

A importância de modelos para o ensino de Física: em foco o princípio de Arquimedes nos livros didáticos de Ensino Médio

The importance of models for teaching Physics: focusing on Archimedes' principle in high school textbooks

Salmon Landi Júnior¹
Nyuara Araújo da Silva Mesquita²
Wellington Pereira de Queirós³

Resumo

Este trabalho teve como objetivo identificar e discutir os modelos explicativos para a abordagem do princípio de Arquimedes em livros didáticos de Ciências da Natureza aprovados pelo Programa Nacional do Livro e do Material Didático 2021. Além disso, propôs-se um modelo explicativo, que pode ser implementado em aulas de Física, a partir da relação entre experimentação e elementos matemáticos e teóricos. Quanto à análise dos livros didáticos, observou-se que a apresentação do princípio de Arquimedes, na maioria dos casos, mostrou-se desvinculada da fundamentação teórica e sustentada por equações matemáticas que não são devidamente explicadas. Por sua vez, o modelo explicativo proposto aqui busca elucidar aspectos conceituais e matemáticos, contribuindo com uma abordagem mais reflexiva em aulas de Física do Ensino Médio.

Palavras chave: ensino de Física; hidrostática; empuxo.

Abstract

This study aimed to identify and discuss the explanatory models for approaching Archimedes' principle in Natural Sciences textbooks approved by the Programa Nacional do Livro e do Material Didático 2021. In addition, an explanatory model that can be implemented in Physics classes, based on the relationship between experimentation and mathematical and theoretical elements was proposed. Regarding the analysis of the textbooks, it was observed that the presentation of Archimedes' principle, in most cases, was disconnected from the theoretical foundation and supported by mathematical equations that are not properly explained. In turn, the explanatory model proposed here seeks to elucidate conceptual and mathematical aspects, contributing to a more reflective approach in High School Physics classes.

Keywords: Physics teaching; hydrostatics; buoyancy.

¹ Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde | salmon.landii@ifgoiano.edu.br

² Universidade Federal de Goiás | nyuara@ufg.br

³ Universidade Federal do Mato Grosso do Sul | wellington_fis@yahoo.com.br

1. Introdução

O entendimento de Ciência como um empreendimento humano e do conhecimento científico como provisório, cultural e histórico requer, por parte daqueles que ensinam sobre Ciência, a compreensão do papel dos modelos explicativos e das idealizações com o objetivo de abordar um determinado aspecto da realidade (MOLLETA; ZANIM, VERONEZ, 2024). Dessa forma, um viés importante para se encaminhar o processo de ensino e aprendizagem de conceitos científicos é entender que, na educação em Ciências, “o conhecimento científico é, ao mesmo tempo, simbólico por natureza e socialmente negociado” (DRIVER et al., 1999, p. 32). Nesse contexto, os objetos são significados por modelos elaborados pelos representantes da Ciência, que estabelecem as regras, a partir das quais tais conhecimentos se configuram como aceitos pela comunidade científica.

Em Física, é importante apresentar a compreensão sobre modelos de Mario Bunge: “toda a teoria física encerra um aspecto idealizado de um pedaço da realidade e essa idealização é chamada de modelo” (MOREIRA, 2021, p. e20200451-2). Ao discutir a matemática como estruturante do conhecimento físico, Pietrocola (2002, p. 101) também se fundamenta em Bunge, sinalizando que “a Matemática, enquanto linguagem, empresta sua própria estruturação ao pensamento científico para compor os modelos físicos sobre o mundo”. Além disso,

[...] uma modelização matemática precisa incorporar de forma explícita o domínio empírico, ou seja, envolver atividades experimentais. Uma boa atividade modelizadora deveria necessariamente se preocupar na passagem dos dados brutos contidos numa observação, até uma representação conceitual de um fenômeno focado (PIETROCOLA, 2002, p. 106).

Apesar da relevância da Matemática para os diversos campos do conhecimento científico, especificamente em relação à Física, argumenta-se que ela precisa ser entendida como uma forma estruturante das teorias que buscam explicar a realidade e não como uma aplicação direta de equações como uma simples ferramenta. Para Machado e Cruz (2011, p. 898), “a modelização no ensino de Física não se reduz à modelização matemática, muito embora a última seja indispensável à primeira”. Isso ocorre porque os modelos teóricos da Física, apesar de estarem estreitamente relacionados com equações matemáticas, também se configuram como hipotéticos, por se referirem a idealizações elaboradas e acordadas pela comunidade científica.

Uma vez que a modelagem matemática está presente na construção de teorias físicas, então, a “modelagem deveria estar sempre presente, em alguma medida, no ensino da Física” (MOREIRA, 2021, p. e20200451-3). No que diz respeito a esse ponto de vista, Cupani e Pietrocola (2002, p. 112) destacam a relevância da epistemologia de Bunge para o ensino de Ciências:

[...] na medida em que o conhecimento científico é, por definição, preciso, toda teoria científica deve aspirar a ser formulada matematicamente. Teorias não matematizadas são para Bunge um claro indício de que não se alcançou suficiente maturidade científica num dado campo. De maneira análoga a como a Física conquistou essa maturidade há mais de três séculos, as demais disciplinas (incluindo as ciências sociais) vêm fazendo progressos nessa direção.

A partir de tais pressupostos, no presente estudo, discutiu-se um recorte do universo do ensino de Física: o princípio de Arquimedes. Justifica-se a escolha do tema por ser o foco de investigações pedagógicas recentes (HIDALGO; RAMALHO; ANSELMO, 2023) e por compor o currículo escolar de Física do Ensino Médio. Em pesquisa anterior, os autores evidenciaram a importância e o impacto de pesquisas sobre o princípio de Arquimedes, as quais reverberaram na produção de materiais didáticos para o ensino de Física (HIDALGO; QUEIROZ; OLIVEIRA, 2021).

De todo modo, o princípio de Arquimedes é um assunto, em geral, presente em livros didáticos do Ensino Médio e do Ensino Superior, e que possui diversas aplicações no âmbito da Mecânica dos Fluidos (NELSON; BRAY NELSON, 2015). Em particular, é importante para estimar a carga máxima que comporta um balão de ar quente ou um navio cargueiro; possui relação direta com a construção de densímetros utilizados, por exemplo, em postos de combustível (OLIVEIRA; MELO FILHO; AFONSO, 2013); propõe uma explicação para o mecanismo de redução do consumo energético de golfinhos durante a procura por alimentos em águas profundas (TANIGUCHI et al., 2019); permite determinar o percentual dos principais metais que compõem uma liga – problema histórico da coroa do rei Hieron II de Siracusa (LUCIE, 1986); dentre outros (SILVA; FONSECA, 2021, LANDI JÚNIOR; CARVALHO; SOUZA, 2024). Nesse sentido, o ensino sobre essa temática reforça o que Araújo e Abib (2003) pontuam sobre o fato de o entendimento da Ciência ser elemento fundamental à formação da cidadania.

Ao considerar questões relacionadas com a flutuação, Koehl (1949) questionou se um barquinho de 150 g poderia flutuar em 100 g de água, em alusão ao enunciado tradicional do princípio de Arquimedes, já explorado no século XVI por Galileu Galilei (SNIR, 1991). Há 15 anos, esse mesmo problema foi retomado por Silveira e Medeiros (2009). Os autores enfatizaram que o enunciado tradicional do princípio de Arquimedes “está correto apenas se as dimensões do recipiente que contém o líquido forem muito maiores que as dimensões do corpo ali colocado” (SILVEIRA; MEDEIROS, 2009, p. 283).

Entende-se por enunciado tradicional do princípio de Arquimedes, a sua formulação em termos do peso de fluido deslocado, comumente encontrada em livros didáticos de Física; *todo corpo mergulhado em um líquido sofre um empuxo de baixo para cima igual ao peso do fluido por ele deslocado* (NUSSENZVEIG, 2013). Se o referido enunciado estivesse sempre correto, então a resposta para a pergunta de Koehl é, certamente, *não!* Um barquinho de 150 g não poderia flutuar em 100 g de água. Isso porque o peso de toda água que seria deslocada numa situação hipotética, o que corresponde ao máximo da força de empuxo, de acordo com o referido enunciado tradicional, é inferior e, portanto, incapaz de equilibrar o peso do barquinho. No entanto, conforme discutido a seguir, o barquinho pode flutuar nas condições mencionadas por Koehl (1949).

Importa enfatizar que existem casos até bastante próximos do contexto dos estudantes, em que o empuxo não pode ser calculado corretamente a partir do enunciado tradicional do princípio de Arquimedes. Como exemplo em que o módulo do empuxo não corresponde ao do peso do líquido deslocado, pode-se mencionar o empuxo sobre cubos de gelo que flutuam num copo com água. Por outro lado, observa-se que a literatura especializada ainda persiste com a redação tradicional do princípio de Arquimedes, isto é, em termos do peso do fluido deslocado, haja vista que são ignorados os limites de sua validade.

A força de empuxo é uma força vertical, dirigida para cima, que age em qualquer corpo imerso em um fluido, sendo seu módulo igual ao peso do fluido deslocado [...] (SILVA; FONSECA, 2021, p. e20200364-2).

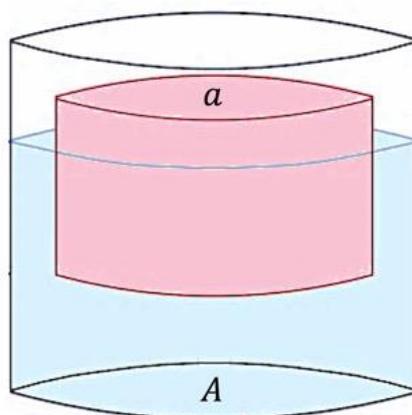
Posto isto, o presente trabalho tem como objetivo analisar os modelos explicativos utilizados para o ensino do princípio de Arquimedes presentes nos livros didáticos de Ciências da Natureza aprovados pelo Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD) 2021. Antes, porém, a próxima seção apresenta uma abordagem teórica para demonstrar que o peso de fluido deslocado nem sempre pode ser utilizado para calcular o módulo da força de empuxo sobre um objeto flutuante. É importante realçar que o modelo proposto nesta pesquisa leva em consideração conceitos abordados no Ensino Médio, tais como, as forças hidrostáticas sobre o objeto flutuante e elementos geométricos relacionados ao volume de fluido deslocado e ao volume do objeto que se encontra submerso, os quais, conforme demonstrado a seguir, nem sempre são iguais.

1.1. Modelo explicativo para o princípio de Arquimedes

Embora haja visões distintas sobre o significado de modelos, pesquisadores concordam que esses constituem um dos principais produtos da Ciência e que o processo de modelagem desempenha um papel central na produção do conhecimento científico (JUSTI, 2015). Para Moreira (2021), o modelo matemático “é um conjunto de símbolos e relações matemáticas que procura traduzir, de alguma forma, um fenômeno em questão ou problema de situação real” (p. e20200451-3).

Mediante o exposto, propôs-se um modelo explicativo, acompanhado de atividades experimentais, em que se admite a força de empuxo como consequência das forças devido à pressão exercida pelo(s) fluido(s) sobre diferentes pontos da superfície de um objeto flutuante (LIMA, 2012). Além disso, a abordagem do referido fenômeno leva em consideração o caso em que a área da seção transversal “ A ” do recipiente que contém o fluido é da mesma ordem de grandeza da área da seção transversal “ a ” do objeto flutuante (Figura 1). Isso significa que o nível do fluido se altera com a inserção do objeto no fluido.

Figura 1 – Modelo utilizado para o estudo da força de empuxo que atua sobre um objeto flutuante



Fonte: os autores

Ademais, importa enfatizar que a alteração do nível do fluido em virtude da inserção do objeto não foi um aspecto considerado em “Sobre os corpos flutuantes”, o trabalho original em que Arquimedes estabelece as bases da hidrostática (ASSIS, 1996). Snir (1991, p. 599)

pontua ainda que “Arquimedes baseou os seus argumentos em um sistema compostos de objetos sólidos colocados em um oceano sem limites”⁴. Nesse sentido, é prudente esperar que a Proposição 5 do tratado de Arquimedes: “qualquer sólido mais leve que um fluido ficará, caso colocado no fluido, submerso de tal forma que o peso do sólido será igual ao peso do fluido deslocado” (ASSIS, 1996, p. 74), pode não ser verdadeira para o caso ilustrado na Figura 1.

Conforme mencionado, as análises aqui realizadas levam em consideração as forças devido à pressão sobre os diferentes pontos da superfície do objeto flutuante. Assim, é imperativo reconhecer, antecipadamente, o conceito de pressão (P)⁵, uma grandeza escalar, cuja definição envolve a razão entre o módulo da força normal (F_{\perp}) aplicada sobre uma superfície e o valor da área (A) sobre a qual a força é aplicada:

$$P = \frac{F_{\perp}}{A}. \quad (1)$$

De acordo com o princípio de Pascal, a pressão total, também chamada de pressão absoluta, em pontos localizados no interior do líquido da Figura 1 é dada pela soma da pressão atmosférica com a pressão exercida pelo próprio líquido. Enquanto a pressão atmosférica pode ser considerada constante sobre toda a superfície do objeto, aquela que é exercida pelo líquido aumenta linearmente com a profundidade, conforme a lei de Stevin (NUSSENZVEIG, 2013).

A Figura 2(a) ilustra, portanto, o caso de um recipiente cilíndrico de seção transversal “ A ”, contendo um determinado líquido de densidade “ d_f ”, e um objeto também cilíndrico de seção transversal “ a ”. Com a inserção do objeto flutuante, a posição da superfície livre do líquido se desloca do nível N para o nível N’ (Figura 2(b)), o que corresponde a uma variação ao longo da vertical dada por “ $H - h$ ”, em que “ H ” e “ h ” são alturas tomadas em relação à posição final da base do objeto flutuante. A escolha para o estudo da situação mostrada na Figura 2 levou em consideração o apontamento de Santos, Santos e Berbat (2007), os quais argumentam que textos utilizados em materiais didáticos tanto de Ensino Médio quanto de Ensino Superior

[...] só demonstram o princípio de Arquimedes, quando o corpo está totalmente submerso; nessa situação, o empuxo é exatamente igual à força resultante que o fluido exerce sobre a superfície do corpo. Quando a imersão do corpo é parcial, o fluido que se encontra acima do corpo também exerce força sobre ele e essa força tem de ser considerada. Consequentemente, a força que um líquido exerce sobre um corpo parcialmente imerso nele não é igual ao empuxo total; portanto, não se pode considerar, sem a introdução de algum artifício convincente, que a demonstração usual seja válida também nesse caso (p. 296).

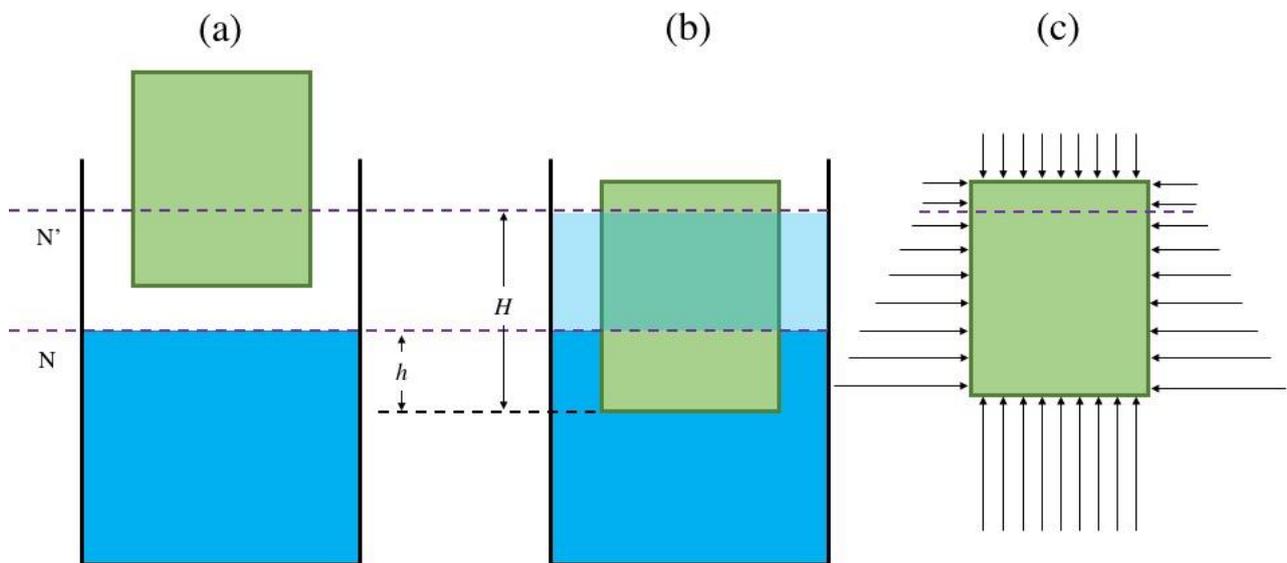
Por sua vez, na Figura 2(c), as setas, que estão fora de escala, representam: as forças devido à pressão atmosférica sobre a parte da superfície do objeto que se encontra emersa (acima de N’); ou as forças devido à pressão atmosférica acrescida da pressão do líquido sobre a parte da superfície do objeto que se encontra imersa (abaixo de N’). As setas acima de N’ têm todas o mesmo comprimento porque a pressão atmosférica é constante em torno

⁴ Excerto traduzido pelos autores.

⁵ A história (não linear) da construção do conceito de pressão é bem discutida por Frontali (2013).

do objeto flutuante. Por outro lado, as setas abaixo de N' aumentam linearmente de tamanho em virtude do comportamento da pressão exercida pelo líquido.

Figura 2 – Recipiente preenchido com um líquido antes (a) e após (b) a inserção de um objeto flutuante e (c) forças devido à pressão absoluta sobre a superfície do objeto flutuante



Fonte: os autores

Partido do conceito de que a força de empuxo sobre o objeto flutuante provém do somatório das forças devido à pressão absoluta em cada ponto da superfície do objeto, e que:

- i) por uma questão de simetria, as forças laterais sobre o objeto flutuante se cancelam aos pares;
- ii) a força descendente devido à pressão no topo do objeto flutuante tem módulo dado pelo produto da área de sua seção transversal (a) pela pressão atmosférica (P_{atm}); e
- iii) a força ascendente devido à pressão na base do objeto flutuante tem módulo dado pelo produto da área de sua seção transversal (a) pela soma da pressão atmosférica (P_{atm}) com a pressão exercida pelo fluido, calculada pela lei de Stevin ($d_f g H$),

conclui-se que o módulo da força de empuxo " F_E " que sustenta o peso do objeto flutuante, corresponde à diferença de pressão entre a base e o topo do objeto flutuante vezes a área de sua seção transversal, ou seja,

$$F_E = P_{hid} a = d_f g H a, \quad (2)$$

em que " g " é o módulo da aceleração gravitacional local. A partir da Eq. (2), infere-se que o volume que fornece o valor correto para o módulo da força de empuxo é dado por:

$$V_{sub} = H a, \quad (3)$$

em que " V_{sub} " é a porção do volume do objeto flutuante que se encontra abaixo da superfície do líquido, geralmente, chamado de volume submerso.

Já o volume de líquido deslocado pode ser calculado de duas maneiras: a partir do volume de líquido localizado entre os níveis N e N', Figura 2(b), ou seja, o volume de líquido que se encontra ao longo da altura dada por " $H - h$ ", Eq. (4); ou a partir do volume do objeto que se encontra abaixo do nível N, Eq. (5).

$$V_{des} = (H - h)(A - a) \quad (4)$$

$$V_{des} = ha \quad (5)$$

Portanto, baseando-se nas Eqs. (3) e (5), conclui-se que para a situação ilustrada na Figura 1, o volume de líquido deslocado não é igual ao volume submerso do objeto. Em outras palavras, o módulo do peso do fluido deslocado ($d_f h a g$) não corresponde ao módulo do empuxo ($d_f g H a$), Eq. (2), contradizendo o enunciado tradicional do princípio de Arquimedes.

Além disso, escrevendo-se $H = V_{sub}/a$, pela Eq. (3), $h = V_{des}/a$, pela Eq. (5) e substituindo-se ambos na Eq. (4), obtém-se, após rearranjar os termos, a Eq. (6).

$$V_{des} = \frac{A - a}{A} V_{sub} \quad (6)$$

A Eq. (6) permite concluir que o volume deslocado tende a ser igual ao volume submerso apenas quando $A \gg a$. Nesse caso, a inserção do objeto flutuante praticamente não altera o nível do líquido ($H \rightarrow h$) e, assim, o módulo do empuxo pode, de fato, ser calculado a partir do peso do fluido deslocado. Isso também acontece quando o recipiente se encontra completamente cheio com o líquido, em concordância com Silveira e Medeiros (2009).

2. Metodologia

Quadro 1 – Livros didáticos analisados

Título da coleção	Editora	Volume	Identificação
Ser Protagonista Ciências da Natureza e suas Tecnologias	SM	Composição e Estrutura dos Corpos	LD1
Diálogo – Ciências da Natureza e suas Tecnologias	Moderna	Vida na Terra: como é possível?	LD2
Ciências da Natureza – Lopes & Rosso	Moderna	Água, Agricultura e Uso da terra	LD3
Moderna Plus – Ciências da Natureza e suas Tecnologias	Moderna	Água e Vida	LD4
Conexões – Ciências da Natureza e suas Tecnologias	Moderna	Saúde e tecnologia	LD5
Matéria, Energia e Vida: uma abordagem interdisciplinar	Scipione	Materiais, Luz e Som: Modelos e Propriedades	LD6

Fonte: os autores

O presente estudo consiste em uma pesquisa qualitativa do tipo análise documental (LÜDKE; ANDRÉ, 1986), cujos materiais analisados foram os livros didáticos de Ciências da Natureza (manual do estudante) aprovados pelo PNLD 2021. É importante ressaltar que, nos

últimos anos, houve uma reestruturação do PNLD, que resultou em alterações significativas para as disciplinas da área de Ciências da Natureza. Especificamente no PNLD 2021, as disciplinas de Biologia, Física e Química passaram a compor livros didáticos de forma agrupada, ou seja, em coleções únicas com seis volumes, dois para cada série do Ensino Médio (BRASIL, 2021). Além disso, no PNLD 2021 foram aprovadas sete coleções de Ciências da Natureza para o Ensino Médio, totalizando, portanto, 42 livros. Dentre esses, constatou-se que apenas seis, mencionados no Quadro 1, abordam ou citam o princípio de Arquimedes e, portanto, constituíram o *corpus* analisado desta pesquisa.

No âmbito das análises⁶, observou-se os aspectos relacionados à abordagem teórica do princípio de Arquimedes nos livros didáticos, considerando tanto situações conceituais, quanto contextuais. Além disso, no sentido de trazer uma contraposição aos aspectos identificados na análise documental, e com o intuito de contribuir com o trabalho dos professores de Física do Ensino Médio, a situação ilustrada na Figura 1 também foi investigada experimentalmente. Para esse propósito, utilizou-se duas latas fechadas de 350 mL de uma mesma marca de refrigerante, uma designada por “sabor original”, a outra, por “zero açúcar”; um copo de plástico de 500 mL; uma seringa de 20 mL; e água de torneira como fluido (Figura 3).

Figura 3 – Materiais utilizados para as análises experimentais



Fonte: os autores

Inicialmente, inseriu-se uma das latas no copo de plástico e com o auxílio da seringa adicionou-se água no copo até que se observou a flutuação da lata. O mesmo procedimento foi realizado para a outra lata de refrigerante. O volume mínimo de água que permitiu equilibrar o peso de cada lata e o respectivo desvio padrão, calculados a partir da média de cinco repetições, são apresentados na próxima seção. Embora haja semelhanças com a proposta apresentada por Silveira e Medeiros (2009), e revisitada recentemente por Santos Júnior, Hidalgo e Paula (2023), é pertinente sinalizar que o modelo apresentado neste estudo utiliza uma abordagem teórica mais acessível para estudantes do Ensino Médio. Isso se deve porque o processo de modelização utilizado aqui se baseia, fundamentalmente, em elementos geométricos e no conceito de empuxo.

⁶ Subsidiadas pelo modelo explicativo apresentado na seção 1.1 deste trabalho.

3. Resultados e discussão

3.1. Apresentação do princípio de Arquimedes nos livros didáticos

No que se refere ao princípio de Arquimedes, o LD1 menciona que esse princípio permite determinar o volume de um objeto maciço, baseando-se no volume de água que é deslocado quando o objeto é introduzido em uma provera graduada. Nesse caso, os autores confundem o princípio de Arquimedes com o princípio da impenetrabilidade para o qual dois corpos distintos não podem ocupar o mesmo lugar no espaço e ao mesmo tempo. Ademais, observa-se no LD1 uma completa ausência de discussões teóricas a respeito do princípio de Arquimedes.

Em situação similar, encontra-se o LD2, em que o princípio de Arquimedes também não recebe nenhuma abordagem teórica. Nesse caso, os autores apenas ilustram uma situação envolvendo a bexiga natatória, estrutura presente em algumas espécies de peixes, e questionam a sua importância para a flutuação desses animais.

Por sua vez, em LD3, LD4 e LD5, nota-se uma preocupação dos autores em relacionar o princípio de Arquimedes com aspectos tecnológicos, tais como a manutenção de um navio com centenas de milhares de toneladas em água (LD1, p. 73; LD3, p. 48), o movimento de balões de ar quente (LD2, p. 101; LD3, p. 48), dentre outros. No entanto, quando a questão é apresentar a equação para a força de empuxo, infelizmente, todos esses três livros ignoram o que diz a Base Nacional Comum Curricular, BNCC⁷, (BRASIL, 2018a, p. 548):

na área de Ciências da Natureza, os conhecimentos conceituais são sistematizados em leis, teorias e modelos. A elaboração, a interpretação e a aplicação de modelos explicativos para fenômenos naturais e sistemas tecnológicos são aspectos fundamentais do fazer científico, bem como a identificação de regularidades, invariantes e transformações. Portanto, no Ensino Médio, o desenvolvimento do pensamento científico envolve aprendizagens específicas, com vistas a sua aplicação em contextos diversos.

A discordância com a BNCC ocorre justamente pela ausência de um modelo explicativo em LD3, LD4 e LD5, no âmbito das discussões relacionadas com o princípio de Arquimedes. Por sua vez, os autores desses três livros didáticos optam por obter a equação para a força de empuxo, a partir do enunciado tradicional do princípio de Arquimedes, colaborando para a disseminação de uma visão individualista e dogmática de Ciência (GIL-PERÉZ et al., 2001). Trata-se de uma perspectiva individualista porque ignoram nomes como Stevin, Torricelli, Pascal, Newton, dentre outros, que contribuíram para o entendimento moderno das causas do empuxo (FRONTALI, 2013). Também difundem uma visão dogmática de Ciência porque assumem a declaração do princípio de Arquimedes como verdade absoluta, válida para qualquer tipo de situação. Ao discutirem a abordagem do princípio de Arquimedes em livros didáticos do PNLD 2018, Hidalgo, Queiroz e Oliveira (2021) também sinalizaram a presença

⁷ A BNCC foi reformulada em consonância com o Artigo 11 da Resolução CNE/CEB nº. 3/2018 (BRASIL, 2018b), o qual imprime uma redução para a formação geral básica de 2400 para 1800 horas, o que para Branco et al. (2018), “promove ainda mais o esvaziamento e precarização do ensino”. Ademais, Selles (2018), dentre outras críticas, argumenta ainda que “investir tantos recursos para produzir a BNCC sem considerar as profundas limitações ao trabalho docente, com baixos salários, planos de carreira pífios que assinalam a desvalorização da profissão assemelha-se a começar a construir uma casa pelo seu teto”.

de visões individualista e simplista sobre Ciência⁸. Os trechos a seguir ilustram o procedimento adotado pelos autores.

O teorema de Arquimedes pode ser enunciado da seguinte maneira: Um corpo imerso, total ou parcialmente, em um líquido recebe a ação de uma força vertical dirigida para cima, que tem intensidade igual ao peso do líquido deslocado. Assim, podemos considerar que a intensidade da força de empuxo \vec{E} é igual à intensidade da força peso \vec{P} do líquido deslocado: $E = P \therefore E = m_{liq\ desl} \cdot g$ em que $m_{liq\ desl}$ é a massa do líquido deslocado (LD3, p. 74).

Todo corpo sólido mergulhado num fluido em equilíbrio sofre a ação de uma força vertical de baixo para cima, cuja intensidade é igual à do peso do fluido deslocado pela parte submersa do corpo. [...] Sendo a intensidade E do empuxo igual ao peso P_L do líquido contido em um volume V_L igual ao volume da parte submersa do corpo, podemos relacionar a intensidade E com a densidade d_L do líquido, como segue: $E = P_L = m_L \cdot g$ Sendo $m_L = d_L \cdot V_L$, temos: $E = d_L \cdot V_L \cdot g$ (LD4, p. 101).

Todo corpo imerso (total ou parcialmente) em um fluido fica sob a ação de uma força cuja direção é perpendicular à superfície livre do líquido e cujo sentido aponta para a superfície, denominada empuxo. Se um corpo imerso na água fica em equilíbrio, boiando ou totalmente imerso, é porque o empuxo e o peso são forças de mesma intensidade, mesma direção e sentidos opostos que, portanto, se anulam. [...] O empuxo que age sobre o corpo possui valor igual à intensidade do peso do volume de líquido deslocado. Algebricamente, temos: $E = m_L \cdot g$ Nessa expressão, m_L é a massa de líquido que se deslocou quando o corpo foi imerso e g é a aceleração da gravidade. Lembrando que densidade é a relação entre massa e volume, temos: [...] Portanto, o valor do empuxo pode ser escrito na forma: $E = d_{liquido} \cdot V_{deslocado} \cdot g$ (LD5, p. 49-50).

No âmbito do ensino das disciplinas de Ciências da Natureza, em particular o da Física, destaca-se o seu papel como contribuidora para o letramento científico dos estudantes, bem como para o desenvolvimento da capacidade de atuação no e sobre o mundo. No entanto, é sabido que a promoção da capacidade de compreender, interpretar e transformar o mundo natural/tecnológico, com base nos aportes teóricos e processuais das Ciências Naturais, não compactua com um ensino que ignora o uso de modelos explicativos e as relações de causa e efeito (WINKELMANN, 2023). Nessa perspectiva, defende-se que as equações, tão importantes para a Física e para o ensino de Física, sejam apresentadas como decorrentes de modelos explicativos, a fim de evidenciar a sua origem e os limites de validade, do contrário, perde-se o sentido quando não são relacionadas à uma fundamentação teórica adequada.

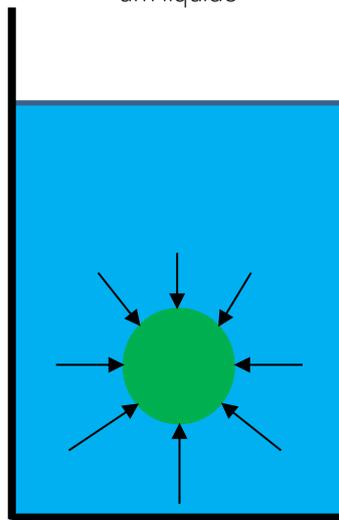
Conforme destaca Moreira (2021), "no ensino da Física é mais importante dar atenção aos conceitos físicos do que às fórmulas. As fórmulas contêm conceitos. Não tem sentido decorar fórmulas sem entender os conceitos que as constituem" (p. e20200451-2). Dos livros aprovados no PNLD 2021, o LD6 foi o único que buscou justificar a equação para a força de empuxo em termos mais fundamentais, isto é, tendo como origem a pressão sobre os

⁸ Quando se trata do tema Gravitação Universal, visões deformadas da atividade científica em livros didáticos do PNLD 2021 também se observa em Coelho e Moura (2023).

diferentes pontos da superfície de objeto em contato com um líquido. Os autores apresentam as forças devido à pressão sobre uma esfera inserida no interior de um líquido, tal como ilustra a Figura 4, e esclarecem que a soma dessas forças sobre a esfera resulta em uma força na vertical que se denomina empuxo (LD6, p. 38). É importante enfatizar que:

- i) as setas que aparecem na Figura 4 possuem comprimentos diferentes, conforme previsto pela lei de Stevin; e
- ii) a pressão absoluta no interior do líquido é obtida levando-se em consideração o princípio de Pascal.

Figura 4 – Representação das forças devido à pressão que atuam sobre uma esfera mergulhada em um líquido



Fonte: os autores

Diante da situação ilustrada na Figura 4, os autores argumentam que o empuxo é uma força que depende unicamente da distribuição da pressão em torno do objeto, ou seja, que independe do material de que é feita a esfera. É importante o professor esclarecer junto aos estudantes que a pressão sobre a esfera é alterada apenas se a altura do nível do líquido for modificada, conforme previsto pela lei de Stevin. Em suma, mantendo o mesmo formato, para qualquer material que constitui a esfera, o empuxo permanece o mesmo, o que permite obter engenhosamente a sua expressão matemática.

Para obter uma expressão quantitativa para o empuxo, podemos imaginar uma esfera constituída pelo próprio líquido de um recipiente. Essa esfera imaginária, por ter a mesma densidade do líquido, vai permanecer em repouso e esse equilíbrio só é possível se a resultante das forças que atuam sobre ela for nula. [...] O empuxo será o mesmo se a esfera for real e feita de qualquer material. Generalizando essa conclusão, podemos dizer que o empuxo sobre um objeto mergulhado em um líquido é numericamente igual ao peso do volume de líquido deslocado pela parte do objeto que se encontra imersa (LD6, p. 39).

De fato, o procedimento utilizado pelos autores do LD6, corresponde ao que se conhece como princípio da solidificação, o qual permite obter a expressão para a força de empuxo com uma matemática acessível para estudantes do Ensino Básico. Esse princípio foi proposto

originalmente pelo holandês Simon Stevin, em seu trabalho “*De beghinselen des waterwichts*” de 1586:

*In his rigorous and original demonstration of Archimedes' principle he introduced the idea of an ideal, weightless vessel, made of infinitely thin surfaces (his neologism *vlackvat* might be rendered as 'vessel made of surfaces'). When filled with water and immersed in water, the ideal vessel will neither float nor sink; if emptied, it will float; if filled with a dense body, it will sink, the action of the surrounding water on its surfaces (which in the first case counterbalances the weight of the internal water) being the same in the three cases (FRONTALI, 2013, p. 485).*

Embora instrutivo e adequado para as discussões envolvendo o princípio de Arquimedes no Ensino Médio e mesmo no Ensino Superior (NUSSENZVEIG, 2013)⁹, o modelo explicativo baseado no princípio da solidificação apresenta pelo menos uma limitação. De fato, ele não é capaz de descrever satisfatoriamente a força de empuxo quando praticamente inexistente fluido entre a parede do recipiente e o objeto, tal qual uma ventosa fixada em um revestimento de parede (LANDI JÚNIOR; MESQUITA; QUEIRÓS, 2024). Casos assim, já abordados teórica e experimentalmente por Lima, Venceslau e Brasil (2014), podem ser analisados a partir do modelo que leva em consideração os valores da pressão em torno da superfície do objeto em contato com o fluido, conforme a seção 1.1 deste estudo.

3.2. Resultados experimentais com as latas de refrigerante

Os resultados das atividades experimentais com as latas de refrigerante podem indicar uma resposta para o questionamento feito por Koehl (1949), presente na introdução deste trabalho, que difere daquela que se espera ao considerar o enunciado tradicional do princípio de Arquimedes. De fato, observou-se que ao utilizar a lata de refrigerante “sabor original”, o volume de água inserido no copo de plástico que equilibrou o peso da lata foi de (170 ± 5) mL. Desse modo, a partir do enunciado tradicional do princípio de Arquimedes, conclui-se que o peso máximo idealizado de água que poderia ser deslocado nesse caso, corresponde, aproximadamente, ao peso de um volume de água igual a 170 mL. Esse valor é drasticamente inferior ao empuxo real, que de fato equilibra o peso do sistema (350 mL de refrigerante¹⁰ e a lata que o contém).

Para a lata de refrigerante “zero açúcar”, obteve-se um volume mínimo de água para a lata flutuar igual a (145 ± 5) mL. Esse resultado também demonstra que um objeto pode flutuar com um empuxo que é significativamente diferente daquele previsto pelo enunciado tradicional do princípio de Arquimedes. Isso acontece porque o caso ilustrado na Figura 1 não foi contemplado nos estudos de Arquimedes, ou seja, não faz parte do seu modelo explicativo. Como consequência, não se pode esperar que as conclusões de Arquimedes, sintetizadas no enunciado que leva o seu nome, sejam aplicáveis, por exemplo, ao fenômeno da flutuação das latas de refrigerante aqui investigado.

⁹ Com a ressalva de que quando se tem um objeto flutuando, tal como na Figura 1, o volume que fornece o módulo correto para a força de empuxo é o volume do objeto que se encontra submerso, e não o volume de líquido deslocado, conforme evidenciado na seção 1.1 deste trabalho.

¹⁰ Uma vez que os refrigerantes são produzidos à base de água, espera-se que a sua densidade não seja inferior a 1 g/mL.

Além disso, observa-se que a diferença da quantidade de água necessária para equilibrar as duas latas de refrigerante, (25 ± 10) g, pode ser utilizada para estimar, de maneira aceitável, a diferença de massa entre as próprias latas. Esse valor está em razoável concordância com a diferença calculada utilizando as massas obtidas por meio de uma balança digital: (380 ± 5) g para a lata com refrigerante “sabor original” e (362 ± 5) g para a lata com refrigerante “zero açúcar”. A diferença obtida, cerca de 20 g, está relacionada, principalmente, com a presença de açúcares no refrigerante do tipo “sabor original”, conforme a informação nutricional do fabricante.

Portanto, a respeito da questão feita por Koehl, os resultados com latas de refrigerante indicam que – sim – um barquinho de 150 g pode flutuar em 100 g de água. Para que isso ocorra, basta que se tenha um recipiente apropriado, ou seja, é necessário que o barquinho fique bem próximo à lateral do recipiente, tal qual, as latas e o copo plástico utilizados nas experiências realizadas, ou ainda navios atracados em diques secos para vistorias ou reparos.

De todo modo, defende-se que construção de modelos explicativos, bem como a observação de seus limites de validade, conjuntamente com os esclarecimentos matemáticos inerentes, colaboram com discussões teóricas mais aprofundadas e com um ensino de Física mais reflexivo, em oposição à mera utilização ou aplicação de equações matemáticas. Pietrocola (2002, p. 90) argumenta ainda que “[...] no ensino da Física, a linguagem matemática é muitas vezes considerada como a grande responsável pelo fracasso escolar. É comum professores alegarem que seus alunos não entendem Física devido à fragilidade de seus conhecimentos matemáticos”. Essa fragilidade na formação básica dos estudantes tem sido percebida inclusive no Ensino Superior (OLIVEIRA; RAMOS; CARNEIRO; LANDI JÚNIOR, 2020, OLIVEIRA; RAMOS; VISEU; ROCHA SEGUNDO; LANDI JÚNIOR, 2023).

4. Considerações finais

Neste trabalho, constatou-se que dentre as sete coleções aprovadas pelo PNDL 2021, apenas uma apresentou um modelo explicativo satisfatório, que vem acompanhado de discussões teóricas para o estudo do princípio de Arquimedes. O modelo em questão, adotado pela coleção Matéria, Energia e Vida: uma abordagem interdisciplinar (LD6), utiliza as ideias desenvolvidas por Stevin relativamente ao que hoje se conhece como princípio da solidificação. No entanto, apesar de bastante instrutivo e didaticamente útil, esse modelo apresenta limitações teóricas, como discutido aqui.

Além disso, salienta-se que em metade dos livros analisados, nomeadamente, L3, L4 e L5, a ausência de um modelo explicativo satisfatório colabora para uma visão individualista da construção do conhecimento, bem como para um caráter dogmático da Ciência (GIL-PERÉZ et al., 2001). Em relação a essa ausência, ao demonstrar a equação para o empuxo em termos do princípio de conservação da energia mecânica, Leroy (1985, p. 56) já alertava para a necessidade de explicar a origem da força de empuxo em termos físicos: *“the origin of the buoyancy force need no longer be mysterious and therefore hidden behind a principle; it can be explained in physical terms”*. Esse posicionamento, que corrobora com as ideias defendidas pelos autores deste trabalho, contrapõe-se a mera utilização do princípio de Arquimedes na forma do seu enunciado tradicional.

Finalmente, destaca-se que o modelo aqui discutido não demonstra apenas uma exceção quanto a validade do enunciado tradicional do princípio de Arquimedes, como também supera os prejuízos de um ensino de Física que ignora o trabalho coletivo e reflexivo

no âmbito da atividade científica. No entanto, os cálculos aqui apresentados são acessíveis para estudantes do Ensino Médio devido a escolha apropriada do formato (regular) do objeto flutuante. Casos mais gerais, envolvendo, por exemplo, a análise de um objeto flutuante de formato irregular, e o fluido sendo um líquido ou um gás, cuja densidade seja uma função da posição, faz-se necessário a utilização de ferramentas do Cálculo Diferencial e Integral (LIMA, 2012).

Referências

- ARAÚJO, M. S. T.; ABIB, M. L. V. S. Atividades experimentais no ensino de física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 25, n. 2, p. 176–194, 2003.
- ASSIS, A. K. T. Sobre os corpos flutuantes, tradução comentada de um texto de Arquimedes, *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, v. 16, p. 69-80, 1996.
- BRANCO, E. P.; BRANCO, A. B. G.; IWASSE, L. F. A.; ZANATTA, S. C. Uma visão crítica sobre a implantação da Base Nacional Comum Curricular em consonância com a reforma do Ensino Médio. *Debates em Educação*, v. 10, n. 21, p. 47-70, 2018.
- BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: MEC, 2018a. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf. Acesso em: 18 nov. 2023.
- BRASIL. **Resolução nº 3, de 21 de novembro de 2018**. Brasília: MEC, 2018b. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/docman/novembro-2018-pdf/102481-rceb003-18/file>. Acesso em: 18 nov. 2023.
- BRASIL. **Guia Digital PNLD 2021**. Brasília: MEC, 2021. Disponível em: https://pnld.nees.ufal.br/assets-pnld/guias/Guia_pnld_2021_didatico_pnld-2021-obj2-ciencias-natureza-suas-tecnologias.pdf. Acesso em: 07 de nov. 2023.
- COELHO, M. N.; MOURA, V. H. F. A abordagem do tema “gravitação” nas coleções de Ciências da Natureza e Tecnologias no PNLD 2021: qual a “Natureza da Ciência” que eles comunicam? *Amazônia: Revista de Educação em Ciências e Matemáticas*, v. 19, n. 43, p. 49–67, 2023. Disponível em <https://www.periodicos.ufpa.br/index.php/revistaamazonia/article/view/14702/10730>. Acesso em: 30 jul. 2024.
- CUPANI, A.; PIETROCOLA, M. A relevância da epistemologia de Mario Bunge para o ensino de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 19, n. especial, p. 100-125, 2002.
- DRIVER, R.; ASOKO, H.; LEACH, J.; MORTIMER, E.; SCOTT, P. Construindo o conhecimento científico na sala de aula. *Química Nova na Escola*, n. 9, p. 31-40, 1999.
- FRONTALI, C. History of physical terms: ‘pressure’, *Physics Education*, v. 48, n. 4, p. 484-490, 2013.
- GIL-PERÉZ, D.; MONTORO, I. F.; ALÍS, J. C.; CACHAPUZ, A.; PRAIA, J. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. *Ciência & Educação*, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

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

HIDALGO, J. M.; RAMALHO, E.; ANSELMO, D. H. A. L. A historical and conceptual analysis of Archimedes' Principle in higher education textbooks and its relevance for teachers. **Physics Education**, v. 58, n. 5, p. 055009, 2023.

KOEHL, G. M. Archimedes' Principle and the Hydrostatic Paradox – Simple Demonstration. **American Journal of Physics**, v. 17, n. 9, p. 579-580, 1949.

LANDI JÚNIOR, S.; CARVALHO, T. M.; SOUZA, A. D. An Instructive Apparatus for Determining the Density of Liquids Based on Archimedes' Principle. **The Physics Teacher**, v. 62, n. 2, p. 114-115, 2024. Disponível em <https://pubs.aip.org/aapt/pte/article-abstract/62/2/114/3176027/An-Instructive-Apparatus-for-Determining-the?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em 25 de ago. de 2024.

LANDI JÚNIOR, S.; MESQUITA, N. A. S.; QUEIRÓS, W. P. Uma análise conceitual do princípio de Arquimedes nos livros didáticos de Ciências da Natureza do Ensino Médio. **Revista de Educação Pública**, v. 33, p. 78-102, 2024.

LEROY, B. Archimedes principle: a simple derivation. **European Journal of Physics**, v. 6, n. 1, p. 56, 1985.

LIMA, F. M. S. Using surface integrals for checking Archimedes' law of buoyancy. **European Journal of Physics**, v. 33, n. 1, p. 101-113, 2012.

LIMA, F. M. S.; VENCESLAU, G. M.; BRASIL, G. T. A downward buoyant force experiment. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 2, p. 2309, 2014.

LUCIE, P. H. La bilancetta – a pequena balança ou a balança hidrostática. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 9, p. 105-107, 1986.

LÜDKE, M.; ANDRÉ, M. E. D. A. **Pesquisa em educação: abordagens qualitativas**. São Paulo: EPU, 1986.

MACHADO, J.; CRUZ, S. M. S. C. S. Conhecimento, realidade e ensino de Física: modelização em uma inspiração bungeana. **Ciência & Educação**, v. 17, n. 4, p. 887-902, 2011.

MOLLETA, E.; ZANIM, A. P.; VERONEZ, M. R. D. Tipos de modeladores revelados no desenvolvimento de atividades de modelagem matemática. **Amazônia: Revista de Educação em Ciências e Matemáticas**, v. 20, n. 44, p. 21-40, 2024. Disponível em <https://www.periodicos.ufpa.br/index.php/revistaamazonia/article/view/15006>. Acesso em: 30 de jul. 2024.

MOREIRA, M. A. Desafios no ensino da física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 43, suppl. 1, p. e20200451, 2021.

NELSON, J.; BRAY NELSON, J. Buoyancy Can-Can. **The Physics Teacher**, v. 53, n. 5, p. 279-281, 2015.

PIETROCOLA, M. A matemática como estruturante do conhecimento físico. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 19, n. 1, p. 89-109, 2002. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/9297/8588>

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. v. 2. 5 Ed. Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor. São Paulo: Blucher, 2013.

OLIVEIRA, B. M.; MELO FILHO, J. M.; AFONSO, J. C. A densidade e a evolução do densímetro. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 1, p. 1601, 2013.

OLIVEIRA, L. D.; RAMOS, T. C.; CARNEIRO, J. A. S. A. O.; LANDI JÚNIOR, S. Conhecimentos de Matemática básica de graduandos nos anos iniciais de Engenharia: desafios, fragilidades e enfrentamentos possíveis. **Revista BOEM**, v. 8, n. 16, p. 134-152, 2020. Disponível em <https://www.revistas.udesc.br/index.php/boem/article/view/18000>. Acesso em: 25 de ago. 2024.

OLIVEIRA, L. D.; RAMOS, T. C.; VISEU, F.; ROCHA SEGUNDO, I. G.; LANDI JÚNIOR, S. A formação dos acadêmicos como fator de entrave ao ensino: um estudo exploratório nas engenharias. **Revista Eletrônica de Educação Matemática**, v. 18, p. 1-23, 2023. Disponível em <https://periodicos.ufsc.br/index.php/revemat/article/view/95894>. Acesso em 25 de ago. de 2024.

SANTOS, F. C.; SANTOS, W. M. S.; BERBAT, S. C. Uma análise da flutuação dos corpos e o princípio de Arquimedes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 2, p. 295-298, 2007.

SANTOS JÚNIOR, E. R.; HIDALGO, J. M.; PAULA, T. A. Contribuições ao ensino do Princípio de Arquimedes. **A Física na Escola**, v. 21, p. 230073, 2023.

SELLES, S. E. A BNCC e a Resolução CNE/CP nº. 2/2015 para a formação docente: a “carroça na frente dos bois”. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 35, n. 2, p. 337-344, 2018.

SILVA, W. R. F.; FONSECA, J. M. Utilizando uma balança digital de baixo custo como densímetro e sua aplicação a sólidos e líquidos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, p. e20200364, 2021.

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, 2009.

SNIR, J. Sink or float - What do the experts think?: The historical development of explanations for floatation. **Science Education**, v. 75, n. 5, p. 595-609, 1991.

TANIGUCHI, D. A. A.; ROHR, J.; RIDGWAY, S.; SCHULZ, K. Two Beakers, Five E's, Twenty Pennies, and Archimedes' Principle. **The Physics Teacher**, v. 57, n. 3, p. 138-141, 2019.

WINKELMANN, J. On Idealizations and Models in Science Education. **Science & Education**, v. 32, p. 277-295, 2023.