

A INFLUÊNCIA DE GALILEO GALILEI NO DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA CIVIL

Júlio César Penereiro^a

RESUMO

No presente trabalho apresentamos algumas das contribuições de Galileo Galilei para estudantes e professores de engenharia. Em particular algumas implicações na engenharia civil. Nesse sentido, examinamos alguns conteúdos da obra *Discursos e Demonstrações Matemáticas acerca de Duas Novas Ciências* (*Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, intorno a Due Nuove Scienze*), publicada em 1638, focando as três questões por ele discutidas: a semelhança física, a teoria da resistência dos materiais e a teoria das flexões. Uma discussão sobre o método científico intuído por ele é também apresentada, com a intenção de encorajar todos a pensarem sobre como as observações dos fenômenos físicos feitas por Galileo nos levaram a reconsiderar nossa maneira de fazer ciência. Destacamos a necessidade de que a história da ciência seja abordada a partir das preocupações de um professor de engenharia em suas atividades de ensino. O trabalho comenta a relação entre essas questões físicas e as dificuldades educacionais em abordá-las.

Palavras-chave: Ensino e aprendizagem. Evolução das engenharias. Galileo Galilei. História da ciência.

ABSTRACT

In this work we present some contributions of Galileo Galilei to undergraduates and teachers engineers. Particular attention was taken for the implications to civil engineering. In this regard, we examined contents which are in the book “*Discourses and Mathematical Demonstrations relating to Two New Sciences*” (*Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno à due nuove Scienze*) published in 1638, focusing on three questions discussed by himself: the physics likeness, the theory of strength of rupture and the theory of the bend. One discussion about the scientific methods intuïd by him is also presented, with the aim to encourage us all to think about how Galileo’s observation of the physics phenomena forced us to reconsider our way to make science. We highlighted the need that the history of the science is approached starting from engineering educator’s concerns. The work comments on the relationship between these physics questions and the educational difficulties in approaching them.

Keywords: Evolutions of engineering. Galileo Galilei. History of science. Teaching and learning.

^a Doutor em Ciências – Astronomia, Professor Titular do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da PUC-Campinas, Rodovia D. Pedro I, km 136, CEP 13086-900, Campinas-SP, (19)3343-7000 E-mail: jep@puc-campinas.edu.br

INTRODUÇÃO

No ano de 2009 o mundo inteiro homenageou os feitos científicos realizados por Galileo Galilei (1564-1642), em particular pelas suas observações através do uso de um telescópio astronômico. Segundo Arthur Koestler (1989), não foi Galileo quem inventou o telescópio. Esse intento coube ao fabricante de óculos holandês, Hans Lippershey, em 1608. Entretanto, deve-se a Galileo a primazia de ser o primeiro cientista de sua época que empregou este instrumento para estudar os corpos celestes, descobrindo fatos marcantes que, até então, nunca haviam sido descritos por outra pessoa e que ficaram marcados na história da ciência. Ele conseguiu observar uma superfície lunar rugosa contendo muitas crateras, montanhas, planícies, rachaduras e vales. Observou e interpretou corretamente as fases do planeta Vênus, além das faixas na atmosfera de Júpiter e os seus quatro maiores satélites. Também observou Saturno como um planeta desfigurado, pois o equipamento utilizado por Galileo aumentava apenas 30 vezes e não oferecia a resolução necessária que lhe permitisse descobrir os sistemas de anéis do planeta. Esse problema foi “resolvido” apenas em 1655 pelo astrônomo holandês Christiaan Huygens.

Além dessas observações, Galileo descobriu, por meio do telescópio, miríades de estrelas na Via Láctea e as manchas solares. Todas essas observações 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 séc. XVII.

Mas foi em 1632 que Galileo publicou o livro mais conhecido e comentado pelo mundo acadêmico e fora dele, intitulado *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (Diálogo sobre os dois principais sistemas do mundo ptolomáico e copernicano; GALILEI, 2004). É nesta 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 compreende-se que o Sol é quem rege os movimentos planetários). Cinco meses depois da sua publicação, o livro foi proibido pela igreja católica e, em 1633, iniciou-se o processo de inquisição contra Galileo, que o obrigou a abjurar suas convicções, além de condená-lo ao cárcere privado, forçando-o assim a

dedicar-se exclusivamente aos seus estudos prediletos de mecânica (PENNEREIRO, 2009).

Galileo, então com 74 anos e quase 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 à due nuove Scienze* (Discursos e Demonstrações Matemáticas acerca de Duas Novas Ciências, ou simplesmente, em português, Duas novas ciências). Essa obra, de importância extraordinária para o ensino das engenharias, é também conhecida no meio científico como *Discorsi* (os “Discursos”; GALILEI, 1988) e, depois de tentativas infrutíferas em diversos países, foi aceita e publicada pela primeira vez na Holanda, em 1638 (Figura 1).



Figura 1 - Ilustração da capa do livro Galileo Galilei - *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno à due nuove Scienze* (Duas novas ciências), publicado em 1638 (Figura extraída de GALILEI, 1988, p. 3)

Escrita na forma de diálogos, seguindo uma forte influência da tradição grega clássica, que se tornara novamente comum no século XVII, teve como interlocutores de seus *discorsi* Filippo Salviati, gentil-homem florentino e acadêmico linceu; Simplicio – célebre comentador gre-

go presente nas obras de Aristóteles –, devido ao seu grande interesse pelas exposições sobre a física e o tratado do céu de Aristóteles (ARISTÓTELES, 1984); e, como terceiro personagem, Giovan Francesco Sagredo, que foi amigo e aluno de Galileo no período que viveu em Pádua. Os diálogos presentes nos *discorsi* têm lugar num palácio na cidade italiana de Veneza.

Resumidamente, na conversa, Salviati é o porta-voz de Galileo, que é referido como o nosso acadêmico e o novo homem de ciência. Simplicio representa a ciência aristotélico-ptolemáica tradicional, enquanto que Sagredo é um homem inteligente e culto, mas não um especialista, sendo o mediador entre os dois. Vale ressaltar que o diálogo (a conversa) entre Sagredo, Salviati e Simplicio nunca ocorreu em local algum, pois representam personagens inteiramente fictícios.

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 ideias 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. Neste trabalho, Galileo esbanja seus conhecimentos sobre a matemática e a geometria, escrevendo todas as suas análises através de equações e figuras. 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).

O presente trabalho aborda três questões levantadas por Galileo na obra *Discorsi*. Na sequência, levantam-se os problemas relacionados com a teoria da semelhança física; a teoria da resistência dos corpos sólidos e a teoria galileana das flexões. Todas essas questões estão relacionadas ao desenvolvimento da engenharia civil e são exploradas em disciplinas básicas dos cursos

de engenharias. Procurou-se discuti-las ao longo do texto de uma forma didática e envolvendo os aspectos fundamentais, além dos históricos, da obra *Discorsi*. Entende-se que esse tipo de abordagem é útil para ser explorada em sala de aula em disciplinas como Introdução à Engenharia, Mecânica, Estática, Resistência dos materiais, Análise estrutural, além, é claro, da Física básica, trabalhadas nos currículos dos cursos de engenharia. Citar e explorar a obra de Galileo constitui numa justa homenagem ao fundador da Teoria da Resistência dos Materiais, e propiciará ao professor e seus estudantes uma possibilidade a mais de se interar com assuntos que envolvam a evolução da ciência.

Acredita-se que o desenvolvimento desse 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, superando a fragmentação do saber, que muitas vezes ocorre no tratamento disciplinar acadêmico. Além disso, o envolvimento entre professores e estudantes é uma prática pedagógica que traz muitos 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 (2007).

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. Neste sentido, é bem conhecida a conclusão do arquiteto e engenheiro romano Marco Vitruvius Polião (Marcus Vitruvius Pollio, ~70-25 a.C.), que afirmou: “Há algumas coisas que, quando aumentadas, imitando modelos pequenos, são efetivas; outras não podem ter modelos” (VITRÚVIO, 2006). Galileo foi 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 propósito de servir de testes antes da fabricação) a partir do comportamento dos *modelos* (como uma representação em pequena escala de algo que se pretende executar).

Atualmente sabemos que dois processos são semelhantes quando das características encontradas em um deles se pode 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. Modernamente, essas condições de semelhança física são expressas através da igualdade, no modelo e no protótipo, de parâmetros adimensionais, formados por produtos de potências dos parâmetros originais do problema e conhecidos como “número ω ”.

Um exemplo muito difundido nas disciplinas de física básica é o estudo do pêndulo simples. Esse problema também foi abordado na obra *Discorsi* (Figura 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 diferente comprimento, 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 (Figura 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 etc.

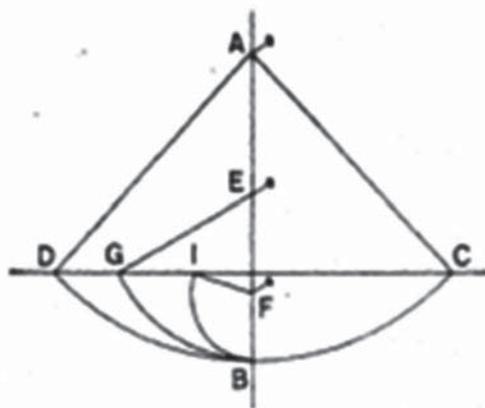


Figura 2 - Dispositivo adotado por Galileo para comprovar experimentalmente um princípio básico da mecânica – a **Conservação do Ímpeto**. Aplicado ao pêndulo simples a ilustração indica que, depois de percorrer o arco do círculo **CB** (com vínculo em **A**), sobe pelo arco **BG** (com vínculo em **E**) 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, p. 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. Neste 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 . Atualmente, se conhece 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 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, 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 $\frac{1}{2\sqrt{2}}$, foi

denominada por Drake como a “constante de Galileo” (DRAKE, 1973).

A clareza com que Galileo tratou a questão da semelhança física fica outra vez patente no seu livro *Discorsi*, especialmente 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 ao meio, começando por avaliar a influência da perda de peso calculada pelo Princípio de Arquimedes, 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:

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 a semelhança das formas), o peso diminuirá ainda mais que a superfície... E isto que exemplifiquei 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 , têm-se, para corpos geometricamente semelhantes, a seguinte relação:

$$V = (l)^3$$

e

$$S = (l)^2$$

então:

$$V = (S)^{\frac{3}{2}}$$

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....

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”, e conclui: “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 perpendiculares de um pêndulo simples era devido às diferentes amplitudes, que, por sua vez refletiam nos valores dos respectivos períodos. Hoje, sabemos (e isso se discute nas disciplinas de física básica nos cursos de engenharia) que o período para pequenas oscilações em torno do ponto de equilíbrio não depende dessas amplitudes, assim como das massas suspensas.

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 como a *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). Assim, é nela que está contido o primeiro tratado de dinâmica no sentido moderno: os tratados dos movimentos (movimento uniforme e movimento uniformemente acelerado).

É interessante observar que foi a partir das conversas com operários de um grande estaleiro naval de Veneza (Itália), que Galileo percebeu, por meio das experiências relatadas por estes, 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 comentaram que, segundo suas experiências acumuladas ao longo dos anos de trabalho, as estruturas maiores tinham menor capacidade de resistir a cargas adicionais, relativas ao seu peso próprio, do que as estruturas pequenas.

Esta comprovação experimental 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 esse trabalho está na segunda jornada, quando diz:

Saviati: O que acontece com o Sr. Símplicio 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 idéia 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. Assim, 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 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, então, essa 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 (Figura 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:

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



Figura 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 o fio, existe para cada material um comprimento limite ou comprimento de ruptura. (Figura extraída de GALILEI, 1988, p. 121 e 116, respectivamente)

A partir desse conceito vieram 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 ($\Delta V/V$).

TEORIA DA FLEXÃO

Em seguida, a partir dos princípios da estática (em particular do *princípio de arquimedes*), 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 engenharia civil. 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 (Figuras 4 e 5).

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, se abstraindo do seu peso próprio, são capazes de resistir a cargas externas proporcionais ao quadrado de uma de suas dimensões. Entretanto, o peso próprio, que por sua vez também é uma carga a atuar sobre a viga, é proporcional ao cubo dessa dimensão.

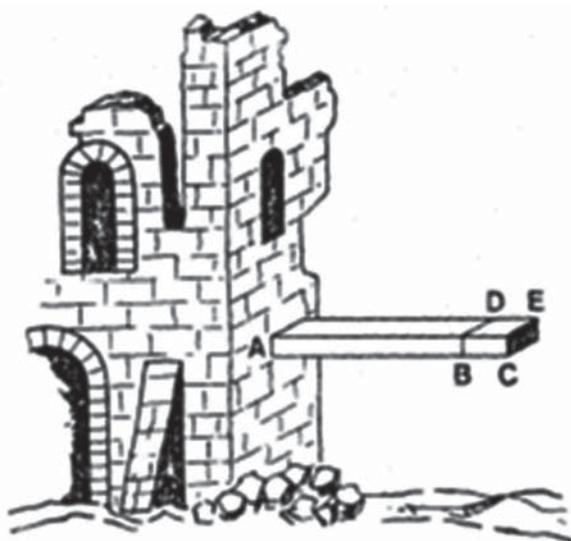


Figura 4 - A teoria da flexão. Combinando a lei da tensão de ruptura com o princípio da alavanca de Arquimedes e com a hipótese incorreta sobre a distribuição de esforços internos, Galileo elaborou a sua teoria da flexão que, apesar de suas imperfeições parciais, conduziu a resultados corretos, no que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

Dessa situação acarreta 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 desta parte da obra *Discorsi*):

Entre os prismas e cilindros pesados, existe um e só um que se encontra (sob efeito de seu peso próprio) no estado limite entre a ruptura e a não-ruptura, de modo que todo sólido maior, incapaz de resistir ao seu próprio peso, quebra-se-á, ao passo que todo sólido menor oporá alguma resistência a uma força destinada a quebrá-lo (GALILEI, 1988, p. 125).

Com esta proposição, Galileo introduziu mais um novo conceito para a época, o “tamanho limite” para uma estrutura, quando diz:

[...] 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,... deveriam 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 que o de uma ponte em forma de arco; este, por sua vez, é maior que o de uma ponte do tipo viga reta. A Figura 5 ilustra esta observação para vigas em balanço sobre dois tipos de apoios.

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 .

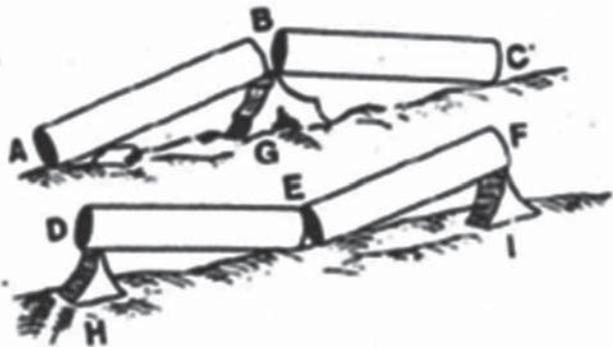


Figura 5 - Depois de aplicar sua teoria da flexão ao caso da viga em balanço (*cantilever*), Galileu estuda o caso da viga sobre dois apoios, representada nessa ilustração. Generalizando a situação, em que a força é aplicada em qualquer ponto do vão, entre os apoios, Galileu encontrou um resultado correto, 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)

Como vimos no início deste trabalho, 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 Galileu a esse “*número π* ” constituiu, portanto, uma digna homenagem ao fundador da teoria da resistência dos materiais.

A ABORDAGEM DO MÉTODO CIENTÍFICO

Uma das contribuições mais importantes de Galileu para com a ciência moderna foi a de ter intuído que, tanto as perguntas como as soluções de problemas, devem ser elaboradas numa linguagem especial: a linguagem matemática. É precisamente nisto que reside a chamada “Revolução Científica do Século XVII” (RONAN, 1987; KUHN, 2003).

Segundo Galileu, para que o fenômeno estudado (*observação*) possa ser tratado matematicamente, é necessário reduzi-lo a um conjunto de parâmetros suscetíveis de medição, a denomi-

nada construção do modelo físico (LUCIE, 1978). Esse modelo deve obedecer, segundo o investigador, a certas leis ou teorias preexistentes. Se essas leis não existem, o investigador impõe ao modelo certas hipóteses de trabalho.

As leis ou hipóteses impostas ao modelo levam a certas deduções analíticas, que fornecem, no papel, uma resposta provisória à pergunta inicial e permitem, geralmente, fazer previsões verificáveis quanto às respostas a outras perguntas porventura suscitadas pelo modelo, no decorrer da investigação.

No entanto, sendo as leis e as hipóteses de trabalho, imposições humanas, resta ainda saber se a natureza concorda com a resposta encontrada. Somente há um meio de sabê-lo: voltar à experiência e analisá-la criteriosamente. Somente ela permitirá decidir, por um lado, se o modelo físico construído era um modelo correto (isto é, se todos os parâmetros relevantes para a pergunta feita foram incluídos) e por outro lado se as leis ou hipóteses de trabalho que foram impostas ao modelo, são corretas.

Podemos resumir tudo isto sob a forma do histograma apresentado na Figura 6.

O maior mérito de Galileu foi ter entendido, ou pressentido, que a chave do método científico estava precisamente na passagem abstrata do real inicial (observação) para o real final (experiência). Essa “*ponte*” está contida na Figura 6 através do quadro tracejado.

A linguagem utilizada por Galileu (como, aliás, mais tarde por Newton e outros cientistas) era a geometria. Ele ainda não possuía os recursos denominados atualmente na análise matemática (a algébrica e a análise vetorial), que iria começar a ser desenvolvida por Gottfried Leibnitz (1646-1716) e pelo próprio Isaac Newton no século XVII.

Ocorre que a manipulação correta da linguagem geométrica é uma verdadeira arte, quase totalmente em desuso hoje em dia; por outro aspecto, a análise oferece melhores condições para sistematização, o que fornece uma razoável garantia de sucesso na solução dos problemas.

Apenas como exemplo de uma aplicação do método científico, pode-se colocar a seguinte situação normalmente explorada nas disciplinas de física gerais e experimentais dos cursos de engenharias: não é óbvio que, na ausência de resistências de atrito ou do ar, os corpos caíam com velocidade uniformemente crescente com o passar do tempo, independentemente de seu peso, forma ou tamanho.

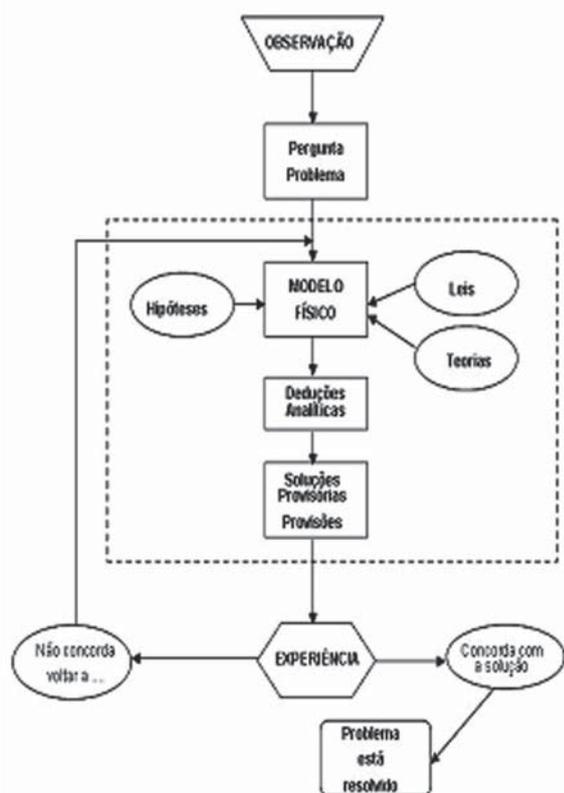


Figura 6 - Histograma esquemático para se entender o método científico proposto por Galileu

Partindo dessa conjectura, podemos deduzir que (de preferência com o uso da matemática), se os corpos caírem com velocidade uniformemente acelerada, sem sofrer qualquer resistência, os deslocamentos percorridos em intervalos de tempo iguais estarão entre si, por exemplo, como os números ímpares: 1, 3, 5, 7, 9,... Isto é, no instante igual a um segundo a esfera cai e encontra-se a uma altura “h”; ao fim de dois segundos, “4h” (pois temos: $h + 3h$); ao fim do terceiro segundo, “9h” (no caso: $4h + 5h$); e assim por diante.

Para verificar essa conclusão, realiza-se uma experiência dedicada ao fenômeno, ou seja, um experimento organizado e interpretado de acordo com a conjectura. Por exemplo, poderia ser montado um plano inclinado e sobre ele deixar rolar uma esfera, ao invés de deixá-la cair livremente. Dessa maneira, reduz-se sensivelmente a influência da resistência do ar. No entanto, se a canaleta do plano inclinado estiver bem polida e a esfera for lisa e maciça, é possível diminuir mais ainda o atrito de contato. Então, dividindo as alturas do plano inclinado segundo os valores: 1, 3, 5, 7, 9,... A partir dessa

montagem, deixa-se rolar a esfera e, se ao medir os tempos para percorrer as alturas assinaladas estes forem iguais, então se pode deduzir que a conjectura será verdadeira.

Nas experiências realizadas por Galileu repetidas vezes, e apresentadas na terceira jornada da obra *Discorsi*, os resultados foram esses. O que o levou a constatar que a conjectura é verdadeira, ou seja, os corpos caem com velocidade uniformemente acelerada.

É exatamente esse o método científico: o da verificação experimental de uma conjectura, a qual pode ser, inclusive, contrária a toda evidência, e não precisa ser necessariamente induzida por fenômenos observados. Torna-se verdadeira se o experimento com ela concordar.

O método científico foi tão revolucionário que transformou a ciência na maneira de estudar os fenômenos observados e estabeleceu novos paradigmas, segundo afirmaria Thomas Samuel Kuhn (1922-1996) no seu livro *A Estrutura das Revoluções Científicas* (KUHN, 2003).

A RELAÇÃO DIDÁTICA E AS SITUAÇÕES DO ENSINO E APRENDIZAGEM

Uma pergunta que não foge à maioria dos professores que atuam nas diferentes áreas das engenharias, principalmente aqueles iniciantes na docência, é: como e quando tratar essas, ou outras questões voltadas à história da ciência, em uma atividade didática? A resposta para essa pergunta exige a ideia da problematização.

Atualmente, percebe-se que um ensino contextualizado não se resume a relações ilustrativas com o cotidiano dos estudantes, ou apenas com exemplos de aplicações práticas. Na verdade ele é o resultado de escolhas didáticas do professor, envolvendo conteúdos e metodologias, e com o projeto de ensino bem definido. O conjunto de estratégias didáticas precede a contextualização. É esse o papel da problematização aqui referida.

Uma das formas que se sugere na sala de aula é a de tratar os saberes a ensinar de modo a amenizar a descontextualização sofrida na transposição didática usando a história da ciência. Nesse sentido, a concepção da problematização aqui discutida visa à prática de um diálogo entre o professor e estudantes no início, ou mesmo durante a aula, buscando levantar suas concepções acerca de determinado assunto, ou conceito a ser abordado. Não se trata apenas de

um levantamento das concepções alternativas dos estudantes, mas de estabelecer um diálogo no qual eles tenham efetiva participação.

Infelizmente, os conteúdos presentes nos materiais didáticos são apresentados de modo excessivamente artificial, resultado de escolhas ocorridas no processo de transposição didática, que procuram satisfazer mais as questões de ordem prática do que didática. Isso leva os estudantes a não reconhecerem as ciências fora da instituição, isto é, no dia-a-dia. Assim, o ideal é que o professor utilize os livros originais, ou traduzidos desses, evitando as divergências nas interpretações relativas a determinados processos, daquilo que originalmente foi considerado, o que fortalecerá o tão necessário debate acadêmico.

Atento a essas questões, trabalhou-se com uma abordagem das teorias galileanas discutidas acima, empregando textos históricos da obra livro *Discorsi*, com o apoio dos trabalhos de Fernando L. Carneiro (CARNEIRO, 1965) e Stephen P. Timoshenko (TIMOSHENKO, 1983). Essas questões foram trabalhadas com os estudantes em três turmas das disciplinas Física geral e experimental II e Mecânica técnica (matutino e noturno), do curso de engenharia civil de uma instituição privada de Campinas, SP.

Os textos foram abordados em assuntos relacionados ao equilíbrio estático, à elasticidade e às oscilações, particularmente nos tópicos: estabilidade, tensão e deformação, suportes, carregamentos e princípio da potência virtual. Primeiramente e como trabalho individual, os alunos fizeram a leitura do texto, posteriormente foram formados grupos em sala de aula, visando à discussão do texto e garantindo assim que os estudantes pudessem expor suas ideias, refutadas ou aceitas pelos colegas. Imediatamente após as discussões, os grupos foram desfeitos, e a interação professor-estudante passou a ocorrer. É o momento em que o professor interage e sistematiza as argumentações trazidas pelos estudantes, onde se procura verter a linguagem cotidiana para a científica como forma de valorizar os aspectos da cultura científica. Finalmente, e talvez a mais importante etapa desse processo, todas as atividades foram encerradas com um trabalho escrito. Isso ocorreu em função da convicção que se tem de que a escrita é a atividade que complementa as argumentações realizadas em aula, e ambas são fundamentais para o ensino de ciências.

Diante dessas atitudes em aula, em todas as turmas trabalhadas percebeu-se que os estu-

dantes reconheceram os acertos e desacertos que um cientista como Galileo Galilei, vivido entre os séculos XVI e XVII, tirou em suas conclusões e inconclusões, além das bases que fundamentaram e apoiaram as teorias do conhecimento científico tal qual ele realizou e que implicaram no desenvolvimento da engenharia civil.

Em comentários e discussões travados posteriormente com outros professores, em particular com aqueles que trabalham em disciplinas como Resistência dos materiais, Análise estrutural, Metodologia científica e Noções de pontes, testemunhou-se que esses evitam ou não executam qualquer abordagem histórica na condução de suas aulas. Neste contexto, não são mencionados quaisquer aspectos históricos que levaram ao desenvolvimento e às formulações das teorias das vigas, trabalhadas por Galileo, e posteriormente por Euler, Bernouli, Vlasov e Timoshenko (COSTA, 2006; e referências ali contidas). Essa situação se estende para os atuais currículos dos cursos de Engenharias, o que leva o tema aqui abordado para uma ampla discussão e faz pensar na tão propalada crise do ensino superior em nosso país.

Em outras palavras, nenhum texto histórico, ou artigos originais, tendo em vista um planejamento de aulas com algumas atividades de história e filosofia das ciências, são feitos, o que impede a construção de uma visão mais apropriada dessas disciplinas, dificultando aos estudantes a desejada transposição cultural dos saberes.

Certamente, atuar dessa forma é um desafio ao professor perante a sala de aula. Defende-se que para transformar os conteúdos históricos (em forma de textos) a serem desenvolvidos em sala de aula são necessários alguns cuidados.

O primeiro é o estudo da linguagem apresentada pelo cientista que esta sendo evidenciado. Normalmente, eles foram escritos para comunicar uma descoberta para um interlocutor, quase sempre outro cientista ou mesmo uma sociedade científica. Então, é necessário ter sensibilidade para verificar se os estudantes entenderão a mensagem que está em pauta.

O segundo cuidado é com a tradução da língua original, quase sempre em inglês, francês, italiano ou espanhol, para nossa língua pátria. A revisão dessa tradução, seja se considerarmos o idioma, seja em relação à clareza e à correção conceitual, também deve ser motivo de atenção e preocupação.

O terceiro cuidado é com relação ao uso de materiais didáticos de apoio. O uso de imagens

em computação com apoio de um *datashow*, ou imagens impressas em papéis, além de maquetes e visitas a construções antigas, dentre outras, é um fator estimulante e significativo para o aprendizado. Além disso, cria vínculos saudáveis na relação professor/estudante.

Por último, mas não menos importante, é necessário organizar a atividade em si para os estudantes. Considera-se fundamental realizá-la por meio de questões que levam os estudantes a interagir com os textos, ou fragmentos bem selecionados desses. Essas questões não devem ser diretivas, mas relativamente abertas, para permitirem uma leitura e uma intervenção criativa dos participantes na sala de aula. Mesmo abertas, devem enfatizar os pontos principais que sustentarão a discussão dos estudantes, atuando em grupos, e na interação com o professor. Defende-se aqui que são essas questões que orientarão o olhar dos estudantes e que permitirão emergir, no debate e discussões, os valores da ciência e uma visão do trabalho do cientista tal como se apontou anteriormente.

CONCLUSÃO

Neste trabalho são apresentados os três principais problemas que Galileo abordou de modo absolutamente inovador na sua obra *Discorsi*: a teoria da semelhança física; a teoria da resistência dos corpos sólidos e a teoria das flexões. Esses problemas possuem implicações diretas na evolução dos estudos aplicados à engenharia civil e podem ser explorados por professores em disciplinas como Introdução à engenharia, Físicas, Mecânica, Estática, Análise estrutural, Resistência dos materiais e Noções de pontes.

Ressalta-se que muitas outras passagens do livro *Discorsi* poderiam ser citadas e analisadas neste trabalho, como é o caso daquelas em que é enunciada a lei das cordas vibrantes, e que também nos remetem ao desenvolvimento dos estudos vibracionais e suas aplicações nas engenharias. Ao se envolver com esses problemas, 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 (Salviati, Simplicio e Sagredo) na obra de Galileo, teve-se o propósito de colocar o leitor frente a frente com seu modo de atuar, pensar e proceder no plano científico. Desta maneira, procurou-se evitar distorções de seu pensamento, interpretando-o segundo as próprias

tendências filosóficas ou ideológicas da época.

Também foi abordado, embora de forma resumida, o método da pesquisa científica de Galileo, que foi uma combinação entre a observação, a experiência e a matemática, isto é, a ferramenta de lógica dedutiva. Verificou-se que, partindo de alguns fatos experimentais, formula-se uma primeira hipótese ou teoria para interpretá-los. Dessa teoria tiram-se conclusões, pelo caminho da dedução. Em seguida, a validade das conclusões é submetida à experiência, à qual cabe sempre a última palavra. A hipótese levantada pode ser mudada ou aperfeiçoada, caso os ensaios não a confirmem. Desta forma, a fonte da verdade é, em última análise, a experiência.

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*, além do método científico por ele elaborado, 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. Neste sentido os trabalhos de Ronan (1987); Cohen (1988); Galilei (1987; 2004); Koesler (1989); Martins (1994); Rossi (2001); Koyré (2006); Whitehead (2006); dentre outros, são de excelente qualidade. Com base no que foi exposto acima, em particular nas experiências vivenciadas em salas de aulas em disciplinas de um curso de engenharia civil de uma instituição privada, quando se empregou textos das passagens dos *Discorsi*, ficou evidente a possibilidade de ensinar como se dá o processo de construção dos conceitos físicos no viés histórico, relacionando-o diretamente com o próprio conceito físico de interesse.

Verificou-se que, reconstruindo momentos do trabalho de Galileo que culminaram nos desenvolvimentos de teorias imprescindíveis para as engenharias, foi possível levar para as salas de aulas discussões que mostraram a relação altamente intrínseca e complexa entre a ciência, a tecnologia e a sociedade, abrindo oportunidades para debates acerca dos motivos, das necessidades e dos entornos que cerceiam e fomentam a atividade dos cientistas.

Reafirma-se que é de grande importância a apresentação de questões históricas e filosóficas (como aqui exploradas) no ensino de engenharia, pois torna mais transparente para os estudantes que a ciência (e aqui se incluem as engenharias como um todo) não é a verdade absoluta (como

muitas vezes é apresentada nos atuais currículos). Ela é uma descrição limitada devido à própria limitação do ser humano.

REFERÊNCIAS

- ARISTÓTELES. *On the heavens (De Cælo)*. Tradução de J. L. Stocks. In: Hutchins, R. M. (Ed.) *Great books of the western world*. Chicago: Encyclopaedia Britannica, v. 8, 1952, p.359-405.
- CARNEIRO, F. L. *Galileu, fundador da teoria dos materiais*. In: História da técnica e da tecnologia. (Ruy Gama, org.). São Paulo: Editora Gradiva, 1988, 305p.
- COHEN, I. B. *O nascimento de uma nova física*. Trad. de Maria Alice Gomes da Costa, Portugal: Editora Gradiva, 1988, 305p.
- COSTA, S. N. J. *O Modelo de Timoshenko em vigas elásticas, estruturas offshore e nanotubos de carbono através da Resposta Fundamental de Valor Inicial*. Porto Alegre: tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Matemática, 2006, 294p.
- DRAKE, S. *Galileo's Discovery of the Law of Free Fall*. *Scientific American*. São Paulo, v. 228, n. 5, 1973, p. 84-92.
- GALILEI, G. *A mensagem das estrelas*. Rio de Janeiro: Editora Salamandra. Coleção Clássicos da Ciência (1), Rio de Janeiro: MAST (Museu de Astronomia e Ciências Afins), 1987, 72p.
- GALILEI, G. *Duas novas ciências*. Tradução: Letizio Mariconda e Pablo Rúben Mariconda. 2. ed. São Paulo: Nova Stella Editorial / Instituto Italiano di Cultura, 1988, 315p.
- 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, 882p.
- GARBI, G. G. *A Rainha das Ciências*. São Paulo: Livraria da Física, 2006, 346p.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física*. v. 2, 4. ed., Rio de Janeiro: Livros Técnicos Científicos Editora S. A., 1996, 292p.
- KELLER, F. J.; GETTYS, W. E.; SKOVE, M. J. *Física*. vol. 1, São Paulo: Pearson/Makron Books, 2004, 605p.
- KENSKI, V. M. *Educação e Tecnologias: o novo ritmo da informação*. 1. ed., Campinas: Papirus, 2007, 141p.
- KOESTLER A. *O homem e o universo*. São Paulo: Ibrasa, 1989, 426p.
- KOYRÉ, A. *Do mundo fechado ao universo infinito*. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora Forense Universitária, 2006, 304p.
- KUHN, Th. S. *A estrutura das revoluções científicas*. Trad. de Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. 7. ed. São Paulo: Perspectiva, 2003, 262p.
- LUCIE, P. *A gênese do método científico*. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1978, 149p.
- MARTINS, R. A. *Galileo e a Rotação da Terra*. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*. Florianópolis, v. 11, n. 3, 1994, pp.196-211.
- PENEREIRO, J. C. Galileo e a defesa da cosmologia copernicana: a sua visão do universo. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*. Florianópolis, v. 26, n. 1, 2009, p. 173-198.
- RONAN, C. A. *História ilustrada da ciência*, Trad. de Jorge Enéas Fortes, v. III. São Paulo: Jorge Zahar Editor (Círculo do Livro), 1987, 136p.
- ROSSI, P. *O nascimento da ciência moderna na Europa*. Trad. de Antonio Angonese, Bauru: Editora Edusc, 2001, 492p.
- SERWAY, R. A.; JEWETT, JR. J. W. *Princípios de Física*. vol. 1, São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2005, 403p.
- TIMOSHENKO, S. P. *History of strength of materials*. New York: Dover publications, 1983, 452p.
- VITRÚVIO, M. P. *Tratado de Arquitectura*. Tradução do latim por MACIEL, M. J. P., 2. ed., Portugal: IST Press, 2006, 456p.
- WHITEHEAD, A. N. *A ciência e o mundo moderno*. Tradução: Hermann Herbert Watzlawick, São Paulo: Paulus, 2006, 264p.

DADOS DO AUTOR

Júlio César Penereiro



Bacharel em Física pela Universidade Estadual de Campinas (1982), com o Mestrado (1987) e Doutorado (1993) em Astronomia pela Universidade de São Paulo. Atualmente é professor titular e pesquisador da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, sendo líder do grupo de pesquisa em modelagem matemática. Atua em pesquisas no ensino de engenharia, matemática, física e astrofísica, além de ensino de ciências.