

Galileu fez o experimento do plano inclinado?

Marcos Cesar Danhoni Neves, José Marcos Batista, José Roberto Costa, Luciano Carvalhais Gomes, Michel Corci Batista, Polonia Altoé Fusinato, Fabiana Ribeiro de Almeida, Rafael Gustavo Rigolon da Silva, Arlindo Antonio Savi, Ricardo Francisco Pereira

Programa de Mestrado em Educação para a Ciência e o Ensino de Matemática, Universidade Estadual de Maringá. E-mail: macedane@yahoo.com

Resumo: O presente artigo busca, através de uma reproposta didática do famoso experimento do plano inclinado, discutir as possibilidades de sua realização em tempos galileano e o caráter epistemológico da nova Mecânica.

Palavras-chave: Galileu, plano inclinado, experimento.

Title: Did Galileo the inclined plane's experiment?

Abstract: The present paper reproduce the famous experiment of the inclined plan, discussing about the possibility of its realization at Galilean times. Discuss also the epistemological view of the new science of Mechanics.

Keywords: Galileo, inclined plan, experiments.

Introdução

Em setembro de 2002 a revista britânica *Physics World* divulgou o resultado de uma pesquisa realizada entre seus leitores para apontar os mais belos experimentos físicos de todos os tempos. Entre os dez mais votados, encontramos dois experimentos atribuídos ao italiano Galileu Galilei (1564-1642): o experimento da queda de corpos (segundo colocado) e o experimento do plano inclinado (oitavo colocado).

O interessante é que não há um consenso entre os historiadores da ciência quanto à veracidade da realização destes experimentos. Koyré (1991, p. 197, grifo do autor), ao comentar a experiência de Pisa, diz que:

Os historiadores que se ocuparam de Galileu – e os historiadores de ciência em geral – atribuem às experiências de Pisa uma grande importância. Habitualmente, nelas vêem um momento decisivo da vida de Galileu: o momento em que ele se pronuncia *abertamente* contra o aristotelismo e inicia seu ataque *público* contra a escolástica. Nelas vêem, também, um momento decisivo da história do pensamento científico: o momento em que, justamente graças às suas experiências sobre a queda dos corpos, Galileu defere um golpe mortal na física aristotélica e assenta os fundamentos da nova dinâmica.

Depois de citar alguns historiadores que descreveram a experiência de Pisa como se realmente tivesse sido realizada por Galileu, o autor conclui que todos

estes relatos “[...] são pura e simplesmente por eles inventados, pois a única fonte autêntica de que dispomos, o *Racconto istorico*, de Vincenzo Viviani, não contém uma única palavra a respeito” (Koyré, 1991, p. 200). Alexandre Koyré alega que este relato foi modificado e ampliado pelos sucessores de Viviani, o que pode ser verdade, mas não estamos de acordo com a afirmação de que na narração de Vincenzo Viviani não havia uma única palavra a respeito da experiência de Pisa. No trecho do texto de Viviani, destacado pelo próprio Koyré, é evidente a referência à experiência:

[...] Foi então que, para grande indignação de todos os filósofos, ele demonstrou – com o auxílio de experiências, provas e raciocínios exatos – a falsidade de numerosíssimas conclusões de Aristóteles sobre a natureza do movimento, conclusões que, até então, eram tidas como perfeitamente claras e indubitáveis. Assim, entre outras, a de que as velocidades de móveis da mesma matéria, mas desigualmente pesados e movendo-se através do mesmo meio, não obedecem a proporção de seus pesos, como é declarado por Aristóteles, mas se movem, todos, com a mesma velocidade. *O que demonstrou em repetidas experiências, feitas no alto do campanário de Pisa, na presença de todos os outros professores e filósofos e de toda a Universidade [...]* (Koyré, 1991, p. 201, grifo do autor).

Isto mostra a parcialidade do autor ao analisar o fato que, em seguida, mostra descrédito ao relato de Viviani. Apesar de este ter sido o biógrafo de Galileu, convivendo com o mesmo nos últimos anos de sua vida, como não há registro em qualquer outra fonte do relato acima (Cohen, 1988), as dúvidas de Koyré, neste caso, tem fundamento.

A polêmica continua com os experimentos do plano inclinado. Para muitos, Galileu obteve racionalmente a relação de que a distância percorrida por um corpo é proporcional ao quadrado do tempo de queda, como descreve detalhadamente na sua famosa obra *Discursos e demonstrações matemáticas acerca de duas novas ciências a respeito da mecânica e dos movimentos locais* (1638). Se estes experimentos existiram, serviram apenas como uma comprovação. Outros acreditam que os esquemas teóricos sobre este tipo de movimento surgiram após vários experimentos com bolas e planos inclinados. Deste modo, temos duas visões sobre o cientista Galileu, uma *racionalista* e outra *empirista*.

O principal argumento dos que acreditam em um Galileu racionalista é de que os resultados encontrados são muito precisos para os precários meios experimentais utilizados. Ou seja, “[...] a própria perfeição de seus resultados é uma rigorosa prova de sua inexatidão” (Koyré, 1991, p. 275). Para estes, Galileu fazia uso freqüente das “experiências de pensamento”, encarnando a herança do platonismo. Em contrapartida, os adeptos do Galileu empirista reconstituíram a experiência do plano inclinado o mais fiel possível à descrição original, para provar a veracidade dos resultados afirmados por Galileu.

Este trabalho apresenta o resumo de alguns resultados obtidos nestas experiências e suas conclusões. Também recriamos o experimento utilizando quatro meios de medição de tempo: pulso cardíaco, pêndulo, relógio d’água e

cronômetro digital. O nosso objetivo, além de vivenciar as dificuldades que Galileu teve na medição do tempo, era demonstrar que com materiais simples é possível levar esta polêmica para a sala de aula, enriquecendo as perspectivas dos alunos sobre o desenvolvimento do conhecimento científico.

Galileu sobre ombros de gigantes

De acordo com Cohen (1988, p. 131): "Se quisermos apreciar com isenção a estatura de Galileu, devemos colocá-lo ao lado dos seus contemporâneos e predecessores." Deste modo, faremos um pequeno histórico sobre alguns personagens da ciência cujos estudos sobre o movimento influenciaram Galileu.

A busca pelos primeiros trabalhos organizados sobre este tema nos remete a Aristóteles no século IV a.C.. O seu modelo cosmológico dividia o universo em dois mundos (o "supralunar" e o "sublunar"), "[...] regradados por diferentes qualidades, no que concerne à natureza dos objetos e de seus movimentos" (Albanese; Danhoni Neves; Vicentini, 1998, pp. 461-472; 2005, p. 66). Os corpos sublunares eram compostos de terra, água, ar e fogo, e os supralunares pelo éter. Para Aristóteles, se os movimentos dos corpos que habitam o mundo supralunar são movimentos circulares e uniformes, os movimentos dos corpos que se encontram no mundo sublunar relacionam-se com a natureza dos corpos materiais, havendo dois tipos de movimentos: o movimento natural e o movimento forçado ou violento.

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

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

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

Mas como explicar o movimento de uma pedra arremessada mesmo após ela ter perdido contato com as nossas mãos? Para resolver este problema, Aristóteles explica que nestes casos o próprio meio atua como motor através do estabelecimento de correntes de ar que é comprimido na parte da frente do objeto em movimento e por isso obrigado a deslocar-se para a sua parte de trás empurrando novamente o objeto. Esta explicação, contudo, cria um

paradoxo: o meio sustenta e resiste ao mesmo tempo o movimento. Segundo Danhoni Neves (2005, p. 166, grifo do autor):

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

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

$$V \propto (F - R) \quad (2)$$

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

Paralelo à teoria do *impetus*, pensadores das universidades de Oxford (Merton College) e de Paris deram início ao ramo da Física que chamamos hoje de *cinemática*. Em Oxford trabalhavam Thomas Bradwardine (1290-1349), Swineshead, Heytesbury, e Dumbleton, que pertenceram à chamada Escola dos Calculadores (1330-1340), em Paris estavam Jean Buridan e seu discípulo Nicole d'Oresme (1323-1382).

Estes pensadores começaram a classificar qualquer quantidade como temperatura, peso, velocidade, deslocamento..., em uniformes, diformes e diformemente diformes. Comparando o efeito de uma quantidade cuja intensidade varia com a extensão e o efeito de uma quantidade cuja intensidade é uniforme, concluíram que *uma quantidade uniformemente variável é equivalente a uma quantidade uniforme que tome o valor médio da quantidade uniformemente variável*. Esta afirmação, conhecida por Regra de Merton, foi posteriormente aplicada por Oresme ao caso particular em que a quantidade é a velocidade, e a extensão o tempo, *afirmando-se então que o*

espaço percorrido num movimento acelerado que parta do repouso é o mesmo que o espaço percorrido com movimento uniforme cuja velocidade seja igual à velocidade média do outro movimento (regra da velocidade média) (Simões, 2007). A regra da velocidade média será de fundamental importância para Galileu deduzir a relação entre o espaço percorrido e o tempo de queda de um corpo. Cohen (1988, p. 136), citando Lord Rutherford, diz:

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

Apoiando-se sobre os ombros de seus antecessores, Galileu tem o caminho aberto para dar a sua contribuição para o desenvolvimento da Ciência.

O plano inclinado de Galileu

Ao pesquisarmos sobre os experimentos com o plano inclinado realizados por Galileu, temos duas grandes fontes de consulta: a primeira são seus manuscritos, correspondências e outros documentos, a outra é o seu livro *Discursos e demonstrações matemáticas acerca de duas novas ciências a respeito da mecânica e dos movimentos locais* (conhecido apenas como *Duas Novas Ciências*). Para Cohen (1988, p. 114-115):

A primeira opção é necessariamente hipotética, pois, em parte depende da interpretação de certas páginas manuscritas que contêm dados numéricos e diagramas sem qualquer comentário ou explicação; trata-se de um registro particular cuja decifração começou apenas na década de 70 do nosso século. A segunda opção, a obra publicada, compreende a seqüência das idéias que Galileu pretendia fazer crer ter seguido.

Por enquanto, analisaremos a obra publicada e mais adiante teceremos considerações sobre o que se tem encontrado em outros trabalhos comentados.

O livro é apresentado sob a forma de um diálogo entre três personagens: Simplicio (simpatizante de Aristóteles), Sagredo (ávido por conhecimento novo) e Salviati (porta-voz de Galileu). Dos quatro diálogos contidos no livro, os dois últimos, dedicados ao tratamento dos movimentos uniforme e acelerado, serão o foco de nossa atenção no momento.

No intuito de compreender como Galileu demonstrou em *Duas Novas Ciências* que o espaço percorrido por um corpo é proporcional ao quadrado do tempo, faremos uma análise de trechos do diálogo contidos no terceiro dia onde é abordado o estudo do movimento naturalmente acelerado. Utilizaremos como fonte de consulta a transcrição contida na dissertação de mestrado de

Araújo Filho (1998), sempre em paralelo com a tradução brasileira (Galilei, 1986).

Sagredo: [...] Por ora, retomando ao fio de nossa conversação, parece-me que até o presente conseguimos estabelecer a definição de movimento uniformemente acelerado do qual se trata na continuação. Tal definição é:

Chamamos movimento igualmente, ou seja, uniformemente acelerado, àquele que, partindo do repouso, adquire em tempo iguais momentos iguais de velocidade (Araújo Filho, 1998, p. 61, grifo do autor; Galilei, 1986, p. 135-136).

Salviati: [...] o autor passa a tratar das proposições, deduzindo-as demonstrativamente, a primeira das quais é a seguinte:

TEOREMA I – PROPOSIÇÃO I

O tempo no qual um determinado espaço é percorrido por um móvel que parte do repouso com um movimento uniformemente acelerado é igual ao tempo no qual aquele mesmo espaço seria percorrido pelo mesmo móvel uniforme, cujo grau de velocidade seja a metade do maior e último grau de velocidade alcançado no movimento uniformemente acelerado (Araújo Filho, 1998, p. 65, grifo do autor).

[...]

TEOREMA II – PROPOSIÇÃO II

Se um móvel, partindo do repouso, cai com movimento uniformemente acelerado, os espaços por ele percorridos em qualquer tempo estão entre si na razão dupla dos tempos, a saber, como os quadrados dos mesmos tempos (Araújo Filho, 1998, p. 66, grifo do autor).

A definição de movimento uniformemente acelerado dada por Sagredo garante que a variação de velocidade é proporcional à do tempo, ou seja, em termos algébricos modernos:

$$\boxed{\frac{v_2}{v_1} = \frac{t_2}{t_1}} \quad (3)$$

O teorema I é a regra da velocidade média demonstrada geometricamente, um século antes de Galileu, em Paris, por Nicole d'Oresme. Aliás, a demonstração dada por Galileu ao teorema, incluindo o diagrama utilizado, é muito semelhante à de Oresme (Cohen, 1988, p. 133).

O teorema II é o ponto central de nossa análise. Galileu o demonstra com recursos geométricos, vamos traduzir a sua fala algebricamente para facilitar a compreensão. Continuemos com Araújo Filho (1998, p. 66-67, grifo nosso; Galilei, 1986, p. 137) [NOTA: a figura 1 é original da obra de Galileu Galilei]:

Representemos o tempo que tem início no instante *A* por meio da linha reta *AB*, na qual tomamos dois intervalos quaisquer de tempo *AD* e *AE*. Seja *HI* a linha segunda a qual o móvel partindo do repouso em *H*, cairá com movimento

uniformemente acelerado; seja HL o espaço percorrido durante o primeiro intervalo de tempo AD , e HM o espaço percorrido durante o intervalo de tempo AE . Afirimo que o espaço MH está para o espaço LH numa proporção dupla daquela que o tempo AE está para o tempo AD ; e podemos também afirmar que os espaços HM e HL tem a mesma proporção que os quadrados de AE e AD . Tracemos a linha AC que forma um ângulo qualquer com a linha AB , e a partir dos pontos D e E tracemos as linhas paralelas DO e EP ; se DO representa o grau máximo de velocidade adquirido no instante D do intervalo de tempo AD , EP representará, por definição a velocidade máxima obtida no instante E do intervalo de tempo AE .

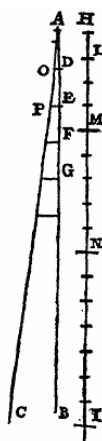


Figura 1.- Desenho original de Galileu (Galilei, 1986).

Mas, conforme foi demonstrado acima a propósito dos espaços percorridos, esses espaços são os mesmos, se um móvel, partindo do repouso, se move com um movimento uniformemente acelerado e se, durante um intervalo de tempo igual, ele se move com um movimento uniforme, cuja velocidade é a metade da velocidade máxima adquirida durante o movimento acelerado. Segue-se que as distâncias HM e HL são idênticas às que seriam percorridas nos intervalos de tempo AE e AD por movimentos uniformes, cujas velocidades seriam iguais à metade daquelas representadas por DO e EP . Se tiver, portanto, sido provado que as distâncias HM e HL estão na proporção dupla dos tempos AE e AD , a proposição terá sido provada. Na quarta proposição do livro primeiro foi demonstrado que os espaços percorridos por dois corpos em movimento uniforme estão entre si numa proporção que é igual ao produto da proporção das velocidades com a proporção dos tempos. Neste caso, porém, a proporção das velocidades é a mesma que a proporção dos tempos (uma vez que a proporção entre AE e AD é a mesma que proporção entre a metade de EP e a metade de DO , ou entre EP e OD). Conseqüentemente, a proporção entre os espaços percorridos é a mesma que o quadrado da proporção entre os tempos; o que queríamos demonstrar.

Seguindo o raciocínio de Galileu, façamos: $AD = t_1$; $AE = t_2$; $HL = s_1$ e $HM = s_2$.

Para provar a afirmação de que

$$\frac{HM}{HL} = \frac{AE^2}{AD^2} \rightarrow \boxed{\frac{s_2}{s_1} = \frac{t_2^2}{t_1^2}} \quad (4)$$

Façamos: $DO = v_1$ e $EP = v_2$.

Utilizando a regra da velocidade média e a proposição deduzida por Galileu, ao tratar do movimento uniforme no mesmo livro, de que *os espaços percorridos por dois corpos em movimento uniforme estão entre si numa proporção que é igual ao produto da proporção das velocidades com a proporção dos tempos*, tem-se:

$$\frac{HM}{HL} = \frac{\frac{EP}{2}}{\frac{DO}{2}} \cdot \frac{AE}{AD} \rightarrow \boxed{\frac{s_2}{s_1} = \frac{v_2}{v_1} \cdot \frac{t_2}{t_1}} \quad (5)$$

Substituindo-se (3) em (5), chega-se a equação (4), que é o que queríamos demonstrar (nós e Galileu). Seguindo com o diálogo entre os personagens, encontramos referência de experimentos realizados pelo autor para comprovar esta relação:

Simplicio: Estou plenamente convencido de que as coisas se passam assim, uma vez enunciada e aceita a definição do movimento uniformemente acelerado. Mas, se essa é a aceleração da qual se serve a natureza no movimento de queda dos graves, tenho no momento minhas dúvidas. Parece-me, pelo que diz respeito a mim e a outros que pensam como eu, que *teria sido oportuno neste lugar apresentar uma das muitas experiências que, em diversos casos, concordam com as conclusões demonstradas*. (Araújo Filho, 1998, p. 67, grifo nosso; Galilei, 1986, p. 139).

Salviati: Como verdadeiro homem de ciência, sua exigência é muito razoável; pois *é assim que convém proceder nas ciências, que aplicam as demonstrações matemáticas aos fenômenos naturais*. (...) Pelo que se refere as experiências, *o autor não deixou de fazê-las; e para assegurar-se de que a aceleração dos graves, que caem de modo natural, acontece na proporção acima afirmada, encontrei-me muitas vezes em sua companhia, procurando tal prova da seguinte maneira*.

Numa ripa ou, melhor dito, numa viga de madeira com um comprimento aproximado de 12 braças, uma largura de meia braça num lado a três dedos do outro, foi escavada uma canaleta neste lado menos largo com um pouco mais de um dedo de largura. No interior desta canaleta perfeitamente retilínea, para ficar bem polida e limpa, foi colada uma folha de pergaminho que era polida para ficar bem lisa; fazíamos descer por ele uma bola de bronze duríssima perfeitamente redonda e lisa. Uma vez construído o mencionado aparelho, ele era colocado numa posição inclinada, elevando-se sobre o horizonte uma de suas extremidades até a altura de uma ou duas braças, e se deixava descer a bola pela canaleta, anotando como exporei mais adiante o tempo que empregava para uma descida completa; *repetindo esta experiência*

muitas vezes para determinar a quantidade de tempo, na qual nunca se encontrava uma diferença nem mesmo da décima parte de uma batida de pulso. Feita e estabelecida com precisão tal operação, fizemos descer a mesma bola apenas a quarta parte do comprimento total da canaleta; e, medido o tempo de queda, resultava ser rigorosamente igual a metade do outro. Variando a seguir a experiência e comparando o tempo requerido para percorrer todo o comprimento com o tempo requerido para percorrer a metade, ou dois terços ou três quartos, ou qualquer outra fração, por meio de experiências repetidas mais de cem vezes, sempre se encontrava que os espaços percorridos estavam entre si com os quadrados dos tempos e isso em todas as inclinações do plano, ou seja, da canaleta, pela qual se fazia descer a bola. Observamos também que os tempos de queda para as diferentes inclinações mantinham exatamente entre si aquela proporção que, como veremos mais adiante, foi encontrada e demonstrada pelo autor. No que diz respeito à medida do tempo, empregávamos um grande recipiente cheio de água, suspenso no alto, o qual por um pequeno orifício feito no fundo, deixava cair um fino fio de água, que era recolhido num pequeno copo durante todo o tempo que a bola descia pela canaleta ou por suas partes. As quantidades de água assim recolhidas eram a cada vez pesadas com uma balança muito precisa, sendo as diferenças e proporções entre os pesos correspondentes às diferenças proporções entre os tempos; e isto com tal precisão que, como afirmei, estas operações, muitas vezes repetidas, nunca diferiam de maneira significativa.

Simplicio: Teria sido grande a satisfação em presenciar tais experiências; contudo, estando certo do seu zelo em efetuá-las e de sua fidelidade em relatá-las, não tenho escrúpulo em aceitá-las como verdadeiras e certas. (Galilei, 1986, p. 139-141, grifo nosso).

A descrição minuciosa feita por Galileu da experiência do plano inclinado é muito convincente. A sua insistência na precisão alcançada leva-nos a crer que realizou a referida experiência. Mas qual o papel da experiência no desenvolvimento das leis do movimento? Esta obra foi redigida nos últimos anos de sua vida. Os historiadores da ciência questionam-se sobre o percurso seguido por Galileu para chegar a tais conclusões sobre o movimento uniformemente acelerado. Ou seja, o que o animou a estudar este tipo de movimento, reflexões teóricas ou análise de experimentos? Afinal, com o aparato que dispunha, ele tinha condições de encontrar resultados tão precisos? A seguir mostraremos os resultados de nosso experimento e de outros autores que reproduziram o de Galileu o mais próximo possível das condições originais, para verificar o aspecto da precisão.

Recriando o experimento do plano inclinado realizado por Galileu

Durante muito tempo, os historiadores da ciência acreditaram no relato da experiência do plano inclinado feita em *Duas Novas Ciências*. O que levou Galileu a ser conhecido como o fundador do "método experimental" ou "método científico". Porém, há uns 70 anos, Paul Tannery e, posteriormente

com mais veemência, Alexandre Koyré criaram uma polêmica ao afirmarem não acreditar que Galileu tenha realizado esta experiência e muitas outras. Koyré “[...] acha que há uma tendência exagerada a crer que este grande físico descobriu seus principais esquemas teóricos graças à observação e à experiência” (Thuillier, 1994, p.121). No entanto, Koyré provavelmente quis afirmar que Galileu concedia muito mais importância aos princípios teóricos que aos dados obtidos na experiência (Koyré, 1991).

Em contrapartida, Thomas B. Settle, em 1961, publicou um artigo afirmando ter realizado a experiência do plano inclinado em condições muito próximas às de Galileu. Thuillier (1994, p. 124) nos informa que:

Segundo Settle, em todo caso, os resultados foram excelentes; mesmo ao experimentar sem grandes minúcias, verificava ser possível confirmar eficazmente certos “teoremas” de Galileu por meio de um método praticamente idêntico ao que este havia indicado. A medição do tempo (grande tema das disputas!) não parecia apresentar maiores dificuldades. As médias das medidas obtidas para cada distância correspondiam perfeitamente às “previsões” teóricas (as diferenças sendo, no máximo, da ordem de 1 ou 2%).

Ainda de acordo com Thuillier (1994, p. 124):

Outro historiador, Stillman Drake, professor da Universidade de Toronto, investigou, no início dos anos 70, os manuscritos inéditos de Galileu da Biblioteca Nacional de Florença e refez as experiências que Galileu teria realizado. Mencionemos ainda James MacLachlan, que por várias vezes praticou este tipo de controle. As conclusões são idênticas: de modo geral, Galileu foi um experimentador muito mais eficiente do que dizia Koyré.

Em 1974, Paul D. Sherman mostrou que a precisão “da décima parte de uma batida de pulso” na medida do tempo, informada por Galileu, era possível de ser obtida na prática. Considerando que, em média, tem-se 75 batidas por minuto, ou, 1.25 batidas por segundo, a décima parte corresponde a, aproximadamente, 0.1 segundo. Simulando o experimento e medindo o tempo com um relógio d’água, Sherman (1974) conseguiu uma precisão de 0.3 segundo, ou seja, na mesma ordem de magnitude. O autor então conclui que Galileu tinha condições de ter encontrado o resultado informado, classificando-o como um experimentador muito habilidoso.

No Brasil, Araújo Filho (1998) ao analisar a imagem que os livros didáticos trazem do cientista Galileu, também reproduziu o experimento do plano inclinado e novamente os resultados foram satisfatórios. O nosso grupo refez o experimento interessado em vivenciar as dificuldades que Galileu teve na medida do tempo e verificar a aplicabilidade didático-pedagógica do mesmo em sala de aula.

Para esta experiência usamos uma trena de 2 m da marca LUFKIN (modelo y822CME) com precisão de 5 centésimos de centímetro; um cronômetro da marca CASIO com precisão de 1 centésimo de segundo; um paquímetro da marca MITUTOYO com precisão de 5 centésimos de milímetro; dois tubos fluorescentes (por ser material de fácil aquisição – praticamente gratuito – e

com um nível de imperfeição de superfície muito pequeno, além de um proporcionar um rolamento da bolinha de aço sem escorregões ou atrito acentuado) de 120 cm (lâmpada de 40 W); uma esfera metálica de 15,92 mm de diâmetro; um calço com altura de 90,65 mm, uma balança MICROHAL (modelo B6000) com precisão de 5 centésimos de grama; relógio d'água; pêndulo; fitas adesivas; caneta; caderno e calculadora.

A montagem do experimento foi feita conforme mostra as Figuras 2 e 3. Marcamos nas lâmpadas fluorescentes 5 traços espaçados a cada 25 cm e colocamos um pequeno calço numa das extremidades dos tubos, de tal modo que a esfera deixada em liberdade adquiria um movimento uniformemente acelerado não muito rápido. O experimento consistiu em abandonar a esfera metálica da origem (0 cm) e medir o tempo que ela gastava para chegar a uma das marcas determinadas. Para a primeira marca (25 cm) foram realizadas 40 medições do tempo e nas demais apenas 20. A primeira marca é a mais problemática porque será ela a determinar a unidade padrão de tempo para a primeira unidade de distância (= 25cm).

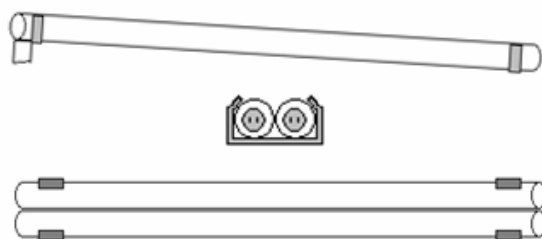


Figura 2.- Esquema da montagem do experimento (vistas lateral, frontal e superior)

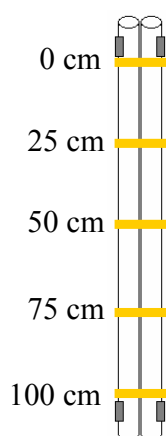


Figura 3.- Esquema da montagem do experimento (marcação das lâmpadas)

Em todas as marcas o tempo transcorrido foi medido de quatro formas diferentes: cronômetro digital, pulso cardíaco, pêndulo e relógio d'água. O pulso cardíaco foi medido sempre pela mesma pessoa. O pêndulo foi

constituído por um pequeno peso de metal amarrado por um barbante de 30 cm de comprimento. O relógio d'água foi feito com uma garrafa plástica PET de 2 L com um furo na parte inferior, por onde os pingos d'água caíam, e um na parte superior, por onde entrava o ar. A água pingada era pesada na balança analítica. Ressalta-se que os pingos d'água saíam da garrafa em um fluxo constante. Organizamos a média dos resultados obtidos em forma de tabela para facilitar a análise:

Medidas usando o cronômetro digital como medidor de tempo						
L (cm)	T (s)	L (normalizado)	T (normalizado)	T ² (normalizado)	T ² (teórico)	percentual entre o T ² experimental e o teórico (%)
25	1,57	1	1,00	1,00	1,00	0,00
50	2,22	2	1,41	1,99	2,00	0,50
75	2,72	3	1,73	2,99	3,00	0,33
100	3,12	4	1,99	3,96	4,00	1,00
Medidas usando o pulso cardíaco como medidor de tempo						
L (cm)	T (pulsões)	L (normalizado)	T (normalizado)	T ² (normalizado)	T ² (teórico)	percentual entre o T ² experimental e o teórico (%)
25	2,0	1	1,0	1,0	1,0	0,00
50	3,0	2	1,5	2,3	2,0	15,00
75	3,5	3	1,8	3,2	3,0	6,70
100	4,0	4	2,0	4,0	4,0	0,00
Medidas usando a oscilação de um pêndulo como medida de tempo						
L (cm)	T (oscilações)	L (normalizado)	T (normalizado)	T ² (normalizado)	T ² (teórico)	Diferença relativa percentual entre o T ² experimental e o teórico (%)
25	1,00	1	1,00	1,00	1,0	0,00
50	1,40	2	1,40	1,96	2,0	2,00
75	1,75	3	1,75	3,06	3,0	2,00
100	1,95	4	1,95	3,80	4,0	5,00
Medidas utilizando um improvisado "relógio d'água" (conta-gotas) como medidor de tempo						
L (cm)	T (g)	L (normalizado)	T (normalizado)	T ² (normalizado)	T ² (teórico)	Diferença relativa percentual entre o T ² experimental e o teórico (%)
25	0,35	1	1,00	1,00	1,00	0,00
50	0,50	2	1,43	2,04	2,00	2,00
75	0,58	3	1,66	2,76	3,00	8,00
100	0,72	4	2,06	4,24	4,00	6,10

Tabela 1.- Medidas usando diferentes marcadores de tempo

A análise dos resultados mostra que os mais precisos foram obtidos com o cronômetro digital, porém, os resultados obtidos com marcadores de tempo "galileanos" apresentam resultados bastante compatíveis com a lei do "quadrado dos tempos". Acreditamos que por mais que se adapte o experimento às condições descritas em *Duas Novas Ciências*, a utilização do pêndulo e do pulso cardíaco não forneceria a precisão obtida por Galileu, se ele tivesse utilizado estes marcadores. Como ele utilizou um relógio de água, a imprecisão poderia ter perdurado. Isto se explica pela dificuldade que encontramos na utilização destes dispositivos e pela possibilidade de grande

imprecisão das medidas, se não houvesse a supervisão acurada de um professor ou tutor. Apesar disso, acreditamos que, longe de inviabilizar a utilização do experimento em sala de aula, suas contingências acabam servindo para despertar o senso crítico quanto às incertezas de uma medida, ou para se obter uma aproximação matemática da relação existente entre o espaço percorrido e o quadrado do tempo.

Por outro lado, mesmo não tendo feito o experimento de forma análoga à descrita em *Duas Novas Ciências*, percebemos que a utilização do relógio d'água é possível e eficaz, o que está em consonância com a conclusão de Araújo Filho (1998). A maior dificuldade que tivemos foi parar o fluxo d'água no momento exato em que a esfera metálica atingia a marca determinada. Uma sugestão seria colocar pequenos sinos nestas marcas, para nos alertar da chegada da esfera, e repetir o experimento mais de cem vezes (como disse Galileu), para adquirir habilidade nas medidas. Outra medida que ajudaria na obtenção de resultados mais precisos é a utilização de um recipiente maior para o relógio d'água, de tal maneira que a variação do nível da água seja desprezível, o que garantiria um fluxo contínuo e uniforme pelo furo.

Diversos Galileus

Apesar destes experimentos certificarem a possibilidade de Galileu ter encontrado os resultados enunciados, ainda não é claro o caráter epistemológico da nova mecânica por ele inaugurada. Mesmo que os racionalistas se convençam de que Galileu fez os experimentos do plano inclinado, ainda restará a dúvida se ele queria apenas verificar o que já tinha demonstrado racionalmente, ou se, observando estes experimentos, por inúmeras vezes, chegou à formulação correta. Este fato ocorre pela dificuldade em reconstituir com exatidão as etapas de seu trabalho intelectual. Segundo Thuillier:

[..] por inúmeras razões que dizem respeito inclusive, à cronologia dos manuscritos inéditos. Segundo Drake, "Galileu descobriu a trajetória parabólica em 1608 e demonstrou-a matematicamente no começo de 1609, embora só faça menção a isso num texto impresso trinta anos mais tarde." É possível – ele sugere – que as experiências levadas a efeito durante o período 1607-1609 tenham contribuído para colocar o físico italiano no bom caminho. *Mas nas especulações desse gênero existe sempre uma boa dose de incerteza*; mesmo se a argumentação é satisfatória do ponto de vista lógico, é delicado estipular a data de certos escritos. (Thuillier, 1994, p. 125, grifo nosso).

Acrescentamos que, além da incerteza na cronologia de certos manuscritos e documentos, a visão de ciência do historiador que estiver analisando estes escritos influenciará profundamente em suas conclusões, pois não existe uma interpretação neutra. Para ilustrar esse comentário, rerepresentamos aqui uma pequena síntese de Moschetti (2004) que nos apresenta diversas leituras do texto galileano, realizadas por Koyré, Drake, Duhem, Feyerabend, Finnochiario entre outros.

Moschetti (2004), reforçando o que se encontra em Cohen (1988) e Thuiller (1994), mostra a polêmica entre as leituras de Alexandre Koyré (1991) e Stillman Drake (1986). O primeiro, apesar de notar a importância da experimentação na obra de Galileu, o enxerga como um arquimediano e platônico (Koyré, 1991), devido à importância que o mesmo dava à razão e ao papel da matemática no seu pensamento. Por outro lado, Drake, com base em manuscritos galileanos que sugerem a realização de experimentos com queda dos corpos e lançamento de projéteis, além de algumas passagens de seus livros (principalmente *Duas novas ciências*), o considera como o "pai do método experimental" (Drake, 1986).

Duhem defende a tese de um Galileu "peripatético" (aristotélico) pelos argumentos apresentados contra a imobilidade do céu: o fato de nunca haver sido observada qualquer mudança no mesmo, com exceção do movimento circular; a tese de que um corpo que se move circularmente deve ser perfeito (e imutável, inalterável, incorruptível, etc.); e a situação especial do corpo que se move circularmente frente aos três princípios da mudança expostos na *Física*. Estes argumentos foram expostos por Aristóteles e aceitos por Galileu, o que caracteriza uma continuidade de pensamento entre ambos e não uma ruptura como muitos historiadores afirmam. Por essa razão é importante, mais que o experimento em si, a discussão de sua natureza epistêmica e de seus condicionantes históricos.

Já Feyerabend (1979) e Finochiaro, segundo Moschetti (2004), preferem não enquadrá-lo em qualquer concepção de ciência mais estreita, alegando que suas atitudes ora o denunciam como sendo racionalista ora como empirista.

Esta leitura é, quanto a nós, a mais profícua do ponto de vista didático já que permite explorar diferentes formas de raciocínio. Mais do que determinar se Galileu é um racionalista, um empirista ou um racionalista e empirista, é a sua forma de se relacionar com a experiência que nos deve interessar.

Conclusão

Muitos professores têm-se preocupado com o fato dos estudantes estarem demonstrando desestímulo e desinteresse em aprender os conhecimentos básicos na área de Física, pois esta é abordada em sala de aula, geralmente, restringindo-se à resolução de problemas e exercícios de quadro-negro. Porém, o ato de ensinar é uma atividade complexa para cada professor, rodeada de riscos de insucesso para cada um dos seus alunos ou para o conjunto dinâmico de uma sala de aula.

Considerando a complexidade do processo ensino/aprendizagem e admitindo ser o conhecimento uma conquista pessoal do educando, somos levados a acreditar que qualquer proposta metodológica, por melhor que seja, não será, por si só, garantia de aprendizagem. Ela deverá ser acompanhada pela competência do professor e pela consciência e vontade do aluno em querer aprender. Nesta perspectiva, o elemento principal reside no despertar do

interesse do aluno, fundamental nesta caminhada, cabendo ao professor a difícil tarefa de oferecer ao aluno condições favoráveis para sua aprendizagem e a construção do conhecimento, de sua história, de suas bases epistêmicas, de suas contingências (Danhoni Neves e Savi, 2005).

Uma boa opção como elemento para o despertar do interesse do aluno seria um estudo mais aprofundado sobre alguns experimentos científicos históricos fundamentais. Isso poderia permitir ao educando desenvolver algumas das competências e habilidades sugeridas pelos Parâmetros Curriculares Nacionais, como, por exemplo:

Reconhecer o sentido histórico da ciência e da tecnologia, percebendo o seu papel na vida humana em diferentes épocas e na capacidade humana de transformar o meio.

Compreender as ciências como construções humanas, entendendo como elas se desenvolvem por acumulação, continuidade ou ruptura de paradigmas, relacionando o desenvolvimento científico com a transformação da sociedade. (Brasil, 2000, p. 13)

Deste modo, sugerimos o estudo do experimento do plano inclinado realizado por Galileu, em sala de aula. Além dos motivos já citados, acreditamos que o aluno, ao ser mergulhado no contexto das opiniões divergentes dos historiadores sobre este experimento, e até sobre o próprio personagem Galileu Galilei, poderá desenvolver, potencialmente, um espírito crítico, desmistificando o conhecimento científico.

Em seu livro, "Discurso sobre Duas Novas Ciências" (Galilei, 1986), de 1638, no "terceiro dia" do debate, os personagens discutem a queda livre e um pouco depois, o personagem Salviati, que representa o próprio Galileu, descreve o experimento do plano inclinado com uma precisão de detalhes assombrosa. A partir deste relato, vários pesquisadores e historiadores recriaram o experimento da mesma maneira que Galileu o descreve e todos eles chegaram à mesma conclusão, de que o experimento fornece precisão suficiente para se chegar aos resultados encontrados por Galileu.

Teríamos motivo para desconfiar da descrição minuciosa de Galileu?

Decidir se Galileu realizou o experimento não é uma tarefa fácil. Os argumentos prós e contras são muito consistentes e coerentes. A nossa análise nos leva a aceitar as opiniões dos que são favoráveis. Realizando o experimento, dentro de nossas condições e adaptações possíveis, nota-se claramente que os resultados são precisos para se chegar à proporcionalidade entre a distância e o tempo de queda ao quadrado (Drake, 1986). E, novamente, nossas análises históricas mostram que na época de Galileu, havia sim precisão técnica de medidas suficiente na pesagem para corroborarem as suas medidas.

Por outro lado, nas anotações de Galileu sobre o experimento, sempre há dois valores anotados, um deles sempre entre parênteses (Drake, 1986). Acreditamos que esses valores em parênteses são valores teóricos obtidos por

Galileu antes da realização do experimento, para assim comparar com os próprios valores obtidos por ele. Pode-se notar que a visão de um Galileu obtida por nós, é intermediária à visão extrema de Koyrè (Galileu racionalista) e a de Drake (Galileu experimentalista). Concluimos que Galileu chegou na lei díspar de queda dos corpos através de estudos teóricos antes de realizar o experimento do plano inclinado, mas ele, muito provavelmente, realizou o experimento, que serviu para corroborar a lei encontrada teoricamente, pois, na época, havia precisão suficiente na pesagem para que ele obtivesse valores condizentes com a sua teoria.

Não conseguimos chegar, pois, a uma definição quanto ao caráter epistemológico da nova ciência galileana, e nem era essa a pretensão dos autores deste artigo. Nossa conclusão não destrona o Galileu pai do método científico, de Drake e nem destrona o Galileu pitagórico, de Koyrè, mas apresenta um Galileu com um caráter epistemológico que une as duas correntes, empirista e racionalista.

Referências bibliográficas

Albanese, A., Danhoni Neves, M.C. e M. Vicentini (1998). Students' ideas about equilibrium, friction and dissipation. *Acta Scientiarum*. 20 (4), 461-472.

Albanese, A., Danhoni Neves, M.C., M. Vicentini (2005). Concepções de estudantes sobre equilíbrio, atrito e dissipação. In: Marcos C. Danhoni Neves e Arlindo Savi. (orgs.). *De Experimentos, Paradigmas e Diversidades no Ensino de Física* (pp.65-84). Maringá: Massoni.

Araújo Filho, W.D. (1998). *Galileu e a queda de corpos: conteúdo veiculado nos livros didáticos do 2º grau: uma abordagem crítica*. São Paulo. 143f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo.

Baptista, J.P. e L. Ferracioli (1999). A Evolução do Pensamento sobre o Conceito de Movimento. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. São Paulo, 21 (1), 187-194.

Brasil (2000). Secretaria de Educação Média e Tecnológica. Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio. Brasília: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Média e Tecnológica.

Cohen, I.B. (1988). *O Nascimento de Uma Nova Física*. Lisboa: Gradiva.

Danhoni Neves, M.C. e A.A. Savi [orgs.] (2005). *De Experimentos, Paradigmas e Diversidades no Ensino de Física* (pp. 163-187). Maringá: Massoni.

Danhoni Neves, M.C. (2005). Uma investigação sobre a natureza do movimento ou sobre uma história para a noção do conceito de força. In: Marcos C. Danhoni Neves e Arlindo Savi. (orgs.). *De Experimentos, Paradigmas e Diversidades no Ensino de Física* (pp. 163-187). Maringá: Massoni.

- Drake, S. (1986). *Galileo*. Madrid: Alianza.
- Feyerabend, P.K. (1979). *Contra o Método*. Rio de Janeiro: Francisco Alves.
- Galilei, G. (1986). *Discursos sobre Duas Novas Ciências*. São Paulo: Nova Stella.
- Koyré, A. (1991). *Estudos de história do pensamento científico*. Rio de Janeiro: Forense Universitária.
- Moschetti, M. (2004) Qual Galileu? Sobre diversas leituras possíveis do texto galileano. *Guairacá*. Guarapuava, 20, 71-83.
- Santos, C.A. (2007) Os mais belos experimentos da física. *Ciência Hoje Online*. Em: <http://cienciahoje.uol.com.br/controlPanel/materia/view/2526>. Acesso em: 09 jan. 2007.
- Sherman, P.D. (1974). Galileo and the Inclined Plane Controversy. *The Physics Teacher*, 12, 343-348.
- Simões, A. (2007) História das Ciências, de Galileu a Einstein. Notas de aula. Em: http://fisica.fc.ul.pt/~asimoes/Sumarios_aulas.pdf. Acesso em: 09 jan. 2007.
- Thuillier, P. (1994). *De Arquimedes a Einstein: a face oculta da invenção científica*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar.