

Ludião versus princípio do submarino

(*Cartesian diver versus submarine principle*)

V.L.B. de Jesus¹, C. Marlasca² e A. Tenório¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Química de Nilópolis, Nilópolis, RJ, Brasil

²Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Recebido em 12/7/2007; Aceito em 21/8/2007

O mergulhador cartesiano, ou ludião, é um aparato simples frequentemente apresentado em feiras de ciências. É utilizado para ilustrar os princípios hidrostáticos de Pascal e de Arquimedes. Todavia, a simplicidade do aparato induz uma sobre-simplificação da descrição do experimento. Mesmo alguns livros didáticos fornecem explicações incompletas. Outro engano comum é a associação do mergulhador cartesiano com submarinos. O ludião é muito semelhante a outro tipo de equipamento subaquático, muito mais antigo que os submarinos, os sinos de mergulho. Neste trabalho, os aspectos práticos e a descrição teórica do experimento são abordados em detalhes.

Palavras-chave: submarino, pressão, princípio de Pascal, princípio de Arquimedes.

The Cartesian diver is a simple apparatus which is presented often in science fairs. It is used to illustrate the hydrostatic principles of Archimedes and Pascal. However the apparatus simplicity leads in general to an oversimplification description of the experiment. Even some textbooks give incomplete explanations. Another common misconception is to associate Cartesian divers with submarines. The Cartesian diver is very similar to another kind of subaquatic equipment older than the submarines the diving bells. In this work, the practical aspects and the theoretical description of the experiment are treated in details.

Keywords: submarine, pressure, Pascal's principle, Archimedes's principle.

1. Introdução

O ludião, ou mergulhador cartesiano, é um experimento muito comum em feiras de ciência. Seu objetivo é demonstrar os princípios hidrostáticos de Pascal e Arquimedes.

O aparato experimental pode ser construído de forma simples. Primeiramente, deve-se confeccionar o ludião propriamente dito, a partir, por exemplo, de um tubo de plástico com uma extremidade fechada. É preciso fixar ao tubo plástico um pequeno objeto que sirva de lastro para o ludião - por exemplo, uma porca ou arruela de metal, de preferência de latão para não enferrujar, uma vez que ficará imerso na água. O papel do lastro é o mesmo para barcos e submarinos. Seu objetivo é garantir que o centro de gravidade (CG) do corpo fique abaixo do centro de pressão (CP), assegurando a estabilidade vertical, do contrário, a embarcação adernaria.

Uma vez pronto, o ludião é inserido emborcado numa garrafa PET cheia de água transbordando. É necessário verificar se o lastro é demasiado, pois isto faria o ludião afundar imediatamente. Para completar o

aparato, fecha-se a tampa da garrafa firmemente, com o intuito de evitar derramar água, pois é interessante que a bolha de ar entre a tampa e a superfície da água seja a menor possível. O experimento funciona da seguinte forma: ao se pressionar a garrafa com a mão, o ludião submerge e afunda; ao se aliviar a pressão externa, ele sobe.

Em nosso laboratório, utilizamos uma versão um pouco mais sofisticada do aparato descrito acima. A garrafa PET foi substituída por um longo tubo rígido de acrílico. Este tubo foi conectado por uma mangueira a um manômetro e a uma seringa. A seringa torna possível controlar a pressão externa aplicada, sendo monitorada pelo manômetro. O ludião foi feito de um pequeno recipiente quadrado de acrílico amarrado a um boneco para servir como lastro.

Existem duas formas de explicar o funcionamento do experimento. O que as distingue é a escolha de qual parte do sistema considera-se como o ludião em si. Numa, o ludião é constituído pelo lastro, o recipiente e o bolsão de ar que se forma em seu interior. Noutra, o ludião é formado pelo lastro, o recipiente, o bolsão de ar e o volume de água que entra no recipiente,

¹E-mail: vitor@cefeteq.br.

comprimindo o bolsão de ar. Na primeira, o volume do ludião é variável; na segunda, é constante. Portanto, são duas as possibilidades de análise:

- 1) empuxo variável e peso constante;
- 2) empuxo constante e peso variável.

Ambas as abordagens aparecem nos livros didáticos de forma mutuamente exclusiva. Porém, a segunda parece ser adotada com mais frequência. Um exemplo dela é muito similar a seguinte: “o ludião flutua porque seu peso (ao qual deve ser acrescido o peso da água nele contida) é igual ao empuxo que atua sobre ele. Quando se comprime o êmbolo da seringa, ou se aperta a garrafa PET, aumenta-se a pressão na água. Esse acréscimo de pressão se transmite a todo líquido (princípio de Pascal) e faz com que entre um pouco mais de água no ludião. Quando o peso do ludião se torna maior que o empuxo ele afunda” [1].

Esse tipo de abordagem é escolhido em parte por sugerir uma analogia entre o mergulho do ludião e o princípio de funcionamento dos submarinos. A entrada e saída de água do recipiente de plástico emborcado são associadas ao processo de bombeamento de água (via ar comprimido) para dentro ou fora dos compartimentos de lastro dos submarinos. Contudo, tal analogia é imprópria.

No caso do mergulhador cartesiano, o processo é passivo e se deve a variação externa da pressão. O compartimento do ludião está sempre aberto e volume do bolsão de ar varia de acordo com a pressão hidrostática própria à profundidade instantânea do ludião. Nos submarinos, a aceitação de água é ativa e voluntária. Para submergir, um submarino deve permitir a entrada de água nos tanques de lastro somente até o empuxo ser anulado pelo peso. Ao atingir o equilíbrio de forças, as comportas são fechadas e assim mantidas enquanto durar a imersão. Seu empuxo e peso são constantes qualquer que seja a profundidade de mergulho (aqui não consideramos as deformações sofridas pelo casco em águas profundas).

Os autores consideram a primeira abordagem preferível. Desta forma, os princípios de funcionamento do ludião e do submarino são explicados a partir das mesmas leis da hidrostática, aplicadas, porém, a sistemas distintos.

Em um outro livro didático [2] vemos que a explicação do submarino aparece de forma muito simples e não há associação ao ludião. Mostra-se, corretamente, que o submarino submerge devido ao aumento do peso por admissão de água em seus compartimentos de lastro, os quais estão fechados a maior parte do tempo. Diferentemente, no ludião, cujo compartimento está sempre aberto, a variação do empuxo, ao invés da do peso, é a responsável pelo mergulho.

Este artigo aborda em detalhes o funcionamento do ludião para mostrar com clareza que o seu mergulho se deve a variação do empuxo do bolsão de ar retido em seu interior, diferente do princípio do submarino, onde

a variação de seu peso é o fator responsável por sua imersão e sua estabilidade, durante sua navegação. Ao ludião cabe a analogia com o sino de mergulho, descrito na seção 3. Ao final é proposto que se use um experimento simples, muito conhecido, para exemplificar com clareza o princípio de funcionamento do submarino.

2. O Ludião

O ludião, ou mergulhador cartesiano, é um aparato experimental que pode ser usado para exemplificar os princípios de Pascal e Arquimedes. A Fig. 1 mostra o ludião utilizado em nossas aulas experimentais sobre fluidos. Ele é feito com um tubo de acrílico de 1,00 m de altura, preenchido com água e vedado, sendo a parte superior conectada por uma mangueira a uma seringa e a um medidor de pressão. Esta montagem nos permite medir a pressão manométrica dentro do aparato conforme o êmbolo é comprimido.



Figura 1 - O ludião.

Inicialmente, o mergulhador cartesiano flutua (Fig. 2 - foto à esquerda), mas quando o êmbolo da seringa é comprimido o mergulhador cartesiano inicia sua submersão (Fig. 2 - foto à direita). Manuseando-se o êmbolo da seringa com um pouco de destreza, pode-se tentar equilibrá-lo, mas isso é difícil, já que se tem aqui uma dinâmica difícil de controlar. O manômetro marca inicialmente zero (correspondente a pressão atmosférica local) e após a compressão do êmbolo, o manômetro

passa a marcar aproximadamente 80 mm Hg (correspondente a um aumento de 80 mm Hg na pressão atmosférica a que está submetida a superfície do líquido - a pressão absoluta seria (760 + 80) mm Hg), como mostram as fotos da Fig. 3.



Figura 2 - Mergulhador cartesiano em dois momentos. A foto à esquerda mostra o momento em que a pressão dentro do aparato experimental é a pressão atmosférica local e a foto à direita mostra o momento em que o êmbolo é comprimido, aumentando a pressão na superfície do líquido em aproximadamente 80 mm Hg.

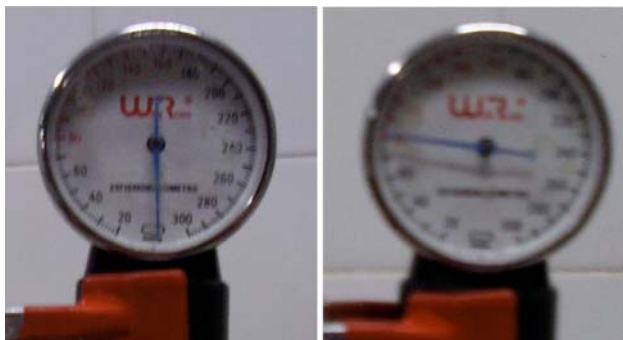


Figura 3 - Manômetro mostrado em dois momentos, equivalentes àqueles descritos na Fig. 2.

Com o aumento da pressão na superfície do líquido, a pressão em qualquer ponto do líquido é aumentada da mesma quantidade, devido ao princípio de Pascal. Assim sendo, temos um aumento da pressão sobre a bolha de ar que se localiza dentro do recipiente plástico, comprimindo-a e diminuindo seu volume. Podemos descrever as forças atuantes quando o ludião está totalmente imerso da seguinte maneira (ver Fig. 4).

O módulo do peso total do sistema é constante e dado por

$$P_{total} = P_1 + P_2 + P_{ar},$$

sendo $P_1 = m_1g$, $P_2 = m_2g$ e $P_{ar} = m_{ar}g$ os respectivos pesos do mergulhador (lastro), do recipiente de plástico e da massa do bolsão de ar.

O módulo do empuxo total, variável, é dado por

$$E_{total} = E_1 + E_2 + E_{ar}(p_{ar}),$$

onde $E_1 = \rho g V_1$, $E_2 = \rho g V_2$, $E_{ar} = \rho g V_{ar}$, V_1 , V_2 e V_{ar} são os respectivos empuxos e volumes do mergulhador (lastro), do recipiente de plástico e do bolsão de ar, quando o ludião está totalmente imerso. ρ é a densidade do líquido, neste caso, água, p_{ar} é a pressão do bolsão de ar a uma profundidade h , medida entre a superfície do líquido e a interface do bolsão de ar com o líquido, cuja relação é

$$p_{ar}(p_{sup}, h) = p_{sup} + \rho gh,$$

onde p_{sup} é a pressão do ar na superfície do líquido dentro do aparato, conforme mostra a Fig. 4. O valor de p_{sup} pode ser modificado pela compressão do êmbolo da seringa (ver Fig. 1).

Quando o ludião está inicialmente em equilíbrio próximo à superfície livre do líquido, teremos o valor do empuxo total igualado ao peso do sistema (constante), sendo um equilíbrio estável. Quando o valor de p_{sup} é modificado pela compressão do êmbolo, temos um aumento no valor da pressão inicial do bolsão de ar, $p_{ar} = p_{sup} + \rho gh_0$, sendo h_0 a profundidade inicial do bolsão de ar, que está muito próximo à superfície do líquido. Este aumento de pressão do bolsão de ar leva a uma diminuição de seu volume, $V_{ar} = nRT/p_{ar}$, considerando aqui como um gás ideal, sendo n o número de moles do gás, R a constante universal dos gases e T a temperatura absoluta do gás, considerada constante e igual à temperatura ambiente. Conseqüentemente, essa redução de seu volume leva a uma diminuição de seu empuxo, E_{ar} . Com o início da imersão tem-se um aumento da profundidade do bolsão de ar, h , o que faz aumentar ainda mais sua pressão, contribuindo com a redução de seu empuxo, E_{ar} , que pode ser escrito como

$$E_{ar}(p_{sup}, h) = \rho g V_{ar} = \frac{\rho g n R T}{p_{ar}} = \frac{\rho g n R T}{p_{sup} + \rho gh} \quad (1)$$

Em outras palavras, quando o ludião está totalmente imerso, tem-se como única possibilidade de controlar a profundidade de imersão variando o empuxo relativo ao volume do bolsão de ar. Quando se inicia o processo de imersão tem-se uma dinâmica difícil de controlar devido à variação da profundidade, h , e o único parâmetro que se pode controlar é a pressão na superfície do líquido, utilizando a seringa.

No caso exemplificado neste trabalho, tem-se um aumento da pressão na superfície do líquido de 80 mm Hg quando o ludião estava a aproximadamente 1 m de profundidade (~ 76 mm Hg). Isto implica em um aumento aproximado da pressão do bolsão ar de (80 + 76) mm Hg, o que resulta, utilizando a relação (1), em uma diminuição do volume da bolsão de ar em aproximadamente 17%, a esta profundidade, naquele instante de tempo.

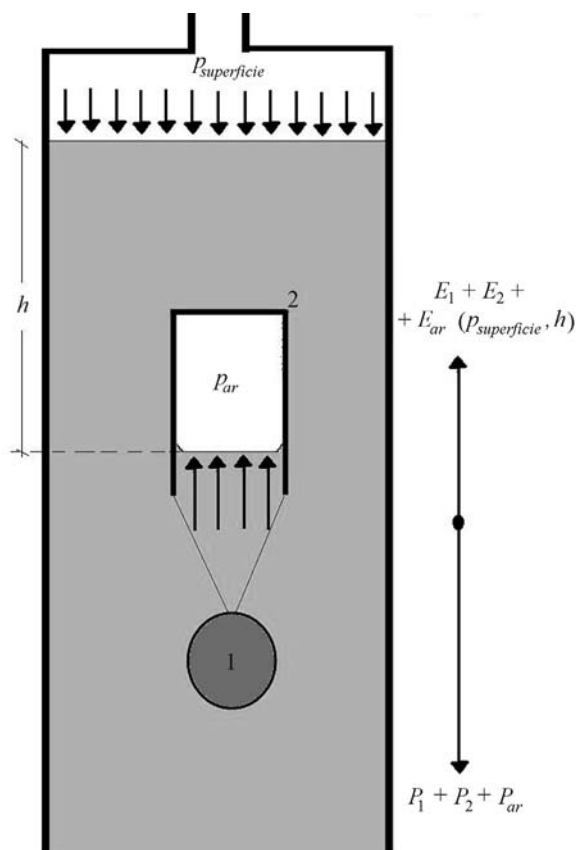


Figura 4 - Diagrama de forças do mergulhador cartesiano durante a imersão, sendo o peso total do sistema (lastro + recipiente + bolsão de ar) sempre o mesmo e, neste caso, maior que seu empuxo. O empuxo é variável, dependente da pressão do ar na superfície do líquido, p_{sup} , e da profundidade do bolsão de ar, h .

3. Sino de mergulho

Um sino de mergulho é uma câmara estanque de ar, suspensa por um cabo e aberta no fundo, que serve de base subaquática para um pequeno número de mergulhadores. É operado por um barco de superfície e usado principalmente em longos resgates ou explorações submarinas.

A diferença entre um ludião e um sino de mergulho é que o sino tem sempre um lastro suficientemente pesado para afundar mesmo completamente cheio de ar e independentemente da profundidade.

O sino de mergulho foi um dos primeiros equipamentos para exploração subaquática. Seu uso foi relatado por Aristóteles no século 4 a.C.: "...eles possibilitam mergulhadores respirar normalmente ao baixar um caldeirão, pois este não enche de água, mas retém o ar, quando forçado a submergir." Em 1535, Guglielmo de Lorena criou e usou o que é considerado o primeiro sino de mergulho moderno.

Sua primeira aplicação foi provavelmente a pesca comercial de esponjas. Essa prática milenar predatória, felizmente, passou a ser considerada crime ambiental, mas apenas há uns 20 anos. Em 1628, um sino de mer-

gulho foi usado para recuperar um canhão do famigerado e malfadado navio de guerra sueco *Vasa*.

Em 1690, Edmund Halley inventou um sino de mergulho que permitia uso prolongado, onde barris com ar fresco eram baixados da superfície. Nos sinos atuais, o ar é renovado através de uma mangueira ligada a uma bomba na superfície. Eles servem como habitat submarino e oferecem um ambiente seco pressurizado no qual mergulhadores podem descansar sem ter que passar pelo demorado processo de descompressão, necessário após mergulhos além de 10 m de profundidade.

4. O princípio de funcionamento de um submarino

O princípio de funcionamento de um submarino está baseado na variação do seu peso, através da admissão de água em seus compartimentos estanques. Uma vez que a água é admitida, o submarino começa sua imersão. Antes da imersão total, o empuxo varia continuamente igualando-se ao peso, o qual muda enquanto a água está sendo admitida em seus tanques. Quando está totalmente submerso, o empuxo atuante sobre o submarino não é mais variável, já que o volume do submarino não varia (aqui desconsideramos as deformações sofridas pelo casco em águas profundas). Então, a admissão de água em seu interior permite o aumento de seu peso fazendo-o imergir ($P > E$). Pode-se emergir ($P < E$) ativando as bombas (via ar comprimido) para a retirada de água de seus tanques. O submarino pode navegar submerso quando o equilíbrio é alcançado, ou seja, o seu peso é igual ao empuxo ($P = E$). Quando isto acontece, as comportas de admissão de água são fechadas. A navegação é feita utilizando suas hélices.

Um simples experimento demonstrativo pode ser feito com uma garrafa plástica (600 mL) com tampa de rosca e um lastro, que pode ser feito de um pedaço de metal amarrando à garrafa. Deve-se colocar um lastro de forma a garantir que o centro de gravidade do conjunto fique abaixo do centro de pressão, assegurando a estabilidade vertical. Primeiramente, coloca-se o conjunto (garrafa + lastro) fechado e vazio dentro de um tanque contendo água. Pode-se, abrir a garrafa e enchê-la com um pouco de água e fechá-la. Em seguida, coloque-a de volta no tanque. Pode-se observar que a garrafa terá uma parte maior de seu volume submerso. Esse processo pode ser repetido até que o conjunto fique totalmente imerso no tanque, em repouso, permitindo assim colocá-lo em diferentes posições dentro do tanque sem que o conjunto afunde ou volte à superfície, significando que o peso do conjunto está igualado ao empuxo, conforme mostra a seqüência da Fig. 5. Dessa maneira, se esse conjunto tivesse hélices propulsoras, poderia navegar dentro do tanque. Pode-se também aumentar um pouco mais a quantidade de água fazendo com que o conjunto chegue ao fundo do tanque ou, ao contrário, retirando um pouco de água, fazendo-o emer-

gir. Guardados os detalhes técnicos, esse é um exemplo muito claro e simples de como funciona um submarino.

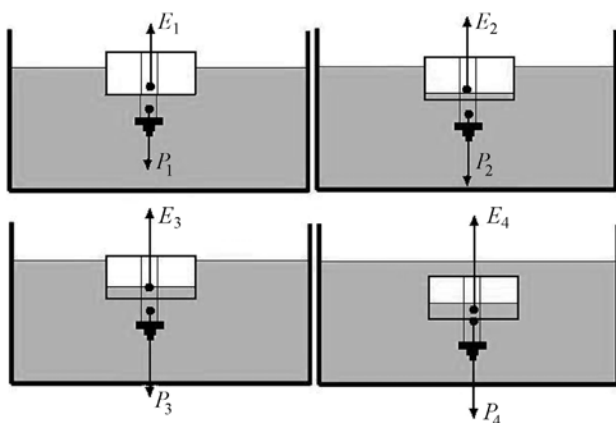


Figura 5 - Diagrama de forças de um simples experimento exemplificando o funcionamento de um submarino utilizando um conjunto (garrafa plástica + lastro) em um tanque com água. Em todos os casos temos o peso igualado ao empuxo. O peso é aumentado por admissão de água dentro da garrafa. No último quadro, à direita e abaixo, temos a situação limite em que o empuxo se manterá constante (E_4), cabendo ao experimentador a decisão de acrescentar (afundando o conjunto) ou retirar (emergindo o conjunto) água de seu interior, aumentando ($P > E_4$) ou diminuindo ($P < E_4$) seu peso.

5. Conclusões

Observando a análise feita sobre o ludião e sobre o princípio de funcionamento de um submarino, verifica-se que o ludião tem analogia direta com o sino de mergulho, onde o empuxo varia com a profundidade e o peso do sino é maior que o empuxo exercido pelo volume imerso do próprio sino e do bolsão de ar em seu interior.

A diferença entre o funcionamento do ludião e do submarino está na variação mais complicada do empuxo, dependente da pressão na superfície e da profundidade no caso do ludião, e na variação mais simples do peso, independente da profundidade (salvo as deformações no casco devido a pressões externas em águas profundas), no caso do submarino. O objetivo deste artigo é modificar a idéia amplamente difundida

de que o ludião é um bom exemplo do funcionamento do submarino. Além disso, a explicação para a imersão do ludião é feita via variação da densidade do ludião, acrescentando-se a isso a quantidade de água que está na parte interna do recipiente plástico. Esta explicação não é necessária e confunde o estudante, já que a água “contida” no recipiente está em contato com a água do tanque, diferente do submarino que cessa esse contato com o líquido ao redor, já que as comportas são fechadas após a admissão de água, não tendo assim variação da pressão interna com a profundidade, o que foi mostrado claramente no caso do ludião.

Os autores acreditam que uma abordagem mais aprofundada em cursos de licenciatura em física sobre os dois casos citados neste artigo pode modificar e melhorar a formação do futuro professor, destacando a física corretamente em cada situação exemplificada. O ludião é um experimento rico em física, onde se pode focar nos princípios de Arquimedes e Pascal, a variação da pressão em um líquido com a profundidade e, ainda, tratar o bolsão de ar como um exemplo de gás ideal que sofre uma transformação isotérmica, sem se prender demais ao princípio do submarino. Este pode ser mais bem exemplificado no experimento citado na seção 4, de forma muito mais simples e clara.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao apoio do projeto FINEP - Ciências para Todos (2006), cujos recursos ajudaram a divulgar a ciência em nossas Instituições de Ensino.

Referências

- [1] A. Gaspar, *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental* (Editora Ática, São Paulo, 2005).
- [2] A.M. Pereira, M.C. Santana e M. Waldhelm, *Ciências* (Editora do Brasil, São Paulo 1999).
- [3] P.A. Tipler, *Física, volume 1* (Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2000), 5ª ed, p. 474, problema 12.
- [4] P.G. Hewitt, *Física Conceitual* (Editora Bookman, Porto Alegre, 2002), 9ª ed., p. 234-238.