

UMA PROPOSTA DE ABORDAGEM DO PRINCÍPIO DE ARQUIMEDES A PARTIR DA INVESTIGAÇÃO DO EPISÓDIO DA COROA

A PROPOSAL TO APPROACH ARCHIMEDES' PRINCIPLE FROM THE INVESTIGATION OF THE EPISODE OF THE CROWN

UNA PROPUESTA PARA ABORDAR EL PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES A PARTIR DE LA INVESTIGACIÓN DEL EPISODIO DE LA CORONA

Erisvaldo R. Santos Júnior

erisvaldo.ramalho@ifpi.edu.br
<https://orcid.org/0000-0002-4207-1232>
Instituto Federal do Piauí, Campus Corrente

Juliana M. Hidalgo

julianahidalgo@fisica.ufrn.br
<https://orcid.org/0000-0001-6526-454X>
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

RESUMO

Esse trabalho teve como objetivo colaborar com a abordagem do Princípio de Arquimedes no contexto educacional básico, considerando as nuances do desenvolvimento histórico desse conhecimento científico. Tomou como ponto de partida o episódio histórico envolvendo Arquimedes e a tarefa atribuída a ele de determinar se a coroa do Rei Hieron, de Siracusa, havia sido falsificada. Há uma versão muito difundida desse evento, segundo a qual Arquimedes resolveu o problema por meio da descoberta do empuxo ao se banhar. Essa versão foi narrada pelo arquiteto romano Marcus Vitruvius, que viveu cerca de dois séculos após Arquimedes, no século I a.C. Apesar de possuir uma série de inconsistências conceituais físicas e históricas, a narrativa continua sendo propagada no contexto educacional. Em contrapartida, Galileu Galilei sugeriu, em 1586, no seu trabalho denominado *La Bilancetta*, que Arquimedes teria utilizado uma Balança Hidrostática para resolver o problema da coroa. A versão de Galileu para o episódio é fisicamente consistente, além de apoiada por evidências históricas descobertas por historiadores. Esta versão, contudo, é praticamente ausente do contexto escolar. Igualmente ausente é a existência de um limite de validade para o Princípio de Arquimedes, assinalada pelo chamado Paradoxo Hidrostático de Galileu. Buscando contribuir para a superação dessas lacunas e distorções, o presente trabalho propõe um Produto Educacional que problematiza, sob os pontos de vista físico e histórico, a versão mais conhecida do episódio da coroa. Trata-se de uma sequência didática, voltada para o Ensino Médio, que introduz, de maneira investigativa, trechos de fontes primárias de Vitruvius e de Galileu, bem como contempla atividades experimentais demonstrativas, exploradas segundo um viés dialogado e investigativo, que incluem a própria Balança Hidrostática, além de um limite de validade para o Princípio de Arquimedes.

PALAVRAS-CHAVE: Ensino de Física; Princípio de Arquimedes; Balança Hidrostática; Empuxo; Paradoxo Hidrostático.

ABSTRACT

*This work aimed to collaborate with the approach of Archimedes' Principle in the basic educational context, considering the nuances of the historical development of this scientific knowledge. He took as his starting point the historical episode involving Archimedes and the task assigned to him of determining whether the crown of King Hieron, of Syracuse, had been forged. There is a very widespread version of this event, according to which Archimedes solved the problem by discovering the buoyancy when bathing. This version was narrated by the Roman architect Marcus Vitruvius, who lived approximately two centuries after Archimedes, in the 1st century BC. Despite having a series of physical and historical conceptual inconsistencies, the narrative continues to be propagated in the educational context. On the other hand, Galileo Galilei suggested, in 1586, in his work called *La Bilancetta*, that Archimedes had used a Hydrostatic Balance to solve the crown problem. Galileo's version of the episode is physically*

doi: 10.22407/2176-1477/2024.v15.2583

Recebido em: 30/12/2023

Aprovado em: 19/06/2024

Publicado em: 21/06/2024

consistent, as well as supported by historical evidence discovered by historians. This version, however, is practically absent from the school context. Equally absent is the existence of a limit of validity for Archimedes' Principle, highlighted by the so-called Galileo Hydrostatic Paradox. In this sense, seeking to contribute to overcoming these gaps and distortions, this work proposes an Educational Product that problematizes, from a physical and historical point of view, the best-known version of the corona episode. This is a didactic sequence, aimed at high school, which introduces, in an investigative manner, excerpts from primary sources by Vitruvius and Galileo, as well as including demonstrative experimental activities, explored according to a dialogical and investigative bias, which include the Hydrostatic Balance, in addition to a validity limit for Archimedes' Principle.

KEYWORDS: *Physics Teaching; Archimedes' principle; Hydrostatic scale; Buoyancy; Hydrostatic Paradox.*

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo colaborar con el abordaje del Principio de Arquímedes en el contexto educativo básico, considerando los matices del desarrollo histórico de este conocimiento científico. Tomó como punto de partida el episodio histórico de Arquímedes y la tarea que se le asignó de determinar si la corona del rey Hierón, de Siracusa, había sido falsificada. Existe una versión muy extendida de este suceso, según la cual Arquímedes resolvió el problema descubriendo la flotabilidad al bañarse. Esta versión fue narrada por el arquitecto romano Marco Vitruvio, quien vivió aproximadamente dos siglos después de Arquímedes, en el siglo I a.C. A pesar de tener una serie de inconsistencias conceptuales físicas e históricas, la narrativa continúa propagándose en el contexto educativo. Por otro lado, Galileo Galilei sugirió, en 1586, en su obra llamada La Bilancetta, que Arquímedes había utilizado una Balanza Hidrostática para resolver el problema de la corona. La versión de Galileo del episodio es físicamente consistente y está respaldada por evidencia histórica descubierta por los historiadores. Esta versión, sin embargo, está prácticamente ausente del contexto escolar. Igualmente ausente está la existencia de un límite de validez para el Principio de Arquímedes, resaltado por la llamada Paradoja Hidrostática de Galileo. Buscando contribuir a superar estas brechas y distorsiones, este trabajo propone un Producto Educativo que problematiza, desde el punto de vista físico e histórico, la versión más conocida del episodio de la corona. Se trata de una secuencia didáctica, dirigida al nivel secundario, que introduce, de manera investigativa, extractos de fuentes primarias de Vitruvio y Galileo, además de incluir actividades experimentales demostrativas, exploradas según un sesgo dialógico e investigativo, que incluyen la Equilibrio Hidrostático, además de un límite de validez para el Principio de Arquímedes.

PALABRAS CLAVE: *Enseñanza de la Física; Principio de Arquímedes; Escala Hidrostática; Flotabilidad; Paradoja hidrostática.*

INTRODUÇÃO

A alfabetização científica continua sendo uma meta no horizonte dos envolvidos na Educação em Ciências. Tal objetivo só poderá ser alcançado quando a discussão de conteúdos da ciência estiver atrelada ao debate sobre o que a ciência é e como ela funciona (Martins, 2015). Como indicam Peduzzi e Raicik (2020, p. 20), "saber a ciência (o conteúdo científico) é condição necessária, e indispensável, mas não suficiente para saber sobre a ciência, sobre a natureza do empreendimento científico".

Apesar da frequência dessas sinalizações, o ensino de Ciências praticado por boa parte dos docentes está impregnado de visões ingênuas da atividade científica, dentre as quais o empirismo-indutivismo. Esta concepção minimiza a importância da hipótese e das ideias prévias na construção da ciência e implica considerar que os conhecimentos científicos emergem diretamente da observação e do experimento, de modo que cientistas fazem descobertas por meio de insights repentinos (Chalmers, 1993). Como consequência de um contexto de visões simplistas no qual estão imersos, os discentes muitas vezes são levados a compreender a ciência como um empreendimento individual de seres geniais.

Nesse sentido, a inserção didática da História e Filosofia da Ciência (HFC) vem sendo sugerida pela literatura da área de ensino como possibilidade de contribuir para que os estudantes alcancem percepções mais coerentes e sofisticadas sobre a Natureza da Ciência (NdC) (Martins, 2006; Forato; Martins; Pietrocola, 2012; Moura; Guerra, 2016; Ortega; Moura, 2020; Mendonça, 2020; Peduzzi; Raicik, 2020).

A utilização da HFC pode colaborar em vários sentidos com o Ensino de Ciências:

[...] entender a ciência como uma atividade humana socialmente construída [...]; problematizar uma visão exclusivamente empírico-indutivista da construção da ciência; compreender os termos que envolvem o debate científico e a ciência como parte de sua cultura envolvendo julgamentos de valor; conhecer não apenas os conteúdos científicos, mas também seus pressupostos e limites de validade postos pelo seu contexto histórico; problematizar os mitos sobre a construção do conhecimento científico revelando crenças, valores, disputas e controvérsias que permeiam a construção da ciência (Forato; Martins; Pietrocola, 2012, p. 125).

Os fatores mostrados na citação de Forato, Martins e Pietrocola (2012) justificam a ênfase dada pela literatura à inserção didática da HFC. A legislação educacional vigente, por sua vez, recomenda a abordagem histórica da ciência para além da citação de nomes e datas, de modo a contribuir para uma concepção mais complexa da atividade científica (Brasil, 2018). Não basta inserir qualquer narrativa histórica em sala de aula, já que existem pseudo-histórias romantizadas que reforçam concepções ingênuas sobre a ciência (Allchin, 2003). Dessa forma, é importante que o professor tenha em mente “a qual história da ciência se deve recorrer para se atingir os objetivos educacionais” (Baldinato; Porto, 2008, p. 1) expressos na legislação educacional.

No que se refere aos livros didáticos (LD), principal fonte de consulta dos docentes, nota-se, de modo quase que generalizado, que refletem uma concepção aproblemática e ahistórica da ciência, caracterizada pela transmissão dos conhecimentos de forma já elaborada, pronta, sem contextualizar os problemas que esses conhecimentos tentaram resolver, as dificuldades encontradas etc. (Gil Pérez *et al.*, 2001). No caso do Princípio de Arquimedes, temática central desse trabalho, pesquisa realizada por Hidalgo, Queiroz e Oliveira (2021) identificou nos LD aprovados no PNLD 2018 forte incidência de uma apresentação historicamente descontextualizada. Essa lacuna pode transmitir uma visão individualista da ciência (Gil Pérez *et al.*, 2001), associada diretamente a uma impressão anacrônica de que o enunciado atual do Princípio foi escrito exclusivamente pelo próprio Arquimedes, contemplando componentes de entidades vetoriais e os conceitos atuais de empuxo e de fluido. Isso, contudo, não condiz com o trabalho sobre os corpos flutuantes (Assis, 1996), no qual Arquimedes apresenta, com base em propriedades da geometria euclidiana, um enunciado para o Princípio bastante distinto do atual, válido para líquidos, mais especificamente para a água, sem o conceito de empuxo.

Ainda no que diz respeito ao Princípio de Arquimedes no contexto escolar, para além das apresentações historicamente descontextualizadas, há alusões a uma pseudo-história relacionada à suposta descoberta do empuxo. Essa narrativa remete ao episódio do furto da coroa do Rei Hieron II de Siracusa, citado pelo arquiteto romano Marcus Vitruvius Pollio (80 a.C. – 15 a.C.), em trecho de sua obra *De Architectura*. Segundo Vitruvius, parte do ouro fornecido ao artesão para a confecção de uma coroa teria sido substituído por uma massa equivalente de prata. Desejando investigar o caso sem se desfazer da coroa, Hieron buscou a ajuda de Arquimedes, que, após ter um insight durante um banho em uma banheira, resolveu o problema recorrendo a um método baseado na comparação de volumes transbordados de líquido. Arquimedes teria inserido em um recipiente cheio de água, respectivamente, a coroa

e dois outros objetos de mesma massa, um de ouro e outro de prata, notando, dessa forma, que a coroa fazia mais água transbordar do recipiente que o objeto de mesma massa de ouro, e menos água transbordar que uma massa idêntica de prata. Isso indicava que o artefato era composto por uma liga metálica (Vitruvius, 1958).

É essencial destacar que, apesar de interessante, a narrativa de Vitruvius é pouco confiável do ponto de vista físico e histórico. A tensão superficial da água e a variação mínima do nível do líquido, ao se inserir uma coroa em um recipiente cilíndrico com diâmetro similar ao seu, inviabilizariam a comparação de volumes transbordados. Quanto aos fatores históricos, destaca-se que Vitruvius nasceu 130 anos após a morte de Arquimedes e, portanto, não foi contemporâneo do caso. Além disso, Arquimedes não deixou nenhum relato do episódio e Vitruvius não indicou em qual fonte se baseou para descrever o ocorrido (Martins, 2000).

A narrativa vitruviana foi notada por Hidalgo, Queiroz e Oliveira (2021) em três LD aprovados no PNLD 2018 (Bonjorno *et al.*, 2006; Yamamoto; Fuke, 2016; Luz; Álvares; Guimarães, 2016). Situação análoga foi percebida em duas obras aprovadas no PNLD 2021 (Lopes; Rosso, 2020; Fukui *et al.*, 2020), as quais recomendam aos docentes a utilização de um texto online (Batalha; Bento, 2007) que remete, sem qualquer tipo problematização, à versão vitruviana do episódio histórico (Santos Júnior, 2023).

Sendo inadequada a versão vitruviana sobre a solução para o problema do furto do ouro da coroa do rei, existe uma alternativa fisicamente viável e historicamente fundamentada, narrada por Galileu Galilei (1564-1642), em sua obra *La Bilancetta* (Galilei, 1986). Martins (2000) comenta sobre o interesse de Galileu pela temática, indicando que, no final do século XVI, já havia a concepção de que outro método teria sido utilizado por Arquimedes. A leitura da obra *La Bilancetta* possibilita entendermos qual método Galileu acreditava ter sido utilizado por Arquimedes. O artigo de Mottana (2017) e a introdução produzida por Lucie (1986) à versão traduzida do *La Bilancetta*, trazem elementos contextuais que nos permitem entender por que Galileu teria tanta propriedade para indicar o provável método utilizado por Arquimedes no caso da coroa. A amizade entre o jovem Galileu e Ostilio Ricci, matemático da corte de Toscana, durante período na Universidade de Pisa, levou ao conhecimento das obras de Arquimedes, das quais Galileu se tornou um profundo estudioso.

Segundo Galileu, Arquimedes teria usado uma Balança Hidrostática para comparar pesos aparentes de objetos imersos em água. Esse recurso pode ser facilmente reproduzido e utilizado na Educação Básica. Assim, em termos didáticos, percebe-se o papel central que a Balança Hidrostática poderia ter no ensino do Princípio de Arquimedes, em uma abordagem histórico-filosófica desse conteúdo científico. Outra possibilidade interessante seria a discussão em sala de aula de trechos das fontes primárias de Galileu e de Vitruvius, de modo a problematizar a pseudo-história usualmente associada à descoberta do empuxo.

É motivo de preocupação constatar que nenhuma das sete obras aprovadas no PNLD 2021 traz uma abordagem histórica robusta sobre o Princípio de Arquimedes que, por exemplo, faça uso desses elementos (Santos Júnior, 2023). Esse panorama representa um retrocesso em relação ao que foi observado no PNLD 2018, já que duas obras selecionadas naquele edital do programa (Barreto Filho; Silva, 2016; Torres *et al.*, 2016) haviam realizado abordagens histórico-filosóficas desse conteúdo físico, discutindo a Balança Hidrostática como alternativa ao método descrito por Vitruvius (Hidalgo; Queiroz; Oliveira, 2021).

Outro aspecto relevante diz respeito a não ser contemplada nessas obras didáticas a existência de um limite de validade para o Princípio de Arquimedes (Hidalgo; Queiroz; Oliveira, 2021; Santos Júnior, 2023). Como demonstram Silveira e Medeiros (2009) em discussão sobre o chamado Paradoxo Hidrostático de Galileu, o enunciado tradicional do Princípio de Arquimedes é válido somente quando as dimensões do objeto inserido no fluido são muito menores que as dimensões do recipiente em que o fluido está contido. Dentre todas as

coleções aprovadas nos editais do PNLD 2018 e 2021, somente uma faz alguma referência ao limite de validade desse princípio e, mesmo assim de forma restrita, nas orientações aos docentes. Adotando uma postura instrumentalista, a coleção indica: “fica a critério do professor fazer ou não esse comentário em sala. Nas questões propostas nos concursos vestibulares, o volume submerso do corpo é muito menor que o volume total do líquido no recipiente. Portanto, não há necessidade de levantar essa discussão” (Amabis *et al.*, 2020, p. LXI). Essa lacuna contrasta com a recomendação da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), uma vez que este documento educacional ressalta a importância do “reconhecimento dos limites explicativos das ciências” (Brasil, 2018, p. 550).

Considerando a relevância dos elementos supracitados, propusemos como Produto Educacional uma sequência didática¹ que envolve a discussão de trechos de fontes primárias traduzidas de Vitruvius e de Galileu, a utilização de uma Balança Hidrostática de baixo custo e a apresentação de um limite de validade para o Princípio de Arquimedes. Este Produto Educacional foi desenvolvido e aplicado (Figura 1) no contexto do desenvolvimento de uma dissertação de mestrado profissional em Ensino de Física (Santos Júnior, 2023).



Figura 1: Capa do produto educacional e estudante manipulando uma Balança Hidrostática de baixo custo na aplicação da sequência didática

Fonte: Santos Júnior (2023).

Tomamos como base referências teóricas que tratam da inserção didática de discussões sobre a NdC no ensino, bem como considerações relativas à utilização de experimentos históricos e de fontes primárias da História da Ciência em sala de aula (Hottecke, 2000; Gil Pérez *et al.*, 2001; Cavicchi, 2006; Wineburg, 2010; Holubová, 2014; Batista; Drummond; Freitas, 2015; Martins, 2015; Jardim; Guerra, 2017; Lanza; Manfro; Amaral-Rosa, 2019; Sasseron; Nascimento; Carvalho, 2019; Mendonça, 2020; Peduzzi; Raicik, 2020). A seguir, apresentamos a sequência didática de modo articulado aos referenciais que fundamentaram sua elaboração.

SÍNTESE DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Estruturamos a sequência didática a partir do referencial dos três Momentos Pedagógicos, de modo que cada uma das duas etapas previstas contempla situações de problematização, construção e aplicação do conhecimento (Muenchen; Delizoicov, 2014). Os

¹ Entende-se sequência didática como um produto curricular de pequena ou média escala baseado em atividades de ensino-aprendizagem interligadas sobre um tópico a ser lecionado (Méheut; Psillos, 2004; Psillos; Tselfes e Kariotoglou, 2004).

principais objetivos considerados pela proposta são: i) Abordar o Princípio de Arquimedes de forma historicamente contextualizada; ii) Promover visões mais complexas sobre a NdC a partir da discussão de fontes primárias relacionadas ao Princípio de Arquimedes; iii) Discutir o episódio histórico de Arquimedes e a coroa do Rei Hieron, evidenciando fatores que tornam a versão descrita por Vitruvius incoerente do ponto de vista histórico e físico; iv) Apresentar o método descrito por Galileu para a resolução do problema da coroa por Arquimedes como fisicamente plausível, além de reforçado por evidências históricas; v) Reproduzir a Balança Hidrostática descrita por Galileu e utilizá-la na discussão sobre o conceito de empuxo, em contexto de análise de amostra composta por diferentes materiais e vi) Discutir um limite de validade para o Princípio de Arquimedes e a possibilidade de um enunciado atualizado desse princípio tendo em vista o Paradoxo Hidrostático. O Quadro 1 sintetiza os conteúdos abordados, atividades realizadas e o tempo previsto para as duas etapas da sequência didática.

Quadro 1: Síntese da sequência didática

ETAPAS	CONTEÚDOS CONTEMPLADOS	ATIVIDADES REALIZADAS
ETAPA 1 (90 min)	<ul style="list-style-type: none"> - Versão vitruviana do episódio; - Relação entre densidade, massa e volume; - Conceito de tensão superficial, acompanhado de exemplos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Apresentação de ilustrações relacionadas à versão vitruviana do episódio; - Apresentação de breves biografias de Arquimedes e de Vitruvius; - Leitura coletiva e problematização de um trecho do <i>De Architectura</i> que traz o método descrito por Vitruvius; - Demonstração investigativa sobre o conceito tensão superficial.
ETAPA 2 (210 min)	<ul style="list-style-type: none"> - Crítica de Galileu ao método narrado por Vitruvius; - Enunciado tradicional do Princípio de Arquimedes e seu limite de validade; - Enunciado atualizado do Princípio de Arquimedes, tendo em vista o Paradoxo Hidrostático; - Funcionamento da Balança Hidrostática para a análise de ligas metálicas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Leitura coletiva de trechos do <i>La Bilancetta</i>; - Apresentação de uma breve biografia de Galileu Galilei; - Manipulação de uma Balança Hidrostática de baixo custo; - Investigação do método descrito por Galileu utilizando a Balança Hidrostática; - Demonstração investigativa sobre o Paradoxo Hidrostático; - Determinação da composição de um conjunto contendo bolas de gude e moedas, usando a Balança Hidrostática.
Extraclasse	-----	- Aplicação de questionário pós-intervenção.

Fonte: elaborado pelos autores

Em um primeiro momento, na Etapa 1, busca-se questionar os alunos sobre as temáticas que serão abordadas, estimulando que exponham o que pensam. No contexto deste Produto Educacional, isso ocorre por meio de perguntas relacionadas: ao episódio histórico de Arquimedes e à coroa do Rei Hieron; ao conteúdo da fonte primária de autoria de Vitruvius; ao transbordamento de líquidos em recipientes totalmente preenchidos e à subida do nível do líquido em um recipiente quando um objeto é submerso. Uma atividade experimental demonstrativa, de cunho investigativo, é conduzida pelo docente de modo dialogado (Carvalho, 2010), com o objetivo de oportunizar uma situação em que os estudantes percebam uma lacuna conceitual e se sensibilizem quanto à necessidade de adquirir novos saberes (Muenchen; Delizoicov, 2014).

Ainda quanto ao momento de problematização, busca-se desenvolver entre os estudantes a habilidade de interpretação de fontes históricas, nos moldes de um trabalho investigativo, conforme sugerido pela iniciativa estadunidense *Teaching Historical Thinking*

Using Primary Sources (Wineburg, 2010). Nesse sentido, particularmente na investigação das fontes históricas, destacam-se: a necessidade de pensar sobre a autoria do documento, situá-lo no contexto da época, usar conhecimentos que transcendam a fonte primária para analisá-la (tomando cuidado para não cometer anacronismos) e dirigir perguntas ao documento histórico que se está estudando. Essa forma investigativa de abordar as fontes históricas pode nortear sua inserção em sala de aula, superando sua utilização "como meras ilustrações para os conteúdos", ou seja, deixando de lado a perspectiva simplista (e positivista) de que elas mostrariam "como os fatos da ciência realmente ocorreram" (Batista; Drummond; Freitas, 2015, p. 671). Assim, há um alinhamento a uma das competências gerais da BNCC, que prevê a Educação Básica como um ambiente propício ao exercício para "a investigação, a reflexão, a análise crítica, a imaginação e a criatividade, para investigar causas, elaborar e testar hipóteses" (Brasil, 2018, p. 9). É justamente o que se propõe em uma das etapas do primeiro momento da sequência didática.

Ainda na Etapa 1, em momento de construção de conhecimentos, "sob a orientação do professor, os conhecimentos de física necessários para a compreensão dos temas e da problematização inicial são estudados" (Muenchen; Delizoicov, 2014, p. 620). Em nossa proposta, abordamos a tensão superficial da água e a subida do nível do líquido ao inserirmos a coroa em um recipiente. Por fim, o momento de aplicação do conhecimento da Etapa 1, tem como finalidade contemplar sistematicamente os conhecimentos obtidos pelos estudantes, respondendo a questões elaboradas na problematização, bem como trazendo outros exemplos oportunos. Almeja-se que o aluno perceba como o efeito da tensão superficial e a variação ínfima do nível do líquido são fatores que contribuem para lançar suspeitas sobre a narrativa vitruviana. Esses elementos físicos se somam aos elementos históricos, ou seja, suspeitas decorrentes da interpretação da fonte primária de Vitruvius, colaborando para que o aluno perceba que Arquimedes deve ter recorrido a outro método para resolver o problema da coroa.

Na Etapa 2 da sequência didática, no momento de problematização, os alunos são apresentados, em leitura coletiva do texto de Galileu, à crítica desse pesquisador ao método de medida de volumes de fluido transbordado para resolução do problema da coroa. O interesse de Galileu pelas obras de Arquimedes é evidenciado pelo docente. Em seguida, os fatores que descredibilizam o método descrito por Vitruvius são lembrados, justificando o motivo de Galileu julgar essa metodologia como grosseira, provavelmente nunca utilizada por Arquimedes. Buscando gerar nos alunos a curiosidade em relação a um possível método alternativo, questiona-se a respeito de qual recurso relacionado à água poderia ter sido usado por Arquimedes. Após evidenciar as principais obras de Arquimedes, em especial o estudo das alavancas, apresenta-se a Balança Hidrostática descrita por Galileu.

Nesta etapa, no momento de organização do conhecimento, media-se, inicialmente, uma demonstração investigativa (Carvalho, 2010) com o uso da Balança Hidrostática, intencionando debater a relação entre a densidade de objetos de mesma massa e a posição para a qual o contrapeso precisa ser deslocado ao inserirmos esses corpos na água. Em seguida, discute-se com os estudantes a formulação do Princípio de Arquimedes, explicitando que seu enunciado passou por modificações ao longo do tempo. Ainda na organização do conhecimento, o professor detalha o funcionamento da Balança Hidrostática, utilizando imagens ilustrativas desse mecanismo e um trecho do *La Bilancetta* que o descreve. Essa discussão é baseada em referenciais teóricos sobre o uso didático de experimentos históricos. Em especial, tomou-se como inspiração a metodologia intitulada "experimentos históricos a partir de narrativas" (Jardim; Guerra, 2017), na qual não são utilizados necessariamente os mesmos materiais apresentados na fonte primária. Assim, tem-se a reprodução e o uso de uma Balança Hidrostática de baixo custo inspirada pela narrativa de Galileu.

Em seguida, o docente apresenta uma nova atividade experimental de cunho demonstrativo-investigativo, a partir da qual se discute o Paradoxo Hidrostático e um limite de

validade para o Princípio de Arquimedes. Tem-se que o enunciado usual do Princípio de Arquimedes, o qual indica que “um objeto imerso totalmente ou parcialmente em um fluido sofre uma força de baixo para cima igual ao peso do volume de fluido deslocado pelo objeto”, é válido somente se as dimensões do objeto inserido no fluido forem muito menores que as dimensões do recipiente em que o fluido está contido (Silveira; Medeiros, 2009). Nessa Etapa 2, no momento de aplicação do conhecimento, retoma-se a Balança Hidrostática e os estudantes são estimulados a utilizar o que aprenderam para determinar a proporção entre as massas de dois materiais (bolas de gude e moedas) que compõem um conjunto. Essa resolução remete ao método descrito por Galileu, provavelmente usado por Arquimedes na resolução do problema da coroa. Por fim, um questionário sobre as versões do episódio histórico, o Princípio de Arquimedes e reflexões sobre a NdC é recomendado aos estudantes como atividade extraclasse.

APRESENTAÇÃO DETALHADA DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Etapa 1 - Problematização Inicial

A aula se inicia com a exibição de imagens que remetem ao episódio *Eureka* de Arquimedes (ver Figura 2, como exemplo). O docente indaga aos estudantes se conhecem algo sobre a situação em foco.



Figura 2: Ilustração que remete à versão vitruviana do episódio histórico.

Fonte: Freepik

São apresentadas aos alunos informações biográficas sobre Arquimedes (287 a.C. - 212 a.C.), citando seu suposto envolvimento com o caso da coroa do Rei Hieron. O docente comenta sobre a fonte histórica do episódio, a obra *De Architectura*, de Marcus Vitruvius (80 a.C. – 15 a.C.). Frisa que não há apontamentos do próprio Arquimedes a respeito do episódio, e registra em quadro os períodos em que viveram Arquimedes e Vitruvius². É realizada a leitura coletiva e discussão de um trecho da obra *De Architectura*, de Vitruvius:

No caso de Arquimedes, embora ele tenha feito muitas descobertas maravilhosas de diversos tipos, ainda assim, de todas elas, a seguinte, que descreverei, parece ter sido o resultado de uma engenhosidade sem limites. Hieron, depois de obter o poder real em Siracusa, resolveu, como consequência de suas façanhas bem-sucedidas, colocar em um certo templo uma coroa de ouro que ele havia jurado aos deuses imortais. Ele contratou sua fabricação por um preço fixo e pesou uma quantidade precisa de ouro para o artesão. Na hora marcada, este último entregou, para a satisfação do

² Para informações biográficas sobre Arquimedes, o professor pode consultar a introdução de Assis (2008) e o artigo de Martins (2000), ambos disponíveis online. Informações biográficas sobre Vitruvius podem ser obtidas em: <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Vitruvius/>.

rei, uma peça de trabalho primorosamente acabada, e parecia que o peso da coroa correspondia exatamente ao peso do ouro. Porém, depois foi feita uma acusação de que o ouro havia sido extraído e um peso equivalente de prata havia sido adicionado na fabricação da coroa. Hieron, achando um ultraje ter sido enganado, e ainda não sabendo como detectar o roubo, pediu a Arquimedes que considerasse o assunto. Este último, enquanto o caso ainda estava em sua mente, foi ao banho e, ao entrar em uma banheira, observou que quanto mais seu corpo afundava nela, mais água escorria pela banheira. Como isso indicava a forma de explicar o caso em questão, sem demora e transportado de alegria, saltou da banheira e correu nu para casa, gritando em alta voz que havia encontrado o que procurava; pois enquanto corria ele gritava repetidamente em grego, "Eureka, Eureka". [...] diz-se que fez duas massas do mesmo peso da coroa, uma de ouro e outra de prata. Depois de fazê-las, ele encheu um grande recipiente com água até a borda e colocou a massa de prata nele. Transbordou um volume de água igual ao da prata afundada no vaso. [...] após esse experimento, ele também inseriu a massa de ouro no recipiente cheio e, ao retirá-lo, medindo como antes, descobriu que não houve tanta água perdida, mas sim uma quantidade menor. [...] Finalmente, enchendo novamente o recipiente e colocando a própria coroa na mesma quantidade de água, ele descobriu que mais água transbordava para a coroa do que para a massa de ouro do mesmo peso (Vitruvius, 1958, p. 238 - 239; nossa tradução).

Com o auxílio da Figura 3, o professor ilustra o método narrado, indicando que a coroa faz transbordar mais água do que um objeto de mesma massa de ouro e, por outro lado, faz transbordar menos água do que a inserção de um objeto de mesma massa de prata. Sugere-se que o conceito de densidade não seja citado pelo professor, já que é esperado que os estudantes recorram a essa explicação em suas respostas a indagações subsequentes.

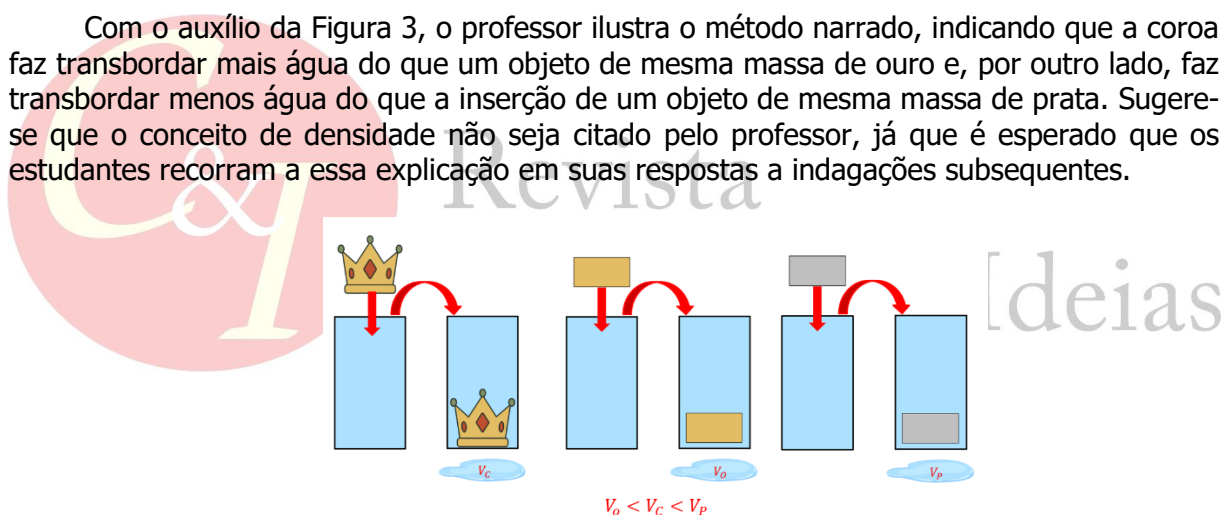


Figura 3: Ilustração para o método da comparação de volumes transbordados narrado por Vitruvius

Fonte: elaborada pelos autores.

Os excertos históricos são problematizados, em seguida, a partir da realização paulatina de questionamentos, baseados em Martins (2000), que remetem à confiabilidade da narrativa sob os pontos de vista físico e histórico: *Fica claro como Vitruvius tomou conhecimento do episódio? Em que ele se baseou? Se Arquimedes ocupava uma posição de prestígio na sociedade da época, quem poderia ter preparado sua banheira? Se vocês fossem preparar um banho em uma banheira, iriam enchê-la até a borda? Por que um objeto de prata, de mesma massa que um objeto de ouro, faria mais água transbordar quando inserido no recipiente cheio de água? De que forma isso teria ajudado a solucionar o problema da coroa? Quanto o nível da água se alteraria se inseríssemos uma coroa em um recipiente cilíndrico parcialmente preenchido com água? Por exemplo, se inseríssemos uma coroa de 1 kg de massa, com 15 g/cm³ de densidade (valor intermediário entre a densidade do ouro e da prata) e de raio igual a 10 cm em um recipiente cilíndrico de 15 cm de raio, a subida do nível do líquido seria*

*perceptível?*³. O professor permite que os estudantes retornem aos excertos históricos a fim de elaborarem respostas para os questionamentos e os ouve com atenção. Para subsidiar a mediação das discussões, o texto do Produto Educacional dialoga com o professor trazendo elementos que possam auxiliá-lo (por exemplo, vide Quadro 2).

Quadro 2: Subsídios para mediação da discussão sobre versão vitruviana do episódio histórico

Para conhecimento do professor: Vitruvius não indicou em que fonte se baseou. Provavelmente, a versão que ele apresentou em seu livro se amparava em boatos que existiam na época sobre o caso. Lembre-se que Vitruvius viveu 130 anos após a morte de Arquimedes. Quão fidedigno um boato se torna após mais de um século sendo reproduzido por pessoas diferentes até chegar a Vitruvius? Tenha isso em mente para essa discussão com os estudantes.

Para conhecimento do professor: segundo Martins (2000), é provável que um escravizado fosse o responsável por preparar a banheira para Arquimedes, já que ele gozava de certo prestígio social. Dessa forma, não é presumível que esse servo enchesse a banheira até a borda, já que teria que limpar o ambiente destinado ao banho.

Fonte: elaborado pelos autores.

Em seguida, na aplicação da sequência didática, o professor continua questionando os alunos sobre a confiabilidade da narrativa de Vitruvius do ponto de vista físico, destacando indagações que remetem ao efeito da tensão superficial do líquido: *O que acontece com um copo de água quando o enchemos até a borda? Ele derrama imediatamente? E se inserirmos uma moeda nesse copo, o que acontece?*

O docente media uma atividade experimental demonstrativa de cunho investigativo. Essa atividade a ser realizada em aula consiste na inserção paulatina de moedas em um copo cheio de água. Segundo Carvalho (2010, p. 64), "a demonstração deve apresentar não só o fenômeno em si, mas criar oportunidade para a construção científica de um dado conceito ligado a esse fenômeno". Sendo assim, ao inserir moedas no copo com água, importa não só a "leitura" do fenômeno, mas também a construção do conceito de tensão superficial para explicar o motivo do não extravasamento do líquido.

Para que essa atividade seja realizada de modo dialogado, oportunizando situações em que os estudantes formulem e discutam hipóteses, alguns questionamentos são paulatinamente propostos: *O que vai acontecer se inserirmos uma moeda bem lentamente nesse copo que está cheio? E se inserirmos mais uma? Ainda não derramou... Quantas moedas vocês acham que conseguiremos inserir antes de o líquido extravasar? O líquido derrama logo após superar o nível da borda do copo? Por que isso acontece? Por que a água não extravasa imediatamente? Quando o líquido transborda, vocês acham que o volume de água derramado é igual ao volume das moedas inseridas?* Como demonstramos em vídeo que traz o procedimento gravado, é possível inserir cuidadosamente várias moedas em um copo, antes que a água transborde (Figura 4).

Considerando a realização de ensaio análogo em sala de aula, espera-se que os estudantes percebam que, dependendo da forma como as moedas são inseridas, o extravasamento pode ocorrer com a inserção de mais ou menos moedas. Isso é um ponto interessante a ser discutido, já que influencia diretamente no volume de líquido que irá transbordar.

³ Posteriormente, na sequência didática, em momento de organização do conhecimento, uma demonstração baseada nesse questionamento é realizada (Quadro 3).



Figura 4: Experimento para discutir sobre a tensão superficial da água

Fonte: elaborado pelos autores⁴.

Etapa 1 - Organização do Conhecimento

O professor ouve as explicações dos estudantes para o fenômeno visualizado anteriormente e, a partir disso, apresenta o conceito de tensão superficial. Para isso, relaciona o fenômeno observado às interações intermoleculares responsáveis por gerar uma força resultante que mantém as moléculas da superfície unidas. São apresentadas situações em que a tensão superficial desempenha um papel importante. Como exemplo, pode-se citar o formato esférico das gotas de chuva e o porquê de alguns insetos permanecerem sobre uma lâmina de água, mesmo quando suas densidades são superiores à do líquido. Em seguida, é retomada a definição conceitual da grandeza densidade, explicitando que, para um valor de massa constante, quanto menor a densidade, maior o volume. Ainda nessa etapa, de forma dialogada, estimulando a participação dos alunos, o professor demonstra a variação do nível da água caso inseríssemos uma coroa de 1 kg de massa, com 15 g/cm³ de densidade e de raio igual a 10 cm, em um recipiente cilíndrico de 15 cm de raio. A variação obtida seria de aproximadamente 0,94 mm (Quadro 3).

Quadro 3: Demonstração da variação do nível do líquido ao se inserir uma coroa em recipiente

Consideremos uma coroa de 1 kg de massa e 15 g/cm³ de densidade. Seu volume será dado pela expressão abaixo.

$$V = \frac{m}{d} = \frac{1000 \text{ g}}{15 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \cong 66,7 \text{ cm}^3$$

Ao inserirmos essa coroa em um recipiente cilíndrico de 15 cm de raio (r) e que possui base de área circular A , a variação do nível do líquido será expressa pelo seguinte.

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{A} = \frac{66,7 \text{ cm}^3}{\pi \times r^2} = \frac{66,7 \text{ cm}^3}{3,14 \times 225 \text{ cm}^2} = 0,094 \text{ cm} = 0,94 \text{ mm}$$

Note que a variação de volume foi considerada exatamente igual ao volume da coroa inserida no recipiente. Perceba ainda que a variação do nível do líquido foi menor que 1 mm, apontando para a inviabilidade do método descrito por Vitruvius.

Fonte: elaborado pelos autores.

Esse momento tem como objetivo que os estudantes percebam quão ínfima é a mudança do nível da coluna de água quando o objeto é submergido. É desejável, ainda, que os alunos comparem esse resultado com a projeção da água acima do nível do copo no experimento realizado anteriormente. Espera-se, desse modo, que os estudantes percebam que, na situação de inserção das moedas no copo, o volume deslocado de líquido não parece corresponder ao volume total das moedas inseridas no recipiente.

⁴ Disponível em: <https://youtu.be/9LZE8hlv4M8>

Etapa 1 - Aplicação do conhecimento

O professor retoma o episódio histórico de Arquimedes e a coroa do rei, com o objetivo de que os discentes notem como os fatores estudados podem influenciar na aceitação de que o método descrito por Vitruvius teria sido mesmo utilizado por Arquimedes. Sendo assim, realiza paulatinamente as indagações: *De que forma a tensão superficial influenciaria no método descrito por Vitruvius? Considerando esses dois elementos do ponto de vista físico (a tensão superficial da água e o resultado da variação de nível), o que podemos pensar sobre a narrativa de Vitruvius? E considerando o ponto de vista histórico, o que podemos afirmar sobre a sua confiabilidade? Considerando a inviabilidade do método vitruviano, de que outra forma Arquimedes poderia ter solucionado o problema que lhe foi demandado?*

Espera-se que os alunos indiquem que o transbordamento da água seria dificultado ou até mesmo impossibilitado pela tensão superficial. Devem, ainda, tomar como referência o fato, estudado anteriormente, de que a variação do nível do líquido seria mínima. Do ponto de vista histórico, espera-se que os estudantes concluam que não é coerente pensar que Vitruvius, vivendo dois séculos após Arquimedes, tivesse ciência do método exato usado para resolução do problema. Além disso, não há indicações de fontes nas quais Vitruvius se baseou, ao passo que Arquimedes nada nos deixou sobre o assunto. Presume-se, ainda, que os discentes notarão que seria insensato um escravizado encher uma banheira até o seu limite, a ponto de que transbordasse quando alguém a adentrasse. Por fim, considerando a implausibilidade da narrativa vitruviana, de que *outra forma* Arquimedes poderia ter solucionado o problema que lhe foi demandado? Essa indagação abre caminho para a segunda parte da sequência didática, com a apresentação de um trecho da obra *La Bilancetta*, de Galileu, e a solução do problema a partir de uma Balança Hidrostática.

Etapa 2 - Problematização inicial

A obra *La Bilancetta* foi uma das primeiras escritas por Galileu, embora só tenha sido publicada em 1644, após a sua morte. Foi seu primeiro texto em italiano. Ao escrevê-lo, ele era um estudante de 22 anos, na Universidade de Florença, muito interessado na produção intelectual de Arquimedes. O texto de poucas páginas circulou como manuscrito e recebeu acréscimos de intelectuais da época, com os quais Galileu discutiu. Nessa obra, ele critica a narrativa vitruviana segundo a qual Arquimedes teria resolvido o problema da coroa a partir da medida de volumes de água deslocados, indicando, em contrapartida, que o estudioso grego poderia ter utilizado uma Balança Hidrostática (Lucie, 1986; Mottana, 2017).

No momento de problematização, é realizada a leitura coletiva de um pequeno trecho traduzido do *La Bilancetta*, cuja autoria inicialmente não é informada aos estudantes:

Os que leem com cuidado os autores antigos estão familiarizados com o fato de Arquimedes ter descoberto o furto do ourives na coroa de ouro de Hieron. No entanto, creio que até agora não se sabe como procedeu aquele homem ilustre para chegar a essa descoberta. [...] Acreditaria sim que, difundindo-se a notícia de que Arquimedes havia descoberto o furto por meio da água, algum autor contemporâneo terá deixado algum relato do fato; e que o mesmo, ao acrescentar qualquer coisa ao pouco que havia entendido pelos rumores espalhados, disse que Arquimedes havia utilizado a água, de modo que passou a ser o universalmente aceito. Porém, o fato de eu saber que esse método era de todo falho, faltando-lhe a precisão requerida nas coisas matemáticas, levou-me muitas vezes a cogitar sobre a maneira pela qual se pudesse descobrir, por meio da água e de modo rigoroso, a composição da liga de dois metais (Galilei, 1986, p. 105).

Tomando como base referenciais teóricos relacionados à utilização didática de fontes primárias (Wineburg, 2010; Batista; Drummond; Freitas, 2015; Silva; Guerra, 2015), alguns questionamentos são paulatinamente propostos aos alunos: *O que pensa o autor sobre o método que Vitruvius atribui a Arquimedes? O autor do texto acredita que Arquimedes usou mesmo o método? Por quê? Na opinião do autor, por que teria surgido essa narrativa falsa, isto é, como Vitruvius teria chegado à conclusão de que Arquimedes utilizou aquele método?*

Espera-se que os estudantes percebam que o autor do texto não acreditava que o método descrito por Vitruvius realmente tivesse sido utilizado por Arquimedes. Além disso, tem-se a expectativa de que percebam que Vitruvius, na opinião daquele autor, deve ter se baseado em alguma informação circulante sobre Arquimedes ter utilizado água, e supôs, sem fontes confiáveis e de maneira equivocada, algo que ele poderia ter feito. Em seguida, o docente indaga os alunos sobre a possível autoria do texto lido, se eles o conhecem ou se teriam alguma ideia de quem poderia ser. A partir desse questionamento, o professor atribui a autoria do texto a Galileu Galilei e pergunta aos alunos sobre o que conhecem a respeito desse personagem histórico: *Em que época viveu Galileu? Ele foi contemporâneo de Arquimedes? O que vocês conhecem sobre Galileu?* Após ouvir os estudantes, o professor situa Arquimedes, Vitruvius e Galileu em uma linha do tempo, deixando claro que Arquimedes e Galileu estão separados por quase 1800 anos.

Prosseguindo, o docente apresenta informações biográficas de Galileu⁵, indicando seu interesse pela obra de Arquimedes, e em que momento e circunstâncias da vida de Galileu foi escrito o *La Bilancetta*, do qual faz parte o excerto discutido. Nessa contextualização histórica, é importante deixar claro que, justamente por ter estudado os trabalhos de Arquimedes, Galileu tinha propriedade para discordar da narrativa de Vitruvius e sugerir outra hipótese sobre como Arquimedes teria procedido. Por fim, a questão da confiabilidade desse método é retomada: *Mas, afinal, vocês conseguem se lembrar quais fatores justificam a desconfiança em relação ao suposto método narrado por Vitruvius? Há fatores físicos e históricos...* Mediando a discussão, esses fatores são lembrados e registrados em quadro pelo professor: tensão superficial da água, subida do nível da água praticamente imperceptível, para quê o escravizado encheria a banheira até a borda, Arquimedes não registrou o episódio, Vitruvius não viveu naquela época.

Em seguida, o docente chama atenção para o fato de que, na visão de Galileu, provavelmente, Vitruvius ouviu dizer que Arquimedes teria solucionado o problema utilizando água e, a partir disso, teria imaginado o método baseado em medidas de volume. O docente, então, propõe um questionamento que levará à sugestão de uma hipótese alternativa sobre o método utilizado por Arquimedes: *Que método, envolvendo a utilização de água, Arquimedes teria empregado para resolver o impasse da falsificação da coroa?*

Para mediar a percepção de uma hipótese metodológica alternativa, o professor retoma a biografia de Arquimedes, enfatizando o estudo das alavancas. Por fim, apresenta uma Balança Hidrostática, como um mecanismo baseado na ideia de alavanca, cujo funcionamento é atrelado à água. Disponibiliza o instrumento para que os alunos o manipulem e registra possíveis sugestões para o seguinte questionamento: *Como a Balança Hidrostática poderia ser utilizada por Arquimedes para descobrir se havia fraude na coroa?*

Na Figura 5, temos uma Balança Hidrostática elaborada com materiais de baixo custo: um escalímetro, uma mamadeira graduada (contrapeso à direita), barbantes, um recipiente transparente com água e uma rede contendo bolas de gude (inserida na água à esquerda).

⁵ O professor pode ter acesso a essas informações consultando a introdução de Lucie (1986) à versão traduzida do *La Bilancetta*, disponível em <GALILEO E A TRADIÇÃO ARQUIMESEANA | Cadernos de História e Filosofia da Ciência (unicamp.br)>. Pode também ser utilizada a postagem “Galileo: para além dos mitos”, da plataforma Universo Racionalista, disponível em: <https://universoracionalista.org/galileo-para-alem-dos-mitos/>.

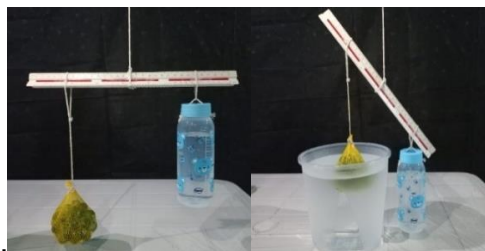


Figura 5: Balança Hidrostática com materiais de baixo custo
Fonte: elaborada pelos autores.

Etapa 2 - Organização do conhecimento

Com a Balança Hidrostática em mãos, o professor media uma demonstração investigativa dialogada, seguindo as indicações de Carvalho (2010) para a realização desse tipo de atividade experimental. Utiliza-se uma Balança Hidrostática de baixo custo, com 30 cm de comprimento, que pode girar em torno do seu centro de gravidade. São utilizadas duas amostras de mesma massa e diferentes densidades (sendo importante os alunos perceberem que os volumes são distintos), e um contrapeso também de mesma massa (Figuras 6 a 10). No decorrer da atividade experimental, são realizados questionamentos a fim de estimular a percepção dos estudantes e a elaboração de hipóteses, que são paulatinamente testadas. Inicialmente, temos uma balança usual no ar: *Se colocarmos uma das amostras a uma distância de 10 cm do eixo de rotação (fixado no centro de gravidade), onde precisaremos colocar o contrapeso para a balança ficar equilibrada (Figura 6)?*



Figura 6: Representação da balança na situação narrada
Fonte: elaborada pelos autores.

Uma das amostras e o contrapeso de mesma massa estão em equilíbrio no ar, quando equidistantes do eixo de rotação da balança: *O que acontece se inserirmos a amostra na água?* O procedimento é realizado após os alunos ensaiarem suas hipóteses (Figura 7).

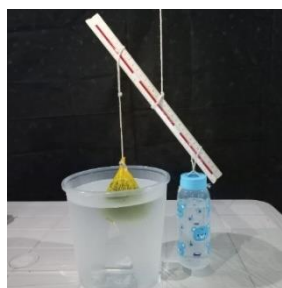


Figura 7: A amostra é inserida na água e a balança se desequilibra
Fonte: elaborada pelos autores.

O que precisamos fazer com o contrapeso para reestabelecer o equilíbrio? O professor testa as hipóteses sugeridas até que o equilíbrio seja reestabelecido (Figura 8).

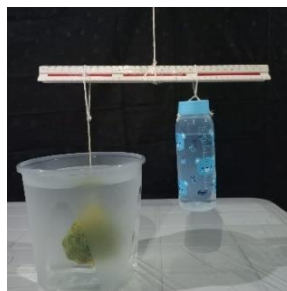


Figura 8: Equilíbrio reestabelecido ao aproximar o contrapeso (recipiente azul) do eixo de rotação
Fonte: elaborada pelos autores.

Alterando a amostra por outra de menor densidade, mas de mesma massa, o professor repete os procedimentos anteriores, realizando questionamentos (Figura 9).



Figura 9: O procedimento é repetido com uma amostra de menor densidade
Fonte: elaborada pelos autores.

Dessa vez é necessário mover o contrapeso para mais perto do eixo de rotação ou para uma posição mais distante? Novamente, o procedimento é realizado após os alunos ensaiarem suas hipóteses (Figura 10).

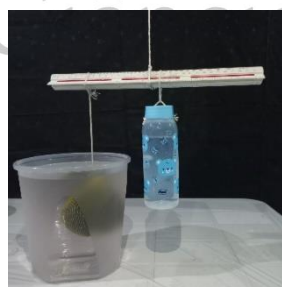


Figura 10: Equilíbrio reestabelecido ao aproximar o contrapeso ainda mais do eixo de rotação
Fonte: elaborado pelos autores.

Prosseguindo as discussões temos: *Se fosse utilizada uma amostra com densidade ainda menor, onde o contrapeso precisaria ser colocado para reestabelecer o equilíbrio? Voltando à situação em que a amostra é colocada na água, o que faz surgir aquele desequilíbrio? O que faz a amostra "pesar" menos na água?*

Finalmente, são indicados questionamentos para que os alunos expandam suas reflexões sobre o episódio da coroa, abrindo caminho para a introdução de uma perspectiva ainda a ser contemplada: *O que vocês concluem a partir do que observamos e discutimos? Voltando ao problema da coroa do rei, se o ourives substituísse uma parte da massa de ouro por prata, o que aconteceria com a densidade da coroa? Como a Balança Hidrostática poderia ser aplicada na resolução do problema da coroa?*

Ainda nesse momento de organização do conhecimento, na Etapa 2, sugere-se que o professor apresente o enunciado do Princípio de Arquimedes na sua versão atual, o qual indica que um objeto imerso totalmente ou parcialmente em um fluido sofre uma força de empuxo, de baixo para cima, igual ao peso do volume de fluido deslocado. O docente, em seguida, apresenta o desenvolvimento matemático habitualmente contemplado nesse conteúdo nos LD. Podem ser apresentados exemplos de atuação da força de empuxo, como a flutuação de navios e balões, e a sensação de “pesar” menos quando estamos imersos na água. É importante que seja enfatizada a relação de proporcionalidade entre o módulo da força de empuxo e o volume submerso do objeto no fluido, deixando claro que, quanto maior volume o submerso, maior o empuxo que atuará sobre o corpo.

Contextualizando historicamente, é importante que o professor diferencie como concebemos atualmente a validade do Princípio de Arquimedes da validade estabelecida por Arquimedes em sua obra *Sobre os corpos flutuantes*. Deve sinalizar, ainda, conceitos, terminologia e notação matemática que não estão contidos no trabalho de Arquimedes, registrando-os como fruto de construção histórica coletiva do conhecimento. Como mencionamos anteriormente, se consultarmos o tratado *Sobre os corpos flutuantes* (Assis, 1996) podemos notar que a argumentação usada por Arquimedes para demonstrar o Princípio é baseada em propriedades da geometria euclidiana.

Em momento algum, Arquimedes cita experimentos para corroborar a sua demonstração geométrica. É importante que o docente tenha em seu horizonte que a notação atual usada para demonstrar o Princípio de Arquimedes é fruto das contribuições de vários autores, dentre os quais, Newton (1643 – 1727) e seus seguidores. A concepção de peso como uma força relacionada à interação gravitacional entre duas massas, por exemplo, não existia no século II a.C. Além disso, o princípio enunciado por Arquimedes se referia somente a líquidos, enquanto atualmente é considerado válido para fluidos em geral (líquidos e gases). Historicamente, o mesmo caminho em relação à ampliação do escopo de validade ocorreu também com o Princípio de Pascal (Anselmo; Hidalgo; Queiroz, 2020; Hidalgo; Queiroz; Anselmo, 2021).

Os conceitos físicos abordados são, em sequência, acionados na discussão da Balança Hidrostática. Citando trecho da obra *La Bilancetta*, o docente explica como Galileu Galilei sugeriu que a balança teria sido utilizada por Arquimedes para resolver o problema da coroa.

E, finalmente, após haver cuidadosamente revisto o que Arquimedes demonstra nos seus tratados "Dos corpos que flutuam sobre a água" e "Dos corpos de mesmo peso", me veio à mente um método que resolve o problema de maneira perfeita. Até acreditaria ser esse mesmo o método que usou Arquimedes, ao observar que, além de ser extremamente preciso, apoia-se em demonstrações descobertas pelo próprio Arquimedes (Galilei, 1986, p. 105).

Contextualizando, indica-se que Galileu chegou a essa conclusão ao estudar o trabalho de Arquimedes sobre alavancas, e levar em conta que circulava na época de Vitruvius a informação de que o método de Arquimedes envolveria água. Com o apoio de imagens, o docente discute o método para a resolução do problema da coroa por meio da Balança Hidrostática. São apresentadas figuras da balança em diferentes situações (Figuras 11 a 14). A discussão proposta toma como base o Princípio estudado no passo anterior. A seguir registramos exemplos de questionamentos a serem acionados na mediação das discussões.

Por que a balança fica desequilibrada quando o ouro é colocado na água? Do que depende o módulo da força de empuxo que atua sobre o ouro? (Figura 11).

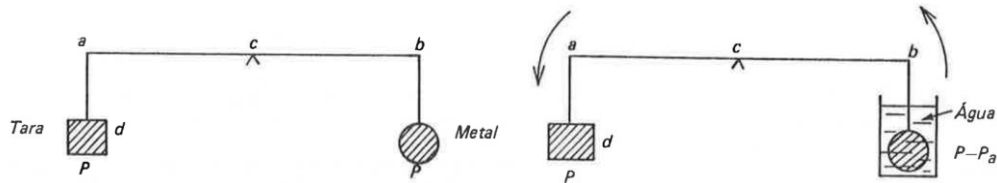


Figura 11: Metal e contrapeso de mesma massa em equilíbrio no ar. Desequilíbrio provocado pela imersão do metal em água. Fonte: LUCIE, 1986, p. 97.

De que forma isso é compensado pelo deslocamento do contrapeso para mais próximo do eixo de rotação (c)? (Figura 12).

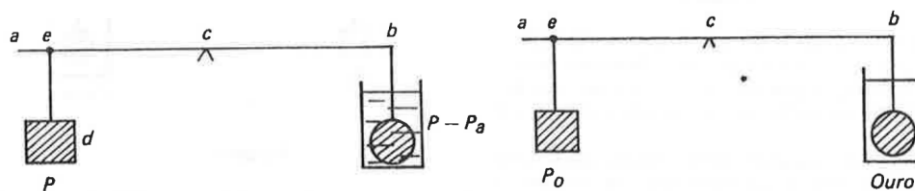


Figura 12: Contrapeso é aproximado do eixo de rotação (c) para reestabelecer o equilíbrio. Fonte: LUCIE, 1986, p. 99

Por que a balança fica desequilibrada quando a prata é colocada na água? O volume que a prata ocupa é maior ou menor que o volume ocupado pela amostra de ouro de mesma massa? O empuxo que atua sobre a prata é maior ou menor que o empuxo que atua sobre o objeto de ouro? Como isso influencia na posição que o contrapeso precisa assumir para a balança ficar em equilíbrio novamente? (Figura 13).

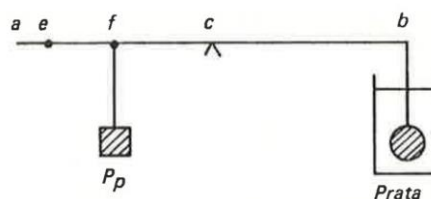


Figura 13: A balança retorna ao equilíbrio quando o contrapeso é movido, para o caso em que a amostra é de prata pura. Fonte: LUCIE, 1986, p. 100.

Na situação em que é utilizada uma liga de ouro e prata (Figura 14), como o volume desse objeto se relaciona com os volumes dos corpos feitos de ouro e prata puros? E o empuxo exercido sobre esse corpo formado por uma liga, como se relaciona com o empuxo sofrido pelos outros dois corpos?

Finalizando essa sequência de discussões, pode-se propor um questionamento que interliga as situações estudadas ao episódio histórico da coroa do rei: *E, então, o que ocorreria em caso de fraude se a coroa fosse inserida na água...?*

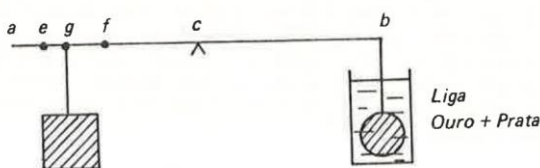


Figura 14: Balança retorna ao equilíbrio quando o contrapeso é movido, para o caso em que a amostra é uma liga de ouro e prata.

Fonte: LUCIE, 1986, p. 100.

Em seguida, um trecho do *La Bilancetta*, que explica o funcionamento da balança, é lido em conjunto com os estudantes. Novamente, com a utilização das Figuras 11 a 14, novos questionamentos são realizados.

Admitamos então que o peso (b) seja de ouro e que, ao pesá-lo em água, o contrapeso tenha de ser levado até (e); e, a seguir, procedendo do mesmo modo com prata pura, o contrapeso seja levado até (f), ponto que está mais próximo do ponto (c), como mostra a experiência, já que a prata é menos densa que o ouro. [...] Se agora tivéssemos uma liga de ouro e prata, está claro que, contendo prata, pesará menos [terá menor densidade] que o ouro puro e, contendo ouro, pesará mais [terá maior densidade] que a prata pura. Portanto, pesada no ar e querendo que o mesmo contrapeso a equilibre quando estiver mergulhada em água, será preciso aproximar o contrapeso até uma posição mais próxima do fulcro (c) que o ponto (e), marco correspondente ao ouro, e mais afastada que (f), marco correspondente à prata pura. Portanto, [o contrapeso] está situado entre os marcos (e) e (f), e a proporção dos dois metais na liga será perfeitamente determinada pela razão em que [a posição do contrapeso] divide a distância "ef" (Ggalilei, 1986, p. 106).

Extrapolando a interpretação do documento histórico, o professor propõe paulatinamente as seguintes reflexões: *Suponham que a coroa contivesse muito mais prata do que ouro, ao inseri-la na água, o equilíbrio seria obtido com o contrapeso mais próximo de (e) ou de (f)? Imaginem agora que um percentual pequeno de ouro foi substituído por prata, o contrapeso precisaria ser deslocado para mais perto de (e) ou de (f)? E se o ourives fosse inocente? O contrapeso precisaria ser deslocado para qual ponto para se reestabelecer o equilíbrio na água?*

Busca-se, assim, recorrendo ao diálogo com os estudantes, construir de modo coletivo a possibilidade de utilização da Balança Hidrostática para resolver o problema da coroa. Discute-se que, quanto maior o volume ocupado pelo objeto, para mais próximo do eixo de rotação será necessário mover o contrapeso, já que maior será o módulo da força de empuxo atuante sobre ele.

Ao final desse passo, é importante que o professor mencione que a versão de Galileu para o episódio é reforçada por evidências históricas encontradas posteriormente, as quais atribuem a Balança Hidrostática a Arquimedes. Esses indícios elencados por Martins (2000) são creditados ao trabalho investigativo realizado por Marcel Berthelot (1891), no final do século XIX. Ele localizou um poema latino do século IV ou V d.C., que descreve e atribui o método Balança Hidrostática a Arquimedes, como solução para o problema da coroa.

Em sequência, busca-se evidenciar a existência de um limite de validade para o Princípio de Arquimedes. Para discutir o chamado Paradoxo Hidrostático de Galileu (Silveira; Medeiros, 2009), realiza-se uma demonstração investigativa dialogada (Carvalho, 2010). Nessa atividade

experimental, tem-se uma latinha com 350 ml de refrigerante e um recipiente que contém somente 280 ml de água. A latinha é inserida no recipiente e flutua (FIGURA 15). Contudo, caso o enunciado usual do Princípio de Arquimedes fosse válido nessa situação, a latinha precisaria deslocar 350 ml de líquido para ser equilibrada (considerando sua densidade aproximadamente igual à da água). Isso porque o Princípio de Arquimedes indica que o módulo da força de empuxo é igual ao módulo do peso do volume de líquido deslocado pelo objeto.



Figura 15: Demonstração do Paradoxo Hidrostático de Galileu

Fonte: elaborada pelos autores, baseada em Silveira e Medeiros (2009).

O professor, então, questiona: *Pelo enunciado do Princípio de Arquimedes, qual volume de líquido seria deslocado para a latinha ficar em equilíbrio? Por esse enunciado, há líquido suficiente no recipiente para a latinha flutuar? Como é possível ocorrer o que estamos observando?*

O docente indica que o enunciado tradicional do Princípio de Arquimedes - "um objeto imerso totalmente ou parcialmente em um fluido sofre uma força de baixo para cima igual ao peso do volume de fluido deslocado pelo objeto" - possui um limite de validade. O enunciado somente é aplicável quando as dimensões do recipiente são muito maiores que as dimensões do objeto. Por fim, um enunciado revisto do Princípio, que evita o Paradoxo Hidrostático, é apresentado: "todo corpo mergulhado em um líquido sofre um empuxo de baixo para cima igual ao peso do fluido contido em um volume idêntico ao volume submerso do corpo no fluido" (Silveira e Medeiros, 2009, p. 289). No caso do exemplo sugerido para discussão, por mais que só haja 280 ml de líquido no recipiente, praticamente todo o volume da latinha está submerso. Isso torna o enunciado revisto, apresentado anteriormente, aplicável.

Etapa 2 - Aplicação do conhecimento

Retornando à Balança Hidrostática, o professor prepara um conjunto com certa massa, composto por bolinhas de gude e moedas idênticas em proporção desconhecida. Como atividade, propõe aos alunos que determinem essa proporção. Para isso, o docente prepara mais dois conjuntos, com a mesma massa do que vai ser estudado, um contendo somente moedas e, o outro, somente bolinhas de gude. Primeiramente, utilizando um contrapeso de mesma massa que os três conjuntos, manipula-se aquele composto somente por bolinhas de gude. Algumas questões são progressivamente apresentadas à turma: *Já que o contrapeso e o conjunto de bolinhas de gude possuem a mesma massa, qual deve ser a distância de ambos ao eixo de rotação para que fiquem em equilíbrio no ar? Se inserirmos as bolinhas de gude na água, o que acontecerá com o sistema? Realizando esse procedimento, por que o equilíbrio é perturbado? Que força passa a atuar sobre as bolinhas de gude? Movendo o contrapeso, como é possível fazer com que a balança retorne ao equilíbrio?*

O docente pede que os alunos tomem nota da posição do contrapeso quando o equilíbrio é reestabelecido na situação anterior. Em seguida, repete-se o mesmo procedimento para o conjunto contendo somente moedas, bem como para o mesclado, que possui moedas e bolinhas de gude. Por fim, é solicitado que os estudantes analisem a posição para a qual o contrapeso foi levado nas três situações anteriores: *A posição do contrapeso, que reestabelece o equilíbrio quando usamos o conjunto composto por moedas e bolinhas de gude, se aproxima mais da sua posição quando usamos apenas bolinhas de gude ou daquela quando usamos*

somente moedas? Dessa forma, vocês acham que temos uma massa maior de moedas ou de bolinhas de gude no conjunto mesclado? Como podemos estimar a relação entre essas massas?

O professor registra possíveis sugestões dos alunos. De modo dialogado, estimulando a participação da turma, demonstra matematicamente como obter as massas de cada porção distinta no conjunto mesclado (Quadro 4). A relação obtida é utilizada para a situação estudada, de modo que os alunos possam encontrar a proporção entre as massas dos objetos.

Quadro 4: Obtenção da massa das moedas e das bolinhas de gude no conjunto mesclado.

A expressão discutida é mostrada abaixo, em que $X_{conjunto}$ é a posição de equilíbrio do contrapeso para cada tipo de conjunto imerso em água.

$$\frac{M_{bolinhas\ de\ gude}}{M_{moedas}} = \frac{X_{moedas+bolinhas\ de\ gude} - X_{moedas}}{X_{bolinhas\ de\ gude} - X_{moedas+bolinhas\ de\ gude}} \quad (1)$$

$$M_{bolinhas\ de\ gude} = \frac{X_{moedas+bolinhas\ de\ gude} - X_{moedas}}{X_{bolinhas\ de\ gude} - X_{moedas+bolinhas\ de\ gude}} \cdot M_{moedas} \quad (2)$$

É importante lembrar que todos os conjuntos possuem a mesma massa M (a qual é previamente conhecida), de modo que podemos usar a expressão abaixo para descobrir a massa das bolinhas de gude e das moedas presentes no conjunto mesclado.

$$M_{bolinhas\ de\ gude} + M_{moedas} = M \quad (3)$$

Substituindo a equação (2) na igualdade (3), obtemos o seguinte:

$$\frac{X_{moedas+bolinhas\ de\ gude} - X_{moedas}}{X_{bolinhas\ de\ gude} - X_{moedas+bolinhas\ de\ gude}} \cdot M_{moedas} + M_{moedas} = M \quad (4)$$

A partir disso, é possível determinar a massa das moedas e, posteriormente, a massa das bolinhas de gude.

Fonte: elaborado pelos autores.

Por fim, o docente solicita que os alunos respondam, como atividade para casa, a um questionário com 11 perguntas: 1) Segundo o método narrado por Vitruvius, como Arquimedes teria determinado se a coroa havia sido fraudada?; 2) Que fatores físicos descredibilizam a versão descrita por Vitruvius?; 3) Que fatores históricos descredibilizam a versão descrita por Vitruvius?; 4) O que Galileu aponta sobre a versão de Vitruvius?; 5) Segundo Galileu, Arquimedes teria usado uma Balança Hidrostática para analisar o caso da coroa. O que Arquimedes teria feito para saber se houve fraude?; 6) Que fatores históricos contribuem para o fortalecimento da versão apresentada por Galileu?; 7) Qual a relação entre o módulo do empuxo atuante sobre um objeto e seu volume submerso?; 8) Ao submergir na água uma coroa composta por ouro e prata e uma amostra de ouro de mesma massa, qual dos objetos sofrerá um empuxo maior?; 9) Podemos dizer que o princípio elaborado por Arquimedes, no século III a.C., é idêntico ao que consideramos hoje como Princípio de Arquimedes? (reflita, por exemplo, sobre a sua aplicabilidade, os termos usados na redação etc.); 10) Considerando o questionamento anterior, o que isso sugere sobre a natureza do conhecimento científico? e 11) O enunciado do Princípio de Arquimedes tem um limite de validade? Explique. Para responder a essa questão, lembre-se do experimento sobre o Paradoxo Hidrostático.

O questionário promove uma reflexão historicamente contextualizada sobre o conhecimento físico Princípio de Arquimedes, remetendo à sua validade e ao seu desenvolvimento, bem como sugere uma extrapolação no que tange a refletir sobre a provisoriabilidade da ciência. Esse questionário, caso o docente deseje, pode ser utilizado de forma avaliativa ou para retomada dos elementos abordados na sequência didática.

CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O PRODUTO EDUCACIONAL E SUA APLICAÇÃO

A partir dessa abordagem, sob os pontos de vista físico conceitual e histórico-filosófico, é possível contemplar a temática do Princípio de Arquimedes de forma mais completa do que os LD usuais no mercado. Espera-se, dessa forma, que os estudantes alcancem uma concepção mais consistente, histórica e fisicamente fundamentada desse conteúdo, bem como uma visão mais adequada a respeito da natureza do trabalho científico, afastada do entendimento de que a ciência resulta de insights a partir de observações casuais repentinas.

O Produto Educacional, na forma apresentada nesse trabalho, foi aplicado, em agosto de 2023, em intervenção da qual participaram 24 alunos de cursos técnicos integrados ao ensino médio do Instituto Federal do Piauí – campus Corrente. Desses estudantes, 22 cursavam o 3º ano do curso técnico integrado em informática e 2 cursavam o 1º ano do curso técnico integrado em meio ambiente. Os discentes da turma do 3º ano de informática possuíam, em sua maioria, idades entre 17 e 18 anos. Já os matriculados no 1º ano do curso técnico integrado em meio ambiente tinham 15 anos de idade. Nessa ocasião, o questionário (previamente validado em uma aplicação piloto), foi utilizado como instrumento de pesquisa, de modo que os dados obtidos serviram como base para investigarmos o impacto da intervenção junto aos estudantes, tendo em vista os objetivos previamente estabelecidos⁶.

A participação dos discentes durante a aplicação e as suas respostas ao questionário evidenciaram que, de modo geral, eles obtiveram êxito em compreender os métodos narrados por Vitruvius e Galileu para a resolução do problema da adulteração da coroa. Além disso, expressaram adequadamente os fatores físicos e históricos que trazem maior credibilidade à versão galileana se comparada à vitruviana. No que tange a concepções sobre a NdC, resultados interessantes foram percebidos. Boa parte dos participantes da intervenção ressaltaram a provisoriedade do conhecimento científico quando questionados sobre as alterações que o Princípio de Arquimedes sofreu ao longo dos séculos.

Quanto ao conteúdo físico do Princípio de Arquimedes, os alunos evidenciaram de forma apropriada, durante a intervenção e nas respostas ao questionário, a relação de proporcionalidade direta entre o volume submerso dos objetos e o empuxo ao qual eles ficam submetidos, recorrendo, inclusive, a esse aspecto para explicar o funcionamento da Balança Hidrostática. No que concerne à compreensão do Paradoxo Hidrostático e do limite de validade para o Princípio de Arquimedes, notou-se dificuldade entre alguns participantes, sobretudo no entendimento do enunciado revisto do Princípio conforme proposto por Silveira e Medeiros (2009). Esse fato sugere a necessidade de uma abordagem cuidadosa quanto a esse recorte da sequência didática pelos docentes que desejarem aplicá-la.

Por fim, tendo em vista o que se pôde notar em sua aplicação, pode-se sugerir que a sequência didática tem potencial para contribuir não somente para a aprendizagem do conteúdo físico Princípio de Arquimedes, como também para a problematização do episódio histórico mais difundido relacionado a esse Princípio, possibilitando a abordagem de aspectos importantes sobre a NdC, como a discussão da provisoriedade da ciência e a crítica a visões individualistas e empírico-indutivistas da atividade científica.

Sugerimos a aplicação deste Produto Educacional no contexto do Ensino Médio. Não indicamos nenhum limite de utilização, mas recomendamos que o professor-mediador avalie a quantidade de alunos participantes, de modo a viabilizar a condução das discussões

⁶ Pode ser consultada em Santos Júnior (2023), uma apresentação detalhada dessa aplicação e da investigação realizada nesse processo, que consistiu em analisar os impactos que a sequência didática proposta pode promover na introdução dessa temática física na Educação Básica de nível médio.

propostas. Embora este Produto Educacional não tenha sido aplicado em diferentes ambientes, consideramos que ele apresenta grande potencial de replicabilidade.

Agradecimentos

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) pelo apoio à realização dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALLCHIN, Douglas. Scientific myth-conceptions. **Science education**, v. 87, n. 3, p. 329-351, 2003.

AMABIS, José et al. **Moderna plus**: ciências da natureza e suas tecnologias: Água e vida. 1. ed., v. 2, São Paulo: Moderna, 2020.

ANSELMO, Dory Hélio; HIDALGO, Juliana; QUEIROZ, Daniel. Pascal's principle revisited: A critical review of physics undergraduate textbooks. **EUROPEAN JOURNAL OF PHYSICS**, v. 41, p. 063001, 2020.

ASSIS, André. *Sobre os corpos flutuantes*, tradução comentada de um texto de Arquimedes. **Revista da SBHC**, n. 16, p. 69-80, 1996.

ASSIS, André. **Arquimedes, o Centro de Gravidade e a Lei da Alavanca**. 1. ed., Montreal: Editora Apeiron Montreal, 2008.

BALDINATO, José Otávio; PORTO, Paulo. Variações da História da Ciência no Ensino de Ciências. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, VI; 2008, Belo Horizonte. **Anais do VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**. Belo Horizonte, ABRAPEC, 2008.

BARRETO FILHO, Benigno; SILVA, Cláudio. **Física aula por aula**. Mecânica. São Paulo: FTD, 2016. v. 1.

BATALHA, Elisa; BENTO, Sílvio. **Arquimedes e a coroa**. Invivo, 2021. Disponível em: <<http://www.invivo.fiocruz.br/historia/arquimedes-e-a-coroa/>>. Acesso em: 25 fev. 2023.

BATISTA, Giovanninni; DRUMMOND, Juliana; FREITAS, Daniel. Fontes primárias no ensino de física: considerações e exemplos de propostas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, p. 663-702, 2015.

BERTHELOT, Marcel. Sur l'histoire de la balance hydrostatique et de quelques autres appareils et procédés scientifiques. **Annales de Chimie et de Physique** [série 6], v. 23, p. 475-485, 1891.

BONJORNO, José Roberto *et al.* **Física**. São Paulo: Editora FTD, 2016. v. 1.

BRASIL, MEC. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: MEC, 2018.

CARVALHO, Anna Maria. **As práticas experimentais no ensino de física**. In: Ensino de Física. Org. CARVALHO et al. Coleção ideias em ação. São Paulo: Editora Cengage, p. 53-77, 2010.

CAVICCHI, Elizabeth. Historical Experiments in Students' Hands: Unfragmenting Science through Action and History. **Science & Education**, v. 17, n. 7, p. 717–749, 2006.

CHALMERS, Allan. **O que é a ciência, afinal?** São Paulo: Brasiliense, 1993.

FORATO, Thaís; MARTINS, Roberto; PIETROCOLA, Maurício. Enfrentando obstáculos na transposição didática da história da ciência para a sala de aula. In: PEDUZZI, Luís Orlando; MARTINS, André; FERREIRA, Juliana (Orgs.) **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino**. Natal: EDUFRN, 2012. p. 123-154.

FUKUI, Ana et al. **Ser protagonista: ciências da natureza e suas tecnologias: composição e estrutura dos corpos: ensino médio**. 1. ed. v. 1. São Paulo: SM, 2020.

GALILEI, Galileu. *La Bilancetta* — A pequena balança ou Balança Hidrostática. Trad. de P. Lucie. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 9, p. 105–107, 1986.

GIL-PÉREZ, Daniel; MONTORO, Isabel; ALÍS, Jaime, CAPACHUZ, António; PRAIA, João. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 2, p. 125–153, 2001.

HIDALGO, Juliana; QUEIROZ, Daniel; ANSELMO, Dory Hélio. O Princípio de Pascal nos livros do PNLD 2018: uma análise crítica multicontextual (histórica e conceitual). **Revista Brasileira de Ensino de Física** (ONLINE), v. 43, p. e20210064-1-e20210064-21, 2021.

HIDALGO, Juliana; QUEIROZ, Daniel; OLIVEIRA, Mara Cristina. A História da Ciência no PNLD 2018: o Princípio de Arquimedes como estudo de caso. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 38, n. 2, p. 1251–1281, 2021.

HOLUBOVÁ, Renata. **Historical Experiments in Physics Teaching**. US-China Education Review A, v. 4, n. 3, p. 163-172, 2014.

HOTTECKE, Dietmar. How and what Can we learn from replicating historical experiments? A Case Study. **Science and Education**, v. 9, p. 343-362, 2000.

JARDIM, Wagner; GUERRA, Andreia. Experimentos históricos e o ensino de física: agregando reflexões a partir da revisão bibliográfica da área e da história cultural da ciência. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 22, n. 3, p. 244-263, 2017.

LANZA, Nasser; MANFRO, Julia; AMARAL-ROSA, Marcelo. "O mito é o nada que é tudo": o ensino de física e o caso do problema da coroa do rei Hierão. **Revista científica on-line: Tecnologia – Gestão – Humanismo**, v. 9, n. 1, p. 72-86, 2019.

LOPES, Sônia; ROSSO, Sérgio. **Ciências da Natureza Lopes e Rosso: Água, Agricultura e Uso da terra**. 1. ed., v. 1, São Paulo: Moderna, 2020.

LUCIE, Pierre. Galileu e a tradição arquimedea - *La Bilancetta*. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 9, p. 95–104, 1986.

LUZ, Antônio; ÁLVARES, Beatriz; GUIMARÃES, Carla. **Física: contexto & aplicações**. São Paulo: Scipione, 2017. v. 1.

MARTINS, André. Natureza da Ciência no ensino de ciências: uma proposta baseada em 'temas' e 'questões'. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, p. 703-737, 2015.

MARTINS, Roberto. Arquimedes e a coroa do Rei: problemas históricos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 17, n. 2, p. 115-121, 2000.

MARTINS, Roberto. Introdução: a história das ciências e seus usos na educação. In: SILVA, Cibelle (Org.). **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. p. XXI-XXXIV.

MARTINS, Roberto. O mito de Galileu desconstruído. **Revista de História da Biblioteca Nacional**, 5 (número especial de História da Ciência 1), p. 24-27, 2010.

MÉHEUT, Martine; PSILLOS, Dimitris. Teaching–learning sequences aims and tools for science education research. **International Journal Of Science Education**, v. 26, n. 5, p. 515-535, 2004.

MENDONÇA, Paula Cristina. De que conhecimento sobre Natureza da Ciência estamos falando? **Ciência & Educação**, n. 26, p. e20003-1-16, 2020.

MOTTANA, Annibale. Galileo's *La Bilancetta*: The first draft and later additions. **Philosophia Scientiæ**, v. 21, n. 1, p. 165-179, 2017.

MOURA, Cristiano; GUERRA, Andreia. Conflitos em abordagens históricas para temas consolidados na ciência escolar: um estudo de caso sobre os modelos atômicos. **Revista Tecné, Episteme y Didaxis**, número extra, p. 797-803, 2016.

MUENCHEN, Cristiane; DELIZOICOV, Demétrio. Os três momentos pedagógicos e o contexto de produção do livro "Física". **Ciência & Educação**, v. 20, n. 3, p. 617–638, set. 2014.

ORTEGA, Daniel; MOURA, Breno. Uma abordagem histórica da reflexão e da refração da luz. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, p. e20190114 -1-16, 2020.

PEDUZZI, Luís Orlando; RAICIK, Anabel. Sobre a natureza da ciência: asserções comentadas para uma articulação com a história da ciência. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 25, n. 2, p. 19-55, 2020.

PSILLOS, Dimitris; VASSILIS, Tselfes; KARIOTOGLOU, Petros. An epistemological analysis of the evolution of didactical activities in teaching–learning sequences: the case of fluids. **International Journal Of Science Education**, v. 26, n. 5, p. 555-578, 2004.

SANTOS JÚNIOR, Erisvaldo Ramalho dos. **O Princípio de Arquimedes no Ensino Médio: a Balança Hidrostática e o Paradoxo de Galileu**. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) - Polo 51, Sociedade Brasileira de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2023.

SASSERON, Lúcia Helena; NASCIMENTO, Viviane; CARVALHO, Anna Maria. O Uso de Textos Históricos Visando a Alfabetização Científica. In: BELTRAN, Maria Helena; SAITO, Fumikazu; SANTOS, Rosana; WUO, Wagner (Orgs.). **História da Ciência e Ensino**: propostas, tendências e construção de interfaces. São Paulo: Livraria da Física, 2009, v. 1, p. 96-106.

SILVA, Ana Paula; GUERRA, Andreia (Org.). **História da Ciência e Ensino**: Fontes Primárias e propostas para sala de aula. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.

SILVEIRA, Fernando; MEDEIROS, Alexandre. O paradoxo hidrostático de Galileu e a lei de Arquimedes. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 273–294, ago. 2009.

TORRES, Carlos *et al.* **Física: ciência e tecnologia**. 4. ed. São Paulo: Moderna, 2016. v. 1.

VITRUVIUS, Marcus. *De Architectura* IX. In: COHEN, M.; DRABKIN, I. (Orgs.). **A Source Book in Greek Science**. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, p. 238-239, 1958.

WINEBURG, Sam. Teaching Historical Thinking Using Primary Sources. **Teaching with Primary Sources Quarterly**, v. 3, n. 1, p. 01-08, 2010.

YAMAMOTO, Kazuhito; FUKU, Luiz Felipe. **Física para o ensino médio**. São Paulo: Saraiva, 2016. v. 1.



Revista
Ciências & Ideias