

A folha seca, a pedra, a maçã e o Sputnik – algumas considerações sobre a gênese dos conceitos de peso e massa¹

The falling leaf, the stone, the apple and the Sputnik – some considerations on the genesis of the concepts of weight and mass

Renato P. dos Santos

RESUMO

Parece já demonstrado por intensa atividade de pesquisa desde a década de 80 que o nosso entendimento dos fenômenos físicos observados no dia-a-dia, para além do conhecimento eventualmente adquirido na escola, baseia-se também num conjunto de concepções alternativas adquiridas espontaneamente. Uma das linhas de investigação que Piaget perseguiu apontava na direção de verificar, fazendo uso do método psicogenético, se os mecanismos de passagem de um período histórico da Ciência ao seguinte são análogos aos da passagem pela criança de um estágio genético aos seguintes. Em seu trabalho com Rolando Garcia, "Psicogênese e História das Ciências", investigou, entre outros, as explicações infantis da transmissão do movimento em analogia ao conceito medieval do 'impetus'. Aqui pretendemos apresentar algumas primeiras observações referentes à formação do conceito de 'massa' e a sua distinção do conceito de 'peso', desde Aristóteles até Newton, em comparação à elaboração desse conceito pela criança e, dum ponto de vista mais geral, da persistência da confusão entre eles no percurso acadêmico e na vida adulta. Comentar-se-ão, ainda, algumas implicações pedagógicas dessa persistência no contexto de concepções alternativas.

Palavras-chave: psicogênese, pensamento físico.

ABSTRACT

It seems already demonstrated after intense activity of research since the decade of 80 that our understanding of the physical phenomena observed in the day the day, beyond the knowledge

Renato P. dos Santos é professor do Curso de Física da ULBRA.

¹ Comunicação apresentada no Congresso Internacional comemorativo do Centenário de Jean Piaget, Instituto Piaget, Almada, Portugal, 19 a 23 de Novembro de 1996.

eventually acquired in the school, is also based on a set of spontaneously acquired alternative conceptions. One of the inquiry lines that Piaget pursued pointed in the direction to verify, making use of the psicogenetic method, if the passage mechanisms from a historical period of Science to the following one, are analogous to the ones of the ticket for the child of a genetic stadium to the following ones. In its work with Rolling Garcia 'Psychogenesis and the History of Science', he investigated, among others, the infantile explanations of the transmission of the movement in analogy to the medieval concept of impetus. Here we intend to present some first observations on the formation of the concept of mass and its distinction of the concept of weight, since Aristotle until Newton, in comparison to the elaboration of this concept for the child and, of a more general point of view, of the persistence of the confusion between them in the academic passage and the adult life. It will be commented too, some pedagogical implications of this persistence in the context of alternative conceptions.

Key words: psychogenesis, physical thinking.

1 Introdução

Estamos no outono e um dos sinais característicos desta estação é a queda de folhas secas das árvores.

Com certeza que há muitos milhares de anos que caem folhas secas, todos os outonos, bem como caem frutas maduras, galhos secos e uma infinidade de outras coisas, durante o ano todo e espontaneamente. A ênfase na palavra espontaneamente decorre de que antes dos primatas aprenderem a lançar objetos sobre outros animais, já esse fenômeno ocorria. É provável, no entanto, que só bastante depois dos homens começaram a jogar pedras uns sobre os outros é que começaram a pensar em porque, afinal, uma pedra lançada caía sempre ao chão.

Ainda hoje muita gente acredita que as coisas caem porque têm a tendência natural de se dirigirem para o lugar mais baixo, isto é, o chão é o 'lugar natural' das coisas que têm peso, até pouco tempo chamadas de 'graves', enquanto que as coisas que não caem – gases, nuvens, balões e até pássaros, também chamadas de 'imponderáveis', 'flutuam' porque é da sua natureza serem leves. De fato, Mariano Gago (1992a; 1992b), numa pesquisa com adultos, perguntando por que um pássaro voa e não cai, obteve as seguintes respostas: "porque é naturalmente leve" e "porque Deus Nosso Senhor o fez assim, porque tem a constituição própria para voar,

porque senão não era pássaro, era peixe ou outra coisa qualquer!"

Todos nós, desde as nossas primeiras explorações do mundo que nos rodeia em bebês ou pouco mais que isso, começamos a adquirir espontaneamente conceitos sobre o funcionamento da 'máquina do mundo'². São esses conceitos que nos permitem viver o dia a dia, deslocarmo-nos, mover objetos, utilizar artefactos simples como alavancas, manivelas, torneiras, janelas, gavetas, cestos de papéis, e mesmo praticar desportos como futebol, tênis, tiro com arco, etc. Esses conceitos vão formando o que é chamada a 'física do senso comum'³, 'física intuitiva' ou ainda 'física qualitativa', em oposição à Física tradicional, quantitativa, a que se aprende na escola. Mas será que se sabe efetivamente essa Física que se aprende na escola? Melhor dizendo, será que esta Física é aceite pelos nossos sentidos?

Ainda durante esse já mencionado trabalho, Mariano Gago, em resposta ao 'paradoxo neolítico' de Lévi-Strauss (1962), formula a 'hipótese neolítica' de que a cau-

² Note-se que essas noções também nos são transmitidas, confirmadas e reforçadas socialmente pelo círculo familiar, meios de comunicação, etc.

³ É claro que a nossa vivência propicia a formação não apenas da física do senso comum, mas igualmente da 'química do senso comum', da 'biologia do senso comum', da 'medicina do senso comum', 'psicologia do senso comum' e talvez até da 'política do senso comum'.

sa da permanência, desde o neolítico, antes e depois do aparecimento das ciências modernas e até nossos dias, de representações comuns da natureza, “muito mais próximas da intuição sensível”, seria a “estabilidade das práticas comuns de ação sobre a matéria da generalidade da população, desde o neolítico”. Isto é, manipula-se a matéria artesanal e manualmente numa série de atividades tais como a feitura de pães, bolos e tortas, a preparação e utilização da argamassa, a fabricação de utensílios de cerâmica, etc. praticamente da mesma maneira que no neolítico, o que faz com que nossa percepção e compreensão intuitiva das propriedades da matéria seja a mesma desde então, levando a que o nosso senso comum a respeito seja o mesmo que nossos antepassados ancestrais. Deixo estes pontos para o final deste trabalho.

Voltemos aos princípios: porque é afinal que uma pedra cai? Porque é pesada, certo? Se não tivesse peso, não caía, é claro. Mas o que significa que é pesada? Que não é leve como o ar ou as nuvens? Mas afinal o ar e as nuvens têm ou não peso? E se têm peso, por que é que não caem? E por que é que a Lua não cai?

2 O peso e a massa

Embora correspondam a conceitos físicos distintos, o público não especializado normalmente não distingue entre ‘peso’ e ‘massa’, tratando-os como sinônimos. Isso dificulta a análise do conceito, o que aliás já fora observado por Piaget & Garcia (1971).

Apesar disso, o sentido específico de ‘massa’ não é tão desconhecido – palavras, tais como ‘maciço’ são familiares e na famosa equação de Einstein $E = mc^2$, muita gente sabe que m significa ‘massa’ e não ‘peso’.

Todos sabemos que é mais difícil mover um objeto ‘pesado’; no entanto, mesmo que esse objeto estivesse suspenso por um balão – ou estivesse em órbita da Terra –, num estado de aparente ausência de

peso, ainda assim seria difícil movê-lo, o que indica que para além do ‘peso’, a matéria possui outra propriedade, a qual determina a sua dificuldade de ser posta em movimento e é chamada ‘massa’.

2.1 Peso

A palavra ‘peso’ deriva do latim com o sentido de medida de quantidade, e ‘pesar’ vem de ‘avaliar, comparar’. Por extensão chamam-se pesos os objetos utilizados como referência para a operação de pesagem. Também se conhecem unidades monetárias com o nome de peso e derivados em várias línguas: peseta, taler, dólar, etc. Por outro lado, ‘grave’ vem de ‘pesado, sério’. Não é por outro motivo que se chama ‘grávida’ à mulher que porta uma ‘carga’. Em Francês, *pesant* e *poids* derivam das mesmas raízes latinas anteriores e *lourd* deriva da mesma raiz que ‘lerdo’. Em Inglês, *weight* (peso, carga) e *to weigh* (pesar) derivam do Indo-Europeu com o sentido de ‘carga’ e ‘carregar’, a mesma raiz de ‘vação’. Da mesma raiz derivam em Alemão *Wagen* (carro) e *Waage* (balança).

De ‘peso’ derivam palavras tais como ‘pesado’, ‘pesadelo’, ‘pêsames’ e ‘pesaroso’ e metáforas tais como dizer que uma situação que causa alguma forma de constrangimento é “um peso em nossa vida”.

A etimologia vista acima mostra, desta forma, que ‘peso’ está associado ao esforço que se tem que fazer para levantar um objeto do chão e carregá-lo.

A maior parte dos físicos interpreta Newtonianamente o peso como a força que um corpo sente ao ser atraído para outro, com uma intensidade dada pela Teoria da Gravitação de Newton como proporcional ao produto das duas massas e ao inverso do quadrado da distância que as separa, isto é, será maior a força de atração ou peso quanto maior qualquer uma das massas e quanto mais próxima uma da outra. Assim, o peso é maior em Júpiter e menor na Lua e, por outro lado, sutilmente menor no cimo do Himalaia.

Segundo outros (IONA, 1995), todavia, o peso é a força que o primeiro corpo exerce sobre um obstáculo tal como nossa mão ou uma mesa sobre a qual repousa, ao ser atraído da mesma forma como acima dito. Esta visão parece mais próxima das primeiras considerações de Einstein sobre a gravidade: nós, de fato, não sentimos a gravidade; a sensação que chamamos de peso deriva do trabalho de nossos músculos para evitar cair. “Tire-se-nos o apoio e a sensação de peso desaparece!” (GALILI, 1993).

2.2 Massa

A palavra ‘massa’ deriva do grego através do latim com o significado original de pasta informe.

Podem-se encontrar, mesmo em outras línguas européias, palavras correlacionadas a ‘massa’ e principalmente com os seguintes significados:

1. pasta de farinha e água ou outro líquido;
2. qualquer outra substância informe;
3. grande número de elementos de um conjunto;
4. povo, multidão.

Destes sentidos de ‘massa’ derivam palavras tais como ‘massa bruta’, ‘massudo’, ‘maciço’, ‘massificar’, ‘massacre’.

Um dos primeiros atributos que discernimos nos objetos é uma avaliação qualitativa, ‘a olho’, da sua quantidade. Mas é de início um conceito vago, que admite uma correlação com o tamanho e o peso: a criança prefere sempre, o bolo maior. Porém logo uma casca vazia ou um bolo excessivamente fofo nos ensina que nem sempre o maior é mais pesado e, principalmente, que maior quantidade correlaciona-se com maior peso, não com maior tamanho.

Note-se que as palavras derivadas anteriormente de ‘massa’ sempre indicam

algo ‘grande’ em tamanho ou em quantidade. Ninguém fala no uso comum de pequenas massas e Bachelard observa: “Estranha medida que apenas mede aquilo que cresce!” (BACHELARD, 1940) Estas são indicações claras de um conceito pouco elaborado no senso comum.

Newton, na Definição I, no primeiro parágrafo de seu *Principia Mathematica*, define axiomáticamente a ‘quantidade de matéria’, também referida pelo nome de ‘massa’, como o produto da sua densidade pelo volume. Desta forma, um volume maior do mesmo material deve conter mais matéria e, portanto, pesar mais, enquanto que uma substância mais densa deve conter mais matéria que igual volume de outra substância menos densa.

Por outro lado, Bachelard (1940) chama atenção para a coincidência das grafias dos termos ‘massa’ e ‘maça’, a antiga arma de guerra ou ferramenta. Essa coincidência é interessante, embora ocorra apenas em Francês e (aproximadamente) apenas em Português e Inglês. De fato, o maço, ou qualquer ferramenta deste tipo, funciona no princípio de o colocarmos em movimento e, em seguida, levá-lo a colidir com um outro objeto com o objetivo de realizar o trabalho que pretendemos. Temos além disso, a noção de que um martelo maior, se, por um lado, é mais difícil de manejar, também é capaz de realizar uma ação maior. Pois que uma característica que atribuímos aos objetos ‘massudos’ é precisamente o de serem difíceis de ser postos em movimento mas, por outro lado, também o de serem difíceis de ser parados, uma vez em movimento.

A noção de massa, portanto, está ligada à propriedade da matéria de resistir à mudança do seu movimento, seja em pôr-se em movimento, aumentar a velocidade ou diminuí-la, podendo-se interpretar, justamente, a massa, de forma quantitativa, como uma medida dessa resistência.

3 A psicogênese dos conceitos

Piaget (1973) afirma, como conclusão dos seus trabalhos de investigação, ter observado que, por vezes, conceitos considerados primitivos do ponto de vista da Física são compostos ou derivados do ponto de vista da epistemologia genética e vice-versa. Isto é, para Piaget & Garcia (1971) a formação de um conceito dá-se não pela composição de elementos mais simples mas pela diferenciação e ordenação de caracteres indiferenciados num conceito vago.

Assim, por exemplo, a velocidade é normalmente considerada composta dos conceitos mais primitivos de distância e intervalo de tempo. Já, segundo a epistemologia genética, a velocidade seria um conceito fundamental, tendo sido encontrados nos nossos olhos receptores que permitem avaliar a velocidade de um objeto que atravesse o nosso campo visual (PIAGET, 1973). A partir desse conceito, e através do conceito intermediário de ‘ultrapassagem’ (PIAGET, 1967), construir-se-iam simultânea e gradualmente os conceitos de distância percorrida e tempo decorrido. Como prova, verifica-se que uma criança pode conseguir comparar velocidades de dois carrinhos e ter dificuldade em identificar qual parou primeiro ou qual percorreu uma distância menor.

Da mesma forma, o ‘peso’, ao englobar inicialmente dois conceitos físicos distintos – quantidade de matéria e peso, propriamente dito, uma força –, os quais são genericamente confundidos não só pela criança como pelo adulto médio, é uma noção cujo desenvolvimento é complexo e difícil de analisar em detalhe (PIAGET; GARCIA, 1971). Distingue-se, assim, a quantidade de matéria, ou massa inercial, do peso, ou antes, da massa gravitacional. Além disso, para Piaget & Garcia (1983), “o peso é uma das noções cujo desenvolvimento é o mais complexo, pelo fato de,

enquanto propriedade dos objetos (indiferenciada na massa), não constituir um observável simples.” Com relação a este conceito, Piaget & Garcia (1971) verificaram uma sucessão de fases no processo de diferenciação entre o ‘peso-quantidade’ (massa), propriedade do corpo, e o ‘peso-ação’ como manifestação de efeitos dinâmicos variados.

Piaget & Garcia (1983) caracterizaram o desenvolvimento da mecânica a partir dos Gregos até ao século XVII por três formas específicas de ‘transição’: 1. A passagem das pseudonecessidades⁴ e das pseudo-impossibilidades à necessidade lógica e causal; 2. A passagem dos atributos às relações e 3. A transição de uma ‘explicação física’ em termos de causas últimas e causas concorrentes para a concepção de uma dinâmica que apenas estabelece dependências funcionais e sistemas de transformações.

Um ponto crucial é apontado por Piaget & Garcia (1983): “o fato fundamental para a epistemologia das ciências é que o sujeito, partindo de níveis muito baixos, de estruturas pré-lógicas, chegará a normas racionais isomorfas das estruturas das ciências aquando do seu nascimento.” Ao que Doménech et al. (1993) acrescenta “Um paralelo pode ser estabelecido entre a formação individual, psicológica, dos conceitos físicos e a evolução das formulações científicas ortodoxas. Um dos aspectos mais cruciais da análise de conceitos é que um dado conceito científico só pode ser completamente entendido dentro de um referencial teórico.”

Nesse caso particular, Piaget & Garcia (1983) estabeleceram uma correspondência estreita entre as quatro fases históricas (os dois motores aristotélicos, o recurso a um único motor externo, a descoberta do *impetus* e depois a descoberta da aceleração) e as quatro etapas da psicogênese. Esses autores ressaltam, porém, que o objetivo

⁴ Ver mais adiante a definição de pseudonecessidade.

dessa correspondência não era de modo algum das sucessões históricas com as reveladas pelas análises psicogenéticas, sublinhando os conteúdos, mas mostrar que os mecanismos da passagem de um período histórico ao seguinte são análogos aos da passagem de um estágio psicogenético ao seu sucessor.

Piaget & Garcia (1983) alertam, porém, que o paralelo observado “não significa que os sábios de Aristóteles ao período pré-newtoniano tenham extraído as suas idéias do seu inconsciente infantil, caso contrário teria havido prolongamento imediato e não semelhança de processos construtivos”. No entanto, o que se mostra assombroso é “a aceleração considerável que manifesta na sucessão dos estágios na criança por comparação à dos períodos da história. A razão tem a ver, seguramente, com o meio social adulto, cuja ação contínua se traduz por múltiplos incitamentos e por problemas incessantemente renovados.”

À conservação da massa, como medida da quantidade de matéria, Piaget & Inhelder (1941) chamam de ‘conservação da substância’. Segundo estes autores, a noção de conservação da substância, quando o objeto sofre deformações reais em suas qualidades de comprimento, largura, etc., tais como seccionamentos e alterações nas posições das suas partes, só será possível quando o sujeito, dado o conflito entre a experiência sensorial e as operações racionais, renunciar às percepções subjetivas e passar a apoiar-se nas operações racionais para justificar a conservação que se lhe apresentará então não mais como fortuita mas necessária. Para eles, a conservação da substância implica necessariamente na sua quantificação, isto é, a aptidão de conceber a compensação das alterações na forma do objeto, igualando-as e deixando a quantidade de matéria invariante, o que, segundo os autores, implica numa repartição da substância em unidades. A conservação da substância formar-se-ia, então, da

noção da conservação dos próprios elementos que compõem o objeto, estes concebidos como invariantes. A decomposição mental do objeto em elementos que conservam as propriedades do todo é também interpretada pelos autores como implicando num atomismo primitivo.

É curioso que, no esquema piagetiano, a conservação do peso e do volume, qualidades sensíveis, sucedam e não antecedam a própria noção de substância, a qual poderia ser entendida como o suporte daquelas. Piaget e Inhelder (1941) apontam esse fato como prova da atuação do pensamento operatório. A pergunta que naturalmente surge é por que a conservação da substância, já admitida pelas crianças desta fase, não acarreta de saída a do peso (e também a do volume)?

Esses autores explicam (PIAGET; INHELDER, 1941) esse fenômeno considerando que o peso nesta fase ainda está muito associado aos esforços musculares de levantar objetos. Assim, embora a criança a partir dos 8-10 anos já compreenda a possibilidade lógica da reconstrução do objeto inicial pela reunião das suas partes, o que implica na conservação da quantidade de matéria, não alcança ainda a conservação do peso porque não aceita a conservação do peso de cada parte, uma vez separada do todo, fundamentada na sua experiência sensorial de que os pedaços pesam pouco, cada um, e que uma mesma porção de matéria parece pesar diferentemente conforme esteja concentrada ou espalhada sobre a palma da mão. Desta forma, não se consegue a quantificação do peso pois embora as partes do todo mantenham-se invariáveis quanto à sua quantidade de matéria durante uma transformação, não se lhes concebe a invariância do peso.

O peso é, portanto, nesta fase, subjetivo, estando sujeito a variáveis tais como posição, superfície de contato, etc.. Isto é, verifica-se um primado egocêntrico da sensação subjetiva sobre o próprio funcionamento da balança (PIAGET; INHELDER,

1941). São necessárias uma série de construções lógicas. A conservação do peso dar-se-á quando o sujeito for capaz de descentrar a ação de pesar, passando o peso, assim, a ter um caráter objetivo, associado a cada parte do objeto e invariante durante qualquer processo de segmentação ou deformação, resultando o peso do objeto da adição dos pesos de cada parte.

Note-se que na segunda etapa, quando já há conservação da massa mas não a do peso, este obviamente não é proporcional à quantidade de matéria.

Piaget e Inhelder (1941) examinam em seguida um outro aspecto da formação da noção de peso, qual seja a relação entre peso e movimento, isto é, a distinção entre peso e inércia, apresentando à criança duas bolinhas e, em seguida, fazendo uma delas rodar como uma funda.

Praticamente todos nós temos uma memória cinestésica de que uma pedra ao girar em círculo atada a um cordel parece esforçar-se por afastar do centro e tanto mais quanto mais depressa é girada. Esse esforço é comumente denominado ‘força centrífuga’, conceito introduzido por Huygens no século XVII, e pareceu, a vários físicos e filósofos da altura, incluindo mesmo Newton (STEINBERG, 1990) a princípio, uma tendência própria da matéria, uma propriedade, a par com o ímpeto, que manteriam um corpo em movimento.

Piaget e Inhelder (1941) relatam que, numa primeira etapa, as crianças consideram não só que “a que gira é mais pesada” como justificam “porque tem mais massa”. Numa segunda etapa, afirmam a conservação da massa mas ainda negam a conservação do peso, apresentando como argumento “sente-se no barbante”, justificando “porque se mexe”, “é mais pesada porque gira”. Esses autores ressaltam que “o peso confundir-se-á assim não apenas com a massa, o que é natural, mas ainda com qualquer espécie de forças.” Tal situação manter-se-ia enquanto o peso, o volume e a massa não se diferenciarem entre

si, o que só ocorreria quando deixarem de estar associadas a qualidades sensórias.

Mas afinal o que é que se sente? Quando a esfera está parada, sente-se, de fato, o peso da esfera, mas quando em movimento, é a força centrípeta exercida pela mão sobre o cordel para manter a esfera na sua trajetória circular que se sente, a qual é, como se sabe, tanto maior quanto a velocidade que se lhe imprima.

Pode-se facilmente calcular a velocidade com que se deve girar a esfera para que a sensação em movimento iguale àquela quando ela está parada como $v = \sqrt{r \times g}$. Sendo o comprimento do percurso da órbita $2\pi r$, tem-se o período de rotação da

esfera como $\tau = 2\sqrt{r/g}$, o que, para um cordel usual de, digamos, cerca de 15 cm e com $g \cong 10 \text{ m/s}^2$, corresponde a algo como uma rotação a cada 0,8 s. Cordéis de maior comprimento implicarão em maior ainda período.

É, todavia, algo difícil manter a esfera em rotação a uma velocidade tão baixa, de forma que é natural que uma pessoa confira uma velocidade maior, o que, como já vimos, levará inevitavelmente a uma sensação de força maior que a do peso da esfera parada. E se se pretender manter uma órbita horizontal, é preciso conferir uma rotação bastante mais alta, pois, de outra forma, a órbita ficará bastante ‘descaída’. Desta forma, por uma ‘conspiração’ das constantes físicas universais, a nossa experiência cotidiana de rodar um objeto amarrado a um cordel a uma velocidade usual, dá-nos a nítida sensação de que o ‘peso’ do objeto é maior em movimento que em repouso. Em Júpiter, teríamos já de girar por rotação.

Note-se porém que essa experiência poderia ser realizada com idêntico resultado no espaço vazio, sem gravidade e, portanto, sem peso; o que está em causa aqui não é o peso, associado à massa gravitacional, mas àquela força, associada à massa inercial.

3.1 1ª fase – Conceitos indistintos na Antigüidade

Possivelmente, uma das primeiras manifestações do peso na Natureza observadas pelo homem terá sido a queda das folhas secas no Outono.

Os antigos, mesmo os filósofos gregos, aparentemente, não distinguiam ‘peso’ de ‘massa’, a resistência intrínseca de um corpo à mudança de movimento – eram conceitos indiferenciados. Segundo Crombie (1957, pp. 82-83), este conceito foi elaborado apenas no século XVII, como conseqüência da afirmação de que no vácuo todos os corpos cairiam com a mesma velocidade, independente do seu peso.

Por falta de registros mais antigos, a história da mecânica começa com o tratado *Problemas de Mecânica*, atribuído a Aristóteles mas provavelmente apócrifo (DUGAS, 1955, p. 19). Aristóteles defendia que os movimentos poderiam ser ‘naturais’ ou ‘forçados’. O natural seria aquele em que o objeto dirige-se para o seu ‘lugar natural’, como no caso da folha seca que vai do ramo da árvore para o chão, lugar natural das coisas pesadas – seria da natureza dos corpos chamados ‘graves’ dirigirem-se para o centro da Terra. O forçado, ao contrário, é aquele em que um agente ou ‘motor’ externo retira um corpo do seu lugar natural, como no caso de uma pedra que é levantada do chão ou é lançada para cima pela mão. Por outro lado, os seres vivos e os corpos celestes mover-se-iam devido a um ‘motor interno’.

Inicialmente, o peso era compreendido como a tendência dos corpos para moverem-se para o seu ‘lugar natural’. Os escolásticos medievais dividiram-se entre os que, como Averrões e Alberto Magno, interpretavam Aristóteles como considerando essa tendência intrínseca aos corpos e os que, como Tomás de Aquino, o interpretavam como considerando-a produto de uma força externa, análoga ao magnetismo, exercida pelo lugar natural, pelo centro do universo ou por algo que ocupasse

essa posição e, desta forma, tanto maior quanto a distância desse lugar (CROMBIE, 1957, p. 242).

Como conseqüência dessa doutrina, Alberto da Saxônia defendia que um corpo em seu lugar natural não exerceria peso sobre os corpos com que estivesse em contato (DUGAS, 1955, p. 56). Desta forma, por exemplo, as águas de um lago ou de um oceano não exerceriam peso sobre o fundo.

A verdade é que Aristóteles não estudou a queda dos objetos da forma como o fez Galileu. Ao contrário, tendo constatado que os objetos caem, tentou explicar esse fato a partir da sua metafísica, isto é, apoiado em seus princípios metafísicos bastante gerais, procurou inferir, através de um raciocínio lógico irrepreensível, a queda dos corpos. E, por esse processo, ele se viu forçado a conclusões que nos parecem hoje completamente inverosímeis. Assim, deduziu, por exemplo, no seu tratado *Do Céu*, que o tempo de queda de um corpo é inversamente proporcional ao seu peso, isto é, que “um corpo duas vezes mais pesado cairá da mesma altura na metade do tempo” (DUGAS, 1955, p. 20).

No *Liber Euclidis de gravi et levi*, atribuído a Euclides, há mesmo uma passagem em que se argumenta que “se dois corpos forem amarrados, a velocidade de queda do combinado será a soma das velocidades de cada um separadamente” (DUGAS, 1955, p. 36). Filo de Alexandria terá defendido igual resultado (CROMBIE, 1957, p. 245). Não é verdade, como se aprende na escola, e uma experiência bastante simples poderia demonstrá-lo. Mas é, por outro lado, a conseqüência lógica de um conjunto de premissas evidentes à razão e, portanto, apelativa ao senso comum. Como conseqüência, e também graças à autoridade de Aristóteles, manteve-se aceite durante toda a Idade Média até Galileu, dois mil anos depois, embora Filipon no século VI e Giovanni Battista Benedetti (CROMBIE, 1957, pp. 286-287) no século XVI já tivessem contestado essa afirmação. Filipon parece ter mesmo realizado uma experiência

(CROMBIE, 1957, p. 245) em que a diferença entre os tempos de queda de dois corpos com pesos diferentes terá sido “muito menor que a diferença entre os pesos”, contrariando a lei Aristotélica. Mas as idéias de Filipon ficaram esquecidas durante a maior parte da idade média até o século XIII.

Em analogia com o estudo da formação do conceito de momentum feito por Piaget e Garcia (1983), delinearemos uma primeira fase na formação do conceito de massa, caracterizando-a pela indiferenciação de um conceito de outros com ele relacionados e derivados freqüentemente de um animismo e pelo primado do sensorial, pela presença de pseudonecessidades associadas e pela centração em atributos.

No nosso conceito, o peso é uma força decorrente da atração gravitacional, que, como já vimos, distingue-se da massa. Do ponto de vista de uma criança, tal como para os Aristotélicos, o peso é uma propriedade da matéria, e assim, Piaget & Garcia (1971) interpreta que quando a criança usa a palavra ‘peso’ está a referir-se não a uma força mas à quantidade de matéria. Para Piaget & Inhelder (1941), nesta altura, a criança não diferencia ainda a substância das qualidades de cor, tamanho, forma, etc., de que é suporte; considera que a quantidade de matéria de um objeto possa crescer ou mesmo desaparecer, como um princípio vital e observa-se, por exemplo, usar ambigüamente os termos ‘mais grosso’ e ‘mais pesado’ para indicar tanto maior quantidade de matéria como o de exercer maior força sobre a mão.

Segundo Piaget & Garcia (1983), o raciocínio Aristotélico caracteriza-se pelo primado de pseudonecessidades. Estes autores definem pseudonecessidade como constituindo a fase elementar de indiferenciação de um processo geral de diferenciação e de ordenação correlativas entre o possível, o real e o necessário, resultante de indiferenciações iniciais entre o geral e o necessário, entre o fatural e o normativo (se o objeto x é tal como é, é porque ele deve ser assim) ou ainda entre ‘as boas formas’ perceptivas (retas ou cír-

culos) e como tal consideradas as únicas racionalmente inteligíveis, etc. Segundo eles, a pseudonecessidade é um fenômeno corrente nos primeiros níveis da psicogênese dos conhecimentos e exprime a dificuldade de imaginar outros possíveis para além daquele que está atualizado numa realidade. A todos os níveis do pensamento científico, a descoberta de um novo possível poderia, por sua vez, ser longamente bloqueada pelas pseudonecessidades.

Para Piaget & Garcia (1983), a criança desta fase não parte de uma noção de massa como quantidade de matéria, independente da força; ao contrário, a matéria parece já imbuída de uma força (interna) que a move, num finalismo biomórfico. Assim, a criança desta fase, tal como os Aristotélicos, explica o movimento através dos conceitos de ‘motor interno’ ou ‘lugar natural’. Esses autores oferecem um exemplo: uma bola de gude desce por um plano inclinado porque “é preciso que ele tenha um fim para onde vai sempre, ele deve ter o seu lugar natural.”

Num estudo realizado com estudantes secundários de 12 a 17 anos ingleses, Watts (1982) observou a presença das seguintes ‘necessidades’ que podemos interpretar como pseudonecessidades:

- um ‘meio’ para a gravidade ‘transmitir-se’ através, seja a atmosfera – o que implica ou ‘explica’ porque um astronauta em órbita não sente peso – ou mesmo um sólido, como a mesa sobre a qual se apoia um livro, p.ex;
- uma ‘força para a frente’, que parece remanescente do *impetus*, para explicar o movimento dos objetos, também observada por outros autores (CLEMENT, 1977; VIENNOT, 1979).

No mesmo estudo, Watts observou também:

- objetos em uma posição mais elevada requerem maior força para serem lá mantidos, isto é, seu peso é maior quanto mais distante do seu ‘lugar natural’

- os corpos em movimento “tentam vencer a gravidade e falham”, isto é, o movimento dos corpos é ‘forçado’
- a gravidade atua apenas durante a queda dos corpos, não durante o seu percurso de subida, quando apenas a ‘força para a frente’ ou *impetus* está em ação
- a gravidade não é o peso mas pode agir em conjunção com o peso para manter os objetos ‘em baixo’, no seu ‘lugar natural’
- a gravidade tem a ver mais com a queda dos objetos, enquanto o peso tem a ver com o esforço muscular para levantar objetos
- a gravidade é seletiva, isto é, não atua sempre da mesma maneira sobre todas as coisas da mesma maneira; desta forma, apenas seriam afetados pela gravidade as substâncias ou partes de um objeto que sugerem ser ‘pesadas’ ou inertes, enquanto que as ‘leves’ ou inativas, não seriam afetadas. Por exemplo, seriam afetadas as botas do astronauta e a borracha de um balão de gás mas não o astronauta em si ou o gás no interior do balão.

3.2 2ª fase – O *impetus* e o início da distinção na Idade Média

Embora a doutrina dos motores de Aristóteles explicasse razoavelmente para a época uma série de fenômenos, não era suficiente para explicar a persistência do movimento forçado. Assim, o movimento de um projétil – uma pedra, por exemplo – deveria cessar imediatamente, uma vez tendo perdido o contato com o motor (a corda do arco ou a mão) mas, ao contrário, continua como que auto-móvil, o que seria exclusivo dos seres vivos e dos astros.

Para contornar esse problema, desenvolveu-se a idéia da reação do ambiente ou ação de retorno ou ainda *antiperistasis*: o ar que o projétil atravessa e é deslocado por este, retorna para o vazio deixado atrás do

projétil pela sua deslocação, de forma violenta, produzindo uma espécie de turbilhão que impulsiona o projétil para a frente. Desta forma, o motor inicial delega ao ar sua potência motriz, tornando-o por sua vez um motor.

Também essa doutrina foi contestada por Filipon mas somente Buridan no século XIV apresentou uma nova explicação (DUGAS, 1955, p. 47): o motor imprimiria no projétil um *impetus*, um poder de auto-movimento capaz de mover o projétil na direção dada pelo motor quando aquele já não é movido por este. Devido à resistência do ar e à gravidade do projétil, o *impetus* enfraqueceria continuamente até que a gravidade predominasse e o projétil retornasse a seu lugar natural.

Segundo Buridan (CROMBIE, 1957, p. 252), quanto maior a quantidade de matéria do corpo, maior o *impetus* adquirido. Como exemplo (DUGAS, 1955, p. 50), um pedaço de ferro alcançaria uma distância maior que um pedaço de madeira de mesmo tamanho e forma pois o ferro, sendo mais denso, teria mais matéria, recebendo portanto mais *impetus*; por outro lado, uma pena receberia um *impetus* tão pequeno que este seria logo destruído pela resistência do ar. Diríamos hoje que o *impetus* é proporcional à quantidade de matéria ou massa. Pode-se encontrar, portanto, já no *impetus*, algumas das propriedades do *momentum* Newtoniano.

Por sua vez, Benedetti, inspirado em Arquimedes, considerava o peso como proporcional à densidade relativa do material (CROMBIE, 1957, p. 287), enquanto que Kepler afirmava que a característica mais marcante da matéria que forma a maior parte da Terra é a inércia: o movimento é repugnante a ela e mais assim quanto maior a sua densidade. (DUGAS, 1955, p. 117).

Buridan explicava o movimento acelerado dos corpos em queda livre por um mecanismo de realimentação: a gravidade agia colocava o corpo em movimento, que adquiria assim *impetus*, mantendo o movimento; a ação combinada da gravidade com

o *impetus* já adquirido pelo corpo aumentaria ainda mais o movimento, aumentando o *impetus*, etc., causando um movimento acelerado (CROMBIE, 1957, p. 252-253).

É bem conhecida e contestada (p.ex. COOPER, 1935) a “experiência” de Galileu lançando do topo da Torre de Pisa objetos de pesos diferentes com o objetivo de demonstrar que caem ao mesmo tempo, contrariando a intuição usual. Em seu trabalho *De Motu* de 1590, Galileu menciona um experimento em que teria lançado blocos de madeira e de chumbo de uma dada altura, tendo observado o bloco de chumbo chegar primeiro, comprovando aparentemente a doutrina Aristotélica. Dois cientistas italianos, Coresio em 1612 e Renieri em 1641, repetiram a experiência tendo chegado aos mesmos resultados (CROMBIE, 1957, p. 298) mas, nessa altura, Galileu já não deu importância pois já estava provavelmente convencido por um raciocínio razoável, tal como Benedetti estava já no século XVI (CROMBIE, 1957, pp. 286-287), de que, desprezada a resistência do ar, deveriam cair em tempos iguais. Benedetti argumenta que se se deixam cair dois corpos separadamente e, em seguida, unidos, formando um corpo mais pesado que qualquer um separadamente, o tempo de queda no segundo caso não pode ser diferente do primeiro apenas por causa da união. Desta forma, os tempos de queda seriam independentes do peso, ao contrário do que afirmavam Hierão de Alexandria (CROMBIE, 1957, p. 245) e o autor do *Liber Euclides de gravi et levi* (DUGAS, 1955, p. 36) para a mesma experiência.

É interessante a comparação desta situação com a de Stevin, que realizou uma experiência semelhante meio século antes de Galileu, sem ter conseguido causar qualquer impressão entre seus contemporâneos, enquanto aquele já não teria sentido necessidade de realizar a experiência por saber de antemão o resultado esperado. De qualquer forma, aparentemente Galileu serviu-se não apenas experiências reais mas

também experiências imaginárias, que não teriam sido realizadas ou por falta de condições técnicas ou por Galileu estar convencido a priori de seu resultado, e experiências mentais, *Gedankenexperimente* na denominação de Mach, que serviriam como verificação mental, recurso muito utilizado por Mach e Einstein (SEGRE, 1980).

Estudando o movimento em planos inclinados, Galileu chegou ao estudo do movimento de uma esfera sobre uma superfície paralela à superfície da Terra. Como durante tal movimento a esfera não se aproximava nem se afastava do centro da Terra, seu movimento não seria nem natural nem forçado, em pleno confronto com Aristóteles, e foi por esta razão denominado por Galileu de movimento neutro (DRABKIN; DRAKE, 1960, p. 68). Considerando que, para todos os efeitos, o curto trajeto de um tal movimento é pequeno em comparação com o raio da Terra, tal superfície podia, para Galileu, ser aproximada a um plano horizontal.

Desta forma, Galileu conclui que um corpo sobre um plano horizontal encontra-se num estado de ‘indiferença’ (DRABKIN; DRAKE, 1960, p. 171): qualquer força, por mínima que seja, seria suficiente para colocá-lo em movimento ou pará-lo. E oferece um exemplo nos *Diálogos sobre Duas Novas Ciências*:

Aquele que fechar as portas de bronze de San Giovanni tentará em vão fechá-las com um único empurrão simples; mas com um impulso contínuo ele imprime a esse mesmo pesadíssimo corpo móvel uma tal força que, quando chega a bater e choca de encontro ao batente, faz tremer a igreja inteira. (GALILEI, Galileu apud HALL, 1954, p. 155)

Para muitos historiadores (p. ex. DRAKE, 1964; vide, porém, LOSEE, 1966), tais afirmações, reproduzidas no segundo dia dos *Diálogos*, constituem pelo menos uma versão restrita do princípio de inércia desenvolvido posteriormente por Newton.

No entanto, Galileu ressalva que um plano só pode ser paralelo à superfície esférica da Terra num ponto e, desta forma, qualquer trajeto sobre ele estará afastando-se ou aproximando-se do centro da Terra, não sendo mais um movimento ‘neutro’ e, desta forma, “há boas razões para que não seja possível mover uma esfera com uma força arbitrariamente pequena” e “não se deveria surpreender se falhasse” tal experimento.

Mas o experimento acima mencionado poderia falhar por outro motivo: se na queda livre todos os corpos caem ao mesmo tempo, por outro lado, no plano horizontal um mesmo impulso provocará movimentos diferentes em uma bola de gude e em uma bola de boliche. Embora Salviati pergunte, no segundo dia dos *Diálogos*, “se não haverá no móvel, para além da tendência natural ao termo contrário, outra tendência intrínseca que faça-o avesso ao movimento”, na verdade, Galileu ainda não distinguia do peso o conceito de massa, como chamaríamos hoje essas ‘tendências’, conceitos que só foram diferenciados com Newton. De fato, na queda livre, todos os corpos cairiam com iguais acelerações, as diferenças de peso sendo compensadas pelas diferenças de massa, determinantes da aceleração resultante.

Galileu considerava a gravidade como a tendência natural dos corpos para o centro da Terra. Desta forma, o peso, tal como a massa, era uma propriedade natural dos corpos (CROMBIE, 1957, pp. 301-302). Descartes entendia a matéria apenas como extensão (CROMBIE, 1957, p. 304) e rejeitava a noção de ação à distância propondo a existência de um meio, o éter, que transmitia mecanicamente as interações estava possuindo das várias propriedades físicas, entre as quais, o que posteriormente se chamaria massa (CROMBIE, 1957, p. 305). Torricelli considerava o peso como apenas mais uma dimensão do objeto, para além das dimensões geométricas (CROMBIE, 1957, p. 303). Note-se ainda que, enquanto Cavalieri, Kepler,

Gassendi e outros defendiam a noção do peso como efeito de uma força à distância (CROMBIE, 1957, pp. 301-302), essa noção era repugnante para contemporâneos de Galileu.

Segundo Piaget & Garcia (1983), a segunda fase caracteriza-se pelo início da diferenciação dos conceitos antes indistintos, pela introdução da medida onde antes a avaliação era apenas qualitativa, isto é, de comparações; pela passagem dos predicados às relações; pela passagem da centração sobre os predicados à consideração das relações e das transformações e pela eliminação do motor interno.

Segundo Piaget & Garcia (1983), a primeira diferenciação importante manifesta-se por altura da fase II com a correção das correspondências ilegítimas e, por consequência, a eliminação do motor interno. Como vimos, dois mecanismos foram propostos em alternativa ao motor interno: a *antiperistasis* e o *impetus*. A experiência do ‘movimento neutro’ de Galileu, com seu ‘estado de indiferença’, também promove a diferenciação entre os conceitos de peso e resistência ao movimento (massa). Embora se inicie a relação entre os conceitos de peso e quantidade de matéria (massa), deixando aquele de ser uma qualidade, um predicado dos corpos, mas já efeito de uma ação à distância, observam-se falsas relações entre o peso e o tempo de queda dos corpos.

3.3 3ª fase – A distinção clara na Mecânica Newtoniana

Com Newton e sua lendária maçã, finalmente, a Mecânica encontra um novo sistema de leis, princípios e definições – a mecânica Newtoniana –, a qual é ainda a base de grande parte da física do século XX.

Newton, na Definição I dos seus *Principia Mathematica*, define vagamente massa como a ‘quantidade de matéria’. Na Definição III, Newton apresenta a *vis insita*, a força inata da matéria como a propriedade de resistir à mudança de estado de

movimento, e por isso mesmo, denominada inércia (*vis inertiae*) ou força de inatividade. Na Definição IV, define a *vis impressa*, a ação externa que atua sobre um corpo e altera seu estado de movimento. No comentário a essa definição, afirma ainda que os corpos mantêm o seu estado de movimento apenas pela inércia, descartando, portanto, o *impetus* para explicar a manutenção do movimento de um corpo lançado ou em movimento violento, na denominação de Aristóteles. Segundo Steinberg (1990), essa receptividade de Newton a forças como agentes externos deriva do contato de Newton com a Alquimia.

A expressão ‘quantidade de matéria’ tem sido frequentemente repetida em livros, motivando uma interpretação metafísica deste conceito. No entanto, Newton, nos seus *Principia* claramente afirma que ‘massa’ é uma medida, isto é, um número produzido por operações definidas. Assim, ‘massa’ é um conceito métrico (HEMPEL e BUNGE, citados em DOMÉNECH et al. 1993).

Embora Newton tenha definido ‘massa’ na Definição I e declarado ter verificado que esta é proporcional ao ‘peso’, não define este último pois, na verdade, não é possível a distinção entre esses dois conceitos sem referência à sua segunda lei, a qual será formulada em termos de conceitos ainda a serem introduzidos. Assim, deixa essa distinção para a proposição XXIV do livro II dos *Principia*, onde demonstra, de acordo com experimentos com pêndulos realizados “com muita precisão”, que a massa é proporcional ao peso.

No fim do século XIX, Mach (1919) criticou as definições Newtoniana e tentou definir as grandezas operacionalmente. Desta forma, Mach propôs uma definição de massa através da aceleração que um corpo sofre ao ser atraído por outra massa tomada como padrão, em consonância com a terceira lei de Newton. Todavia, o desenvolvimento da filosofia da ciência neste século levou a que o operacionalismo radical e a mecânica de Mach fossem criticados por várias razões lógicas e metodológicas (BUNGE, 1966).

As chamadas três leis de Newton descrevem:

- o comportamento dos corpos quando não sujeitos a forças: estarão em repouso ou em movimento com velocidade constante (1ª Lei);
- como interagirão dois corpos: as forças entre eles, sejam de contato ou à distância, terão a mesma intensidade e sentidos opostos (3ª Lei);
- o resultado de uma força sobre um corpo: será acelerado na direção da força e em proporção inversa à sua massa (2ª Lei).

Newton concebe as suas leis do movimento como axiomas, a desempenhar a mesma função dos axiomas euclidianos (PIAGET; GARCIA, 1983, p. 180) e formando um verdadeiro sistema, o primeiro após o sistema de Aristóteles. A partir apenas dessas quatro leis e algumas definições, Newton é capaz de explicar quantitativamente uma série infindável de situações mecânicas, deduzindo-as como teoremas nos seus *Principia Mathematica*.

Para além disso, Newton formula a Lei da Gravitação Universal, segundo a qual dois corpos quaisquer atraem-se mutuamente com intensidade proporcional ao produto de suas massas e ao inverso do quadrado da distância que os separa. Desta forma, o peso de um objeto – sua atração pela Terra – é proporcional à sua massa.

Mas, ao contrário do que foi interpretado na altura da primeira edição dos *Principia* (1687), Newton não acreditava que a gravidade fosse uma qualidade inata da matéria, nem que ela pudesse agir à distância, sem a intermediação de um ‘éter’, um meio subtil, que propagasse essa e outras interações.

Distingue-se, porém, a chamada ‘massa inercial’ da 2ª Lei, medida da inércia de um corpo, da ‘massa gravitacional’ da Lei da Gravitação Universal, coeficiente de atração gravitacional. Mas mesmo antes de Newton a equivalência entre as duas massas havia já sido testada por Filipon no sé-

culo V da nossa era, e por Stevin e Galileu separadamente no século XVI (ISRAEL, 1987, pp. 86-87).

Objetos em queda livre ‘sentem’ uma força de atração pela Terra – peso – proporcional à sua massa gravitacional, segundo a Lei da Gravitação Universal, mas são acelerados por ela em razão inversa da sua massa inercial, segundo a 2ª Lei. Desta forma, objetos ‘mais pesados’ sofrem a ação de uma força maior mas apresentam maior dificuldade em serem acelerados devido à maior massa inercial. As diferenças entre os seus pesos são compensadas pelas diferenças entre as massas (CROMBIE, 1957, p. 306) e, como conseqüência, um objeto “pesado” e um “leve” cairão juntos. Exatamente juntos se as duas massas, gravitacional e inercial, equivalerem exatamente. O problema da queda dos corpos que desafiou as mentes mais capazes durante séculos foi então resolvido graças à distinção entre a massa e o peso.

Segundo Piaget & Garcia (1983), esta fase caracteriza-se por clara distinção entre os conceitos previamente indistintos e relação dos conceitos num sistema.

Para Bachelard (1940), com Newton, a noção de massa como o quociente da força pela aceleração define-se, não mais como elemento primitivo de uma experiência imediata e direta mas correlativamente, num *corpo de noções*.

Por outro lado, segundo Piaget & Garcia (1983), numa síntese entre a queda dos corpos e movimento dos astros, Aristóteles e seus continuadores interrogavam-se a propósito da natureza do corpo que cai e do modo como os seus atributos se modificam durante a queda. Galileu, por seu lado, vai abandonar essas questões para se concentrar exclusivamente na comparação das distâncias e dos tempos de queda. Newton, por sua vez, reduzirá o problema a uma relação no sistema Terra-pedra e, numa síntese genial, vai mostrar que a relação é do mesmo gênero do que aquela que preside ao sistema Sol-Terra.

Para aí chegar, ele teve também eliminar uma outra das limitações impostas por Aristóteles: a ‘necessidade’ de perfeição e de incorruptibilidade atribuída ao universo que está para além do mundo sublunar.

3.3 4ª fase – A reunificação na Relatividade Geral

Einstein acreditava ser muito provável que, mais do que uma igualdade de valores, as massas gravitacional e inercial fossem exatamente idênticas e estava convicto que devia ser expressa como um princípio fundamental da Física (EINSTEIN; GROSSMAN, apud MISNER; THORNE; WHEELER, 1973, p. 431).

Esta equivalência é conhecida na Física atual como Princípio da Unicidade da Queda Livre ou Princípio de Equivalência e está na base nada menos que da Teoria da Relatividade Geral de Einstein estando a massa associada ao tensor que mede a curvatura do espaço (WHEELER, 1973, pp. 1050-1051). O exemplo mais conhecido é o da pessoa fechada num elevador, a qual não tem maneira de saber se o que sente é o peso devido à ação da gravidade ou, estando no espaço, a reação a uma aceleração para cima de igual intensidade à da gravidade.

Experimentos atuais envolvendo a verificação do princípio de equivalência: $m_g \equiv m_i$ são conhecidos como experimentos de Eötvös e estão entre os de maior precisão na Física: verifica-se uma equivalência entre as massas gravitacional e inercial ao limite de precisão dos aparelhos, o que já atinge a menos de uma parte em dez mil milhões (ISRAEL, 1987)!

Conclusões

Conseguimos neste trabalho, em analogia com o estudo da formação do conceito de momentum feito por Piaget e Garcia (1983), delineamos quatro fases na psicogênese do

conceito de massa, em analogia com o seu desenvolvimento histórico, desde a Antiguidade até a Relatividade Geral.

Por outro lado, todo este trabalho pode também testemunhar sobre a importância do construtivismo e da história da ciência no ensino. Parece-nos ainda necessária uma atenção à pré-lógica infantil, como alerta Watts (1982): “muitos sistemas de ensino não reconhecem que as crianças nem sempre fazem uma clara relação entre gravidade e peso”, com as consequências que daí decorrem.

Referências

- BACHELARD, Gaston, *La Philosophie du Non*, PUF, Paris, 1940 (trad. port.: *A Filosofia do Não: Filosofia do Novo Espírito Científico*, Presença, Lisboa, (5.ed.), 1991).
- BUNGE, Mario, Mach's Critique of Newtonian Mechanics, *Amer. J. Phys.*, vol. 34, pp. 585-596, 1966.
- CLEMENT, John, *Catalogue of Students' Conceptual Models in Physics*, working paper, Department of Physics and Astronomy, University of Massachusetts, 1977.
- COOPER, Lane, *Aristotle, Galileo and the Tower of Pisa*, Ithaca, NY: Cornell University Press, 1935.
- CROMBIE, Alistair C., *Augustine to Galileo – the History of Science A.D. 400-1650*, London: William Heinemann, 1957.
- DOMÉNECH, A.; CASASÚS, E.; DOMÉNECH, M.T., The Classical Concept of Mass: Theoretical Difficulties and Student's Definitions, *Int. J. Sci. Educ.*, vol. 15, n.2, pp. 163-173, 03-04/1993.
- DRABKIN, I.; DRAKE, Stillman, *Galileo on Motion and on Mechanics*, Wisconsin: University of Wisconsin, 1960.
- DRAKE, Stillman. Galileo and the Law of Inertia, *Amer. J. Phys.* vol. 32, n. 8, pp. 601-608, 08/1964.
- DUGAS, René, *A History of Mechanics*, Neuchâtel: Ed. du Griffon, 1955.
- GALILI, Igal, Weight and Gravity: Teachers Ambiguity and Students' Confusion about the Concepts, *Int. J. Sci. Educ.*, vol. 15, n. 2, pp. 149-162, 03-04/1993.
- GUNSTONE, Richard F.; WHITE, Richard T., Understanding of Gravity, *Science Education* vol. 65, n. 3, pp. 291-299, 07/1981.
- HALL, A. Rupert, *The Revolution in Science 1500-1750*, Longman, London, 1954, (trad. port.: *A Revolução na Ciência 1500-1750*, Lisboa: Edições 70, 1988).
- IONA, Mario, The Meaning of Weight, *Phys. Teach.* vol. 13, n. 5, pp. 263-274, 05/1995.
- ISRAEL, W., *Three Hundred Years of Gravitation*, Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- LÉVI-STRAUSS, Claude, *La Pensée Sauvage*, Paris: Plon, 1962.
- LOSEE, John, Drake, Galileo, and the Law of Inertia, *Am. J. Phys.* vol. 34, n. 5, pp. 430-432, 1966.
- MACH, Ernst, *The Science of Mechanics*, Chicago: Open Court, 1919.
- MARIANO GAGO, José, *Ciência e Saber Comum*, in *A Ciência como Cultura*, colóquio promovido pelo Presidente da República, Lisboa: Imprensa Nacional Casa da Moeda, 1992, pp. 27-44; *idem*, *Quantidades e Qualidades na Física do Senso Comum*. In: *Matemática e Cultura I*, FURTADO COELHO, J. (Coord.), Lisboa: Centro Nacional de Cultura, 1992.
- MISNER, Charles; THORNE, Kip S.; WHEELER, John Archibald, *Gravitation*, San Francisco: Freeman, 1973
- NEWTON, Isaac, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, London, 1687, Andrew Motte's English translation of 1729, Florian Cajori edition.
- PIAGET, Jean, *Os Dados da Epistemologia Física*. In: *Logique et Connaissance Scientifique*, Paris: Gallimard, 1967 (ed. portug. *Lógica e Conhecimento Científico*, Porto: Livraria Civilização, 1981).
- PIAGET, Jean, *L'Epistemologie génétique*, Paris: PUF, 1970.
- PIAGET, Jean; GARCIA, Rolando, *Les Explications Causales, Études d'Épistémologie Génétique XXVI*, Paris: PUF, 1971.
- PIAGET, Jean; GARCIA, Rolando, *Psychogenèse et Histoire des Sciences*, Paris: Flammarion, 1983, (trad. port. *Psicogénese e História das Ciências*, Lisboa: Dom Quixote, 1987).

- PIAGET, Jean et. coll., *La Formation de La Notion de Force*, Études d'Épistémologie Génétique XXIX, Paris: PUF, 1973.
- PIAGET, Jean; INHELDER, Bärbel, *Le Développement des Quantités Physiques chez l'Enfant*, Neuchâtel: DelaChaux et Niestlé, 1941 (trad. port.: *O Desenvolvimento das Quantidades Físicas na Criança: Conservação e Atomismo*, Rio de Janeiro: Zahar, 1975).
- SEGRE, M., *The Role of Experiment in Galileo's Physics*, Arch. Hist. Exact Sci. vol. 23, n. 3, pp. 227-252, 30/11/1980.
- STEINBERG, Melvin S., *Genius is not Immune to Persistent Misconceptions: Conceptual Difficulties Impeding Isaac Newton and Contemporary Physics Students*, Int. J. Sci. Educ. vol. 12, n. 3, pp. 265-273, 1990.
- VIENNOT, L., *Spontaneous Reasoning in Elementary Dynamics*, Eur. J. Sci. Educ. vol. 1, n. 2, pp. 205-221, 04-06/1979.
- WATTS, D. Michael, *Gravity – don't Take it for Granted!*, Phys. Educ. vol. 17, n. 3, pp. 116-121, 05/1982.