

A Balança Hidrostática e o Princípio de Arquimedes: impactos de uma sequência didática pautada em fontes primárias da História da Ciência⁺

Erisvaldo Ramalho dos Santos Júnior¹

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí

Nova Corrente – PI

Juliana Mesquita Hidalgo¹

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Natal – RN

Resumo

*Em materiais didáticos, no que diz respeito ao Princípio de Arquimedes, ainda é notada a reprodução da pseudo-história relacionada ao problema da adulteração da coroa do rei de Siracusa, narrada na obra *De Architectura*, por Marcus Vitruvius. Essa narrativa atribui a Arquimedes um método contraditório às evidências históricas, impreciso e fisicamente inviável. Em sua obra *La Bilancetta*, Galileu sugeriu que Arquimedes teria empregado uma Balança Hidrostática para resolver o problema da coroa. Sob o ponto de vista didático, a discussão desse mecanismo pode favorecer a abordagem do conceito de empuxo e do Princípio de Arquimedes. Assim, planejamos e aplicamos, no contexto da Educação Básica, uma sequência didática pautada na discussão de fontes primárias de Vitruvius e Galileu, e na reprodução de uma Balança Hidrostática como experimento histórico. Nesse trabalho, discutimos o impacto educacional da proposta, a partir da análise das respostas de estudantes que participaram dessa intervenção a um instrumento de pesquisa.*

Palavras-chave: *Princípio de Arquimedes; Balança Hidrostática; Experimento Histórico; Fontes Primárias.*

⁺ The Hydrostatic Balance and Archimedes' Principle: impacts of a didactic sequence based on primary sources from the History of Science

^{*} Recebido: 21 de maio de 2024.

Aceito: 3 de outubro de 2024.

¹ E-mails: erisvaldo.ramalho@ifpi.edu.br; julianahidalgo@fisica.ufrn.br

Abstract

*In teaching materials, regarding Archimedes' Principle, the reproduction of the pseudo-history related to the problem of the adulteration of the crown of the king of Syracuse, narrated in the work *De Architectura*, by Marcus Vitruvius, is still noted. This narrative attributes to Archimedes a method that is contradictory to historical evidence, imprecise and physically unfeasible. In his work *La Bilancetta*, Galileo suggested that Archimedes would have used a Hydrostatic Balance to solve the crown problem. From a didactic point of view, the discussion of this mechanism can favor the approach to the concept of buoyancy and Archimedes' Principle. Thus, we planned and applied, in the context of Basic Education, a didactic sequence based on the discussion of primary sources from Vitruvius and Galileo, and the reproduction of a Hydrostatic Balance as a historical experiment. In this work, we discuss the educational impact of the proposal, based on the analysis of responses from students who participated in this intervention to a research instrument.*

Keywords: Archimedes' Principle; Hydrostatic Balance; Historical Experiment; Primary Sources.

I. Introdução

Um aspecto essencial quando se pensa em uma Educação Básica de qualidade é que os estudantes desenvolvam o pensamento crítico e criativo. Nesse sentido, abordagens histórico-filosóficas vêm sendo apontadas como possibilidade para ensinar conteúdos de ciências e contextualizar discussões relacionadas à natureza do trabalho científico (Martins, 2006; Forato; Martins; Pietrocola, 2012; Moura; Guerra, 2016; Ortega; Moura, 2020; Mendonça, 2020; Peduzzi; Raicik, 2020).

No que concerne à temática Natureza da Ciência (NdC), Peduzzi e Raicik (2020) apresentam uma série de asserções comentadas com o objetivo de promover uma reflexão contextualizada sobre a ciência. Dentre essas proposições, destacamos, como um dos aspectos que fundamentam o presente trabalho, que a observação científica é seletiva, ou seja, ocorre à luz de interesses e problemas especiais; descobrir é mais complexo do que simplesmente observar e ter um “insight”; leis e teorias científicas são construções do intelecto humano, ou seja, não são conclusões imediatas de experimentos.

A História da Ciência é um dos caminhos possíveis para a abordagem desse tipo de proposição em sala de aula, o que pode ser feito com o auxílio de fontes primárias. Estas são compreendidas como produções culturais que expressam as intencionalidades de personagens históricos. São concebidas como objetos a serem interpretados, tendo em vista o contexto no

qual foram produzidas. Dessa forma, podem ser introduzidas em contexto escolar em perspectiva dialógica, interpretativa, favorecendo a compreensão de características do processo de produção científica: as motivações dos envolvidos nos episódios históricos da ciência, os conflitos de interesse, o papel da crítica no desenvolvimento científico e a credibilidade dos métodos utilizados (Sasseron; Nascimento; Carvalho, 2009; Wineburg, 2010; Batista; Drummond; Freitas, 2015).

A despeito da evidente relevância desses aspectos da construção histórica dos conceitos científicos, os livros didáticos, continuam, em grande parte, negligenciando-os. Por isso, pesquisas acadêmicas vêm, paradoxalmente, destacando os próprios livros-texto como “obstáculos pedagógicos que representam desafios à implementação de abordagens históricas em sala de aula” (Moura; Guerra, 2016, p. 797)².

Tão preocupante quanto essas lacunas é a reprodução, no contexto educacional, de pseudo-histórias romantizadas sobre o desenvolvimento científico. Tais narrativas transmitem visões simplistas sobre a ciência, como o empirismo-indutivismo, de modo que uma “descoberta” gradual e coletiva é atribuída a um único indivíduo que a realizou por meio de um *insight* repentino (Allchin, 2004; Forato, Martins, Pietrocola, 2012). Um exemplo relevante dessa problemática diz respeito ao Princípio de Arquimedes. A pseudo-história mais difundida sobre esse conteúdo físico é citada inclusive em livros didáticos aprovados nas edições do PNLD 2018 e 2021³.

Esta pseudo-história, que causa prejuízo à formação crítica dos alunos, pois replica a concepção de que a ciência se faz por acaso, a partir de insights repentinos, remonta à narrativa do romano Marcus Vitruvius (80 a.C. – 15 a.C.), em um trecho de sua obra *De Architectura*. Segundo esse autor, suspeitava-se, no passado, que parte do ouro confiado por Hieron II de Siracusa a um artesão para confecção de sua coroa havia sido substituído por prata. Desejando investigar o caso, sem se desfazer da coroa, Hieron buscou a ajuda de Arquimedes. Entusiasmado, este teria corrido nu pelas ruas após resolver o problema repentinamente. Ao adentrar em uma banheira cheia de água, Arquimedes teria percebido que o volume submerso do seu corpo na água era idêntico ao volume de água que transbordava. Ele teria, então, comparado os volumes de água que transbordavam de um recipiente cheio, quando nele eram inseridos um objeto de prata, um objeto de ouro e a coroa, todos de mesma massa. O volume

² Apenas duas coleções aprovadas no edital 2018 do PNLD apresentaram abordagens histórico-filosóficas robustas para o Princípio de Arquimedes a partir de fontes históricas de Arquimedes e de trabalhos historiográficos (Hidalgo; Queiroz; Oliveira, 2021). Nenhuma coleção aprovada no edital do PNLD 2021 traz esse tipo de abordagem para o Princípio de Arquimedes (Santos Júnior, 2023).

³ Duas coleções selecionadas no edital do PNLD 2021 recomendam aos estudantes a leitura de textos que remetem à narrativa pseudo-histórica relacionada à descoberta do empuxo (Santos Júnior, 2023). Realidade similar já havia sido notada por Hidalgo, Queiroz e Oliveira (2021) em três coleções aprovadas no edital do PNLD 2018.

de líquido que a coroa fazia transbordar era maior que o volume transbordado pela imersão do objeto de ouro de mesma massa, o que atestava a culpa do ourives (Vitruvius, 1958).

Apesar de muito interessante, a narrativa de Vitruvius é pouco confiável do ponto de vista físico e histórico. Quanto à coerência física, a tensão superficial da água impossibilitaria a obtenção de conclusões confiáveis a partir desse método. A imersão de uma coroa de 1 kg de massa, densidade 15 g/cm^3 (valor intermediário entre a densidade do ouro e da prata) e diâmetro 20 cm, em um recipiente cilíndrico de 15 cm de raio, ocupado por água, geraria uma variação do nível de líquido menor que 1 mm, ou seja, algo imperceptível. Já quanto à credibilidade histórica, Vitruvius viveu cerca de dois séculos após Arquimedes e não apontou em quais fontes baseou seu relato (Martins, 2000; Santos Júnior, 2023).

Sendo essa versão do caso da coroa improvável, como Arquimedes teria solucionado o problema? Galileu Galilei (1564-1642), grande admirador de Arquimedes, criticou a imprecisão do método descrito por Vitruvius. Baseando-se nos próprios trabalhos de Arquimedes sobre alavancas e equilíbrio, Galileu propôs um outro método, fisicamente viável, o qual considerava ter sido empregado por Arquimedes. Em sua obra *La Bilancetta*, ou *A Pequena Balança*, Galileu afirmou que Arquimedes teria utilizado uma Balança Hidrostática (Galilei, 1986). No século XIX foram encontradas evidências históricas antigas que reforçaram a hipótese de Galileu, ao trazerem a resolução do problema da coroa, atribuindo o uso da Balança Hidrostática diretamente a Arquimedes (Martins, 2000).

A Balança Hidrostática permite comparar a diminuição dos pesos aparentes da coroa e dos objetos de ouro e prata de mesma massa quando inseridos na água. À luz de conceitos atuais, podemos dizer que tais objetos, com a mesma massa, mas densidades diferentes, sofrem empuxos distintos quando submersos na água, já que possuem volumes diferentes. Notam-se, assim, as potencialidades do mecanismo da Balança Hidrostática (Fig. 01) como recurso didático para contextualizar o conceito de empuxo e o próprio Princípio de Arquimedes.

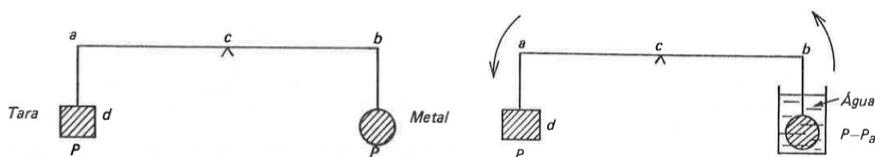


Fig. 1 – Representação da Balança Hidrostática.

Fonte: Lucie, 1986, p. 97.

Exploramos essas potencialidades em uma abordagem histórico-filosófica que parte do episódio da coroa, contrapondo as versões vitruviana e galileana para essa ocorrência. Elaboramos e aplicamos uma sequência didática que emprega como recursos uma Balança Hidrostática de baixo custo e trechos de fontes primárias de Arquimedes e Galileu. Esta promove também, por meio de uma demonstração experimental investigativa (Carvalho, 2010), uma discussão do limite de validade do Princípio de Arquimedes, uma vez que o enunciado usualmente presente em livros didáticos é válido somente quando as dimensões do recipiente

em que o fluido está contido são muito maiores que as dimensões do objeto que nele será imerso (Silveira; Medeiros, 2009)⁴.

A aplicação dessa sequência didática ocorreu no âmbito de um minicurso extraclasse para alunos do Ensino Médio do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – campus Corrente (IFPI). Foram ao todo 24 alunos, entre 15 e 18 anos de idade, dos quais 22 cursavam o 3º ano do curso técnico integrado em informática e 2 cursavam o 1º ano do curso técnico integrado em meio ambiente. O presente trabalho tem como objetivo apresentar a análise das respostas dos alunos participantes a um instrumento de pesquisa aplicado após a intervenção, o qual buscou avaliar o impacto educacional dessa proposta.

II. A sequência didática e sua aplicação⁵

A sequência didática desenvolvida previa duas etapas: a primeira, com duração estimada de 90 minutos e a segunda com cerca de 210 minutos (Quadros 1 e 2). A primeira parte da aplicação foi realizada no dia 23 de agosto de 2023. A segunda parte, iniciada naquela mesma data, foi finalizada dois dias depois. Foram objetivos dessa intervenção: promover visões mais complexas sobre a NdC a partir da discussão de fontes primárias relacionadas ao Princípio de Arquimedes; discutir o episódio histórico de Arquimedes e a coroa do rei, evidenciando fatores que tornam a versão descrita por Vitruvius incoerente do ponto de vista histórico e físico-conceitual; apresentar o método descrito por Galileu para a resolução do problema da coroa por Arquimedes como fisicamente plausível, além de reforçado por evidências históricas; reproduzir a Balança Hidrostática descrita por Galileu e utilizá-la na discussão sobre o conceito de empuxo, no contexto da análise de uma amostra composta por diferentes materiais; abordar o Princípio de Arquimedes de forma historicamente contextualizada, discutindo seu limite de validade e a possibilidade de um enunciado atualizado desse princípio, tendo em vista o Paradoxo Hidrostático.

Tomamos como referencial teórico estruturante os três momentos pedagógicos - problematização inicial, organização e aplicação do conhecimento (Muenchen; Delizoicov, 2014). Buscamos também apoio na perspectiva de experimentação investigativa desenvolvida no referencial de Carvalho (2010). Nesse tipo de atividade, os discentes constroem o conhecimento científico por meio de respostas a questionamentos intermediários, os quais proporcionam a apropriação de uma linguagem característica da ciência. Esse processo é importante à medida que demanda do estudante a necessidade de pensar em justificativas para

⁴ Somente quando respeitadas essas circunstâncias, a força de empuxo será idêntica ao peso do volume de líquido deslocado pelo objeto. Isso é explicitado ao notarmos que corpos imersos em recipiente de dimensões comparáveis às suas próprias conseguem flutuar mesmo deslocando um volume de líquido menor do que o previsto pelo enunciado mais difundido do Princípio de Arquimedes (Silveira; Medeiros, 2009).

⁵ Este trabalho decorre de uma pesquisa de mestrado em Ensino de Ciências. Mais detalhes sobre a sequência didática e a mobilização dos referenciais podem ser consultados na dissertação desenvolvida por um dos autores (Santos Júnior, 2023).

as suas ideias, expressando-as de forma verbal. Esse tipo de atividade experimental deve ir além da simples constatação do fenômeno, oportunizando que os discentes construam, a partir do diálogo com o docente, o conceito físico capaz de explicá-lo. A demonstração investigativa deve estar permeada por questões problematizadoras, propiciando que os estudantes pensem sobre o problema e proponham possíveis respostas (Carvalho, 2010).

Quadro 1 – Síntese da Parte I da sequência didática.

Problematização	Passo 01- Apresentação de imagens que remetem ao episódio Eureka de Arquimedes (ver Santos Júnior, 2023). Os estudantes são indagados sobre se já conhecem algo a respeito.
	Passo 02- Apresentação de informações biográficas de Arquimedes ⁶ (287 a.C. - 212 a.C.) e sobre o seu suposto envolvimento no caso da coroa do rei, frisando que não há registros do próprio Arquimedes a respeito do episódio. Comentário sobre a obra <i>De Architectura</i> , na qual Marcus Vitruvius (80 a.C. – 15 a.C.) narra o episódio. Registro no quadro dos períodos em que viveram Arquimedes e Vitruvius.
	Passo 03- Leitura coletiva de trecho traduzido da obra <i>De Architectura</i> , no qual Vitruvius narra sua versão do episódio (Anexo I). O professor ilustra o método narrado por Vitruvius com auxílio de figura ilustrativa (ver Santos Júnior, 2023). Discussão coletiva a partir de questionamentos 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, quem poderia ter preparado sua banheira?”; “Se vocês fossem preparar um banho em uma banheira, encheriam-na 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 15g/cm ³ de densidade (intermediária entre ouro e prata) e de raio igual a 10 cm em um recipiente cilíndrico de 15 cm de raio interno, a subida do nível do líquido seria perceptível?” ⁷
	Passo 04- Indagações sobre a confiabilidade da narrativa vitruviana decorrentes da tensão superficial do líquido: “O que acontece quando inserirmos delicadamente uma moeda em um copo de água cheio de água?”
	Passo 05- Demonstração investigativa dialogada (Carvalho, 2010) para abordar a temática da tensão superficial. Nesse contexto, conduzimos uma demonstração investigativa na qual progressivamente inserimos moedas em um copo cheio de água. Durante a realização da atividade experimental, realizamos questões problematizadoras para reflexão coletiva: “O que vai acontecer se inserirmos uma moeda bem lentamente nesse copo que está cheio?”; “Quantas moedas vocês acham que conseguiremos inserir antes de o líquido

⁶ Recomendamos como fontes de informações para o professor o capítulo introdutório da obra *Arquimedes, o centro de gravidade e a lei da alavanca* (ASSIS, 2008), disponível no link: <https://www.ifi.unicamp.br/~assis/Arquimedes.pdf>.

⁷ Nessa etapa, a questão é apenas levantada. O cálculo ocorrerá em etapa subsequente.

	extravasar?” ⁸ ; “O líquido derrama logo após superar o nível da borda do copo? 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?” Desse modo, os estudantes foram convidados a refletir sobre a situação em questão. Fomos além da simples constatação de que o líquido não transbordaria prontamente, oportunizando uma situação na qual os discentes foram convidados à construção do conhecimento a partir da interação.
Organização do conhecimento	Passo 01- Discussão sobre a tensão superficial dos líquidos. Apresentação de exemplos. Passo 02 - Demonstração matemática, com a participação dos alunos, da variação de nível da água prevista ao inserir uma coroa em um recipiente cilíndrico, conforme a situação descrita ao final do Passo 3 da etapa de Problematização. Obtém-se a previsão de 0,94 mm, ou seja, variação de nível praticamente imperceptível (ver Santos Júnior, 2023).
Aplicação do Conhecimento	Passo 01- Discussão: “De que forma a tensão superficial influenciaria no método descrito por Vitruvius?”; “Considerando a tensão superficial e o resultado da variação de nível, o que podemos pensar sobre essa narrativa?”; “E considerando o ponto de vista histórico, como fica a sua confiabilidade?”; “Considerando a inviabilidade do método descrito por Vitruvius, de que forma Arquimedes teria solucionado o problema?” ⁹

Fonte: Autoria própria.

Quadro 2 – Síntese da Parte II da sequência didática.

	Passo 01- Leitura coletiva de trecho traduzido da obra <i>La Bilancetta</i> (Anexo II/A-B), cuja autoria inicialmente não é informada aos estudantes. Nesse trecho, Galileu critica a narrativa vitruviana, baseada na medida de volumes de água deslocados. Alguns questionamentos são propostos aos estudantes: “- 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?” Passo 02- Indagação sobre a possível autoria do texto lido: “Quem é o autor do trecho que lemos?” O professor atribui a autoria do texto a Galileu Galilei (1564-1642) e questiona: “Em que época viveu Galileu? Ele foi contemporâneo de Arquimedes? O que vocês conhecem sobre ele?” Após ouvir os estudantes, o professor situa cronologicamente Arquimedes, Vitruvius e Galileu, e apresenta informações biográficas de Galileu ¹⁰ . Indica
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

⁸ No total, 14 moedas puderam ser inseridas até que houvesse o extravasamento. Demonstração semelhante, realizada pelos autores do presente trabalho, pode ser visualizada em: <https://youtu.be/9LZE8hIv4M8>.

⁹ Não se pretende, nessa etapa da sequência didática, que os alunos tenham uma resposta para esse último questionamento, mas sim que reflitam a respeito, como preparativo para a etapa subsequente.

¹⁰ Para informações sobre Galileu, sugerimos ao professor: o texto de Lucie (1986), intitulado “Galileo e a tradição arquimediana”, disponível em <https://www.cle.unicamp.br/eprints/index.php/cadernos/article/view/1218> ; a postagem “Galileo: para além dos mitos”, da plataforma Universo Racionalista, disponível em <https://universoracionalista.org/galileo-para-alem-dos-mitos/>.

	<p>o interesse e a admiração desse estudioso pela obra de Arquimedes, o que o levou a perceber que o método atribuído por Vitruvius a Arquimedes era inconsistente.</p>
	<p>Passo 03- Questionamento que levará a uma hipótese alternativa para 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 elaboração de uma hipótese, o professor retoma a biografia de Arquimedes, enfatizando o estudo das alavancas. Por fim, é apresentado aos alunos um protótipo de uma Balança Hidrostática (Apêndice I), como um mecanismo baseado na ideia de alavanca, cujo funcionamento é atrelado à água: “Como a Balança Hidrostática poderia ser utilizada por Arquimedes para descobrir se havia fraude na coroa?” Os alunos manipulam o instrumento e são registradas possíveis sugestões.</p>
Organização do conhecimento	<p>Passo 01- Demonstração investigativa dialogada (Carvalho, 2010) com o protótipo da Balança Hidrostática, na qual, paulatinamente, apresentamos questões para reflexão, convidando-os à construção do conhecimento por meio do diálogo com o professor. São utilizadas duas amostras de mesma massa e diferentes densidades e um contrapeso também de mesma massa. Questionamentos estimulam a elaboração de hipóteses, as quais são testadas: “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?” (nesse caso, temos uma balança usual no ar); “Uma das amostras e o contrapeso de mesma massa estão em equilíbrio no ar quando colocados 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); “Diante do observado, o que precisamos fazer com o contrapeso para reestabelecer o equilíbrio?”. Alterando a primeira amostra por outra de menor densidade, mas de mesma massa, repete-se o procedimento descrito anteriormente: “Dessa vez é necessário mover o contrapeso para mais perto do eixo de rotação ou para uma posição mais distante?”, “Se fosse utilizada uma amostra com densidade ainda menor, onde o contrapeso precisaria ser colocado para reestabelecer o equilíbrio após inserir a amostra na água?”, “Voltando à situação em que o objeto é colocado na água, o que faz surgir aquele desequilíbrio? O que faz a amostra ‘pesar’ menos na água?”, “O que vocês concluem a partir do que observamos e discutimos? Voltando ao problema da coroa, se o ourives substituir uma parte da massa de ouro por prata, o que acontece com a densidade da coroa?”, “Como a Balança Hidrostática poderia ser aplicada na resolução do problema?”¹¹</p>
	<p>Passo 02- Apresentação do enunciado do Princípio de Arquimedes, acompanhado do desenvolvimento matemático conforme livros didáticos. Tomamos como base proposições extraídas da obra <i>Sobre os corpos flutuantes</i>¹², de Arquimedes, para diferenciar como concebemos sua validade (para fluidos) do que foi estabelecido por Arquimedes (para líquidos), na obra. Sinalização de que o conceito de empuxo, o enunciado do Princípio e a notação matemática não estão contidos no trabalho de Arquimedes, sendo frutos da construção histórica coletiva. Tem-se uma abordagem implícita do aspecto da</p>

¹¹ Aqui sugere-se que os alunos começem a refletir sobre essa questão, a qual será retomada em etapa subsequente.

¹² Conforme apresentado na tradução comentada de Assis (1996).

	<p>“provisoriedade do conhecimento científico”, uma vez que essa característica da ciência pode ser inferida a partir da discussão.</p>
	<p>Passo 03- A partir de um trecho da obra <i>La Bilancetta</i> (Anexo II/C), explica-se como Galileu sugeriu que a Balança Hidrostática teria sido utilizada por Arquimedes para resolver o problema da coroa. Para isso, são apresentadas figuras¹³ da balança em diferentes situações. Discussão: “Por que a balança fica desequilibrada quando o ouro é colocado na água?”; “Do que depende o empuxo que atua sobre o ouro?”; “De que forma isso é compensado pelo deslocamento do contrapeso para mais próximo do eixo de rotação (c)?”; “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?”; “Na situação em que é utilizada uma liga de ouro e prata, 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?”; “Podemos ter uma certa massa de ouro de um lado equilibrando a coroa do outro lado, com a balança no ar, dando a impressão de que o ourives usou todo o ouro recebido. Saber o volume da coroa resolveria o problema, porque Arquimedes poderia comparar as densidades e, assim, identificar se houve fraude. Mas ele também não sabia o volume da coroa, que é um objeto irregular. E, então, o que ocorreria em caso de fraude se a coroa fosse inserida na água...?” Em diálogo, constrói-se coletivamente a possibilidade de utilização da Balança Hidrostática para resolver o problema.</p>
	<p>Passo 04- Explica-se que Galileu chegou à conclusão de que a Balança Hidrostática teria sido utilizada por Arquimedes ao estudar o trabalho do grego sobre alavancas e levar em conta que circulava a informação de que o método empregado envolveria água. Um trecho do trabalho <i>La Bilancetta</i>, no qual Galileu explica o funcionamento da Balança Hidrostática (Anexo II/C), é lido coletivamente. Discussões com a utilização de figuras (Santos Júnior, 2023): “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, uma compreensão do uso da Balança Hidrostática como solução para o problema. Ao final desse passo, menciona-se que a versão de Galileu para o episódio é fisicamente coerente e reforçada por evidências históricas encontradas¹⁴.</p>
	<p>Passo 5- Estabelecimento de um limite de validade para o Princípio de Arquimedes: é válido quando as dimensões do recipiente que contém o fluido são muito maiores que as dimensões do objeto inserido no fluido (Silveira; Medeiros, 2009). Demonstração investigativa dialogada para evidenciar o Paradoxo Hidrostático de Galileu (Carvalho,</p>

¹³ Foram utilizadas as figuras presentes na introdução, produzida por Lucie (1986), da obra *La Bilancetta*.

¹⁴ Para essas informações, o professor pode se basear em Martins, 2000.

	<p>2010). Uma latinha com 350 ml de refrigerante é inserida em um recipiente que contém 280 ml de água, e flutua (ver Santos Júnior, 2023). Questionamentos: “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 que o que estamos observando ocorra?”. Apresentação de um enunciado revisto do Princípio, que evita o Paradoxo Hidrostático¹⁵.</p>
<p>Aplicação do conhecimento</p>	<p>Passo 1- Os alunos utilizam a Balança Hidrostática para determinar a proporção de bolinhas de gude e de moedas em uma amostra (“conjunto”). Para isso, são utilizados mais dois conjuntos, com a mesma massa do que vai ser estudado, um contendo somente moedas e, o outro, somente bolinhas de gude. Primeiro, utilizando um contrapeso de mesma massa que os três conjuntos, manipula-se aquele que é composto somente por bolinhas de gude: “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?”</p>
	<p>Passo 2- Repete-se o mesmo procedimento para o conjunto contendo somente moedas, bem como para o conjunto com moedas e bolinhas de gude. Os alunos analisam a posição para a qual o contrapeso foi levado nas três situações: “A posição do contrapeso, que reestabelece o equilíbrio quando usamos o conjunto com 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. De modo dialogado, demonstra matematicamente como obter as massas de cada porção distinta no conjunto mesclado. A relação obtida é utilizada (ver Santos Júnior, 2023).</p>
	<p>Passo 03- Atividade extraclasses, os estudantes respondem a um questionário investigativo¹⁶.</p>

Fonte: autoria própria.

¹⁵ O enunciado revisto do Princípio de Arquimedes é apresentado por Silveira e Medeiros, os quais demonstram que, para evitar o Paradoxo Hidrostático, deve-se indicar que “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” (2009, p. 289).

¹⁶ Este questionário pós-intervenção não tinha caráter avaliativo somativo. Não houve discussão com os alunos após a aplicação do questionário, uma vez que este exercia o papel apenas de instrumento de pesquisa.

III. Metodologia da pesquisa

Finalizando a aplicação da sequência didática, os alunos responderam a um instrumento de pesquisa composto por 11 questões abertas, por meio do qual buscamos investigar o impacto da proposta implementada. As questões foram organizadas nos blocos temáticos citados no Quadro 3, a seguir¹⁷.

Quadro 3 – Perguntas do questionário pós-intervenção organizadas por blocos.

Bloco	Perguntas
Bloco 1 - Fatores físicos referentes aos métodos narrados por Vitruvius e Galileu.	1, 2, 4, 5
Bloco 2 - Fatores históricos relacionados às versões do episódio do furto da coroa.	3, 6
Bloco 3 - Compreensão do Princípio de Arquimedes e do seu limite de validade.	7, 8, 11
Bloco 4 - Concepções sobre a NdC.	9, 10

Fonte: autoria própria.

Ao todo, 16 dos 24 alunos participantes das duas etapas de aplicação da sequência didática, responderam ao questionário. Desse total, 15 cursavam o 3º ano do curso técnico integrado em informática e 1 cursava o 1º ano do curso técnico integrado em meio ambiente. A nomenclatura utilizada para identificar os participantes será P_n , com n variando de 1 a 16¹⁸.

Os dados obtidos, de natureza descritiva, serão apresentados em tabelas, orientadas pela preocupação de registrar as concepções dos participantes, e, ao mesmo tempo, compará-las. As respostas às questões foram analisadas tanto isoladamente, quanto por bloco, de acordo com as suas temáticas. Elementos significativos nas discussões perpassam diversas questões. Por exemplo, buscando otimizar a organização dos resultados, optamos por agregar a discussão da validade do Princípio de Arquimedes ao Bloco 3, relacionado à discussão desse conteúdo físico, e não ao Bloco 4, sobre NdC, ao qual ela também se ajustaria, visto ser desejável que os estudantes compreendam que o conhecimento científico não possui validade irrestrita.

É importante destacar que, embora os blocos de análise estivessem estabelecidos *a priori*, em função de objetivos norteadores da própria sequência didática, as categorias de análise foram construídas a partir das ideias centrais das respostas dos participantes, de acordo com critérios de análise de conteúdo (Bardin, 2004). Vale salientar ainda que em algumas situações, as respostas dos participantes puderam ser classificadas em mais de uma categoria.

¹⁷ Os enunciados das questões serão apresentados na seção IV.

¹⁸ A utilização das respostas nessa pesquisa foi autorizada por meio da assinatura, pelos respectivos responsáveis ou pelos próprios estudantes, no caso dos maiores de idade, de um termo de consentimento livre e esclarecido, que segue recomendações gerais da UFRN para sua elaboração (ver Santos Júnior, 2023).

IV. Resultados da pesquisa

A seguir, apresentamos, para cada bloco de questões, quadros com os resultados, classificados nas categorias de análise propostas, e, em seguida, as discussões desses resultados.

Bloco 1 – Fatores físicos referentes aos métodos narrados por Vitruvius e Galileu

Estão relacionadas à temática “*fatores físicos referentes aos métodos narrados por Vitruvius e Galileu*” as questões 1, 2, 4 e 5 do questionário pós-intervenção. Esta análise foi baseada no referencial de Martins (2000).

A primeira pergunta proposta dizia respeito ao método que Vitruvius atribuiu a Arquimedes: *Segundo o método narrado por Vitruvius, como Arquimedes teria determinado se a coroa havia sido fraudada?*

Quadro 4 – Síntese das respostas à primeira pergunta.

Categoría	Método de Arquimedes segundo Vitruvius	Participantes
A	Submergiu a coroa e os objetos de mesma massa de prata e ouro. Verificou que a coroa fazia mais água transbordar do que o objeto de ouro; comparou densidades.	P ₁ , P ₂ , P ₄ , P ₅ , P ₆ , P ₇ , P ₈ , P ₉ , P ₁₀ , P ₁₁ , P ₁₂ , P ₁₃ , P ₁₄ e P ₁₆ .
B	Descobriu como resolver o caso ao tomar banho.	P ₆ e P ₁₀ .
C	Usou a Balança Hidrostática.	P ₃ e P ₁₅ .
D	Usou o princípio do Empuxo.	P ₁₁ .

Fonte: autoria própria.

Foram elencados na categoria A 14 participantes (Quadro 4). Estes indicaram que Vitruvius teria afirmado que Arquimedes comparou o volume transbordado pela submersão da coroa aos volumes transbordados pela submersão dos objetos de mesma massa de prata e de ouro. Respostas com esse cunho eram esperadas e desejadas (de acordo com o referencial de Martins, 2000), haja vista a discussão realizada sobre o trecho do *De Architectura*, no qual Vitruvius descreve o suposto método utilizado por Arquimedes. Como indicou P₁, “ele teria fabricado duas peças com igual peso à coroa, uma feita de ouro e outra de prata. Ao submergir ambas as peças na água, Arquimedes teria registrado o volume de água deslocado por cada uma delas”.

Outro ponto a ser destacado é a menção da diferença entre as densidades do ouro, da prata e da coroa pelos participantes incluídos nessa categoria. Como comentou P₉, “por serem materiais de densidades diferentes, os blocos não tinham o mesmo tamanho”. P₆ e P₁₀ foram classificados em duas categorias (A e B), pois, além de indicarem o método de comparação de volumes transbordados, recordaram a narrativa de Vitruvius sobre o suposto *insight* de Arquimedes na banheira, o qual o teria levado a realizar o experimento de imersão da coroa em

água. Como evidenciado por P₉, “Ele tinha ido tomar banho e percebeu que ao entrar na banheira quando mais seu corpo afundava, mais água derramava”.

Tais declarações são indício de que os participantes citados nessas categorias entenderam o método narrado por Vitruvius. Além disso, o fato de as classes A e B possuírem juntas uma incidência tão significativa é um primeiro indício de que a aplicação da sequência didática foi bem-sucedida, se considerado o objetivo de proporcionar ao grupo a compreensão dos aspectos físicos que fundamentam o método descrito por Vitruvius (de acordo com o referencial de Martins, 2000).

O estudante P₁₁ teve sua resposta classificada na categoria A e, ao mesmo tempo, na categoria D, uma vez que afirmou: “Arquimedes usou o princípio de empuxo, na qual submergiu a coroa e um objeto de peso igual ao ouro puro em um recipiente com água”. Em momento algum, durante a intervenção, afirmamos que Vitruvius teria dito que Arquimedes utilizou o “princípio do Empuxo”. No entanto, é comum que sites de divulgação científica e livros didáticos, ao trazerem o episódio na forma da narrativa vitruviana, pseudo-histórica, utilizem essa expressão, ainda que isto seja um anacronismo (Hidalgo; Queiroz; Oliveira, 2021; Santos Júnior, 2023). Há, assim, um indício de que, ao responder ao questionário, o participante pode ter buscado fontes disponíveis na rede que explicam o caso, ignorando anacronismos presentes nessas explicações.

Apesar da clara demarcação entre os métodos narrados por Vitruvius e Galileu na aplicação da sequência didática, P₃ e P₁₅ parecem ter se confundido. Esses participantes, situados na classe C, apontaram que a versão de Vitruvius indicava que Arquimedes teria utilizado a Balança Hidrostática. Segundo P₁₅, “teria determinado se a coroa havia sido fraudada através do método da Balança Hidrostática, comparando o peso da coroa com o peso de uma quantidade equivalente de ouro puro”. O equívoco dos estudantes pode ser resultado da ênfase que demos ao uso da Balança Hidrostática, de modo que eles podem ter se lembrado somente desse método. Por outro lado, o equívoco pode ser indicativo de desatenção no momento de resposta ao questionário ou mesmo dificuldade de entendimento ao longo da intervenção. Observamos que esses participantes, ainda que tenham citado a Balança Hidrostática em respostas, não descreveram o seu funcionamento corretamente em nenhum item do questionário, o que pode sinalizar a incompREENSÃO desse mecanismo.

A segunda questão proposta dizia respeito a avaliar do ponto de vista físico a narrativa vitruviana: *Que fatores físicos descredibilizam a versão descrita por Vitruvius?* (Quadro 5). Novamente, alguns participantes foram incluídos em mais de uma categoria. P₉, por exemplo, indicou: “Vários fatores físicos questionam a versão descrita por Vitrúvio. Primeiro, era improvável que Arquimedes tivesse acesso a equipamentos de medição precisos na época, e a tensão superficial da água poderia ter afetado a quantidade de água derramada, Além do fato de que a quantidade de líquido derramado seria tão pouco que seria quase impossível fazer uma comparação”. A menção de diversos fatores (instrumentos de medida pouco precisos, tensão

superficial, quantidade mínima de líquido derramado, dificuldade de comparar volumes transbordados) credenciou a inclusão desse participante em quatro categorias (A, B, C e F).

O fator mais presente nas respostas foi a atuação da tensão superficial, citada explicitamente por 11 dos 16 estudantes, os quais foram incluídos na categoria A. Isso era esperado tendo em vista o conteúdo abordado na intervenção, uma vez que enfatizamos a relação entre esse fenômeno e outros aspectos, como a diferença entre o volume de líquido transbordado e o volume submerso dos objetos (de acordo com o referencial de Martins, 2000). Para exemplificar a percepção dos estudantes, podemos citar a resposta de P₂: “a tensão superficial da água poderia ter afetado a quantidade de água derramada, e era improvável que Arquimedes tivesse acesso à equipamentos de medição precisos naquela época”. Nota-se que o participante estabeleceu um paralelo entre a tensão superficial da água e o fato de o volume transbordado desse líquido ser distinto do volume dos objetos nele inseridos. A relação estabelecida é adequada, visto que, como discutido na demonstração investigativa de inserção de moedas em um copo com água prestes a transbordar, a atuação da tensão superficial fez com que o volume transbordado de água fosse bem menor que o volume das moedas submersas no fluido. Resposta análoga forneceu P₁₀ ao afirmar que “A tensão superficial dificultaria ou até impediria a água derramar”.

Quadro 5 – Síntese das respostas à segunda pergunta.

Categoría	Fatores físicos que descredibilizam a versão vitruviana	Participantes
A	A tensão superficial da água.	P ₁ , P ₂ , P ₄ , P ₆ , P ₇ , P ₈ , P ₉ , P ₁₀ , P ₁₂ , P ₁₃ e P ₁₆ .
B	Instrumentos de medida pouco precisos na época de Arquimedes.	P ₁ , P ₂ , P ₃ , P ₈ , P ₉ , P ₁₁ , P ₁₂ , P ₁₃ e P ₁₅ .
C	O volume de líquido transbordado seria diferente do volume submerso do objeto.	P ₂ , P ₆ , P ₇ , P ₉ , P ₁₀ e P ₁₆ .
D	A variação mínima do nível da água.	P ₁ , P ₆ , P ₇ e P ₁₆ .
E	Outros (peso, densidade e volume dos elementos).	P ₄ , P ₅ e P ₁₄ .
F	Dificuldade de comparar volumes transbordados.	P ₂ e P ₉ .

A resposta de P₂ exemplifica também outro aspecto abordado na intervenção. Assim, na categoria B, a qual engloba 9 das 16 respostas, temos a menção à ausência de instrumentos precisos o suficiente para viabilizar a medida da variação do nível do líquido quando os objetos nele fossem inseridos (Martins, 2000). Além de P₂ o estudante P₁₅ declarou: “Alguns fatores físicos que descredibilizam a versão descrita por Vitruvius são a dificuldade de realizar medições precisas na época, a falta de instrumentos adequados para determinar o volume da coroa e a possibilidade de variações na densidade do ouro e da prata utilizados na coroa”.

Tal resposta, além de indicar a falta de precisão dos instrumentos, aponta que poderiam existir variações na densidade do ouro e da prata utilizados na coroa. Esse último aspecto, não

discutido na intervenção, é um questionamento interessante levantado pelo estudante. A densidade do objeto de ouro usado para fins de comparação corresponderia à densidade do ouro utilizado na coroa, se, por exemplo, os materiais tivessem a mesma procedência.

Na categoria C foram alocados 6 participantes. Estes citaram que o volume de líquido transbordado não corresponderia ao volume dos objetos inseridos no recipiente. Esse aspecto, interligado à tensão superficial da água, havia sido evidenciado em atividade experimental investigativa, quando moedas foram inseridas no copo cheio de água. Os participantes, na ocasião, notaram que o volume de líquido transbordado era bem menor que o volume das moedas. Como exemplo de resposta enquadrada nessa classe, P₆ indicou: “Mesmo que houvesse transbordamento, o volume de líquido derramado não corresponderia ao volume da coroa”. Assim, o participante demonstrou implicitamente que talvez nem ocorresse o transbordamento, e que, mesmo que o líquido derramasse, o volume extravasado não seria idêntico ao da coroa (Martins, 2000).

Na categoria D foram listados 4 participantes que apontaram que, ao inserir a coroa em um recipiente com água, a variação do nível do líquido seria mínima. Entre as respostas apresentadas, destaca-se a do estudante P₁₆ que relacionou o efeito à tensão superficial: “a variação do nível de líquido seria ínfima, contribuindo para o não transbordamento, devido à tensão superficial”. Esse tipo de apontamento provavelmente teve como base a demonstração matemática, realizada na intervenção, de que haveria uma elevação de cerca de 1 mm no nível da água na situação considerada.

A categoria F situa duas respostas que destacam quão difícil seria comparar os volumes transbordados do recipiente com água na imersão da coroa, da prata e do ouro. Esse argumento, o qual enfatizamos várias vezes durante a intervenção, curiosamente, só apareceu em duas respostas. A caráter de exemplificação, P₉ afirmou que “a quantidade de líquido derramado seria tão pouco que seria quase impossível fazer uma comparação”.

Por fim, na categoria E estão três participantes que apresentaram respostas idênticas¹⁹, compostas basicamente pela seguinte frase: “O peso, densidade e volume dos elementos”. Infelizmente, não parece haver um raciocínio mais sofisticado que justifique tal resposta. O estudante P₄ ainda ponderou: “pois não tem como comparar isso tudo apenas com uma bacia cheia de água e água derramada”. A afirmação demonstra descrença por parte do discente na eficiência do método narrado por Vitruvius, mas carece de embasamento em sua argumentação.

Na quarta pergunta, os estudantes foram questionados acerca da avaliação de Galileu sobre a narrativa vitruviana: *O que Galileu aponta sobre a versão de Vitruvius?* (Quadro 6).

¹⁹ P₄, P₅, e P₁₄ responderam a quase todas as perguntas de forma idêntica. Dessa forma, praticamente em toda a análise, estarão listados nas mesmas categorias.

Quadro 6 – Síntese das respostas à quarta pergunta.

Categoría	Apontamentos de Galileu sobre a versão vitruviana	Participantes
A	Vitruvius escreveu sobre um rumor/informação/lenda/mito disseminado.	P ₁ , P ₂ , P ₄ , P ₅ , P ₆ , P ₇ , P ₈ , P ₉ , P ₁₂ , P ₁₃ , P ₁₄ e P ₁₅ .
B	O método narrado por Vitruvius é impreciso/sem fundamentação científica.	P ₄ , P ₅ , P ₁₀ , P ₁₄ , P ₁₅ e P ₁₆ .
C	A versão era inválida segundo os princípios da época.	P ₃ .
D	Galileu nada diz a respeito.	P ₁₁ .

Fonte: autoria própria.

Na categoria A, foram agrupados 12 dos 16 participantes. Estes indicaram a convicção de Galileu de que Vitruvius teria se baseado em algum tipo de informação não confiável ou fantasiosa que circulava em sua época (Martins, 2000). Uma alta incidência nessa categoria era esperada, tendo em vista que os discentes P₆, P₈, P₁₅, P₉, P₁₇, P₁₁, P₁₂ e P₁₆ já haviam expressado verbalmente durante a aula percepções semelhantes sobre a narrativa vitruviana. Os termos utilizados nessa referência foram variados. P₁ por exemplo, afirmou: “algum escritor teria registrado o evento, acrescentando algo ao limitado entendimento que ele tinha baseado nos rumores que circulavam”. P₁₅, por sua vez, empregou o termo “lenda” para se referir a supostas fontes de Vitruvius: “Galileu aponta que a versão de Vitruvius é baseada em lendas”. Já P₁₃ afirmou que Galileu acreditava que a versão de Vitruvius havia se fundamentado em “um mito que ganhou notoriedade”. Essas afirmações estão de acordo com as críticas de Galileu à credibilidade histórica da narrativa vitruviana (Galilei, 1986; Martins, 2000). Indicam, portanto, que os participantes compreenderam esse aspecto evidenciado pela interpretação do texto histórico de Galileu na intervenção.

Complementando esse fator, P₄, P₅, P₁₄ e P₁₅ acrescentaram os apontamentos de Galileu relacionados à carência de precisão do método narrado por Vitruvius (Galilei, 1986; Martins, 2000). É importante destacar que P₄, P₅ e P₁₄ transcreveram o trecho do *La Bilancetta* no qual Galileu criticou o método narrado por Vitruvius. Dessa forma, se apoiaram no próprio documento histórico interpretado na intervenção para evidenciar a imprecisão notada por Galileu. Já P₁₅ acrescentou que, para Galileu, a versão de Vitruvius “não possui fundamentos científicos sólidos”.

Essas respostas foram incluídas na categoria B, assim como as respostas de P₁₀ e P₁₆ as quais citaram os mesmos aspectos, mas isoladamente, isto é, sem referência ao apontamento compreendido pela categoria A. P₁₆ declarou que “além de ser imprecisa ela poderia ter sido feita de outra maneira que iria ser mais precisa”. Dessa forma, o estudante percebeu que Galileu não somente criticou a versão vitruviana pela imprecisão, como também propôs uma solução adequada, sob o ponto de vista da acurácia (Martins, 2000). Já P₁₀ afirmou “Que não era precisa, pois não tinha nada que comprovava o fato”, indo ao encontro das respostas dos colegas no que dizia respeito à crítica de Galileu ao método descrito por Vitruvius. Além disso, nessa resposta,

pareceu sinalizar a ausência de evidências históricas que corroborassem a versão vitruviana (Martins, 2000).

Na categoria C, de modo insuficiente no sentido de representar a discussão realizada na intervenção, P₃ sem explicar seu argumento, afirmou que Galileu julgou a narrativa de Vitruvius como “inválida segundo os princípios da época”. A resposta de P₃ não foi estruturada o suficiente para promover a compreensão do que o discente quis expressar, muito embora note-se que ele percebeu a rejeição de Galileu à narrativa vitruviana.

Já na categoria D alocamos a resposta de P₁₁. Ele declarou que “não há menção alguma de Galileu sobre a versão de Vitruvius”. A afirmação pode ter sido fruto de desatenção no momento da intervenção. Galileu realmente não cita nominalmente Vitruvius, mas critica a versão mais difundida do episódio histórico, cuja autoria era do arquiteto romano.

Na quinta pergunta, os participantes também foram instigados a explicar a narrativa galileana a respeito do uso da Balança Hidrostática por Arquimedes: *Segundo Galileu, Arquimedes teria usado uma Balança Hidrostática para analisar o caso da coroa. O que Arquimedes teria feito para saber se houve fraude?* (Quadro 7).

Na categoria A, foram elencados 9 dos 16 participantes, cujas respostas remetiam à comparação do peso da coroa, imersa em água, aos pesos de amostras de ouro e prata de mesma massa (da coroa). De fato, esse tipo de resposta faz jus ao método descrito por Galileu, baseado em comparações de pesos, diferenciando-o do método narrado por Vitruvius, baseado em comparações de volumes transbordados (Martins, 2000). Essa distinção havia sido amplamente discutida na intervenção com o uso das fontes histórica escritas por Galileu, aliada à discussão experimental desse procedimento. A incidência dessa categoria é um indicativo de que os alunos compreenderam o cerne do funcionamento do método narrado por Galileu.

Quadro 7 – Síntese das respostas à quinta pergunta.

Categoria	Como Arquimedes usou a Balança Hidrostática para analisar o caso da coroa, segundo Galileu.	Participantes
A	Comparou a diferença entre os pesos da coroa e das amostras de ouro e prata de mesma massa quando submersas na água.	P ₁ , P ₂ , P ₆ , P ₇ , P ₈ , P ₉ , P ₁₁ , P ₁₂ e P ₁₃ .
B	Analisa a força de empuxo atuante sobre cada objeto.	P ₁₀ , P ₁₅ e P ₁₆ .
C	Comparou os volumes transbordados após a imersão da coroa e das amostras de ouro e prata na água.	P ₄ , P ₅ e P ₁₄ .
D	Comparou quanto cada objeto afundava na água.	P ₃ .

Fonte: autoria própria.

Destaca-se, no entanto, que as respostas dos discentes parecem se diferenciar do método apresentado na intervenção a partir do *La Bilancetta*. Na intervenção, indicamos que

cada uma das três amostras, feitas de materiais diferentes, eram inseridas paulatinamente na água, provocando, em cada caso, um desequilíbrio na balança que só seria revertido após a movimentação do contrapeso, mantido no ar, para três posições distintas, cada uma relacionada à imersão de um material diferente (Galilei, 1986). Naquela situação, durante a atividade investigativa com a Balança Hidrostática, os participantes expressaram compreender que, quanto maior o volume do objeto, menor o seu peso na água e para mais próximo do eixo de rotação o contrapeso precisaria ser deslocado. Já as respostas ao questionário pareceram sugerir a imersão simultânea da coroa e dos demais objetos na água, paulatinamente, avaliando-se, a partir disso, a diferença entre os pesos da coroa investigada e dessas amostras quando submersas.

Dentre as respostas incluídas nessa categoria, merece destaque a declaração de P₁₂ o qual mencionou que, segundo Galileu, Arquimedes “teria colocado as três massas de mesmo peso (ouro, prata e a coroa) na água, comparado o ‘peso’ que elas agora teriam dentro da água, por conta da diferença de densidade entre o ouro e a prata”. É possível notar que o participante entendeu que as amostras possuíam o mesmo peso, já que tinham a mesma massa e estavam submetidas à mesma aceleração gravitacional. Para se referir ao peso aparente na água, diferente para cada objeto, o estudante utilizou aspas como recurso em sua redação. Percebe-se também que ele concebeu a existência de uma distinção entre esses pesos aparentes, haja vista a diferença entre as densidades do ouro e da prata. Resposta similar foi apresentada por P₉: “Arquimedes colocou a coroa e o mesmo peso de prata e ouro na água e depois analisou o peso na água devido à diferença de densidade entre a prata e o ouro”.

Diferenciamos a categoria A da categoria B pelo uso do termo “empuxo” nas explicações dos participantes classificados nessa última categoria. Em linguagem hodierna, a Balança Hidrostática possibilita investigar a diferença entre as forças de empuxo atuantes sobre cada objeto. Na categoria B, indicamos os participantes P₁₀, P₁₅ e P₁₆ que mencionaram a força de empuxo para explicar o funcionamento da Balança Hidrostática. O estudante P₁₅ por exemplo, afirmou que “Arquimedes teria usado uma Balança Hidrostática para analisar o caso da coroa. Ele teria submerso a coroa e uma amostra de ouro de mesma massa em água e comparado os empuxos gerados por cada objeto”. O participante não explicou qual fator provocaria empuxos de módulos diferentes em cada objeto submerso.

A distinção entre as respostas de P₁₅ e de P₁₂ alocados respectivamente nas categorias B e A, se dá basicamente pela substituição da explicação apresentada por P₁₂ mais condizente com a fala de Galileu, pela expressão “empuxo”, que o pesquisador não utilizou.

Outra resposta interessante foi a apresentada por P₁₀: “Ele teria usado a Balança Hidrostática, e aí teria colocado a coroa de um lado e uma massa de ouro do mesmo peso de outro lado dentro de um recipiente com água, para ver a força de empuxo, se a coroa tivesse fraudada a força de empuxo seria menor do que a massa do ouro”. O participante indicou que o empuxo sofrido pela coroa era diferente daquele sofrido por um objeto de mesma massa de ouro. No entanto, ele se confundiu, indicando que a coroa sofreria um empuxo menor, devido

à sua composição. Esse equívoco não aparece nas respostas do mesmo indivíduo às perguntas 7 e 8 do questionário, as quais analisaremos ainda nessa seção. Assim, ao que parece, o discente compreendeu adequadamente o funcionamento da Balança Hidrostática.

Na categoria C, foram situados participantes que, erroneamente, atribuíram a Galileu a descrição do método descrito por Vitruvius. Nessa questão, P₄, P₅ e P₁₄ afirmaram que Galileu indicou que Arquimedes “mergulhou um objeto de mesmo peso do ouro e outro do mesmo peso da prata e depois a coroa e com isso comparou a quantidade de água derramada para saber se havia mais ouro ou mais prata na coroa”. Esses indivíduos responderam a praticamente todo o questionário de forma idêntica, o que sinaliza a execução conjunta da atividade (diferentemente do que foi solicitado) ou, ainda, que houve cópia das respostas de um indivíduo.

Já na categoria D, foi alocado um único participante, P₃ o qual declarou que o funcionamento da Balança Hidrostática, método atribuído por Galileu a Arquimedes, estaria relacionado à comparação do quanto cada corpo afundava ao ser imerso em água. Possivelmente, tal afirmação está relacionada à atividade experimental realizada na intervenção, uma vez que as amostras submetidas a um maior empuxo ficaram suspensas sem afundarem completamente quando a Balança Hidrostática estava desequilibrada (Santos Júnior, 2023).

Bloco 2 – Fatores históricos relacionados às versões do episódio do furto da coroa

Estão contempladas nesta temática as questões 3 e 6 do questionário pós-intervenção. Esta análise foi baseada no referencial de Martins (2000).

Na questão 3, os participantes foram estimulados a recordar aspectos históricos referentes à problematização da versão vitruviana: *Que fatores históricos descredibilizam a versão descrita por Vitruvius?* O Quadro 8 sintetiza os argumentos apresentados.

Alocado na categoria A, o fator mais citado pelos estudantes, presente em 14 das 16 respostas, foi a ausência de registros históricos de Arquimedes sobre o episódio da falsificação da coroa. Praticamente todos os participantes, com exceção de P₃ e P₁₁ frisaram que esse aspecto tornava a narrativa de Vitruvius menos confiável. P₂ por exemplo, afirmou que “Não há evidência histórica que apoie a história da coroa, pois, Arquimedes não deixou registro do que aconteceu”. Essa visão foi reforçada pelos demais discentes.

Na categoria B, complementando o aspecto “ausência de registros históricos por Arquimedes”, P₆, P₇ e P₁₆ adicionaram outro elemento de grande importância, quer seja, a ausência do indicativo de fontes no texto de Vitruvius (Martins, 2000). P₁₆ por exemplo, afirmou que “Vitruvius [...] em nenhum momento indicou fonte em que se baseou”. De fato, como enfatizado na intervenção, Vitruvius não explicitou quaisquer fontes que o corroborassem.

Quadro 8 – Síntese das respostas à terceira pergunta.

Categoria	Fatores históricos que descredibilizam a versão vitruviana	Participantes
A	Arquimedes não registrou o episódio.	P ₁ , P ₂ , P ₄ , P ₅ , P ₆ , P ₇ , P ₈ , P ₉ , P ₁₀ , P ₁₂ , P ₁₃ , P ₁₄ , P ₁₅ e P ₁₆ .
B	Vitruvius não indicou sua fonte.	P ₆ , P ₇ e P ₁₆ .
D	Um escravizado não encheria a banheira até a borda.	P ₂ , P ₆ , P ₇ , P ₉ , P ₁₀ , P ₁₁ e P ₁₆ .
C	Vitruvius e Arquimedes não eram contemporâneos.	P ₁ , P ₂ , P ₃ , P ₆ , P ₈ , P ₉ , P ₁₀ , P ₁₂ , P ₁₃ e P ₁₆ .

Fonte: autoria própria.

Já na categoria C, foram elencados 10 participantes, os quais mencionaram que Vitruvius não viveu na mesma época que Arquimedes (Martins, 2000). Dentre as respostas indicadas, destaca-se a afirmação de que “Vitruvius viveu quase dois séculos depois de Arquimedes, um período muito longo para ter qualquer embasamento teórico”, apresentada por P₉. De fato, na intervenção, havíamos solicitado que os participantes imaginassem o que ocorreria com uma narrativa se ela fosse difundida verbalmente por um século e meio por intermédio de pessoas distintas. Na ocasião, os participantes declararam que a narrativa se fragilizava à medida que era disseminada a partir de relatos de terceiros ao longo desse período.

Na categoria D, registramos outro fator retomado com frequência pelos participantes, notado em 7 respostas: o fato de que um escravizado não encheria totalmente a banheira (Martins, 2000). P₁₁ afirmou que “um criado não iria encher uma banheira de água até a boca sabendo que iria ter que limpar depois”. De fato, como discutido na intervenção, é provável que um indivíduo em situação de servidão preparasse o banho de Arquimedes, haja visto seu prestígio. Sendo assim, não seria sensato supor que essa pessoa encheria a banheira até o seu limite, já que seria incumbido de limpar o local. Assim, P₂ indicou: “os servos de Arquimedes não deixariam a banheira totalmente cheia, pois, depois teriam que limpar, o que seria mais trabalhoso”.

Na sexta pergunta, os participantes foram questionados sobre evidências históricas que corroboram a versão galileana: *Que fatores históricos contribuem para o fortalecimento da versão apresentada por Galileu?*

O fator mais recorrente nas respostas (Quadro 9) está relacionado ao método descrito por Galileu se basear em trabalhos do próprio Arquimedes. De fato, o funcionamento da Balança Hidrostática é fundamentado por duas temáticas estudadas por Arquimedes: o funcionamento das alavancas e a hidrostática (Martins, 2000). As respostas que recordaram esse aspecto abordado na intervenção foram elencadas na categoria A. P₁, por exemplo, afirmou que “A narrativa proposta por Galileu é mais congruente, já que nela o método de solução

atribuído a Arquimedes está em sintonia com os princípios derivados de suas pesquisas registradas". De forma análoga, P₁₂ respondeu que "a versão apontada por Galileu tem mais lógica porque nele a forma de resolução que Arquimedes usou tem relação com os estudos que ele deixou".

Quadro 9 – Síntese das respostas à sexta pergunta.

Categoria	Fatores históricos que fortalecem a versão galileana	Participantes
A	Coerência com trabalhos de Arquimedes.	P ₁ , P ₂ , P ₇ , P ₈ , P ₉ , P ₁₁ , P ₁₂ e P ₁₃ .
B	Corroborada por documentos medievais e/ou poemas latinos.	P ₄ , P ₅ , P ₆ , P ₁₀ e P ₁₄ .
C	Outros.	P ₁₁ , P ₁₅ e P ₁₆ .

Fonte: autoria própria.

É notável que 8 dos 16 alunos tenham enfatizado esse aspecto, o qual, de fato, corrobora a versão de Galileu em detrimento da narrativa de Vitruvius (Martins, 2000). Houve, no entanto, menor incidência de respostas que citaram as evidências documentais que corroboram a narrativa galileana (apenas 5 discentes mencionaram esse fator). Assim, na categoria B, estão listados os participantes que citaram a existência de documentos medievais e/ou poemas latinos que apontam a utilização da Balança Hidrostática para a resolução de problemas similares ao da coroa. P₁₀, por exemplo, indicou "o fato de ter documentos medievais que citam a Balança Hidrostática para resolver problemas tipo o da coroa e poemas latinos que descrevem o uso da balança". Conforme citado na intervenção, esses documentos teriam sido encontrados no fim do século XIX pelo pesquisador francês Marcel Berthelot (1827-1907).

A categoria C lista estudantes que apresentaram respostas destoantes do que foi discutido durante a intervenção. P₁₅, por exemplo, indicou entre os fatores históricos "registros mais detalhados sobre os experimentos de Arquimedes feitos por outros cientistas posteriores e a maior compreensão da física e da hidrostática ao longo dos séculos". É possível que ele estivesse tentando se referir a documentos posteriores à Arquimedes que citam a Balança Hidrostática. P₁₁ afirmou que "Galileu foi influenciado por vários fatores históricos, como o Renascimento, que valorizou a observação empírica e a experimentação". Apesar de as informações evidenciadas serem verdadeiras, não se aplicam como resposta ao que foi solicitado. Já P₁₆ indicou como fatores históricos "Os princípios de Arquimedes que falam a respeito da lei de empuxo". É possível que o estudante estivesse tentando se referir ao fato de a versão de Galileu ser mais compatível com os trabalhos de Arquimedes sobre Hidrostática (categoria A), no entanto, essa intenção não transparece efetivamente na sua afirmação.

Bloco 3 – Compreensão do Princípio de Arquimedes e seu limite de validade

Enquadram-se na temática as questões 7, 8 e 11. Esta análise foi baseada no referencial de Silveira e Medeiros (2009).

A sétima pergunta questionava sobre o conceito de Empuxo: *Qual a relação entre o módulo do empuxo atuante sobre um objeto e seu volume submerso?*

O padrão mais recorrente nas declarações (Quadro 10), notado em 7 das 16 respostas, consistiu na escolha por evidenciar a relação entre o módulo do empuxo e o volume de fluido deslocado. Tais respostas foram elencadas na categoria A. Esses discentes indicaram que quanto maior o volume de fluido deslocado, maior a intensidade da força de empuxo. Como afirmou P₁, “o empuxo exercido por um fluido em um objeto submerso é equivalente ao peso do fluido deslocado pelo objeto”. Tal afirmação remete ao enunciado do Princípio de Arquimedes, o qual, como discutido anteriormente, possui um limite de validade. É importante notar que o volume submerso do objeto não é necessariamente idêntico ao volume deslocado de fluido, no entanto, tais quantidades são diretamente proporcionais. Dessa forma, por mais que esses estudantes não tenham citado explicitamente “volume submerso” nas suas respostas, indicar que o empuxo é diretamente proporcional ao volume de fluido deslocado é uma resposta satisfatória. O estudante P₆ fez uso exatamente do enunciado do Princípio de Arquimedes apresentado na intervenção, declarando 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”. Novamente, não houve menção direta ao volume submerso do objeto, mas a resposta é aceitável para condições que não se aproximam do limite de validade do Princípio.

Quadro 10 – Categorização das respostas à sétima pergunta.

Categoria	Relação entre o módulo do empuxo atuante sobre um objeto e o seu volume submerso	Participantes
A	Quanto maior o volume de fluido deslocado, maior o módulo do empuxo.	P ₁ , P ₂ , P ₆ , P ₇ , P ₈ , P ₉ e P ₁₁ .
B	Quanto maior o volume submerso do objeto, maior o empuxo.	P ₁₀ , P ₁₂ , P ₁₃ , P ₁₅ e P ₁₆ .
C	Condições de flutuação.	P ₄ , P ₅ e P ₁₄ .
D	O empuxo é igual ao peso do objeto na água.	P ₃ .

Fonte: autoria própria.

Já na categoria B, estão listados 5 dos 16 participantes, os quais enfatizaram a relação de proporcionalidade direta entre o volume submerso de um objeto e a intensidade do empuxo atuante. Essas respostas são consideradas satisfatórias. Remetem à atividade experimental com a Balança Hidrostática, e ressaltam um aspecto relacionado ao enunciado revisto do Princípio de Arquimedes, abordado na intervenção, o qual substitui a referência ao volume de fluido

descolado pelo volume submerso do objeto, evitando o Paradoxo Hidrostático (Silveira; Medeiros, 2009).

A incidência desse padrão de resposta demonstra que a discussão relacionada à atualização do Princípio de Arquimedes surtiu efeitos positivos. P₁₅, por exemplo, indicou que “a relação entre o módulo do empuxo atuante sobre um objeto e seu volume submerso é diretamente”. Acredita-se que o estudante, ao expressar que a relação entre o empuxo e o volume submerso do objeto “é diretamente”, queira, na verdade, indicar que essas grandezas são diretamente proporcionais. P₁₀ fez uma declaração similar, apontando que “a relação é que quanto maior for o volume (submerso), maior vai ser a força do empuxo”. O discente havia afirmado como resposta à questão 5 que a coroa de ouro e prata sofreria um empuxo menor que um objeto de mesma massa de ouro, o que colocaria em dúvida sua compreensão sobre o que foi discutido. No entanto, a indicação correta de que há uma relação direta entre o volume submerso de um objeto e o módulo do empuxo atuante sobre ele, permite cogitar que o erro na questão 5 possa ter sido um simples equívoco na escrita.

Na categoria C, estão P₄, P₅ e P₁₄ os quais, como indicado anteriormente, responderam seus questionários de forma quase idêntica. Esses discentes não indicaram a relação entre o módulo do empuxo e volume submerso de um objeto. Em vez disso, explicitaram as condições de flutuação, temática que não foi discutida em sala. A resposta dos alunos foi a seguinte:

“Se um objeto mergulhado em um fluido afunda, pode afirmar que a sua densidade é maior que a do líquido e que o seu peso é superior ao empuxo. Se as densidades do corpo e do fluido forem iguais, o corpo permanecerá em equilíbrio no líquido e pode afirmar que o empuxo é igual ao peso do corpo”.

A afirmação, apesar de correta, evidencia uma má compreensão da pergunta ou mesmo falta de interesse em responder ao questionário, já que os participantes não foram indagados sobre as condições de flutuação de um objeto imerso totalmente ou parcialmente em um fluido.

Por fim, na categoria D, está P₃ o qual indicou que “o empuxo é igual ao peso do objeto na água”. É possível que ele estivesse se referindo também a uma condição de flutuação, mas seu raciocínio está incompleto, de modo a não transmitir o que ele pode ter pensado.

O oitavo questionamento dizia respeito à comparação das magnitudes dos empuxos: *Ao submergir na água uma coroa composta por ouro e prata e uma amostra de ouro de mesma massa, qual dos objetos sofrerá um maior empuxo?* (Quadro 11).

Quase a totalidade dos participantes (14 dos 16 alunos) respondeu corretamente que a coroa de ouro e prata sofreria um empuxo maior que a amostra de ouro. Esses estudantes foram inseridos na categoria A. Um exemplo de afirmação que se enquadra nessa categoria foi apresentado por P₂, que indicou que o empuxo teria maior intensidade “na coroa composta por ouro e prata, pois, tem um volume maior”. Resposta análoga foi apresentada por P₁₀ ao afirmar que o empuxo seria maior no objeto que contém “prata, pois o seu volume é maior”. Novamente, a declaração de P₁₀ confirma a hipótese de que sua resposta à quinta questão refletia um equívoco na escrita e não uma compreensão deficiente do Princípio de Arquimedes.

Quadro 11 – Síntese das respostas à oitava pergunta.

Categoria	Objeto que sofrerá maior empuxo: coroa composta por ouro e prata ou amostra de ouro de mesma massa?	Participantes
A	A coroa de ouro e prata.	P ₁ , P ₂ , P ₃ , P ₄ , P ₅ , P ₆ , P ₇ , P ₈ , P ₉ , P ₁₀ , P ₁₁ , P ₁₂ , P ₁₃ e P ₁₄ .
B	Ambos sofrerão o mesmo empuxo.	P ₁₅ .
C	A coroa, pois possui uma maior massa.	P ₁₆ .

Fonte: autoria própria.

Ainda sobre a categoria A, destaca-se que P₃, P₄, P₅ e P₁₄ haviam apresentado respostas à sétima questão que não explicitavam as suas concepções sobre a relação entre o volume submerso de um objeto e o módulo do empuxo atuante sobre ele. Mesmo assim, responderam corretamente à oitava pergunta, indicando que a coroa feita de ouro e prata sofreria um empuxo mais intenso que um objeto de ouro de mesma massa. Esse fato pode ser um indicativo de má compreensão do questionamento anterior ou de dificuldade de expressarem o que pensavam de forma escrita. Já os demais discentes citados nessa categoria apresentaram respostas coerentes com o que haviam evidenciado no sétimo item do questionário.

Nas categorias B e C, estão listados, respectivamente, P₁₅ e P₁₆. O discente P₁₅ afirmou que “ambos os objetos sofrerão o mesmo empuxo, pois o empuxo depende apenas do volume do líquido deslocado e não da composição dos objetos”. É interessante notar que o mesmo padrão de resposta é obtido quando a pergunta é destinada à Inteligência Artificial (IA) denominada de ChatGPT. Os estudantes foram alertados durante a aula que a IA falha ao analisar o problema da coroa. Mesmo assim, P₁₅ parece ter insistido em sua utilização, evidenciando ausência de criticidade para julgar informações fornecidas pela internet. De fato, o módulo do empuxo só depende do volume de fluido deslocado, mas a coroa feita de uma liga metálica desloca um volume de líquido maior que uma amostra de mesma massa de ouro, sendo submetida a um empuxo mais intenso. Já P₁₆ indicou corretamente que a coroa sofreria um maior empuxo, mas justificou indicando que “ela será o corpo de maior massa”. A afirmação demonstra desatenção já que a própria pergunta registra que ambos têm a mesma massa.

A décima primeira questão indagava os participantes sobre um limite de validade para o Princípio: *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.*

Elencados na categoria A, 7 dos 16 participantes responderam ao questionamento indicando que o Princípio de Arquimedes só seria válido quando o objeto imerso no fluido possuísse dimensões bem menores que as do recipiente que o contivesse (Quadro 12). De fato, como discutido na intervenção, o enunciado usual do Princípio de Arquimedes falha em prever o módulo do empuxo quando as dimensões do objeto são parecidas com as dimensões do

recipiente em que o fluido está contido. Assim, somente seria válido quando as dimensões do recipiente contendo o fluido fossem muito maiores que as dimensões do objeto imerso no fluido (Silveira; Medeiros, 2009). Nesse sentido, P₁₂ afirmou que “para o princípio ser válido o objeto tem que ser colocado em um fluido localizado em um recipiente com dimensões muito maiores”. De forma análoga escreveu P₁₄ ao afirmar que “só é válido quando as dimensões do objeto inserido no fluido são muito menores que as dimensões do recipiente em que o fluido está contido”. Tais declarações se equivalem, demonstrando compreensão do que foi discutido.

Quadro 12 – Síntese das respostas à oitava pergunta.

Categoría	O enunciado do Princípio de Arquimedes tem um limite de validade? Explicar.	Participantes
A	Sim, só é válido quando o objeto imerso no fluido tem dimensões muito menores que as dimensões do recipiente.	P ₄ , P ₅ , P ₆ , P ₁₀ , P ₁₂ , P ₁₃ e P ₁₄ .
B	Sim, o Paradoxo Hidrostático é notado quando um objeto é submerso em um fluido contido em um recipiente com dimensões bem maiores que as do objeto.	P ₁ , P ₂ , P ₇ , P ₈ e P ₉ .
C	Sim, se aplica apenas a alguns objetos.	P ₃ .
D	Não, mas pode ser desafiado em algumas situações, como no experimento do Paradoxo Hidrostático.	P ₁₅ .
E	Sim, nem sempre é totalmente preciso para determinar a pureza de um material.	P ₁₁ .
F	Sim, no caso da banheira era inviável que ela fosse preenchida até a borda para um banho.	P ₁₆ .

Fonte: autoria própria.

Na categoria B, nota-se uma inversão. Cinco participantes indicaram, de modo equivocado, que o Paradoxo Hidrostático ocorre quando as dimensões do recipiente que contém o fluido são muito maiores que as dimensões do objeto imerso. No entanto, essa é justamente a condição que *não gera paradoxo algum*. O enunciado usual do Princípio de Arquimedes funciona exclusivamente nessa situação, conforme evidenciado na intervenção.

A declaração de P₁ é um exemplo de resposta inserida na categoria B:

“A validade do enunciado do Princípio de Arquimedes encontra limitações em algumas circunstâncias, conforme evidenciado pelo experimento do Paradoxo Hidrostático. Se manifesta quando um objeto é imerso em um líquido mantido em um recipiente significativamente maior do que o objeto”.

O indivíduo reconheceu que o Princípio de Arquimedes possui limitações, mas descreveu erroneamente em quais condições a sua validade se encerra.

As categorias C, D, E e F possuem cada uma um representante. P₃ inserido na categoria C, indicou simplesmente que “como visto na sala o princípio se aplica apenas a alguns objetos, mais outros não”, não apresentando qualquer explicação que esclarecesse suas concepções.

Já na categoria D, encontra-se o participante P₁₅, o qual indicou:

“O enunciado do Princípio de Arquimedes não tem um limite de validade, pois é uma lei fundamental da física que se aplica a qualquer objeto imerso em um fluido. Portanto, o experimento do Paradoxo Hidrostático mostra que o princípio pode ser desafiado em situações específicas, mas isso não invalida sua aplicabilidade geral”.

É interessante notar que o participante, apesar de afirmar, de modo equivocado, que o Princípio de Arquimedes não teria um limite de validade, reconheceu, paradoxalmente, que seu enunciado poderia ser “desafiado em situações específicas” como as do “experimento do Paradoxo Hidrostático”. Não há na resposta do participante elementos que permitam elucidar a sua compreensão sobre que situações específicas seriam essas.

Incluído na categoria E, P₁₁ indicou que o Princípio de Arquimedes seria limitado, já que “nem em todos os casos teremos total precisão da pureza do material”. A resposta do estudante demonstra evidente má compreensão ou desinteresse pela pergunta realizada, ou simplesmente dispersão no momento da discussão sobre essa temática.

Por fim, na categoria F, P₁₆ afirmou que “podemos lembrar acerca da banheira que foi um ocorrido onde seria inviável encher a banheira até o topo para que Arquimedes pudesse tomar um banho”. Tal resposta parece sinalizar um entendimento deficiente do questionamento.

Bloco 4 – Concepções sobre a NdC

Estão vinculadas à temática as questões 09 e 10 do questionário pós-intervenção. A pergunta 9 remetia a refletir sobre possíveis alterações do Princípio de Arquimedes ao longo do tempo, sendo: *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.).*

A distinção mais citada entre o enunciado hodierno do Princípio e aquele elaborado no século III a.C. diz respeito à sua aplicabilidade atual a fluidos (líquidos e gases) e não somente à água, como estabeleceu Arquimedes (Quadro 13). 11 dos 16 alunos mencionaram essa modificação no enunciado do Princípio de Arquimedes, sendo listados na categoria A. A elevada recorrência desse padrão de resposta indica que os estudantes reconheceram essa alteração como algo relevante. Tal percepção pode ter sido potencializada pela discussão do exemplo da força de empuxo atuante sobre um balão de ar quente.

Quadro 13 – Síntese das respostas à nona pergunta.

Categoria	O princípio elaborado por Arquimedes é idêntico ao Princípio de Arquimedes atual?	Participantes
A	Não, pois o enunciado do Princípio de Arquimedes aplicava-se somente à água (ou a líquidos) e hoje se aplica a fluidos em geral.	P ₁ , P ₂ , P ₄ , P ₅ , P ₆ , P ₇ , P ₈ , P ₉ , P ₁₂ , P ₁₃ e P ₁₄ .
B	Não, já que Arquimedes não considerou o papel da tensão superficial no transbordamento dos líquidos.	P ₁ , P ₂ , P ₈ , P ₉ , P ₁₂ e P ₁₃ .
C	Não, a formulação atual é mais abrangente ou melhor.	P ₁ , P ₂ , P ₃ , P ₇ , P ₈ e P ₉ .
D	É idêntico/similar, mas com algumas modificações.	P ₁₀ e P ₁₅ .
E	Não, pois atualmente existem métodos mais eficientes para determinar a pureza do ouro.	P ₁₁ .
F	Não, pois Arquimedes não deixou nenhum relato sobre o episódio da coroa. Sendo assim, é provável que a história tenha sofrido distorções.	P ₁₆ .

Fonte: autoria própria.

O discente P₁ apresentou um exemplo de resposta enquadrada nessa categoria:

“Sua formulação era específica para a água e não incorporava as características de outros líquidos ou gases. O princípio que ele concebeu não se assemelha exatamente ao que atualmente reconhecemos como o Princípio de Arquimedes, o qual é uma formulação mais ampla e refinada, considerando diversos tipos de fluidos”.

O participante demonstrou compreender, portanto, o caráter mutável desse Princípio, indicando que hoje sua aplicabilidade difere daquela de dois milênios atrás. A afirmação, no entanto, de que atualmente o princípio é mais “refinado” não é propriamente recomendável, uma vez que reflete um juízo de valor advindo de uma comparação descontextualizada de enunciados de épocas muito distintas.

Resposta análoga foi apresentada por P₄ o qual indicou que “naquela época os fluidos eram apenas líquidos e atualmente se enquadra também os gases”. O participante se referiu ao termo “fluido”, presente no trabalho de Arquimedes, o qual, na verdade, se referia somente à água. E, indicou corretamente a aplicabilidade atual do princípio para líquidos e gases.

Na categoria B, estão listados os participantes que mencionaram que a tensão superficial não foi considerada por Arquimedes na escrita do enunciado do Princípio. P₈ indicou, por exemplo, que “Arquimedes desenvolveu seu princípio baseado em observações com água como fluido, e não tinha conhecimento sobre a generalização do princípio para diferentes fluidos ou sobre os limites impostos pela tensão superficial”. De fato, esse tipo de fenômeno não foi levado em conta, e o conceito de tensão superficial, por sua vez, sequer existia no século III a.C. Apesar de não haver implicação direta da tensão superficial no enunciado do

Princípio, esse fenômeno influencia no fato de que, mesmo que um objeto seja submerso em um líquido prestes a transbordar de um recipiente, o volume extravasado pode ser diferente do volume submerso do objeto (o que inviabiliza o método descrito por Vitruvius). É provável que a alusão dos participantes a esse efeito remeta à atividade experimental investigativa, realizada na intervenção, que consistia na inserção de moedas em um copo completamente cheio de água.

Já na categoria C, estão elencados os participantes que afirmaram que o enunciado atual do Princípio de Arquimedes seria mais abrangente que aquele indicado no século III a.C. P₁, P₂, P₇, P₈ e P₉ fizeram essa declaração em conjunto com a ponderação de que atualmente o Princípio se aplica a líquidos e gases. Já P₃ se limitou a afirmar que “o princípio foi mudado em relação ao tempo e em que foi descobrindo mais estudos, ele foi melhorado”. Em seguida, na categoria D, estão os discentes P₁₀ e P₁₅ os quais indicaram que o enunciado atual do Princípio de Arquimedes permanece idêntico ou semelhante ao que foi escrito na Antiguidade. P₁₀ afirmou que “hoje o princípio é mais elaborado, mas continua sendo o mesmo”. A conclusão estabelecida pelo participante é, de certa forma, paradoxal. Se o princípio é mais elaborado atualmente, como poderia ser o mesmo? Já P₁₅ afirmou que o princípio atual é similar ao da Antiguidade, “mas pode haver diferenças na redação e na aplicabilidade dependendo do contexto”. Assim como a declaração de P₁₀ a resposta de P₁₅ parece, de certo modo, contraditória. Como um princípio que teve sua redação e sua aplicabilidade alteradas permanece similar ao que era antes? Esperava-se que os alunos percebessem que as modificações sofridas pelo Princípio ao longo de séculos seriam suficientes para afirmar sua diferença considerável em relação ao enunciado do século III a.C.

Por fim, nas categorias E e F, estão respostas que se distanciam do que foi perguntado. P₁₁ (categoria E) indicou que o enunciado do Princípio de Arquimedes não permaneceu inalterado, pois hoje existem métodos mais eficazes para determinar a pureza do ouro. Já o participante P₁₆ (categoria F), indicou que “ao longo da história esse conto pode ter mudado, pois ele não escreveu a respeito do tema”. Tal afirmação remete ao fato de o episódio da coroa não ter sido relatado por Arquimedes. No entanto, a pergunta não dizia respeito a esse aspecto.

Passaremos, agora, à discussão dos resultados obtidos em resposta à décima pergunta do questionário. Como se sabe, a literatura especializada costuma recomendar, há algum tempo, uma abordagem preferencialmente explícita e contextualizada da temática NdC por meio de episódios históricos. Há referências de que um ensino implícito, não contribuiria tanto para o aprendizado de NdC quando comparado a um ensino explícito dessa temática (Abd-El-Khalick; Lederman, 2000; Clough; Olson, 2008; Mccomas, 2008; El-Hani; Freire Junior; Teixeira, 2009; Forato, 2009).

Indicamos anteriormente, na Síntese da Parte II da sequência didática, que foi realizada na intervenção uma abordagem implícita do aspecto “provisoriedade do conhecimento”. Assim, buscamos saber se esse tipo de abordagem, ainda que não explícita, trouxe resultados satisfatórios. A décima pergunta buscava investigar, assim, se os participantes *foram capazes de perceber* o caráter provisório do conhecimento científico a partir das discussões:

Considerando o questionamento anterior, o que isso sugere sobre a natureza do conhecimento científico?

As respostas dos estudantes foram organizadas em categorias, as quais podem ser consultadas no Quadro 14.

Quadro 14 – Síntese das respostas à décima pergunta.

Categoría	Considerar o questionamento anterior para refletir sobre a natureza do conhecimento científico	Participantes
A	O conhecimento científico pode ser alterado.	P ₃ , P ₁₂ e P ₁₆ .
B	O conhecimento científico evolui/ é aprimorado com o tempo.	P ₁ , P ₂ , P ₄ , P ₅ , P ₆ , P ₇ , P ₈ , P ₉ , P ₁₀ , P ₁₁ , P ₁₃ , P ₁₄ e P ₁₅ .

Fonte: autoria própria.

Promover visões mais complexas sobre a NdC a partir da discussão de fontes primárias foi um dos objetivos elencados para a intervenção. As respostas à décima questão indicam que os participantes se deram conta de que o episódio abordado contextualmente sinalizava a perspectiva de provisoredade do conhecimento. Para todos os participantes que responderam ao questionário, o conhecimento científico seria mutável. Dessa forma, embora a abordagem não tenha sido explícita em relação ao referido aspecto, houve resultados satisfatórios no sentido de contribuir com o ensino da temática “provisoredade do conhecimento”, o que, de certo modo, vai de encontro à perspectiva sinalizada pela literatura.

Por outro lado, houve variações nas respostas dos estudantes, de modo que visões mais ingênuas também foram notadas. Na categoria A, estão listadas as respostas de três participantes que assinalaram a possibilidade de modificação do conhecimento. Incluída nessa categoria temos a resposta peculiar de P₃, para quem o conhecimento seria provisório até que definitivamente comprovado. Assim, para P₃ a ciência poderia sofrer modificações quando “a teoria não for 100% comprovada”. Temos, nesse caso, portanto, uma visão de ciência mais simplista uma vez que o participante considera que o conhecimento científico é mutável, mas se torna definitivo após provado experimentalmente. Embora não tenha sido um dos objetivos da intervenção, esse tipo de resposta evidencia a necessidade de se discutir acerca do papel do experimento e do significado da corroboração empírica. Já P₁₆, por exemplo, indicou que na ciência “podem ocorrer mudanças ao passar do tempo, além de influências”. Ele não detalhou em sua resposta que “influências” seriam essas, de modo que não temos indicações específicas para explorarmos esse aspecto interessante da resposta do participante.

Ainda quanto a esse tópico do questionário, 13 dos 16 participantes explicitaram que o conhecimento científico evolui ou é aprimorado com o tempo (categoria B). P₁₅ indicou que “o conhecimento científico é construído ao longo do tempo, com novas descobertas e aprimoramentos, e que as teorias científicas podem ser revisadas e atualizadas com base em

novas evidências”. P₉ afirmou que “o exemplo mostra a forma evolutiva e progressiva do conhecimento científico se transformar e ele vai transformando-se ao longo do tempo”. Os participantes demonstraram, assim, conceber o conhecimento científico como uma construção, podendo sofrer atualizações e revisões ao longo do tempo. Alguns deles citaram o próprio caso do Princípio de Arquimedes para contextualizar essa concepção. P₁₁, por exemplo, respondeu que “o conhecimento científico avança conforme os séculos passam, fazendo com que o Princípio de Arquimedes tenha melhorado de certa forma”. Tendo em vista as respostas incorporadas à categoria B, acreditamos que seria oportuno abordar, nesse tipo de intervenção, em que medida se dão essas transformações, a fim de contornar eventuais percepções de uma evolução linear, contínua da ciência ou, ainda, comparações descontextualizadas de conhecimentos de épocas distintas, que podem implicar avaliações anacrônicas. Assim, aprofundar essas discussões, possivelmente de forma explícita, como sugere a literatura supracitada, poderia trazer contribuições adicionais aos participantes.

Nesta seção, analisamos, portanto, as respostas ao instrumento de pesquisa. No que diz respeito à análise dos aspectos físicos e históricos das versões para o episódio da coroa, os discentes evidenciaram uma boa compreensão dos métodos narrados, bem como dos motivos que fazem a versão galileana inspirar maior credibilidade, se comparada à vitruviana. Quanto ao Princípio de Arquimedes, foi possível notar respostas satisfatórias, indicando corretamente a relação de proporcionalidade direta entre o volume submerso dos objetos e o empuxo ao qual eles ficariam submetidos. Alguns participantes, porém, apresentaram dificuldades em relação ao Paradoxo Hidrostático. Já no que diz respeito às concepções sobre NdC, resultados interessantes foram percebidos. Boa parte dos participantes ressaltou a provisoriação do conhecimento científico. É importante frisar, no entanto, que foram notados nas respostas traços de juízos de valor que procedem de comparações descontextualizadas entre conhecimentos de épocas distintas. Esse aspecto mereceria ser abordado em situação oportuna.

V. Considerações finais

O impacto da abordagem proposta nesse trabalho pode ser avaliado a partir de quatro aspectos: 1. a compreensão dos fatores físicos e históricos que fazem a narrativa de Galileu mais coerente que a de Vitruvius; 2. a compreensão do método da Balança Hidrostática e os argumentos que embasam a sua provável utilização; 3. o entendimento do enunciado do Princípio de Arquimedes e do seu limite de validade e 4. as concepções sobre NdC.

Quanto ao primeiro aspecto, tanto durante a aplicação da sequência didática, quanto nas respostas ao questionário investigativo, a maior parte dos participantes expressou corretamente que a versão vitruviana se baseava em medidas de volumes transbordados, bem como apontou que a tensão superficial e a variação mínima do nível da água seriam empecilhos para a utilização desse método. Além disso, a interação ao longo da intervenção e as respostas observadas no questionário evidenciaram compreensão dos aspectos históricos discutidos, como a ausência de registros históricos deixados por Arquimedes, a ausência de indicação de

fontes por Vitruvius e a separação temporal de dois séculos entre esses dois personagens. As etapas de Problematização, realizadas de acordo com o referencial dos Três Momentos Pedagógicos, foram fundamentais para o desenvolvimento dessas percepções pelos estudantes, de modo a evidenciar a importância desse referencial para a intervenção.

No que concerne à compreensão do método da Balança Hidrostática, a maioria dos participantes identificou corretamente que o método narrado por Galileu se fundamentava na comparação de pesos aparentes ou, em descrição atual, na comparação dos empuxos atuantes sobre objetos de mesma massa, mas de densidades diferentes. Sobre os argumentos históricos que reforçam essa versão, é necessário um alerta. Poucos participantes souberam sinalizar as evidências históricas materiais que corroboram a narrativa de Galileu e a utilização da Balança Hidrostática. Isso aponta a necessidade de redobrar a atenção relativa a esse aspecto em futuras aplicações, reforçando com maior cuidado as evidências encontradas no final do século XIX.

Quanto à compreensão historicamente contextualizada do Princípio de Arquimedes, a percepção foi positiva. Percebemos que os participantes demonstraram compreender corretamente a relação entre o módulo da força de empuxo e o volume submerso de um objeto em um fluido. Nas respostas ao questionário, a maior parte dos estudantes afirmou que objetos de maior volume estão sujeitos a um empuxo de maior intensidade quando submersos. Houve, portanto, uma conclusão fundamentada de que a coroa fraudada experimentava uma força de empuxo mais significativa do que um objeto de ouro com a mesma massa.

Os participantes tiveram êxito na Construção do Conhecimento sobre a Balança Hidrostática. E o fato de nos apoiarmos no referencial da experimentação por investigação, propondo o uso didático da Balança Hidrostática de forma dialogada, a partir de questões problematizadoras, contribuiu para esses bons resultados. Na etapa de Aplicação do Conhecimento, os participantes foram bem-sucedidos na utilização da Balança Hidrostática, determinando adequadamente a proporção entre as massas de moedas e de bolas de gude em uma amostra contendo esses materiais. Desse modo, o referencial dos Três Momentos Pedagógicos também demonstrou sua efetividade como contribuição para o trabalho desenvolvido, havendo integração e articulação entre as diversas etapas.

Quanto ao limite de validade do Princípio de Arquimedes, a maior parcela dos estudantes respondeu corretamente que o enunciado usual se aplica somente a objetos com dimensões muito menores que as do recipiente que contém fluido. No entanto, notou-se, durante a intervenção, que os alunos apresentaram dificuldade para compreender a distinção entre o enunciado usual desse princípio e o enunciado revisado apresentado por Silveira e Medeiros (2009). Além disso, as respostas ao questionário evidenciaram que alguns discentes não obtiveram êxito em descrever corretamente o Paradoxo Hidrostático. Essas observações indicam a necessidade de um período maior para discussão das situações que exploram as limitações do Princípio de Arquimedes. Uma alternativa considerada para futuras reaplicações da sequência didática foi não expor o enunciado revisado, concentrando-se em demonstrar, por meio do resultado supostamente paradoxal do experimento, que o enunciado tradicional não se

aplica a situações análogas àquela. Dessa forma, tem-se, assim a apresentação do enunciado usual do Princípio acompanhado da sinalização do seu limite de validade.

No que diz respeito à natureza do conhecimento científico, mesmo que não tenhamos enfatizado explicitamente considerações sobre a Natureza da Ciência, resultados importantes foram notados. Se por um lado, os participantes em alguns momentos demonstraram certa tendência a comparações descontextualizadas (e anacrônicas) de conhecimentos de épocas distintas, por outro, sinalizaram adequadamente que a ciência é mutável, podendo o conhecimento científico sofrer revisões. Percepções como essas são suficientes para afirmarmos que os discentes manifestaram concepções adequadas quanto à provisoriaidade do empreendimento científico. Ficou evidente, no entanto, que seria desejável avançar no sentido de problematizar algumas visões simplistas sobre a NdC que emergiram durante a intervenção, possivelmente recorrendo a abordagens explícitas, como sugere a literatura da área.

Em síntese, tendo em vista os resultados colhidos por meio do instrumento de pesquisa e a percepção do docente sobre a aplicação, o balanço foi positivo. A discussão das duas versões do episódio permitiu que os discentes exercitassem sua criticidade, realizando a análise de aspectos físicos e históricos relacionados a essas versões, de modo a selecionarem uma delas como a mais coerente. Por fim, chegaram a conclusões importantes quanto à natureza do conhecimento, já que apontaram a existência de um limite de validade para o Princípio estudado e reconheceram que este sofreu modificações ao longo dos séculos. A partir da abordagem historicamente contextualizada, os estudantes foram capazes de compreender o Princípio de Arquimedes, e de aplicá-lo, resolvendo situações e avaliando narrativas históricas intrinsecamente relacionadas à construção desse conhecimento. Tais resultados evidenciam o papel significativo que a HC pode assumir quando utilizada para além da mera ilustração, consistindo em uma possibilidade de abordagem para o ensino da ciência e sobre a ciência.

Agradecimentos

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

Referências bibliográficas

ABD-EL-KHALICK, F.; LEDERMAN, N. The Influence of history of science courses on students' views of nature of science. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 10, n. 37, p. 1057-1095, 2000.

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

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

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 2004.

BATISTA, G. L. F.; DRUMMOND, J. M. H. F.; FREITAS, D. B. Fontes primárias no ensino de física: considerações e exemplos de propostas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, p. 663-702, 2015.

CARVALHO, A. M. P. As práticas experimentais no ensino de física. In: CARVALHO, A. M. P.; RICARDO, E.; SASSERON, L. H.; ABIB, M. L. V. S.; PIETROCOLA, M. (Org.) **Ensino de Física**. São Paulo: Editora Cengage, 2010. cap. 3, p. 53-77.

CLOUGH, M. P.; OLSON, J. K. Teaching and assessing the nature of science: an introduction. **Science & Education**, v. 17, p. 143-145. 2008.

EL-HANI, C. N.; FREIRE JUNIOR, O.; TEIXEIRA, E. S. A influência de uma abordagem contextual sobre as concepções acerca da natureza da ciência de estudantes de física. **Ciência & Educação**, v. 15, n. 3, p. 529-556. 2009.

FORATO, T. M. C. **A natureza da ciência como saber escolar**: um estudo de caso a partir da história da luz. 2009. 420 f. Tese (Faculdade de Educação) - USP, São Paulo.

FORATO, T. C. M.; MARTINS, R. de A.; PIETROCOLA, M. Enfrentando obstáculos na transposição didática da história da ciência para a sala de aula. In: PEDUZZI, L. O. Q.; MARTINS, A. F. P.; FERREIRA, J. M. H. (Org.) **Temas de história e filosofia da ciência no ensino**. Natal: EDUFRN, 2012. cap. 5, p. 123-154.

GALILEI, G. La bilancetta – A pequena balança ou Balança Hidrostática. Tradução: P. Lucie. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 9, p. 105-107, 1986.

HIDALGO, J. M.; QUEIROZ, D. DE M.; OLIVEIRA, M. C. J. DE. 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.

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

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

MARTINS, R. de A. Introdução: a história das ciências e seus usos na educação. In: SILVA,

C. C. (Org) **Estudos de história e filosofia das ciências:** subsídios para aplicação no ensino. São Paulo: Editora Livraria da Física, p. 17-30, 2006.

MCCOMAS, W. F. Seeking historical examples to illustrate key aspects of the Nature of Science. **Science & Education**, v. 17, p. 249-263, 2008.

MENDONÇA, P. C. C. De que conhecimento sobre Natureza da Ciência estamos falando? **Ciência & Educação**, v. 26, e20003, 2020.

MOURA, C.; GUERRA, A. Conflitos em abordagens históricas para temas consolidados na ciência escolar: um estudo de caso sobre os modelos atômicos. **Revista Tecné, Episteme y Didaxis**, número extraordinário, p. 851-857, 2016.

MUENCHEN, C.; DELIZOICOV, D. Os três momentos pedagógicos e o contexto de produção do livro “Física”. **Ciência & Educação**, v. 20, n. 3, p. 617-638, 2014.

ORTEGA, D., MOURA, B. A. Uma abordagem histórica da reflexão e da refração da luz. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, e20190114, 2020.

PEDUZZI, L. O. Q.; RAICIK, A. C. 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.

SANTOS JÚNIOR, E. R. **O Princípio de Arquimedes no Ensino Médio:** a Balança Hidrostática e o Paradoxo de Galileu. 2023. 258 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física em Rede Nacional) - Escola de Ciências e Tecnologia, UFRN, Natal.

SASSERON, L. H.; NASCIMENTO, V. B.; CARVALHO, A. M. P. O Uso de Textos Históricos Visando a Alfabetização Científica. In: BELTRAN, M. H. R.; SAITO, F.; SANTOS, R. N.; WUO, W. (Org) **História da Ciência e Ensino.** São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2009. p. 97-106.

SILVA, A. P. B.; GUERRA, A. **História da Ciência e Ensino:** Fontes Primárias e propostas para sala de aula. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.

SILVEIRA, F. L.; MEDEIROS, A. 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.

VITRUVIUS, M. P. De *Architectura* IX. In: COHEN, M. R.; DRABKIN, I. E. (Org) **A Source**

Book in Greek Science. Cambridge, Massachusetts: Havard University Press, 1958. p. 238-239.

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

Anexo I – Trechos do *De Architectura*

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 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". (Vitruvius, 1958, p. 238; nossa tradução)

[...] 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. 239; nossa tradução)

Anexo II – Trechos do *La Bilancetta*

Trecho A - 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).

Trecho B – [...] após haver cuidadosamente revisto o que Arquimedes demonstra nos seus tratados [...] 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).

Trecho C - 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” (Galilei, 1986, p. 106).

Apêndice I – Balança Hidrostática elaborada pelos autores e utilizada na aplicação da sequência didática



Fonte: autoria própria.



Direito autoral e licença de uso: Este artigo está licenciado sob uma [Licença Creative Commons](#).