ALGUMAS CONSIDERAÇÕES DE GALILEO A RESPEITO DAS TEORIAS DA SEMELHANÇA FÍSICA, DA RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS E DAS FLEXÕES[+*]

Júlio César Penereiro
Centro de Ciências Exatas Ambientais e de Tecnologias
PUC-Campinas
Departamento de Raios Cósmicos e de Cronologias IFGW
UNICAMP
Campinas – SP

Resumo

No presente trabalho, apresentamos algumas das contribuições de Galileo Galilei para estudantes e professores de Física e Engenharia e, em especial, algumas implicações na Engenharia Civil. Examinamos alguns conteúdos da obra "Discurso e Demonstrações Matemáticas em torno de Duas Novas Ciências" (Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, intorno a Due Nuove Scienze), publicada em 1638 e, em particular, três questões por ele discutidas: a da semelhança física, da teoria da resistência dos materiais e a teoria das flexões. Apesar de sua importância, quando as mesmas são apresentadas em sala de aula, em geral, somente seus aspectos matemático-conceituais são enfatizados, deixando-se em segundo plano os aspectos histórico-conceituais. Uma discussão sobre como Galileo conseguiu intuir essas teorias também é apresentada.

[+] Some considerations about Galileo regarding the Physics likeness, theory of strength materials and the bending theory

[*] *Recebido: outubro de 2009.*
Aceito: março de 2010.

Palavras-chave: *Ensino e aprendizagem; Galileo Galilei; História da ciência; Ensino de ciências.*

Abstract

In this work we present some Galileo Galilei's contributions to undergraduate and Physic teachers and Engineers. Especially attention was taken for the implications to Civil Engineering. We examined contents which are in the book "Discourses and Mathematical Demonstrations relating to Two New Sciences" (Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, intorno a Due Nuove Scienze) published in 1638, in particular three questions discussed by himself: the Physics likeness, the theory of strength materials and the bending theory. Despite its importance, only mathematical-conceptual aspects are emphasized in the classroom, leaving out historical-conceptual aspects. One discussion about how Galileo intuited these theories are also presented.

Keywords: *Teaching and learning; Galileo Galilei; History of Science; Science Education.*

I. Introdução

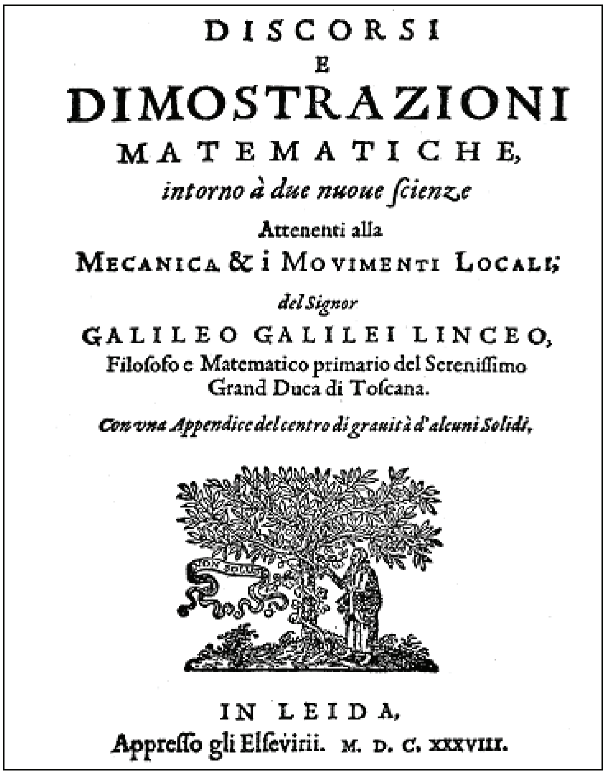
Durante o ano de 2009, o mundo inteiro homenageou o cientista Galileo Galilei (1564-1642) pelos 400 anos de seus feitos científicos, em particular pelas suas observações através do uso do telescópio astronômico. Segundo KOESTLER (1989), Galileo não foi o inventor do telescópio. Quem o inventou foi o fabricante de óculos holandês, Hans Lippershey, em 1608. Porém, deve-se a Galileo a primazia de ser o primeiro cientista de sua época que empregou esse instrumento apontando-o para os corpos celestes e descobrindo fatos marcantes que, até então, nunca haviam sido descritos por outra pessoa. Ele conseguiu observar uma superfície lunar rugosa contendo muitas crateras, montanhas, planícies, rachaduras e vales. Observou as fases do planeta Vênus, além das faixas em Júpiter e seus quatro satélites. Viu também Saturno como um planeta desfigurado, pois o equipamento utilizado por Galileo aumentava apenas 30 vezes, portanto não possuía a resolução necessária que lhe permitisse descobrir os sistemas de anéis do planeta. Esse problema foi "resolvido" apenas no ano 1655, pelo astrônomo holandês Christiaan Huygens. Além dessas observações, Galileo descobriu, através do telescópio, miríades de estrelas na Via Láctea e as manchas solares. As observações da Lua, das estrelas fixas, de Júpiter e a descoberta dos seus quatro satélites foram registradas e publicadas em 1610 na obra intitulada *Sidereus Nuncius* ("O Mensageiro das Estrelas"; GALILEI, 1987), que obteve grande repercussão por toda a Europa do século XVII.

Em 1632, Galileo publicou o seu livro mais conhecido e comentado pelo mundo acadêmico e fora dele, intitulado: *Dialogo sopra i Due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano* ("Diálogo sobre os Dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomáico e Copernicano"; GALILEI, 2004). É nessa obra que Galileo critica o sistema aristotélico (que adotava o sistema geocêntrico para explicar os movimentos existentes no Universo) e defende o sistema copernicano (também conhecido como sistema heliocêntrico, no qual o Sol é quem rege os movimentos planetários). Cinco meses depois da sua publicação, o livro foi proibido pela Igreja Católica e, em 1633, inicia-se o processo de inquisição contra Galileo. Obrigado a abjurar suas convicções, foi condenado ao cárcere privado e passou a dedicar-se aos seus estudos prediletos de mecânica (PENEREIRO, 2009).

Galileo, então com 74 anos e quase que completamente cego, redigiu na prisão domiciliar a sua última obra fundamental e com implicações profundas para a física e as engenharias, intitulada: *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a Due Nuove Scienze* ("Discursos e Demonstrações Matemáticas acerca de Duas Novas Ciências", ou, simplesmente em português: "Duas Novas Ciências"). Essa obra é também conhecida no meio científico como *Discorsi* ("Os Discursos"; GALILEI, 1988) e, depois de tentativas infrutíferas em diversos países, foi publicada pela primeira vez na Holanda, em 1638 (Fig. 1).

Escrita na forma de diálogos, seguindo uma forte influência da tradição grega clássica, que se tornara novamente comum no século XVII, os três interlocutores dos *Discorsi* são: Filippo Salviati, gentil-homem florentino e acadêmico linceu; o segundo, devido ao seu grande interesse pelas exposições sobre a *Física* e o *Tratado do Céu* (*De cælo*) de Aristóteles (ARISTÓTELES, 1984), traz o nome de Simplício, célebre comentador grego de Aristóteles, cujos comentários chegaram até nós nas obras aristotélicas intituladas: *Física*, *De cælo* e *De anima* (GALILEI, 2004) e o terceiro personagem é Giovan Francesco Sagredo, que foi aluno e amigo de Galileo, principalmente no período em que ele viveu em Pádua e trabalhou na famosa universidade desta cidade (GALILEI, 2004).

Na conversa travada no *Discorsi*, Salviati representa o novo homem de ciência, isto é, o especialista que alia a experiência ao conhecimento profundo da matemática, e nesse sentido, suas posições expressam as de Galileo. Simplício representa tanto a tradição no sentido mais complexo da ciência aristotélicoptolomáica referendada pela teologia dominante, quanto o dogmatismo de um comentador que enrijece o pensamento ao procurar conciliar as novas evidências à doutrina aristotélica. Sagredo representa um homem não especialista, mas diletante e entusiasta das novas ideia científicas. É em suas falas que expôs as ideia mais ousadas e as críticas, muitas vezes irônicas e duras, contra os aristotélicos e o dogmatismo na manutenção dos modos tradicionais de pensamento. Nos *Discorsi*, Sagredo é colocado como um mediador entre os pontos de vista de Salviati e de Simplício.



DISCORSI
E
DIMOSTRAZIONI
MATEMATICHE,
intorno à due nuoue ſcienze
Attenenti alla
MECANICA & i MOVIMENTI LOCALI;
del Signor
GALILEO GALILEI LINCEO,
Filoſofo e Matematico primario del Sereniſſimo
Grand Duca di Toſcana.
Con vna Appendice del centro di grauità d'alcuni Solidi.

IN LEIDA,
Appreſſo gli Elſevirii. M. D. C. XXXVIII.

Fig. 1 - Ilustração da capa do livro Galileo Galilei – "Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a Due Nuove Scienze" ("Duas Novas Ciências"), publicado em 1638. (Figura extraída de GALILEI, (1988), pág. 3).

Vale ressaltar que no diálogo (a conversa), os três interlocutores não representam personagens inteiramente fictícios. Sagredo e Salviati foram amigos de Galileo que, dessa forma, lhes presta sua homenagem. Simplício, como citado acima, lembra o famoso comentador de Aristóteles, e não existem elementos para poder afirmar que ele representa uma ou outra pessoa da convivência de Galileo (GALILEI, 1988).

O livro *Discorsi* é constituído, basicamente, por quatro "jornadas". A primeira ('*giornata prima*') é uma introdução às duas novas ciências: a *resistência dos materiais* e *o estudo do movimento*, que serão expostas nas outras três jornadas. A segunda jornada ('*giornata seconda*') trata da **estática** e desenvolve as ideia galileanas sobre *modelos a respeito da resistência dos materiais*. Nas duas últimas jornadas ('*giornata terza*' e '*giornata quarta*'), Galileo discute o *movimento uniforme* e o *movimento uniformemente acelerado*, além das leis que regem os *movimentos dos projéteis* (balística). Certamente, foi o primeiro tratado, no sentido moderno, sobre a **cinemática** e a **dinâmica** dos corpos em movimentos que ocorrem nas proximidades da superfície terrestre. Nesse trabalho, Galileo esbanja seus conhecimentos sobre a matemática e a geometria, expressando todas as suas análises através de várias figuras explicativas. Na verdade, ele já estava seguro de que os fenômenos da natureza obedeciam às leis enunciáveis matematicamente e expressou tal convicção em um célebre pensamento: "*O Universo é um grande livro que não pode ser compreendido, a menos que antes se aprenda a entender a linguagem e a ler as letras nas quais ele está composto. Ele está escrito na linguagem da Matemática*" (GARBI, 2006).

No presente artigo, abordamos três questões levantadas por Galileo na obra *Discorsi*. Na sequência, levantamos os problemas relacionados com a teoria da semelhança física; a teoria da resistência dos corpos sólidos e a teoria galileana da flexão. Todas essas questões estão relacionadas ao desenvolvimento da Engenharia Civil e procuramos discuti-las ao longo do texto de uma forma didática e envolvendo os aspectos fundamentais, além dos históricos, da obra *Discorsi*. Entendemos que esse tipo de abordagem é útil para ser explorada em sala de aula em disciplinas como Mecânica, Estática, Introdução à Engenharia, Resistência dos Materiais, além, é claro, da Física Básica, trabalhadas nos currículos dos cursos de engenharia. Citar e explorar a obra de Galileo constitui uma justa homenagem ao fundador da Teoria da Resistência dos Materiais, e propiciará ao professor e ao estudante uma possibilidade a mais de interação com assuntos que envolvam a evolução da ciência.

Entendemos que o desenvolvimento deste tipo de ação didática valoriza a prática interdisciplinar que, entre outros objetivos, busca integrar diferentes áreas do conhecimento, possibilitando uma visão ampla e adequada da realidade. Além de superar a fragmentação do saber, decorrente de um tratamento disciplinar compartimentado, tal procedimento aproxima professores e alunos em uma prática pedagógica que só pode trazer benefícios para o processo de ensino e aprendizagem. Como afirma Vani Moreira Kenski, "*professores isolados desenvolvem disciplinas isoladas, sem maiores articulações com temas e assuntos que têm tudo a ver um com o outro, mas que fazem parte dos conteúdos de uma outra disciplina, ministrada por um outro professor*" (KENSKI, 2007).

II. Teoria da semelhança física

Muito antes de Galileo, já eram utilizados modelos reduzidos em certas atividades técnicas, especialmente na construção de equipamentos, máquinas e edificações. A ausência de uma ***teoria da semelhança física*** proporcionava tentativas, muitas vezes fracassadas e frustradas desses modelos. É bem conhecida a conclusão do arquiteto e engenheiro romano Marco Vitrúvio Polião (Marcus Vitruvius Pollio, ~70-25 a.C.), que disse: "*Há algumas coisas que, quando aumentadas, imitando modelos pequenos, são efetivas; outras não podem ter modelos*" (VITRÚVIO, 2006). Foi Galileo quem abordou, com extrema competência, esses problemas, acrescentando às condições geométricas outras igualmente necessárias, conhecidas como *condições de semelhança física*. São elas que tornam possível deduzir o comportamento dos *protótipos* (com o propósito de servir de testes antes da fabricação) a partir dos *modelos* (como uma representação em pequena escala de algo que se pretende executar).

Hoje sabemos que dois processos são semelhantes quando das características encontradas em um deles se podem deduzir as características do outro por um simples cálculo, semelhante, por exemplo, ao de uma troca de sistema de unidades de medida. Para que isso seja possível, é necessário conhecer os '*fatores de escala*'. As condições de semelhança física estabelecem, entre esses fatores, relações que devem ser obedecidas. Essas condições de semelhança física são expressas, atualmente, através da igualdade, no modelo e no protótipo, de parâmetros adimensionais, formados por produtos de potências dos parâmetros originais do problema e conhecidos como *números* π.

Um exemplo muito difundido nas disciplinas de física básica no Ensino Médio e Universitário é o estudo do pêndulo simples. Esse problema foi também abordado na obra *Discorsi* (Fig. 2), em particular na primeira jornada, quando Salviati e seu discípulo Sagredo travam um diálogo que reflete muito bem a posição de Galileo em relação à teoria da semelhança física e dos modelos:

Saviati: *(...) Quanto à proporção entre os tempos de oscilação de móveis suspensos por fios de diferentes comprimentos, esses tempos estão entre si na mesma proporção que as raízes quadradas dos comprimentos dos fios, o que quer dizer que os comprimentos estão entre si como os quadrados dos tempos, de modo tal que, se queremos (...); (...) do que segue que os comprimentos dos fios estão entre si na proporção inversa dos quadrados dos números de oscilações realizadas no mesmo tempo.*

Sagredo: *Se entendi bem, eu poderia, portanto, conhecer rapidamente o comprimento de uma corda pendente de qualquer altura, ainda que o ponto a que está atada fosse invisível e somente se visse sua extremidade inferior. Com efeito, se amarro à parte inferior da corda em questão um peso bastante grande ao qual comunico um movimento de vaivém, e se um amigo conta o número de suas oscilações enquanto ao mesmo tempo conto também as oscilações de outro móvel atado a uma corda com comprimento exato de uma braça, a partir dos números de oscilações desses pêndulos, efetuados ao mesmo tempo, encontro o comprimento da corda: suponhamos, por exemplo, que, no tempo em que meu amigo tenha contado vinte oscilações da corda comprida, eu conte duzentas e quarenta da minha, que tem comprimento de uma braça; elevados aos quadrados os números vinte e duzentos e quarenta, obtemos 400 e 57.600 respectivamente, direi que a corda comprida contém 57.600 unidades das quais a minha contém 400; e, dado que esta é de apenas uma braça, dividido os 57.600 por 400, obtendo 144; direi que aquela corda tem 144 braças de comprimento.*

Saviati: *V. S[a]. não teria errado nem mesmo um palmo, especialmente se tomasse um grande número de oscilações* (GALILEI, 1988, p. 88-89).

O pêndulo constituído pela corda comprida, com um corpo amarrado à sua extremidade inferior, é o protótipo, do qual o pequeno pêndulo é o modelo reduzido (Fig. 2). A lei encontrada por Galileo, segundo a qual, no caso das oscilações de pêndulos simples, a escala do tempo é igual à raiz quadrada da escala geométrica, permite deduzir parâmetros do protótipo a partir de observações feitas com base no desempenho do modelo. Assim, conhecendo-se a escala de tempo graças à comparação dos períodos de oscilação do modelo e do protótipo, pode-se deduzir o comprimento deste último com base apenas no conhecimento do comprimento do primeiro.

O uso do modelo em escala reduzida permite a determinação indireta do comprimento do pêndulo, e é exatamente essa a *filosofia* do emprego de modelos reduzidos nas pesquisas experimentais, como em obras de construção civil, maquetes de edificações, protótipo de veículos e aeronaves, etc.

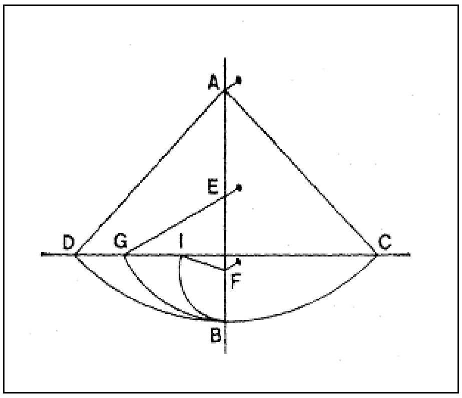


Fig. 2 - Dispositivo adotado por Galileo para comprovar experimentalmente um princípio básico da mecânica – a ***Conservação do Ímpeto****. Aplicada ao pêndulo simples, a ilustração indica que, depois de percorrer o arco do círculo* ***CB*** *(com vínculo em* ***A****), sobe pelo arco* ***BG*** *(com vínculo em* ***E****) ou* ***BI*** *(com vínculo em* ***F****), atingindo sempre o mesmo nível* ***DC****, a menos de um 'pequeno intervalo, causado pela resistência que opõem o ar e o fio'. Para Galileo, "o ímpeto adquirido pelo corpo no ponto* ***B****, ao transpor o arco* ***CB****, foi suficiente para elevá-lo, seguindo um arco similar* ***BD****, à mesma altura". (Figura extraída de GALILEI, 1988, pág. 168).*

Devemos notar que, no exemplo dado acima por Galileo, a '*escala do tempo*' é determinada diretamente: e vale o inverso de 240/20 e, portanto, 1:12. A '*escala geométrica*', igual ao quadrado da escala de tempo, é de 1:144, e o pêndulo-protótipo terá comprimento igual a 144 vezes o pêndulo-modelo. Nesse caso, a condição de semelhança física corresponde à lei de Galileo, segundo a qual *"o período de oscilação T de um pêndulo simples é proporcional à raiz quadrada do seu comprimento"*, isto é,

$$T \propto \sqrt{L} \,.$$

Trabalhando sempre com proporções, e nunca com valores absolutos, Galileo *não* conseguiu determinar o fator de proporcionalidade que une o período T à raiz quadrada do comprimento L do pêndulo simples, e tampouco o valor da aceleração da gravidade g, que é o fator de proporcionalidade que une o dobro do espaço s percorrido em queda livre ao quadrado do tempo de queda t. Hoje conhecemos esses fatores de proporcionalidade graças às contribuições de Christiaan Huygens (1629-1695), Isaac Newton (1642-1727) e Jacob Jacques Bernoulli (1654-1705). Assim, para a queda livre, tem-se:

$$s = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

e

$$v = g \cdot t = \sqrt{2 \cdot g \cdot s}\ ,$$

o que implica, para o pêndulo simples, a conhecida equação do período para pequenas oscilações em torno do ponto de equilíbrio, que é encontrada na literatura (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1996; KELLER; GETTYS; SKOVE, 2004; SERWAY; JEWETT, JR., 2005, dentre outros) como:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}}$$

No entanto, o historiador de ciências Stillman Drake (1910-1993) percebeu, mais tarde, analisando os arquivos da Biblioteca Nacional de Florença, na Itália, que Galileo determinara experimentalmente, e com excelente precisão para a época, a relação entre o quarto do período de oscilação (que é o tempo de queda ao longo do arco de círculo que liga a posição extrema ao ponto mais baixo) e o tempo de queda vertical ao longo do comprimento do pêndulo. Essa relação, igual a $\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$, foi denominada por Drake como a '*constante de Galileo*' (DRAKE, 1973).

Também de fundamental importância foi a utilização que Galileo fez do pêndulo para comprovar experimentalmente uma hipótese em que baseara sua teoria do plano inclinado, extensamente desenvolvida na terceira jornada da obra *Discorsi*. Tratava-se da postulação de que o valor da velocidade adquirida por um móvel que, partindo do repouso, desliza sem atrito, pela ação da gravidade, ao longo de qualquer curva ou superfície, independe da forma da trajetória, sendo apenas função da 'altura equivalente de queda', isto é, da diferença de nível entre o ponto de partida e o de chegada. Por sinal, Galileo faz, ao longo de toda a terceira jornada, várias menções expressas a planos com diversas inclinações e arcos de círculos de vários raios.

Mas a clareza com que Galileo tratou a questão da semelhança física fica outra vez patente no seu livro *Discorsi,* na passagem em que discute sobre a resistência oposta pelo meio a um movimento:

> Saviati: *Saiba agora, Sr. Simplício, que nos sólidos não se pode diminuir a superfície na mesma proporção que o peso, mantendo a semelhança das formas* (GALILEI, 1988, p. 83).

O que Galileo queria nos informar é que a simples semelhança geométrica não assegura a semelhança física.

Na primeira jornada, Galileo volta ao assunto da resistência oposta a que o meio exerce, começando por avaliar a influência da perda de peso calculada pela *Lei de Arquimedes*[1], a qual só é sensível quando a densidade do meio é grande, comparada à do corpo. Ele nos diz:

> Saviati: (...) *mas, como o mesmo meio pode reduzir acentuadamente a velocidade de móveis diferentes somente em tamanho, embora sejam da mesma matéria e da mesma forma, isto exige para sua explicação um raciocínio mais agudo que aquele que é suficiente para entender como uma superfície maior, ou o movimento contrário do meio contra o móvel, retarda a velocidade do corpo. Quanto ao presente problema atribuo a causa à aspereza e à porosidade que se encontram comumente, e quase que necessariamente, nas superfícies dos corpos sólidos e que, no curso do movimento, se chocam com o ar ou com outro meio ambiente... Não se pode duvidar que, na queda dos móveis, essas asperezas, esfregando-se com o meio fluido, produzirão uma diminuição da velocidade tanto maior quanto maior for a superfície, como é o caso dos sólidos menores comparados aos maiores.*

E, Galileo conclui mais à frente com:

> Saviati: *(...) Sendo, portanto, evidente que, ao diminuir um sólido pesado, seu peso decrescerá proporcionalmente a seu volume, toda vez que o volume diminuir mais que a superfície (conservando a máxima semelhança das formas), o peso diminuirá ainda mais que a superfície... E isto que exem-*

[1] Assim como citou Silveira e Medeiros (2009) no trabalho intitulado: "O paradoxo hidrostático de Galileu e a Lei de Arquimedes", e apesar de a maioria dos livros de Física Geral, tanto os de Ensino Médio como os de Ensino Superior, denominarem de Princípio o enunciado de Arquimedes, optaremos por denominá-lo de Lei de Arquimedes (SILVEIRA; MEDEIROS, 2009; p. 275).

plifiquei com os cubos acontece com todos os sólidos semelhantes entre si, cujos volumes estão em proporção sesquiáltera [potência 3/2 – minha nota] com suas superfícies. Vemos, pois, que a resistência produzida pelo contato da superfície do móvel com o meio cresce em maior proporção nos móveis pequenos que nos maiores; e, se acrescentarmos as asperezas das superfícies... Ora, se as superfícies são proporcionais ao quadrado das linhas e os sólidos são proporcionais ao cubo destas, não podemos dizer que os sólidos estão numa proporção sesquiáltera à superfície?"(GALILEI, 1988, p. 82-84).

Esse raciocínio pode ser expresso em linguagem matemática. Considerando o volume V , a superfície S e uma dimensão linear l , tem-se, para corpos geometricamente semelhantes, a relação seguinte:

Se $V = (l)^3$ e $S = (l)^2$, então $V = (S)^{3/2}$.

Assim, quando se reduzem as dimensões, a relação entre o peso e a resistência do meio (que depende da superfície do corpo), não se mantém constante. Logo, a semelhança física *não* é respeitada, e essa desproporção ocorre em todos os processos físicos que envolvam, ao mesmo tempo, parâmetros dependentes do volume e da superfície.

Na quarta jornada do livro, Galileo analisa a influência da velocidade quanto à perturbação devido à resistência do meio, quando diz:

> Saviati: *(...) Pelo que se refere à velocidade, quanto maior ela for, maior também será a resistência oferecida pelo ar; resistência esta que crescerá à medida que os móveis são menos pesados...* (GALILEI, 1988, p. 253).

Na verdade, o que ele queria nos dizer é que a resistência do meio fluido é proporcional à velocidade. Em suas palavras, ele afirma: "... a mesma quantidade de velocidade do móvel é causa e medida, ao mesmo tempo, da quantidade de resistência". Concluindo com: "Portanto, todos os movimentos, sejam lentos ou rápidos, são retardados ou impelidos na mesma proporção: resultado que não me parece desprezível". (GALILEI, 1988, p. 255).

Com isso, Galileo acreditava que o fato de não se poder observar a influência do amortecimento nas oscilações de um pêndulo simples devia-se às diferentes amplitudes, que, por sua vez, refletiam nos valores dos respectivos períodos. Hoje sabemos (e isso se discute nas disciplinas de física básica, tanto no Ensino Médio como em cursos universitários, especialmente em Física e nas Engenharias) que o período para pequenas oscilações em torno do ponto de equilíbrio não dependente dessas amplitudes de oscilações, e assim temos um sistema isócrono (CAPARICA, 2007).

III. A teoria da resistência dos materiais

É comum se ignorar que a primeira das 'duas novas ciências' apresentada na obra *Discorsi* é a teoria da resistência à ruptura dos corpos sólidos, conhecida hoje pelo termo: ***teoria da resistência dos materiais***. Essa teoria está exposta no início da primeira jornada e em toda a segunda jornada, que foi denominada de *Scienza nuova prima, intorno allá resistenza de i corpi solidi all'essere spezzati* (primeira nova ciência sobre a resistência dos corpos sólidos à quebra). A segunda das 'novas ciências' está exposta na terceira e quarta jornadas, onde foi denominada de *Scienza nuova altra, de i movimenti locali* (segunda nova ciência sobre os movimentos locais). É nela que está contido o primeiro tratado de Dinâmica no sentido moderno da ciência dos movimentos: os tratados dos movimentos (movimento uniforme e movimento uniformemente acelerado).

É interessante observar (E porque não discutir em uma aula voltada ao tema aqui desenvolvido?) que Galileo viveu num momento em que a sociedade europeia estava evoluindo consideravelmente. Já se haviam formado ali muitos engenheiros, pintores, escultores, empresários e banqueiros. Enfim, uma sociedade que, como mostram alguns historiadores da ciência (KUHN, 2003; WHITEHEAD, 2006), se tornaria realista e racionalista. A história mostra que, a partir do século XIII, e sobretudo dos séculos XIV e XV, a Europa, que era essencialmente agrícola, tornou-se cada vez mais urbana e ingressou no capitalismo comercial. O poder já não se restringia aos senhores e ao clero, mas surgia uma nova categoria de pessoas que calculava, e que ousava agir sobre a natureza, que confiava no homem e via o mundo de uma nova forma. Galileo vivia justamente numa região muito comercial, muito industrial, não longe de Veneza (Itália) e do famoso Arsenal, que é elogiado no início dos *Discorsi*. Era uma empresa com cerca de 1.000 a 1.500 operários, envolvendo minas e muitas usinas têxteis, com muitas máquinas. A chegada de Galileo a Veneza tem profunda significação para a história da ciência, pois ele encarna a necessidade de um novo saber. Foi a partir de conversas com operários do estaleiro naval de Veneza que Galileo percebeu, através das experiências destes, que, ao se compararem os desempenhos de estruturas geometricamente semelhantes e construídas com um mesmo material, havia violações da semelhança física quando se empregavam escalas diferentes. Os operários do estaleiro relataram-lhe que, segundo suas experiências acumuladas ao longo dos anos de trabalho, as estruturas maiores tinham menor capacidade do que as estruturas pequenas de resistir à variação de cargas sobre seu peso próprio.

É notável perceber que uma comprovação experimental avaliada por Galileo na obra *Discorsi* era corroborada por outros fatos observáveis no dia-a-dia, como são os casos das plantas, dos animais e das estruturas de grande porte, que parecem ser proporcionalmente menos resistentes que as menores, quando semelhantes do ponto de vista geométrico.

Assim, Galileo foi levado a investigar essa questão e elaborou toda uma teoria sobre a resistência dos corpos sólidos. A motivação por este trabalho está na segunda jornada, quando diz:

> Saviati: *O que acontece com o Sr. Simplício aconteceu também comigo durante certo tempo, ao crer que as resistências de sólidos semelhantes fossem semelhantes, até que certa observação, a princípio não muito precisa, pareceu indicar-me que os sólidos semelhantes não o são quanto à sua robustez, visto que são menos aptos a suportar os choques violentos... Foi essa observação que me deu a ideia de investigar o que pretendo agora demonstrar* (GALILEI, 1988, p. 124).

Rejeitando quaisquer imperfeições da matéria, quando supõe inalterável e isenta de quaisquer mudanças acidentais, faz com que a peça maior, fabricada com a mesma matéria e as mesmas proporções que uma peça menor, seja perfeitamente equivalente à menor em todas as outras condições, exceto no vigor e na resistência ao tratamento violento. Dessa forma, Galileo refere-se ao fato de que, quanto maior for um corpo, proporcionalmente mais fraco ele será. Nesse sentido, afirma:

> Saviati: *Ao contrário, pode-se verificar que, ao diminuir os corpos, não se diminuem as forças na mesma proporção mas, antes, que os menores tornam-se proporcionalmente mais resistentes* (GALILEI, 1988, p. 130).

Em sua teoria, Galileo demonstra que é na violação da semelhança física que reside a causa da denominada '*fraqueza relativa dos gigantes*', isto é, ao aumentarmos as dimensões de um corpo, conservando a semelhança geométrica, o peso próprio aumentará em proporção maior do que a capacidade de resistir a cargas adicionais além do seu peso, pois, como vimos antes, o peso próprio varia com o cubo da escala geométrica ($V = l^3$), ao passo que a capacidade de resistir aumenta com o seu quadrado ($S = l^2$).

Foi exatamente nesse trabalho que, pela primeira vez, Galileo introduziu o conceito de '*tensão de ruptura*' (tensão definida como força por unidade de área). Para verificar esta, então, nova concepção, realizou vários ensaios de tração de fios, constatando que as cargas de ruptura eram proporcionais às áreas das seções transversais e que, portanto, dado um mesmo material, o quociente entre as cargas (força, F_n) e as áreas (A) mantinha-se quase que o mesmo (Fig. 3). Esse quociente é conhecido como *tensão de estiramento* do material (σ_t), e representa a tendência de distender o objeto (KELLER; GETTYS; SKOVE, 2004). Essa grandeza pode ser expressa matematicamente pela relação:

$$\sigma_t = \frac{F_n}{A}.$$

Desse conceito decorreram outros, que são essenciais para a Física e as Engenharias, em particular para a Engenharia Civil contemporânea, como, por exemplo:

- a *deformação de estiramento*: $\varepsilon_t = \frac{\Delta l}{l}$, que relaciona a razão entre a variação do comprimento (Δl) e o comprimento original (l);

- o *módulo de Young*: $Y = \frac{\Delta F / A}{\Delta l / l}$, como sendo a razão entre tensão normal ($\Delta F / A$) e a deformação ($\Delta l / l$) para um sólido;

- o *módulo de cisalhamento*: $M_c = \frac{\Delta F_c / A}{\Delta X / l}$, que expressa a relação entre a tensão ($\Delta F_c / A$) e a deformação de cisalhamento ($\Delta X / l$)

e

- o *módulo de elasticidade*: $B = \frac{\Delta P}{\Delta V / V}$, que relaciona a variação da pressão aplicada (ΔP) com a variação fracional do volume ($\Delta V / V$).

IV. A teoria da flexão

Em seguida, a partir dos **Princípios da Estática** (sintetizados na 'Lei da Alavanca'), Galileo construiu sua ***teoria da flexão*** de peças de seção retangular ou circular. Essa teoria é de fundamental importância para o conteúdo formativo de qualquer curso de Física e de Engenharia. O trabalho de Galileo conduz a certas conclusões a respeito das proporções entre as resistências de vigas com vãos e seções transversais diferentes, sejam elas vigas em balanço ou com dois apoios (Fig. 4 e 5).

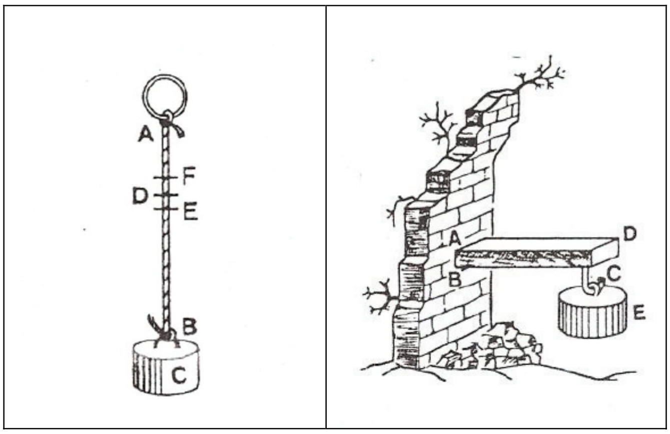


Fig. 3 – Resistência de corpos sólidos à ruptura: Ilustração da esquerda – Um caso de tração simples, exercida por uma força longitudinal. Ilustração da direita – Uma trave, onde ocorre uma flexão causada por uma força transversal. Galileo compreendeu experimentalmente que a resistência à tração de fios ou cabos de um mesmo material é proporcional à área de sua seção transversal e não depende do seu comprimento. Ele concluiu que, no caso de o esforço de tração derivar apenas do peso próprio do fio, existe, para cada material, um comprimento limite ou comprimento de ruptura. (Figura extraída de GALILEI, (1988), p. 121 e 116, respectivamente).

Na formulação dessa teoria, apresentada na segunda jornada, Galileo empregou o princípio da alavanca para confrontar o momento das forças aplicadas à viga, inclusive o de seu peso próprio, com o momento resistente da seção transversal. Apesar de ter cometido algumas incorreções parciais, sua teoria conduziu a resultados corretos, principalmente no que se refere às relações entre resistências de vigas de diferentes vãos e seções transversais.

Da teoria de Galileo se deduz que vigas geometricamente semelhantes, abstraídas do seu peso próprio, são capazes de resistir a cargas externas proporcionais ao quadrado de uma de suas dimensões. Por outro lado, o peso próprio que, por sua vez, também é uma carga a atuar sobre a viga, é proporcional ao cubo dessa dimensão. Isso implica que, quando se aumentam todas as dimensões, conservando a semelhança geométrica, o peso próprio cresce em maior proporção que a capacidade de resistir às cargas aplicadas. Como consequência disso, segue na segunda jornada a Proposição VII (certamente a mais importante dessa parte da obra *Discorsi*):

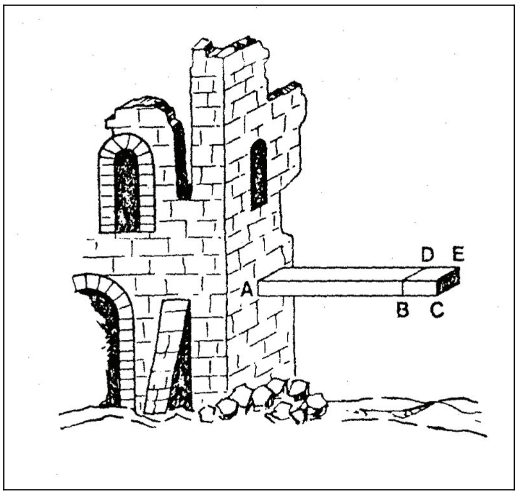


Fig. 4 - A teoria da flexão. Combinando a lei da tensão de ruptura com o princípio da alavanca de Arquimedes e com a hipótese incorreta sobre a distribuição de esforços internos, Galileo elaborou a sua teoria da flexão que, apesar de suas imperfeições parciais, conduziu a resultados corretos, no que se refere às relações entre resistências de vigas de diferentes vãos e seções transversais. (Figura extraída de GALILEI, 1988, p. 118).

> *Entre os prismas e cilindros pesados semelhantes, existe um e um só que se encontra (sob o efeito de seu próprio peso) no estado limite entre a ruptura e a não-ruptura, de modo que, todo sólido maior, incapaz de resistir a seu*

próprio peso, quebrar-se-á, ao passo que todo sólido menor oporá alguma resistência à força destinada a quebrá-lo (GALILEI, 1988, p. 125).

Com essa proposição, Galileo introduziu mais um novo conceito para a época, o '*tamanho limite'* para uma estrutura, quando diz que:

> *(...) do que até aqui foi demonstrado, se infere claramente a impossibilidade, não somente na arte, mas também na natureza, de aumentar seus mecanismos até tamanhos enormes, de modo que seria impossível construir navios, palácios ou templos imensos, cujos remos, mastros, vigas e correntes de ferro e, numa palavra, todas as partes constituíssem um todo..., pois,... deveria ser utilizado um material mais duro ou mais resistente que o habitual... Ao contrário, pode-se verificar que, ao diminuir as dimensões dos corpos, não se diminuem as forças na mesma proporção, mas antes, que os menores se tornam proporcionalmente mais resistentes* (GALILEI, 1988, p. 129).

É evidente que o '*tamanho limite'* depende da forma ou do tipo de estrutura, como, aliás, se verifica nas estruturas da Engenharia Civil: o '*vão limite*' de uma ponte do tipo pênsil é muito maior do que o de uma ponte em forma de arco; este, por sua vez, é maior do que o de uma ponte do tipo viga reta. A Fig. 5 ilustra essa observação para vigas em balanço sobre dois tipos de apoios.

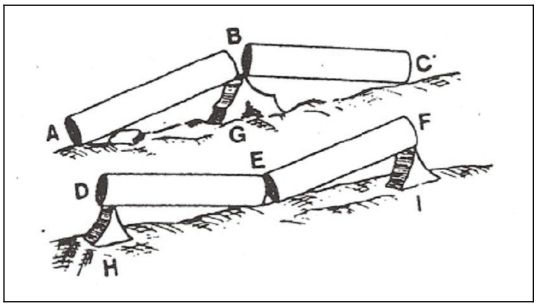


Fig. 5 - Depois de aplicar sua teoria da flexão ao caso da viga em balanço (cantilever), Galileo estudo o caso da viga sobre dois apoios, representada nessa ilustração. Generalizando a situação, em que a força é aplicada em qualquer ponto do vão, entre os apoios, Galileo encontrou um resultado correto, que coincide com a equação atualmente utilizada na Engenharia para calcular o momento máximo de flexão da viga. (Figura extraída de GALILEI, 1988, p. 133).

Galileo mostrou que a semelhança física (e, portanto, a capacidade de resistir a cargas aplicadas, relativamente ao peso próprio) de corpos sólidos de uma mesma matéria se altera quando se aumentam suas dimensões, mantendo a semelhança geométrica. Na segunda jornada do *Discorsi*, ele indica como essa semelhança poderia ser mantida: "deve-se aumentar a resistência mecânica do material ou diminuir seu peso específico".

Essa condição pode ser entendida nos dias de hoje como correspondente ao termo:

$$\frac{\gamma \cdot l}{s},$$

no qual: γ é o peso específico do material, l uma dimensão representativa do corpo e s a resistência mecânica do material em questão. Para que o termo anterior tenha um mesmo valor num corpo pequeno e no maior, o aumento de l deve ser compensado por um aumento em s ou por uma diminuição em γ. Como vimos no início deste artigo, nos tempos modernos, essas condições de semelhança física são expressas através de igualdades (o termo em questão) e conhecidas como '*números* π'. A atribuição do nome de Galileo a esse '*número* π' constituiu, portanto, uma digna homenagem ao fundador da teoria da resistência dos materiais.

V. O conceito de distorção aplicado à arte e à natureza

Galileo foi ainda mais longe com seus estudos. Ainda na segunda jornada, com base na "Proposição VIII", ele introduziu o conceito hoje denominado \`distorção´, ao indicar uma terceira solução para manter numa pessoa gigante a mesma resistência relativa a uma pessoa normal. Neste caso, basta aumentar as dimensões transversais em proporção maior que as longitudinais. Diz a proposição que:

> *dado um cilindro ou prisma, cujo comprimento é o máximo que ele pode possuir sem se romper sob seu próprio peso, e dado um comprimento maior, encontrar a espessura de outro cilindro ou prisma que, no comprimento dado, seja o único e maior que possa resistir ao próprio peso* (GALILEI, 1988, p. 126).

E Galileo demonstra a questão, que se encontra ilustrada na Fig. 6, da seguinte forma:

Saviati*: Imaginemos, agora um cilindro A, cuja base tenha por diâmetro DC, sendo este cilindro A o maior que é capaz de resistir a seu próprio peso. Desejamos encontrar um cilindro maior que também seja o maior e único capaz de resistir a seu próprio peso. Imaginemos um cilindro, por exemplo E, semelhante a A, tendo o comprimento indicado e cujo diâmetro da base é KL, seja MN a terceira proporcional entre DC e KL, sendo MN o diâmetro da base do cilindro X de comprimento igual a E. Afirmo que (...) a resistência da base DC está para a resistência da base KL assim como o quadrado de DC está para o quadrado de KL, ou seja, como o quadrado de KL está para o quadrado de MN, ou ainda, como o cilindro E está para o cilindro X, ou como o momento de E está para o momento de X. Por outro lado, a resistência da base KL está está para a resistência da base MN assim como o cubo de KL está para o cubo de MN, ou seja, como o cubo de DC está para o cubo de KL, ou ainda, como o cilindro A está para o cilindro E, isto é, como o momento de A está para o momento de E; segue-se que a resistência da base DC está para a resistência da base MN assim como o momento de A está para o momento de X. Consequentemente, o prisma X tem a mesma constituição de momento e resistência que o prisma A* (GALILEI, 1988, p. 128).

Galileo nos explica que, como consequência do que foi demonstrado acima, se infere a impossibilidade, não somente na arte, mas em toda a natureza, em aumentar seus mecanismos até dimensões enormes, de modo que seria impossível construir templos, ou palácios imensos, cujas vigas e correntes de ferro e, numa palavra, todas as suas outras partes constituíssem um todo. Da mesma forma, a natureza não poderia fazer árvores de tamanho colossal, porque seus ramos, arqueados pelo próprio peso, acabariam por quebrar-se. Igualmente, seria impossível construir estruturas ósseas para os homens, cavalos ou outros animais que pudessem subsistir e desempenhar suas funções, pois, para que tais animais tivessem alturas imensas, deveria ser utilizado um material mais duro e resistente que o habitual, para que não deformassem os ossos tão desproporcionalmente.

Galileo menciona e ilustra (Fig. 7) a questão acima através de um osso, cujo comprimento foi aumentado apenas três vezes, e cuja espessura foi aumentada em tal proporção [nove vezes] que pudesse realizar num grande animal a mesma função que corresponderia a um osso menor de um animal também menor.

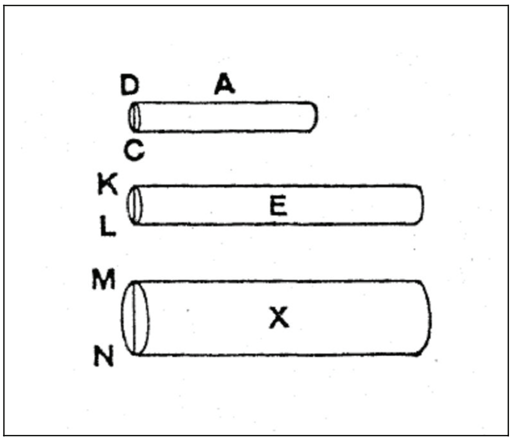


Fig. 6 - Qual a espessura de um cilindro ou prisma que, no comprimento dado, seja o único maior que possa resistir ao próprio peso. (Figura extraída de GALILEI, 1988, p. 128).

Tira-se disso que, quem quisesse manter, num imenso gigante, as proporções dos membros de um homem comum, deveria ou encontrar uma matéria bem mais dura e resistente para formar-lhe os ossos, ou admitir que sua robusteza seja proporcionalmente muito menor que a dos homens de estatura pequena, pois, diversamente, aumentando demasiado a sua altura, vê-lo-íamos, sobrecarregado pelo próprio peso, cair. Ao contrário, pode-se verificar que, ao diminuir os corpos, não se diminuem as forças de resistência na mesma proporção, mas, antes, que os menores se tornam proporcionalmente mais resistentes.

Hoje, sabemos que esse tipo de distorção não se verifica nos mamíferos terrestres contemporâneos, que, do ponto de vista geométrico, são aproximadamente semelhantes. Por esses motivos, comparados aos grandes, os animais pequenos, como cães, ratos e coelhos, são capazes de suportar cargas adicionais, relativamente ao seu peso, assim como de correr e saltar. Para os mamíferos terrestres contemporâneos, existe um 'tamanho limite', que é bem próximo do tamanho de um elefante adulto. Por outro lado, como sabemos hoje através dos estudos paleontológicos, os animais pré-históricos de estrutura assemelhada à dos mamíferos terrestres contemporâneos, como, por exemplo, os mamutes, apresentavam a distorção sugerida por Galileo para os gigantes: as dimensões transversais de seus ossos eram proporcionalmente muito maiores que, por exemplo, as dos cavalos atuais.

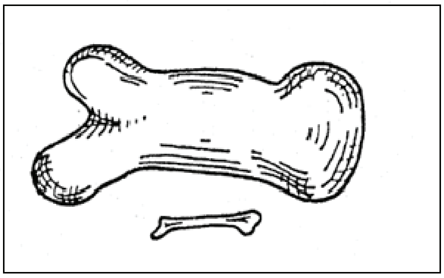


Fig. 7 - A fraqueza relativa dos gigantes. Nesse desenho, Galileo apresenta "a figura de um osso cujo comprimento foi aumentado apenas três vezes e cuja espessura foi aumentada em tal proporção [nove vezes] que pudesse realizar num grande animal a mesma função que corresponderia a um osso menor de um animal também menor". Se fosse mantida integralmente a semelhança geométrica, a 'robustez' do animal gigante, isto é, sua capacidade de suportar cargas adicionais, além de seu próprio peso, seria proporcionalmente muito menor do que a dos pequenos animais, a não ser que se encontrasse uma matéria bem mais dura e resistente para formar-lhe os ossos, ou que lhe diminuísse proporcionalmente o peso específico da matéria dos mesmos ossos e o peso específico de tudo o que se apóia sobre os ossos. (Figura extraída de GALILEI, 1988, p. 129).

VI. Discussão

Para se fazer uma ciência, como apresentou Galileo em quase todas as suas obras, é preciso que já se tenha começado a medir o espaço e o tempo. Para nós, isso parece simples, mas para que essa ciência galileana tenha se tornado possível, foi preciso todo um trabalho de dois ou três séculos, em que os engenheiros e os comerciantes desenvolveram e aperfeiçoaram instrumentos como balanças, roldanas, vigas, relógios, termômetros, pontes, etc. Galileo só poderia ter feito sua ciência valendo-se de uma nova concepção da racionalidade da natureza e de uma confiança estabelecida na experimentação. Ele vivia numa sociedade que, com o relógio, havia elaborado um novo conceito de tempo mecânico, e que, além disso, possuía uma nova perspectiva de espaço para a qual contribuíram muitos pintores renascentistas. A genialidade de Galileo foi notória, porque ele soube utilizar todos os elementos da época para reafirmar uma visão de um mundo novo, fazendo uma ciência eficaz, racional, metodológica, matemática e mecanicista (WHITEHEAD, 2006).

Portanto, se focarmos a atenção apenas nos textos científicos de Galileo, deixando de lado o momento social que vivia e os cientistas da época, perdemos muito do que ele foi realmente capaz de nos transmitir. Devemos perceber que a história da ciência é uma história global da atividade científica, não apenas do que está nos livros e artigos, uma vez que a ciência é uma atividade que engaja os homens.

Por conseguinte, ter uma visão técnica da história da ciência resulta numa abordagem idealista, intelectualista, exclusivamente interessada nos seus resultados. E isso pode ser especialmente interessante quando se procura desenvolver um tipo de ação didática que valoriza a prática interdisciplinar que, entre outros objetivos, busca integrar diferentes áreas do conhecimento, possibilitando uma visão mais ampla e adequada da realidade.

VII. Conclusão

Neste artigo, apresentamos três problemas que Galileo abordou de modo absolutamente inovador na sua obra *Discorsi*. Esses problemas possuem implicações diretas na evolução dos estudos aplicados à Física e às Engenharias e podem ser explorados por professores em disciplinas como Física Básica (no Ensino Médio), Introdução à Engenharia, Mecânica, Estática, Resistência dos Materiais e Noções de Pontes (nos cursos universitários). São eles relacionados à questão da semelhança física; à teoria da resistência dos materiais e à teoria da flexão.

Muitas outras passagens do livro *Discorsi* poderiam ser citadas, como, por exemplo, aquela em que enuncia a lei das cordas vibrantes, e que também nos remete ao desenvolvimento dos estudos vibracionais e suas aplicações nas Engenharias, ou ainda o estudo do movimento, em particular do movimento dos projéteis, que é abordado na quarta jornada do livro.

Ao se envolver com os três problemas abordados anteriormente, Galileo sempre se ocupou das proporções, ou seja, com as grandezas físicas, antecipando-se aos desenvolvimentos modernos dessa teoria.

Ao recorrer às citações feitas pelos três interlocutores na obra de Galileo (Salviati, Simplício e Sagredo), tivemos o propósito de colocar o leitor frente a frente com seu modo de atuar, pensar e proceder no plano científico. Assim, procuramos evitar distorções de seu pensamento, interpretando-o segundo as próprias tendências filosóficas ou ideológicas da época.

Vale salientar que também abordamos, embora de forma extremamente resumida, o método da pesquisa científica de Galileo, que sempre foi uma justa combinação da observação e da experiência com a matemática, instrumento de lógica dedutiva. Vimos que, partindo de alguns fatos experimentais, formula-se uma primeira hipótese ou teoria para interpretá-los. Dessa teoria tiram-se conclusões, por via dedutiva. Em seguida, a validade dessas conclusões é submetida à experiência, à qual cabe sempre a última palavra. A hipótese é substituída ou aperfeiçoada se os ensaios não a confirmam (PENEREIRO, 2009).

Assim, sob o ponto de vista didático, as discussões sobre as dificuldades encontradas por Galileo para explicar e convencer seus leitores a respeito dos três problemas abordados na obra *Discorsi* podem (e devem) ser aproveitadas pelo professor em suas atividades com os estudantes. Para tanto, é necessário que o professor se envolva também com os aspectos históricos da ciência medieval. Os trabalhos de RONAN (1987); GALILEI (1987 e 2004); KOESTLER (1989), MARTINS (1994), KOYRE (2006), além de PORTO e PORTO (2008), por sua qualidade, podem ser de grande valia nesse sentido.

Finalmente, enfatiza-se que é importante a apresentação de questões históricas e filosóficas, como aqui exploradas, no ensino da Física e das Engenharias, pois, além de servirem como meio de motivação para melhorar a participação em sala de aula, tornam mais transparente para os alunos que a ciência não é a verdade absoluta, como muitas vezes sugerem os conteúdos de algumas disciplinas nos currículos desses cursos. Na verdade, trata-se de uma descrição limitada devido à própria restrição do ser humano.

Referências bibliográficas

ARISTÓTELES. On the heavens (De Cælo). Tradução: J. L. Stocks. In: BARNES, J. (Ed.) **The complete works of Aristotle**. The revised Oxford translation. v. I, Princeton: Princeton University Press, 1984, p.447-511.

CAPARICA, A. A. O isocronismo dos triângulos retângulos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 29, n. 3, p. 1806-1117, 2007.

DRAKE, Galileo's Discovery of the Law of Free Fall. **Scientific American.** v. 228, n. 5, p.84-92, 1973.

GALILEI, G. **A mensagem das estrelas**. Rio de Janeiro: Salamandra. Coleção Clássicos da Ciência (1), MAST (Museu de Astronomia e Ciências Afins), 1987.

GALILEI, G. **Duas novas ciências**. Tradução: L. Mariconda e Pablo Rúben Mariconda. 2. ed. São Paulo: Nova Stella Editorial/Instituto Italiano di Cultura, 1988.

GALILEI, G. **Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomáico e copernicano**. Tradução, introdução e notas: Pablo Rúben Mariconda. 2. ed. São Paulo: Imprensa Oficial, 2004.

GARBI, G. G. **A Rainha das Ciências**. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. v. 2, 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos Científicos, 1996.

KELLER, F. J.; GETTYS, W. E.; SKOVE, M. J. **Física**. v. 1. São Paulo: Pearson/Makron Books, 2004.

KENSKI, V. M. **Educação e Tecnologias: o novo ritmo da informação**. 1. ed. Campinas: Papirus, 2007.

KOESTLER, A. **O homem e o universo**. São Paulo: IBRASA, 1989.

KOYRE, A. **Do mundo fechado ao universo infinito**. 4. ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2006.

KUHN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. Tradução: Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. 7. ed. São Paulo: Perspectiva, 2003.

MARTINS, R. A. Galileo e a Rotação da Terra. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 11, n. 3, p.196-211, 1994.

PENEREIRO, J. C. Galileo e a defesa da cosmologia coperniciana: a sua visão do Universo. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 26, n. 1, p. 173-198, 2009.

PORTO, C. M.; PORTO, M. B. D. S. A evolução do pensamento cosmológico e o nascimento da ciência moderna. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 4601-4609, 2008.

RONAN, C. A. **História ilustrada da ciência**. Tradução: Jorge Enéas Fortes. v.III. São Paulo: Jorge Zahar, 1987.

SERWAY, R. A.; JEWETT, JR. J. W. **Princípios de Física**. v. 1. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2005.

SILVEIRA, F. L.; MEDEIROS, A. O paradoxo hidrostático de Galileu e a lei de Arquimedes. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 26, n. 2, p. 273-294, 2009.

VITRÚVIO, M. P. **Tratado de Arquitectura.** Tradução: M. J. P. Maciel. 2. ed. Portugal: IST Press, 2006.

WHITEHEAD, A. N. **A Ciência e o Mundo Moderno.** Tradução: H. H. Watzlawick. São Paulo: Paulus, 2006.