

## Galileu e o plano inclinado: geometria, medidas e propaganda

Marcelo Moschetti

Um tema que ocupou, no último século, papel de destaque nas discussões especializadas, foi a relação entre Galileu e o advento do método experimental. Tratava-se de saber se ele foi ou não um empirista e o "pai" do método experimental. Adeptos de Alexandre Koyré e de Stillman Drake se digladiavam a respeito de determinadas passagens da obra galileana, cada facção com seu conjunto de citações favoritas. Nos últimos anos a discussão passou a ser, por muitos, considerada superada. Há boas razões para se recusar o assentimento irrestrito às interpretações que situam Galileu entre os empiristas ou entre os racionalistas, razões essas que esfriaram o debate. Como disse Popper no *Conjecturas e refutações*, "ninguém presta atenção ao inoportuno que não esquece uma velha rixa". Apesar disso, acredito que a tensão entre as duas interpretações, que parece brotar sozinha dos pesados volumes das *Opere*, ainda pode oferecer material interessante para reflexão. Pretendo revisitar uma das passagens mais célebres dessa controvérsia para mostrar que ainda é possível compreender melhor o papel de Galileu no nascimento da ciência moderna e, mais particularmente, do método experimental, se ela não for considerada isoladamente, mas parte de um tratado tipicamente moderno que inicia a partir dos fundamentos necessários para as demonstrações posteriores. Precisamente, pretendo mostrar em que medida as discussões sobre o contínuo e sobre a natureza da física matemática no primeiro dia dos *Discursos sobre as duas novas ciências*(1638) pode iluminar a interpretação da conhecida passagem do terceiro dia sobre o experimento com o plano inclinado.

Para tanto retomo a referida passagem, que ainda impressiona quando lida pela primeira vez, para em seguida situá-la no contexto do terceiro dia. Feito isso, mostro de que maneira a leitura do primeiro dia pode tornar mais clara qual é, efetivamente, a contribuição de Galileu para o surgimento do método experimental.

Na passagem em questão o autor descreve um experimento com plano inclinado em favor de suas teses sobre a queda dos corpos, mais especificamente no que se refere

às relações entre o espaço percorrido e o tempo e entre o mesmo tempo e as diferentes inclinações do plano, derivadas do conceito de movimento uniformemente acelerado. A descrição impressiona por sua semelhança com a concepção atual de experimento:

“...Numa ripa, ou melhor, numa viga de madeira com o comprimento aproximado de oito braças, uma largura de meia braça num lado e três dedos no outro, foi escavada uma canaleta neste lado menos largo com pouco mais que 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 até ficar bem lisa; fazíamos descer por ele uma bola de bronze perfeitamente redonda e lisa. Uma vez contruído o mencionado aparelho, ele era colocado numa posição inclinada, elevando sobre o horizonte uma de suas extremidades até a altura de uma ou duas braças, e se deixava descer (como afirmei) a bola pela canaleta, anotando como exporei mais adiante o tempo que empregava para uma descida completa; repetindo a 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 por uma quarta parte do comprimento total da canaleta; e, medido o tempo de queda, resultava ser sempre rigorosamente igual à metade do outro. Variando a seguir a experiência e comparando o tempo requerido para percorrer a metade, ou os dois terços, ou os três quartos, ou para concluir qualquer outra fração, por meio de experiências repetidas mais de cem vezes, sempre se encontrava que os espaços percorridos estavam entre si como 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 do plano 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 em que a bola descia pela canaleta ou por suas partes. As quantidades de água assim recolhidas com uma balança muito precisa, sendo as diferenças e proporções entre os pesos correspondentes às diferenças e proporções entre os tempos; e isso com tal precisão que, como afirmei, estas operações, muitas vezes repetidas, nunca diferiam de maneira significativa...” (EN, VIII, 212-213<sup>1</sup>)

---

<sup>1</sup> A tradução utilizada é de Pablo Mariconda. Citoas passagens a partir da edição de Favaro, Edizione Nazionale (EN).

Reconhece-se na passagem uma série de elementos que permitem caracterizá-la como um experimento: em primeiro lugar, evidentemente, a submissão da natureza a condições controladas; além disso, o cuidado na preparação para que as condições sejam mais próximas do ideal; o mesmo cuidado na medição dos resultados; a natureza matemática dos mesmos; a confirmação por um grande número de repetições; a possibilidade de reprodução; por fim, mas em primeiro lugar para os objetivos deste trabalho, o fato de que a criação do experimento só é possível graças à existência prévia de uma teoria, que orienta essa criação e da qual o experimento é a confirmação. Para compreender melhor este último ponto, cumpre localizar a passagem no segundo dia dos *Discorsi*.

Antes da consideração do movimento acelerado e do movimento natural de queda, Galileu examina o movimento uniforme. Embora não parecesse haver maiores dificuldades com a idéia tradicional de movimento uniforme, a saber, aquele em que espaços iguais são percorridos em tempos iguais, Galileu altera essa definição com a adição da palavra quaisquer:

"Parece oportuno acrescentar à velha definição (que chama simplesmente de movimento uniforme àquele que, em tempos iguais, percorre espaços iguais) a palavra quaisquer (*quibuscumque*), ou seja, para todos os tempos iguais..." (EN, VIII, 191)

Não basta que espaços iguais sejam percorridos em tempos iguais. É fundamental que quaisquer tempos com os respectivos espaços percorridos possam ser tomados, na medida em que um movimento não uniforme, ou seja, cuja velocidade seja variável, pode também apresentar, por coincidência, espaços iguais percorridos em tempos iguais. Embora isso seja importante, dificilmente é o motivo principal da advertência. É ainda mais importante, principalmente em função do estudo que do movimento de queda, que se possa tomar qualquer quantidade de tempo, mesmo as mais ínfimas, e nela estudar a relação entre espaço e tempo – mais tarde, também a relação entre velocidade e tempo. É aí que a idéia de contínuo, o infinitamente divisível estudado no primeiro dia, cumprirá seu papel no estudo do movimento. Só o incremento contínuo,

presente em qualquer período que se tome, pode explicar tanto o progresso uniforme no espaço quanto as mudanças na velocidade quando do estudo do movimento de queda.

Segundo Galileu, de várias maneiras pode-se tentar definir o movimento de queda dos corpos, mas apenas uma delas corresponde à sua essência. Ele afirma ter sido bem sucedido na busca dessa essência e atribui sua confiança à coincidência entre as propriedades “demonstradas” por ele e os “resultados da experiência”. É mais um indício de que a chave para se compreender a geometrização da física em Galileu passa pela investigação desse tipo de “demonstração” e desse tipo de “experiência” e da relação entre elas. O procedimento é descrito da seguinte maneira:

“...por que não posso acreditar que tais acréscimos de velocidade não ocorrem segundo a proporção mais simples e mais óbvia? Se considerarmos atentamente o problema, não encontraremos nenhum acréscimo mais simples que aquele que sempre se repete da mesma maneira. O que entenderemos facilmente, se considerarmos a estrita afinidade existente entre o tempo e o movimento: do mesmo modo, com efeito, que a uniformidade do movimento se define e se concebe com base na igualdade dos tempos e dos espaços (com efeito, chamamos movimento uniforme ao movimento que em tempos iguais percorre espaços iguais), assim também, mediante uma divisão do tempo em partes iguais, podemos perceber que os aumentos de velocidade acontecem com simplicidade; concebemos no espírito que um movimento é uniforme e, do mesmo modo, continuamente acelerado, quando, em tempos iguais quaisquer, adquire aumentos iguais de velocidade...” (EN, VIII, 197)

Essa definição de tempo uniformemente acelerado como aquele no qual em quaisquer tempos iguais há incrementos iguais na velocidade ainda não inclui dados empíricos. O autor especula a existência do movimento acelerado "segundo a proporção mais simples e óbvia". O confronto com a experiência é necessário:

“é assim que convém proceder nas ciências, que aplicam as demonstrações matemáticas aos fenômenos naturais, como se observa no caso da Perspectiva, da Astronomia, da Mecânica, da Música e de outras as quais confirmam com experiências sensatas (sic) seus princípios, que são o fundamento de toda a estrutura ulterior” (EN, VIII, 212)

Os princípios da ciência matemática são confirmados por experiências sensíveis. Isso é importante para que não se atribua qualquer empirismo ingênuo a Galileu afirmando que os princípios são obtidos a partir da experiência. O fato de que o fenômeno a ser explicado deve anteceder a explicação tampouco atribui à experiência o caráter de princípio da ciência, pois princípio e ciência, neste contexto, referem-se apenas à explicação. Não haveria sentido em interpretar "confirmar princípios com experiências sensíveis"<sup>2</sup> como "confirmar experiências com experiências". Note-se também que esses princípios são o fundamento de toda a estrutura ulterior, a ciência se desenvolve a partir de princípios, não da experiência. É nesse ponto do segundo dia que aparece a descrição do experimento supracitada.

Pelo fato de haver uma série de experimentos de pensamento em Galileu, diferentes deste por uma série de motivos, e por essa discussão envolver importantes controvérsias entre as linhas interpretativas, a realização efetiva desse experimento pelo autor foi bastante questionada. O ponto foi definitivamente esclarecido algumas décadas atrás. Foram descobertos por Drake manuscritos de Galileu que pareciam apontar para a realização do experimento e apresentar as medidas de seus resultados. Da seqüência de artigos que se seguiu e de que não tratarei com detalhe aqui, destaco duas conclusões: há nos manuscritos alguns conjuntos de números: parte corresponde a previsões teóricas e parte a medidas que comprovam que a passagem descreve um experimento efetivamente realizado. Os manuscritos não atestam a realização da centena de repetições (com as respectivas medidas) reivindicada por Galileu, mas tampouco eliminaram essa hipótese. E, de qualquer maneira, há o fato de que ele menciona as repetições como parte do experimento, o que é suficiente ao menos para mostrar que a idéia de fazê-lo lhe ocorreu.

O autor não parece diferenciar, ao menos nessa passagem, experiência sensível (observação passiva) de experimento (intervenção na natureza de modo a observá-la em condições controladas). Isso, aliado ao fato de que ele nunca descreveu ou discutiu o procedimento, como seria de se esperar diante de uma novidade metodológica tão importante, conduz a outra conclusão: ele não parece considerar o experimento algo muito diverso da mera observação, ou seja, por mais que se tratasse de um artifício

---

<sup>2</sup> *Sensata*, no original, deveria ser traduzida como "sensível", não tem o sentido de "sensata" em português.

muito engenhoso, para ele ainda poderia ser apenas um artifício para se obter experiência sensível. Ele aparentemente não pensava, com o experimento, estar diante de uma novidade metodológica tão importante.

Além disso, ainda restam algumas características do que viria a ser o método experimental que não estão contempladas no experimento de Galileu (algumas nem poderiam, pois são realizações posteriores): distribuição estatística dos resultados, obtenção de uma curva cuja média deve ser comparada com a previsão e a apresentação dessas medidas, seja uma a uma seja em forma de gráficos. Mas a realização de um único experimento claramente caracterizado, ainda que com repetições, sem teorizar sobre a experimentação e sem diferenciá-la da experiência sensível passiva faz de Galileu o “pai” do método experimental ou simplesmente o seu “avô”? A resposta a essa pergunta depende de como se define “método experimental”. E os defensores da paternidade deverão concordar que esse filho nunca foi reconhecido por ele.

Mas resta uma questão ainda mais inquietante: por que as medidas resultantes dos experimentos não foram divulgadas pelo autor?

Acredito que algo pode ser obtido, conforme prometido, da consideração do que o autor considerou princípios dessa discussão, ou seja, daquilo que, no primeiro dia, é dito sobre a física matemática. A ciência da resistência dos materiais, assunto dos dois primeiros dias e que também é a ciência da estrutura geométrica da matéria, tem entre outras a função de justificar as teses sobre o movimento enunciadas no terceiro e no quarto dias. Ela o faz de duas maneiras: em primeiro lugar, de maneira mais imediata, o estudo geométrico da natureza é possível porque ela mesma é estruturada geometricamente. Em segundo lugar, é a geometria que permite transpor os paradoxos que surgem da consideração do infinito, ou, no caso, do infinitamente divisível. Em outras palavras, através do raciocínio geométrico é possível transpor as dificuldades inerentes à consideração do contínuo, que tantos paradoxos produziu, desde os antigos eleatas, ao ser tratado sem o recurso à geometria.

Há em outra obra, no segundo dia do *Diálogo sobre os dois máximos sistemas de mundo*(1632) uma passagem esclarecedora sobre a relação entre o geométrico e o material: Simplicio afirma que não existem figuras geométricas na natureza. Para o aristotélico, não pode ser verdadeiro que uma esfera material toca um plano em um único ponto. A resposta de Salviati é engenhosa. Ele faz com que Simplicio concorde que as esferas materiais, imperfeitas, não têm as propriedades das esferas perfeitas da geometria. Em seguida, questiona se elas têm

as mesmas propriedades de esferas geométricas imperfeitas, ou seja, que tenham a mesma figura da esfera material que se queira.

“...enquanto quereis mostrar-me que uma esfera material não toca um plano material em um ponto, vos servis de uma esfera que não é uma esfera e de um plano que não é um plano, pois, pelo que disseste, ou essas coisas não se encontram no mundo, ou se se encontram deterioram-se, quando se aplicam para produzir o efeito[...] sempre que em concreto aplicais uma esfera material a um plano material, aplicais uma esfera não perfeita a um plano não perfeito; e estes dizeis que não se tocam em um ponto. Mas eu vos digo que também em abstrato uma esfera imaterial, que não seja uma esfera perfeita, pode tocar um plano imaterial, que não seja um plano perfeito, não em um ponto, mas com parte de sua superfície; de modo que até aqui o que acontece em concreto, acontece do mesmo modo em abstrato...” (EN, VII, 233)

Figuras irregulares, ou seja, mais complexas, não deixam, por isso, de ser geométricas, e portanto possuidoras de propriedades em comum com suas contrapartes abstratas. Com isso, Galileu faz com que o próprio aristotélico tenha que concordar com a identidade entre a geometria e as figuras das coisas materiais.

Sugiro que o motivo da não publicação das medidas resultantes seja justamente a objeção clássica à matematização da Filosofia Natural que afirma a imperfeição da matéria, aquela que é assunto dos dois primeiros dias dos *Discursos*. Os dados obtidos são aproximados, não exatos como na geometria pura. Para a tradição, essa diferença decorre da diferença fundamental entre o material e o ideal matemático: a matéria é imperfeita. Esse foi o motivo da recusa da matematização da física por alguns autores medievais. A "confirmação experimental" dessa objeção, cuidadosamente medida, só diminuiria o poder persuasivo das novas idéias. Não se pode subestimar a importância da persuasão ou da omissão nesse caso.

Iluminada pela discussão do primeiro dia, a compreensão da passagem que descreve o experimento aumenta, mostrando ao mesmo tempo que a tensão entre os intérpretes Drake e Koyré é uma tensão inerente ao pensamento galileano, que se articula a partir da relação entre o ideal geométrico e a experiência. Trata-se da união, pretendida pelo autor, entre a física e a matemática.

## BIBLIOGRAFIA

1. CLAVELIN, M., "Conceptual and technical aspects of the galilean geometrization of the motion of heavy bodies". In: SHEA, W. R. (ed.), *Nature mathematized* (v.1). Dordrecht: D. Reidel, 1983.
2. \_\_\_\_\_, *La philosophie naturelle de Galilée*. Paris: Armand Colin, 1968.
3. DRAKE, S, *Discoveries and opinions of Galileo*. Doubleday, Garden City, 1957.
4. \_\_\_\_\_, *Galileo at work, His scientific biography*. Chicago: University of Chicago Press, 1978.
5. \_\_\_\_\_, "Galileo's experimental confirmation of horizontal inertia: unpublished manuscripts". *Isis*, 1973, v. 64.
6. FAVARO, A. (ed.) *Edizione Nazionale delle opere di Galileo*. Firenze: S. A. G. Barbère Editore, 1938, v. 19, p. 21-543.
7. GALILEI, G., *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*. Trad., intr. e notas de A. B. Marí. Madrid: Alianza, 1994.
8. \_\_\_\_\_, *Dialogue concerning the two chief world systems - Ptolemaic & Copernican*. Trad. de S. Drake. Berkeley: University of California Press, 1953.
9. \_\_\_\_\_, *Duas novas ciências*. Trad. de P. Mariconda e L. Mariconda. São paulo: Nova Stella Editorial, 1985.
10. VASCONCELOS, J. C. R., "Um teorema de inércia e o conceito de velocidade nos 'Discorsi' de Galileu". In: *Cad. Hist. Fil. Ci.*, 1993, s. 3, v. 3(1/2), p. 67-83.