo de estabilização de uma boa parte das representações fenomenológicas; os eventuais sucessos sobre os princípios de conservação alcançados ao longo das entrevistas eram sistematicamente renegados em situações sucessivas sem que se possa localizar algum domínio com eles relacionado.

· Em segundo lugar pudemos observar que estes princípios somente começaram a ser assimilados de modo significativo pelos estudantes após o estabelecimento, bastante seguro, das representações fenomenológicas. A partir da quinta ou sexta entrevista o discurso dos estudantes fazia espontaneamente referência a eles, apesar de não respeitar de forma sistemática as condições de validade.

A EVOLUÇÃO DAS REPRESENTAÇÕES FORMAIS

Os conhecimentos formais introduzidos pela entrevistadora para uma compreensão adequada dos fenômenos de colisão podem ser assim resumidos:

- i) Conservação da **quantidade de movimento do sistema**, expressa

- seja como igualdade da soma **vetorial** das quantidades de movimento de projétil e alvo, antes e depois da colisão: $(m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 = m_1 \mathbf{v}_1' + m_2 \mathbf{v}_2')$
- seja como igualdade entre as variações das quantidades de movimento de cada corpo interagente, devidas ao choque: $[m_2(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_2') = m_1(\mathbf{v}_1' - \mathbf{v}_1)]$

ii) Conservação da **energia cinética do sistema**, expressa

- seja como igualdade da soma escalar das energias cinéticas de projétil e alvo, antes e depois da colisão: $[(m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2)/2 = (m_1 v_1'^2 + m_2 v_2'^2)/2]$
- seja como igualdade do módulo da velocidade relativa, antes e depois da colisão: $\text{mod}(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) = \text{mod}(\mathbf{v}_2' - \mathbf{v}_1')$

iii) Condições de **validade das conservações**, representadas

- pelo isolamento do sistema (ausência de forças externas significativas) durante o choque, para ambas as conservações,
- pela elasticidade das colisões (forças exclusivamente conservativas e ausência de deformações permanentes) para a conservação da energia cinética.

Durante as entrevistas não se chegou a discutir de maneira quantitativa o comportamento das grandezas e as correspondentes conservações durante a fase de interação; isso prejudicou em parte a assimilação das condições de validade das conservações.

A apropriação por parte dos estudantes dos conhecimentos essenciais referentes às colisões pode ser caracterizada analisando tanto o processo de **resolução** das dificuldades referentes a cada conhecimento específico quanto o processo de **articulação** desses conhecimentos. Apesar dos dois processos terem sido, pelo menos em parte, interdependentes, é possível explicitar cada um deles.

1 - A SUPERAÇÃO DAS DIFICULDADES

O processo de aprendizagem das conservações pode ser definido como uma reorganização dos conhecimentos rumo a algumas **conquistas essenciais**, a partir da eliminação de alguns obstáculos, constituídos pelas concepções espontâneas ‘enraizadas’ (anteriormente acenadas).

Visão Científica versus Visão Espontânea

A compreensão, por parte dos estudantes, dos conhecimentos formais apresentados pela entrevistadora envolveram:

- (a) A conquista do conceito de **sistema**, representado pelo entendimento do significado do **sinal de mais**, nas expressões da igualdade das somas das quantidades de movimento e das energias cinéticas, antes e depois do choque.
- (b) A conquista da idéia de **quantidade de movimento** (unidimensional) a partir do entendimento do significado do **produto** entre massa e velocidade.
- (c) A conquista da idéia de **balanço** da energia cinética, localizando as energias de todos os corpos interagentes e as eventuais **perdas** durante o choque, devidas a deformações permanentes.
- (d) A conquista do **caráter vetorial** das velocidades e das quantidades de movimento, operando com elas mediante as correspondentes regras de composição.

(e) A conquista da idéia de **conservação vetorial** da quantidade de movimento, utilizando-a em todas as situações nas quais o sistema pudesse ser considerado como isolado, e de **quantidade de movimento do sistema**, como grandeza vetorial **invariante**

Essas conquistas implicaram na superação de várias idéias enraizadas. Elas não se deram num único passo; de fato, dependendo do experimento, o estudante tinha que percorrer em boa parte o caminho inteiro, pouco aproveitando do sucesso anterior e, às vezes, até parecendo "regredir".

A superação da **visão contínua** do choque, onde o estado inicial é identificado com o corpo incidente e o estado final com o alvo, e o a apropriação da idéia de sistema têm-se realizado facilmente nos experimentos com alvo em movimento, nos quais a simetria das situações favorecia a percepção de uma troca de energia ou quantidade de movimento. Entretanto, a presença de um alvo inicialmente em repouso tornava nova esta conquista. A introdução de um alvo infinito abria de novo o problema, pois os estudantes tendiam a identificar o sistema com o projétil.

O **tratamento monoconceitual** das grandezas, desprezando sobretudo as influências das massas apareceu objetivamente em todos os experimentos, mas a dificuldade de substituir a velocidade pela quantidade de movimento tornou-se mais aguda nos choques bidimensionais; os estudantes facilmente lembravam que o ângulo entre as bolas era reto (quando as massas eram iguais) e podiam alcançar a conservação da energia cinética aplicando o teorema de Pitágoras às velocidades das bolas.

A **visão** essencialmente **escalar das grandezas** apareceu de maneira diferente nos choques unidimensionais e bidimensionais. No primeiro caso esta visão tornava difícil compreender como a quantidade de movimento do alvo pudesse ser maior do que a inicial, quando havia a volta do projétil. No segundo caso era comum a tentação de fazer uma mistura entre soma escalar e vetorial. Entretanto, parece que os alunos conseguiram rapidamente lidar com essas dificuldades e aprender a trabalhar com vetores.

Diferentemente das poucas resistências específicas à conservação escalar das energias cinéticas, a resistência à **conservação vetorial** apareceu de forma significativa em todos os tipos de experimentos, por causa dos pré-requisitos que ela exigia: de fato para aplicá-la era necessário ter dominado a idéia de sistema, de quantidade de movimento e as regras de composição vetorial. Contudo, as situações mais complicadas foram as que envolviam alvos com massa "infinita", como ficou claro nas entrevistas de NA e PA (os outros estudantes não chegaram a discutir em detalhe estes experimentos).

A introdução, por parte da entrevistadora, das conservações da energia cinética e da quantidade de movimento não obedeceu a uma programação com etapas hierarquizadas: dependendo dos experimentos analisados e dos aspectos focalizados, uma ou outra conservação era discutida. Parece-nos que a assimilação da conservação vetorial da quantidade de movimento se constituiu no que há de mais sofisticado em termos de construção isolada de uma lei. Sua análise detalhada permite revelar as principais dificuldades referentes também aos outros conhecimentos essenciais sobre conservações.

Alguns Exemplos

FE, PA e NA interpretaram, inicialmente, a expressão, introduzida pela entrevistadora, da igualdade das somas das quantidades de movimento (e também das energias cinéticas),

conforme a idéia de transmissão de movimento, seja focalizando um único corpo, seja identificando o estado inicial com o projétil e o final com o alvo. PA, na quarta entrevista, enunciou a lei da conservação da q.m. dizendo que *"todo corpo após um choque tende a conservar a quantidade de antes do choque"*. A entrevistadora tentou questioná-lo, frisando que ele estava se referindo apenas a **um** corpo, ao que ele respondeu: *"ah, é, os corpos"*. Isso, no entanto, ainda não significou consideração simultânea dos dois corpos, pois mais adiante disse que *"um corpo tinha conservado a quantidade de movimento do outro"*. A resistência de NA foi mais expressiva; ainda no início da sexta entrevista ele lembrou a conservação da q.m. como *"a igualdade da quantidade de movimento da bola incidente com a quantidade de movimento da bola alvo"*

O reconhecimento da necessidade de considerar simultaneamente os dois corpos interagentes deu-se inicialmente nos casos unidimensionais. Na sexta entrevista, NA teve a idéia de considerar simultaneamente as duas bolas somente quando presenciou a volta da bola incidente num choque na canaleta, conseguindo, a partir deste momento, lembrar-se do enunciado correto da lei de conservação do momento linear, e aplicá-la aos demais exemplos que lhe foram apresentados.

O impacto da descoberta da necessidade de considerar simultaneamente as duas bolas levou PA a fazer várias tentativas de partir igualmente a velocidade inicial da incidente, depois dos choques independentemente das massas das bolas envolvidas e a interpretar a lei de conservação da quantidade de movimento como conservação da "soma de velocidades". Em seguida, tendo tomado consciência de que tinha que levar em conta a diferença entre massas, PA fez somas do seguinte tipo: *"se a velocidade da incidente for 3 m/s, a velocidade final da bola menor deverá ser 2 m/s e da maior 1 m/s"*. PA aprendeu a considerar como significativas as massas dos corpos interagentes somente depois que conseguiu comparar as expressões das velocidades finais, matematicamente deduzidas a partir das expressões das leis de conservação, com os resultados das experiências.

A conquista da relevância das "massas" dos corpos interagentes não acabou com as dificuldades, pois os estudantes às vezes **esqueciam-se** de estar trabalhando com grandezas vetoriais. PA e NA, em diferentes ocasiões, para somar grandezas não colineares, utilizaram a *"regra do paralelogramo"* para a direção da resultante e a **soma escalar** para o seu módulo. Outra vez PA ainda forçou os cálculos, misturando **signal algébrico** e **sentido** dos vetores, para obter resultados compatíveis com os esperados.

A compreensão da distinção entre velocidade e quantidade de movimento nos experimentos com carrinhos envolvendo o cavalete fixo ofereceu dificuldades ainda maiores. Inicialmente os estudantes apresentavam grande resistência em compreender que o cavalete fixo devia ser tratado como um alvo infinito. Depois achavam que a quantidade de movimento deste devia ser sempre zero, invalidando a conservação. Somente depois que a entrevistadora mostrou que os cálculos matemáticos levavam a uma velocidade final do alvo nula, compatível com os observáveis físicos, e simultaneamente a uma quantidade de movimento finita, a conservação foi novamente considerada como plausível.

NA e PA conseguiram entender a conservação da quantidade de movimento, tendendo a aplicá-la aos experimentos bidimensionais na forma de variação das quantidades de movimento dos corpos interagentes. Em particular PA associava essa expressão, à análise **prática** dos alcances das bolas (nos experimentos bidimensionais), mas quando tinha que se lembrar da "lei conservação da quantidade de movimento", trazia-a na forma de igualdade de

somas de quantidades de movimento. Apenas no final percebeu que as duas formas eram equivalentes. NA foi o único a descobrir que o vetor quantidade de movimento do sistema era invariante. Exclamou em dado momento: "*então o vetor quantidade de movimento (total) nunca muda de direção?!*"

A aplicação da conservação da energia cinética nos choques elásticos não ofereceu novas dificuldades, a não ser nas entrevistas iniciais nas quais a perda de energia foi associada à relação entre as massas (o alvo maior do que o projétil) sem a preocupação de localizar uma correspondente deformação permanente. Também a utilização da expressão das velocidades relativas como critério para a elasticidade do choque foi aceita sem resistências significativas: os estudantes conseguiam analisar os casos em que não havia perda de energia durante o choque e distinguí-los daqueles anelásticos, tanto nos experimentos unidimensionais, quanto nos bidimensionais. PA e NA trouxeram do estudo em casa as informações que relacionavam a velocidade relativa com coeficiente de elasticidade.

2. A ARTICULAÇÃO DAS CONSERVAÇÕES

A aprendizagem estável dos princípios de conservação na análise das colisões em mecânica certamente não se esgota com a conquista dos elementos essenciais e a superação dos correspondentes obstáculos; pelo contrário, o número relativamente grande de elementos essenciais e a variedade de situações cuja análise requer o uso dos princípios de conservação tornam o processo de articulação do conjunto de conhecimentos a tarefa mais complexa a ser realizada pelos estudantes. Este problema já foi abordado na literatura (Grimellini et al., 1989 e 1993); nosso trabalho fornecerá algumas informações suplementares interessantes.

Em várias circunstâncias todos os estudantes revelaram dificuldades em conciliar os vários aspectos a serem levados em conta na análise (sistema, consideração conjunta da massa e velocidade, caráter vetorial das grandezas, etc.). O resultado era algum tipo de regressão: se lembravam de considerar o sistema, esqueciam que as grandezas eram vetoriais; se percebiam que deviam somar os vetores, esqueciam a influência das massas das bolas; se consideravam as massas, manipulavam inadequadamente os sentidos dos vetores; se utilizavam os vetores, desprezavam o alvo (infinito) ou esqueciam que o sistema não era isolado, etc.

Em geral as conquistas localizadas dos conhecimentos essenciais referentes aos princípios de conservação (i. e. o sucesso na utilização de tais conhecimentos numa situação específica) levaram os estudantes a uma fase da aprendizagem que denominamos de **coleção de conhecimentos**, caracterizada pelo uso **indiscriminado** das duas leis e das condições de validade. Como uma verdadeira coleção onde os conhecimentos se encontram simplesmente "empilhados", os estudantes podiam trazer para determinada situação qualquer combinação entre enunciado da lei e condição de validade e podiam também atribuir validade para uma mesma situação, ora numa condição, ora noutra. É como se os conhecimentos externos formais "pairassem" sobre a base experimental, já razoavelmente construída, sem que essa última realmente estivesse descrita e interpretada por eles. A característica mais marcante dessa fase, praticamente atingida por quase todos os estudantes, foi a **oscilação** de suas interpretações. Ao se depararem com uma nova situação eles tendiam a interpretá-la por sua semelhança com situações anteriores, mas sem a preocupação de verificar se a analogia era completa; frente às diferenças a primeira analogia era rejeitada e outra procurada, de maneira

a satisfazer as novas exigências, mas geralmente sem se preocupar se também as anteriores eram satisfeitas. O resultado, às vezes, era um círculo vicioso dominado pela tendência **monoconceitual** a satisfazer a um único vínculo ou a um número reduzido deles.

Outras vezes o exercício e a discussão com a entrevistadora levavam o estudante a começar efetivamente um processo de **articulação**, no qual a relação entre os conhecimentos fundamentais ou, pelo menos, uma boa parte deles, era estabelecida, numa estrutura organizada com um pequeno número de premissas. Nessa fase os estudantes ganhavam o entendimento de um **determinado conjunto** de situações, que eram regularmente reconhecidas, quando rerepresentadas, mesmo com pequenas variações. Por exemplo, na sétima entrevista, frente ao experimento bidimensional com a massinha entre o suporte e o alvo, inicialmente NA previu que o resultado seria o mesmo que sem massinha; em seguida reconheceu que o atrito provocado pela massinha era um impedimento para o isolamento do sistema e que sua quantidade de movimento não se conservaria. Passando a analisar o choque do carrinho contra o anteparo previu que o carrinho conservaria a quantidade de movimento porque poderia ser considerado um sistema isolado; mas quando a entrevistadora perguntou se isso valia também durante a colisão, ele reconheceu que o carrinho ia sofrer a força do bloco e que, portanto, sua quantidade de movimento iria mudar. Esta última somente se conservaria se fosse incluído *“o carrinho, o bloco, a mesa, o trilho e a terra”*. Voltando aos experimentos bidimensionais, foi capaz de diferenciar as situações sem massinha, com massinha entre as bolinhas que interagiam e com massinha entre alvo e suporte, reconhecendo que no primeiro caso o choque seria elástico, no segundo seria inelástico, mas haveria a conservação da quantidade de movimento do sistema, e no terceiro essa última não se conservaria pois o sistema não seria isolado.

Também PA conseguiu diferenciar as expressões das duas leis de conservação através da associação correta entre elas e suas condições de validade, no caso dos choques com bolinhas de massinha: ele reconheceu que a quantidade de movimento se conservava sempre, independentemente das massas e do alvo estar inicialmente em repouso ou em movimento, mas a energia cinética do sistema não se conservava. Porém isso não garantiu a extensão desse conjunto de informações a situações mais gerais, pois, no final da oitava entrevista, ele tentou, espontaneamente, resumir o que aprendera, dizendo *“a quantidade de movimento tem que se conservar, nos casos de choque elásticos”*.

NA pareceu avançar mais no processo de organização de seus conhecimentos. Ele conseguiu realizar uma síntese mais completa, aplicando as leis a conjuntos maiores de situações e fornecendo um resumo geral da diferença entre as duas leis de conservação. Ele conseguiu também utilizar as expressões matemáticas das leis para fazer previsões em casos específicos e, sobretudo, revelou ter assimilado a nova perspectiva disciplinar frente a uma situação nova. Ao analisar a função do som acoplado ao choque entre bolinhas de aço, ele iniciou procurando verificar se as condições de validade das conservações estavam satisfeitas; escolheu a energia como elemento de balanço, lembrando que uma onda sonora carregava energia e depois referiu-se a quantidade de movimento ao perceber que o ar devia interagir com as bolinhas para produzir o som. Independentemente da análise ter sido incompleta, o comportamento do estudante pode ser considerado um sinal de mudança efetiva. Infelizmente este foi o único caso de **extensão** do conhecimento adquirido e do procedimento de análise nas colisões; por isso não temos indícios suficientes para julgar o grau de estabilidade das conquistas realizadas.

De qualquer maneira as oito entrevistas não foram suficientes para que cada estudante realizasse uma mudança conceitual que incluísse o uso estável e a articulação dos princípios de conservação em situações experimentais ou simplificadas. Esta meta, incluindo a análise do estado intermediário, parece bem mais complexa daquilo que é esperado no ensino de segundo grau (Villani, 1992) e não está claro que com o simples aumento do número de entrevistas, os estudantes teriam alcançado o domínio geral dos princípios de conservação.

ALGUMAS CONCLUSÕES

a) As representações mentais dos estudantes, tanto fenomenológicas quanto formais, se modificaram seguindo um duplice padrão:

· Sua evolução, em parte, **não dependeu do tipo de experimento**. A grosso modo a conquista das representações formais se iniciava pela descoberta, por parte do aluno, do conceito de sistema e do papel complementar das massas dos corpos interagentes na caracterização da sua quantidade de movimento, superando, pelo menos localmente, a idéia espontânea de continuidade do movimento; depois o estudante tomava consciência do carácter vetorial de algumas grandezas envolvidas nas colisões e, somente depois dessas conquistas, aceitava como frutífera a idéia de uma conservação vetorial.

· Por outro lado, a evolução das representações fenomenológicas e formais, em parte, **dependeu do tipo de experimento**. Para as representações formais as diferentes classes de experimentos tiveram um papel essencial para a tomada de consciência de obstáculos significativos. A visão contínua foi privilegiada nos experimentos unidimensionais, o carácter vetorial das grandezas nos bidimensionais e a conservação vetorial tornou-se surpreendente principalmente nos casos de alvo infinito.

b) Diferentemente das representações fenomenológicas, o alcance de cada conquista essencial não garantiu o correspondente processo de **articulação**. Para uma boa parte dos estudantes e durante várias entrevistas, a tendência a reduzir ao mínimo os vínculos significativos tornou-se a característica dominante do processo de aprendizagem, que somente de forma eventual mostrava indícios de organização espontânea por parte do aluno. Consequentemente o processo de articulação do conjunto de conhecimentos novos adquiridos de forma individual torna-se uma **etapa essencial** para alcançar uma mudança conceitual e uma aprendizagem estável. Os sucessos extremamente limitados referentes a coordenação dos princípios de conservação, obtidos em outros trabalhos (Grimellini et al, 1989 e 1993; Lemeignan e Weil-Barais, 1994) com estudantes de segundo grau e as dificuldades de estudantes de pós-graduação e de professores (Villani & Pacca, 1990a e 1990b) em relação à organização deste conteúdo, podem ser interpretados como uma confirmação do bloqueio que parece caracterizar a aprendizagem dos estudantes durante esta fase. Infelizmente pouquíssimos trabalhos tem-se dedicado a estudar este problema com maior profundidade.

c) Finalmente o desenvolvimento do conhecimento dos estudantes dependeu do **papel da entrevistadora**. Sua habilidade em conduzi-los às conquistas fenomenológicas apareceu de maneira evidente comparando o progresso das primeiras duas estudantes (entrevistadas na fase piloto do trabalho) com aquele dos outros estudantes, entrevistados nove meses depois. A mesma observação pode ser feita em relação às conquistas das representações formais, com exclusão do processo de articulação das mesmas. Em nossa interpretação os poucos sucessos alcançados neste processo foram devidos muito mais às exigências e habilidades individuais dos estudantes do que à estratégia didática da entrevistadora. Durante as entrevistas finais, diferentemente daquelas iniciais, raramente ela se preocupou em conduzir o aluno a se

questionar se as análises eram completas e se referiam a todos os casos pertinentes e a **comparar** os resultados dos vários experimentos. Em geral ela mesma fornecia sistematicamente informações e considerações a respeito. Este comportamento explica também a escassez de dados objetivos sobre o processo de articulação dos estudantes, A própria escolha a priori, por razões de conveniência didática, do número total de entrevistas com cada estudante contribuiu para diminuir o número e a qualidade dos dados sobre este processo; apareceram indícios de reorganização espontânea das conquistas formais por parte dos estudantes somente nas entrevistas finais e certamente a continuidade delas teria facilitado uma análise mais detalhada e aprofundada.

Nos parece que, pelo menos no Brasil, o ensino das leis de conservação no segundo grau, quando acontece, consegue atingir, no máximo, a fase de coleção de conhecimentos, considerada pelos docentes como **conclusão satisfatória** do processo de aprendizagem sobre o tema colisões e princípios de conservação. Consequentemente torna-se urgente pesquisar, de um lado, formas de atualização dos professores para que tomem consciência da fragilidade dos sucessos alcançados pelos estudantes nesta fase e, de outro lado, estratégias didáticas concretas para favorecer o processo de reorganização das representações formais dos estudantes.

Referências

- Brown, D & Clement, J. - 1992 - Classroom teaching experiments in mechanics. In Duit, R.; Goldberg, F.; Niedderer, H. (Eds.) *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*. IPN. Kiel (D) 380-397
- Dreyfus, A.; Jungwirth, E.; Eliovitch, R. - 1990 - Applying the 'Cognitive Conflict' strategy for conceptual change: Some implications, difficulties and problems. *Science Education*, 74(5), 555-569.
- Duschl, R.A. & Gitomer, D.H. - 1991 - Epistemological Perspective on Conceptual Change: Implications for Educational Practice - *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9) 839-858
- Dykstra, D. - 1992 - Studying conceptual change: Constructing new understandings. In Duit, R.; Goldberg, F.; Niedderer, H. (Eds.) *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*. IPN. Kiel (D) 40-58.
- Grimellini T. N.; Pecori B.B.; Villani, A.; Casadio, C.- 1988 - Strategie di Insegnamento e Cambiamento Concettuale: Il Caso degli Urti in Meccanica. *Atti VII Convegno Gruppo Nazionale di Didattica della Fisica*, pp. 111-142, Pavia (Italia)
- Grimellini, T. N; Pecori, B.B.; Villani, A.; Casadio, C.; Pacca, J.L.A. - 1989 - *Teaching Strategies and Conceptual Change: The Case of Collisions in Mechanics*- Paper presented at Annual Meeting of the American Educational Research Association, S.Francisco, CA.
- Grimellini, T.N; Pecori, B.B.; Pacca, J.L.A. & Villani, A. - 1993 - Understanding conservation laws in mechanics: Students' conceptual change in learning about collisions. *Science Education*, 77(2), 169-189.
- Lemeignan, G. & Weil-Barais, A. - 1988 - Etude de quelques activités de modélisation. Em G. Vergnaud, G. Brousseau and M. Hulin (eds.) *Didactique et acquisition de connaissances scientifiques*. Grenoble: La pensée sauvage. pp. 229-244.

- Lemeignan, G. & Weil-Barais, A. -1989 - Enseignement et apprentissage d'un concept par les élèves: la quantité de mouvement en classe de seconde cycle. *Bulletin de L'union des Physiciens*, vol. 71(6), pp.1013-1030.
- Lemeignan, G. & Weil-Barais, A. -1994 - A developmental approach to cognitive change in mechanics. *International Journal of Science Education*, v. 16(1), pp. 99-120.
- Mariani, M.C. - 1987 - Evolução das Concepções Espontâneas sobre Colisões - *Master Dissertation* - Universidade de São Paulo.
- Mariani, M.C. & Villani, A. - 1985 - *Idéias Espontâneas sobre a transmissão de movimento*. VI Simpósio Nacional de Ensino de Física - 1985 - Atas p.213.
- Niedderer, H. - 1992 - What Research can Contribute to the Improvement of Classroom Teaching. *Proceeding of The International Conference on Physics Teachers' Education*. Dortmund (Germany) pp.120-157
- Niedderer, H. & Schester, H. - 1992 - Toward an explicit description of cognitive systems for research in physics learning. In Duit, R.; Goldberg, F.; Niedderer, H. (Eds.) *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*. IPN. Kiel (D). pp. 74-98
- Nussbaum, J.; Novick, S. - 1982 - Alternative Frameworks, Conceptual Conflicts and Accommodation: Toward a Principled Teaching Strategy - *Instructional Science*, v. 11, pp. 183-200.
- Orquiza, L.C. - 1994 - Representações mentais e conflitos cognitivos: o caso das colisões em Mecânica. *Tese de Doutorado*. Faculdade de Educação. Universidade de São Paulo,
- PSSC -1960 - *Physics*. Boston: D.C. Heath & Company
- Ricci, A. - 1987 - Uno studio sperimentale sulle rappresentazioni mentali degli studenti in meccanica: il caso degli urti. *Tesi di Laurea*. Dipartimento di Fisica . Università' di Bologna.
- Rowell, J.A.; Dawson, C.J.- 1985 - Equilibration, Conflict and Instruction: A New Class-oriented Perspective - *European Journal of Science Education*, v. 7, pp. 331-344.
- Scott, P.H.; Asoko, H.M.; Driver, R.H. - 1992 -Teaching for conceptual change; A review of strategies. In Duit, R.; Goldberg, F.; Niedderer, H. (Eds.) *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*. IPN. Kiel (D) pp. 310-329
- Strike, K.A. & Posner, G.J. - 1992 : A Revisionistic Theory of conceptual change. In Duschl & Hamilton (Eds.): *Philosophy os Science, Cognitive Science and Educational Theory and Practice*. -Albany, NY, SUNY Press.
- Viennot, L. - 1979 - Le raisonnement spontane' en dynamique élémentaire. Paris: Herman
- Villani, A. - 1992 - Conceptual Change in Science and Science Education. *Science Education*, V. 76(2), pp. 223-237.
- Villani, A. & Orquiza, L.C. - 1994 - *Conflitti cognitivi, esperimenti qualitativi e attività didattiche*. Enseñanza de las Ciencias, em publicação.
- Villani, A. & Orquiza, L.C. - 1995 - *Evolución de las representaciones mentales sobre colisiones*. Enviado para Enseñanza de las Ciencias.
- Villani, A. & Pacca, J.L.A. - 1990a - Spontaneous Reasoning of Graduate Students - *International Journal of Science Education*, v. 12(5), pp. 589-600

Villani, A. & Pacca, J.L.A. - 1990b - Conceptos espontaneos sobre colisiones. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 8, pp. 238-243.

Weil-Barais, A. & Lemeignan, G. - 1990 - Apprentissage de concepts et modélisation. *European Journal of Psychology of Education*, v. 5, pp. 391-437.

Recebido em 15/03/95

Revisado em 30/08/95

Aceito em 29/11/95

APÊNDICE

Aparatos Experimentais Utilizados nas Entrevistas

·PÊNULO

Aparato experimental

O aparato experimental *figura 1* é constituído de um conjunto de pêndulos com bolinhas de aço, de 50g (denominadas **M**) e de 100 g (denominadas **G**), e bolinhas de borracha **M** e **G**, com aproximadamente o mesmo tamanho. Uma estrutura de metal e madeira suportava os pêndulos e permitia a substituição das bolinhas. Assim, era possível realizar várias combinações de colisões entre as bolinhas.

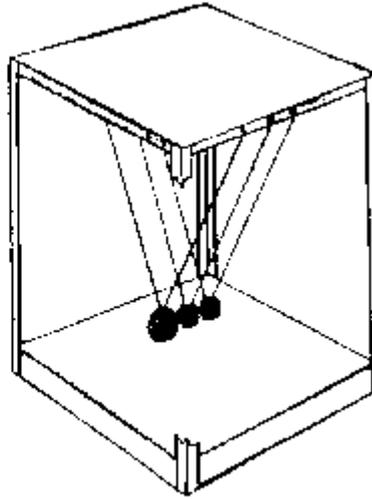


fig. 1

Experimentos

Duas séries de experimentos foram propostas aos estudantes. A série "**a**" de experimentos refere-se às colisões entre as bolinhas de aço em pêndulos; na série "**b**", as colisões eram feitas com bolinhas de borracha substituindo as de aço nos pêndulos. Além disso foi introduzida uma série "**m**", na qual eram propostos dois experimentos imaginários com bolinhas de massa de modelar.

• **CANALETA**

Aparato Experimental

O aparato experimental -figura 2- é constituído de uma canaleta metálica plana, com perfil em "U", de 1 cm de largura e 1,5 m de comprimento, e de um conjunto de bolinhas de aço de 25g (**P**), 50 g (**M**) e 100 g (**G**).

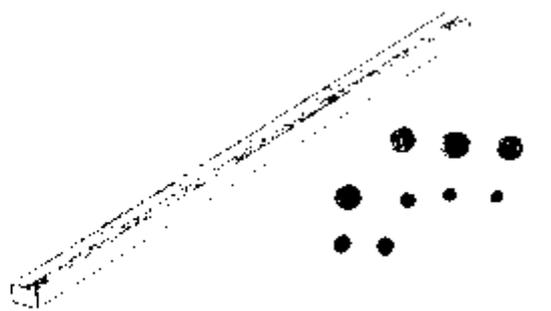


fig.2

Experimentos

Os experimentos realizados na canaleta consistiam em provocar colisões entre bolinhas. Várias combinações de colisões podiam ser realizadas, alterando-se a massa da bolinha incidente e da bolinha alvo. A maneira de se lançar a bolinha incidente também podia ser variada: com um lançamento "seco" e rápido, a bolinha deslizava; porém, quando era lançada com um pouco de rotação, ela continuava rolando até atingir a bolinha alvo.

BOLINHAS E PLACAS DE VÁRIOS MATERIAIS

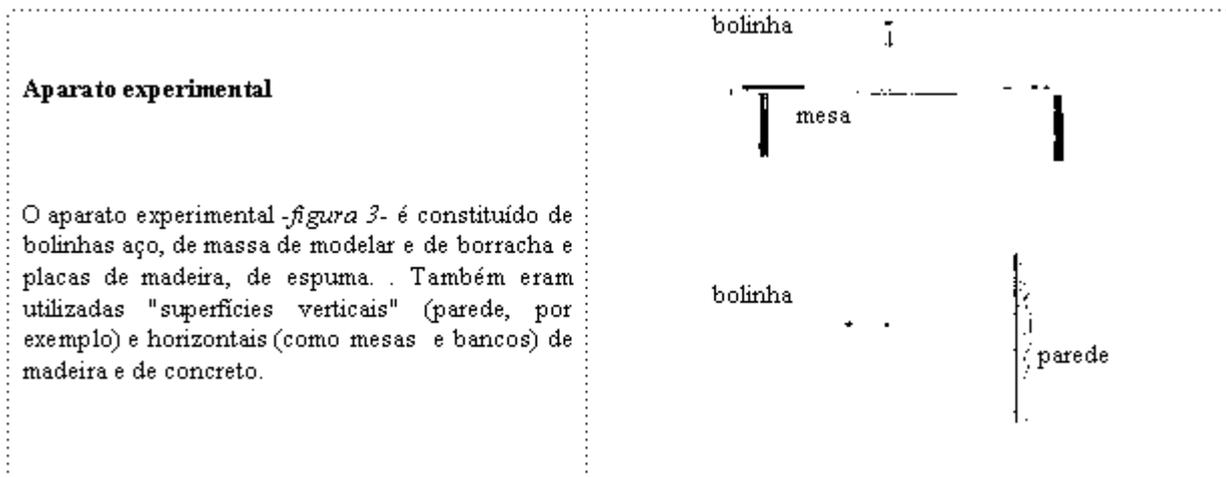


fig.3

Experimentos

As séries “a”, “b” e “m” de experimentos, referem-se às colisões elásticas e inelásticas, que eram realizadas lançando as bolinhas de aço, de borracha e de massa de modelar contra superfícies horizontais e verticais de concreto, de espuma e de madeira.

TRILHO DE MADEIRA E CARRINHOS

Aparato experimental

O Aparato experimental - *figura 4* - é constituído por dois carrinhos de 100 g de massa, um trilho de madeira, blocos de madeira de 100 g, um cavalete sustentador e um anteparo.

Cada carrinho possui, numa das extremidades, um sistema elástico que pode ser comprimido e preso por uma trava, e liberado, quando destravado.

Na metade do comprimento do trilho, e transversalmente a este, pode ser colocado um "cavalete sustentador". Quando passa por baixo deste cavalete o carrinho recebe uma massa suplementar (bloco de madeira de 100 g).

Numa das extremidades do trilho, pode ser colocado um anteparo, que é utilizado como apoio para disparar ou parar o carrinho.



fig.4

Experimentos

A série "t" de experimentos, refere-se às colisões de um carrinho com o anteparo ou entre dois carrinhos. Também era possível obter à variação da velocidade do carrinho em movimento, quando recebia uma carga (massa) suplementar ao passar debaixo do cavalete. Finalmente podiam-se obter "explosões" (mediante o destravamento do sistema elástico apoiado ao anteparo ou a outro carrinho) que lançavam o(s) carrinho(s) com uma certa velocidade inicial.

COLISÕES BIDIMENSIONAIS

Aparato experimental do PSSC

O aparato experimental *figura 5* é constituído por uma rampa com um trilho metálico encurvado, bolinhas de aço **M** e **G**, pino articulável de sustentação, fio de prumo, base de madeira, papéis de seda e carbono.

Ao descer a rampa pelo trilho, a bolinha incidente encontra a bolinha alvo que é sustentada pelo pino articulável. A articulação do pino de sustentação permite um posicionamento adequado da bolinha alvo, de forma a obter os centros e o ponto de contato das bolinhas num mesmo nível.

Após a colisão, as bolinhas, que se comportam como projéteis com velocidade inicial v_i , caem sobre folhas finas de papel e papel carbono, colocadas na base de madeira, e ali deixam registradas suas marcas.

O alcance das bolinhas é proporcional à velocidade inicial.

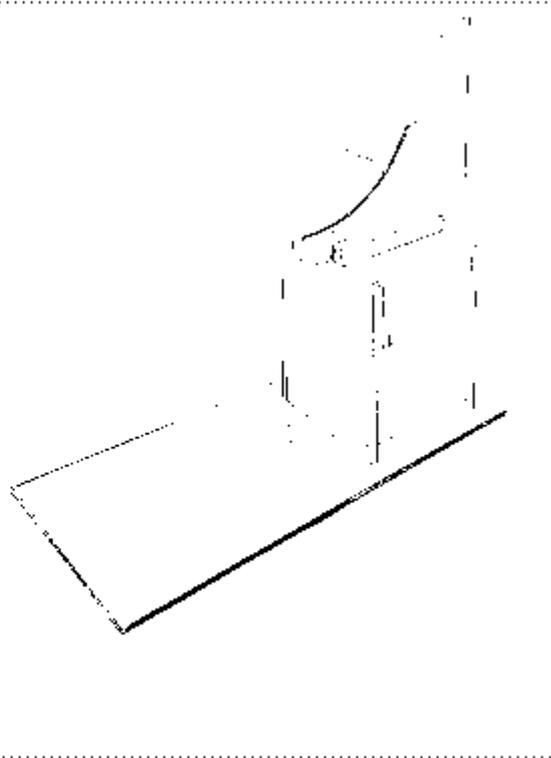


fig.5

Experimentos

A série "d" de experimentos refere-se a colisões bidimensionais, frontais ou não, entre bolinhas de aço de mesma massa e de massas diferentes. Algumas variações nestas colisões eram realizadas envolvendo-se, adequadamente, a bolinha alvo ou o suporte com massa de modelar. Após as colisões, coleando as marcas deixadas pelas bolinhas na folha de papel e o ponto de referência dado pelo fio de prumo, era possível obter vetores, com intensidade proporcional às velocidades das bolinhas. A partir da composição desses vetores (multiplicados por um fator proporcional às correspondentes massas) podia-se calcular a quantidade do movimento inicial e final do sistema.