

Uma discussão sobre hidrodinâmica utilizando garrafas PET

(A hydrodynamics discussion using PET bottles)

V.L.B. de Jesus¹ e M.A.V. Macedo Junior

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, Nilópolis, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Recebido em 12/2/2010; Aceito em 28/8/2010; Publicado em 28/3/2011

Utilizando garrafas PET é possível investigar a hidrodinâmica de fluidos incompressíveis. Comparações utilizando os resultados experimentais da cinemática podem ser feitas. Esta proposta didática de baixo custo é aplicada na parte experimental da disciplina Fluidos e Termodinâmica do curso de Licenciatura em Física do IFRJ - Campus Nilópolis.

Palavras-chave: ensino de física, laboratório didático, hidrodinâmica.

It is possible to investigate the hydrodynamics for incompressible fluids using PET bottles. Comparisons with experimental results of the kinematics can be done. This didactic proposal of low cost is applied at the experimental lectures of Fluids and Thermodynamics of the IFRJ Undergraduate Physics Course - Campus Nilópolis.

Keywords: physics teaching, didactic laboratory, hydrodynamics.

1. Introdução

Experimentos de simples montagem e baixo custo que abordem resultados de hidrodinâmica baseados na equação de Bernoulli seriam uma excelente opção para contribuir na melhora da formação do licenciando em física, no caso do ensino superior, e um incentivo à prática experimental, no caso do ensino médio. O objetivo deste trabalho é mostrar que a hidrodinâmica pode ser investigada e também validada, avaliando as incertezas do experimento, a partir dos resultados obtidos pela equação de Bernoulli à luz do princípio geral da conservação da energia. Medições diretas da velocidade do fluxo de água através de um pequeno orifício na parte inferior de uma garrafa PET de 2 L podem ser feitas e comparadas ao resultado esperado da equação de Bernoulli. Detalhes desta e de outras experiências são descritas na seção 2.

A proposta experimental descrita neste artigo permite a utilização de materiais acessíveis no nosso dia-a-dia, sem grande custo para a instituição de ensino. A discussão dos resultados mostra um leque de oportunidades para se abordar o tema, desde a descrição qualitativa do experimento a uma abordagem mais precisa, baseada na medição e comparação dos resultados obtidos por diferentes métodos. A hidrodinâmica é abordada atualmente em muitas escolas do ensino médio com muita rapidez, e em alguns casos negligenciada. O artigo tem também como objetivo incentivar o ensino do

tema não só do ponto de vista teórico, mas, principalmente, da abordagem experimental simples, baseada na observação cuidadosa e métodos de medição engenhosos que podem despertar a curiosidade científica em muitos estudantes.

2. Proposta experimental e discussão dos resultados

A proposta experimental deste trabalho tem como objetivo discutir e entender a equação de Bernoulli a partir de duas atividades práticas: atividade 1 que consiste na medição direta da velocidade de saída de um jato d'água em um orifício situado na parte inferior de uma garrafa PET de 2 L, utilizando o conhecimento básico da cinemática do lançamento horizontal e sua comparação com o resultado esperado pela equação de Bernoulli. A atividade 2 discute a dinâmica de vazão no caso em que são feitos dois orifícios alinhados horizontalmente na parte inferior de uma garrafa PET, e no caso em que os orifícios são alinhados verticalmente. Os orifícios nas garrafas foram feitos cuidadosamente com um prego quente de diâmetro $(2,45 \pm 0,05)$ mm.

2.1. Atividade 1

Um exemplo simples e didático de hidrodinâmica pode ser dado utilizando uma garrafa PET de 2 L, quando

¹E-mail: vitor.jesus@ifrj.edu.br.

nela é feito um orifício de aproximadamente $(2,50 \pm 0,05)$ mm de diâmetro, d , na sua parte inferior. Quando a garrafa está cheia e não rosqueada, pode-se observar a vazão contínua de água, como mostra a Fig. 1.

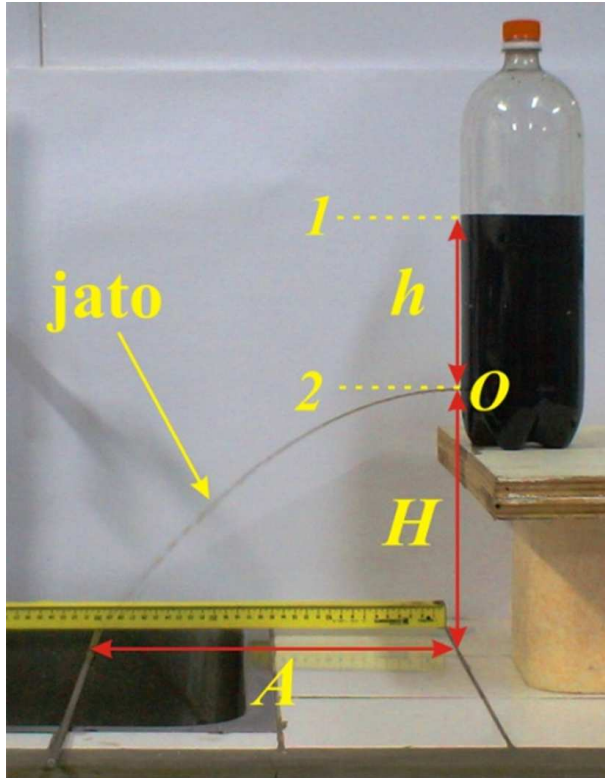


Figura 1 - Vazão contínua de água por um orifício feito na parte inferior de uma garrafa PET de 2 L quando a tampa está aberta.

Na Fig. 1 estão indicadas as alturas H e h , que correspondem, respectivamente, às alturas do orifício da garrafa (ponto 2) em relação à bancada e da linha d'água (ponto 1) até o orifício. O alcance A mostra o ponto escolhido para se realizar todas as medidas. Como isto pode ser feito? Rosqueando-se a tampa no momento em que o jato de água tiver o alcance A desejado, previamente marcado com uma barra metálica (ou uma linha) colocada perpendicularmente à direção do jato de água. A tampa é rosqueada quando a linha d'água atinge a altura h , mantendo-se constante e, assim, podemos realizar sua medida com tranquilidade e precisão.² Aqui, antes de prosseguir com o experimento, uma abordagem sobre a razão de o fluxo de água ser interrompido é interessante. Deve-se lembrar ao es-

²A tampa não deve ser retirada da parte superior da garrafa. Ela deve permanecer encaixada, porém totalmente aberta, até o momento em que se queira interromper o fluxo de água para um determinado valor do alcance.

³Uma molécula no interior de um líquido está solicitada por forças que a atraem em todas as direções, e o vetor resultante destas forças é nulo. Mas uma molécula à superfície de um líquido é solicitada para o interior do líquido, por uma força resultante de coesão que é perpendicular à superfície do mesmo. Por isso é necessário certo trabalho para deslocar as moléculas superficiais contra esta força oposta [1].

⁴A massa específica de um líquido varia geralmente muito pouco quando submetido a pressões consideráveis. A massa específica da água, por exemplo, só aumenta de $\sim 0,5\%$ quando a pressão varia de 1 atm a 100 atm, à temperatura ambiente. Para esses fluidos, onde a massa específica é constante, dá-se o nome de *fluidos incompressíveis* [2].

⁵O valor da aceleração da gravidade local (g) ao nível da bancada é de $(9,7877394 \pm 0,0000002)$ m/s² medido pelo INMETRO.

⁶A incerteza de g foi desprezada nas Eqs. (3) e (5) por ser muito pequena quando comparada às incertezas de h , A e H , respectivamente.

tudante que a pressão externa à garrafa corresponde ao valor da pressão atmosférica (p_{atm}), e a pressão interna do bolsão de ar ($p_{bolsão\ de\ ar}$) confinado entre a linha d'água e a tampa da garrafa é menor que a pressão atmosférica, e sua diferença é dada pela pressão da coluna de água. Aqui vale a pena pedir aos estudantes que calculem o valor desta pressão em termos de porcentagem da pressão atmosférica local. Esta pode ser obtida simplesmente pela razão entre a altura da coluna de água h e o valor da coluna de água equivalente a pressão atmosférica ($p_{atm} = 10,4$ mH₂O). Esta razão, no caso mostrado na Fig. 1, é de $(0,128\text{ m}/10,4\text{ m}) \times 100$ que corresponde a 1,23 % da pressão atmosférica. Aqui cabe uma observação sobre o limite do diâmetro do orifício, no caso de um único orifício. Se o diâmetro do orifício for muito grande teremos vazamento do líquido. A tensão superficial é a responsável por não deixar o líquido vaziar.³

As medidas de A , H e h , com suas respectivas incertezas, podem ser encontradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores das medidas de A , H e h , e de suas respectivas incertezas.

A (m)	H (m)	h (m)
$0,300 \pm 0,005$	$0,222 \pm 0,002$	$0,128 \pm 0,002$

A Eq. (1) é conhecida como equação de Bernoulli para fluidos incompressíveis, uma das bases para introdução à hidrodinâmica⁴

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 + \rho g z_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2 + \rho g z_2. \quad (1)$$

Na Eq. (1) ρ representa a massa específica do líquido (no caso água), v_1 (v_2), p_1 (p_2), z_1 (z_2) representam, respectivamente, a velocidade da água, a pressão e a posição do ponto 1(2). A partir do valor de h pode-se calcular a velocidade de saída do jato de água utilizando a Eq. (2) deduzida a partir da equação de Bernoulli (1)

$$v_{Bernoulli} = \sqrt{2gh}. \quad (2)$$

O valor obtido no caso acima foi de $(1,58 \pm 0,01)$ m/s.⁵ A avaliação da incerteza foi feita com base na Eq. (3).⁶

$$\delta v_{Bernoulli} = \left(\frac{\partial v_{Bernoulli}}{\partial h} \right) \delta h = \left(\sqrt{\frac{g}{2h}} \right) \delta h. \quad (3)$$

Num segundo momento, utilizando as medidas de H e A , pode-se obter a velocidade de saída do jato de água fazendo uso dos conhecimentos de cinemática do lançamento horizontal

$$v_{\text{lançamento horizontal}} = A\sqrt{\frac{g}{2H}}. \quad (4)$$

O valor obtido neste caso foi de $(1,41 \pm 0,02)$ m/s. A avaliação da incerteza foi feita com base na Eq. (5)⁵

$$\begin{aligned} \delta v_{\text{lançamento horizontal}} &= \left[\left(\frac{\partial v_{\text{lançamento horizontal}}}{\partial A} \right)^2 (\delta A)^2 + \right. \\ &\left. \left(\frac{\partial v_{\text{lançamento horizontal}}}{\partial H} \right)^2 (\delta H)^2 \right]^{1/2} = \\ &\left[\left(\sqrt{\frac{g}{2H}} \right)^2 (\delta A)^2 + \left(-A\sqrt{\frac{g}{8H^3}} \right)^2 (\delta H)^2 \right]^{1/2}. \quad (5) \end{aligned}$$

Na Fig. 2 é possível comparar os resultados obtidos pelos dois métodos e perceber, levando em conta as incertezas dos resultados, que a velocidade medida via lançamento horizontal (esquerda) é menor que aquela prevista pela equação de Bernoulli (direita).

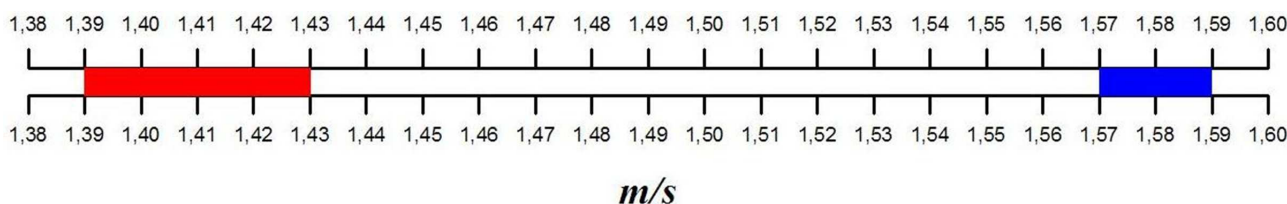


Figura 2 - Escala graduada em m/s mostrando os valores centrais das velocidades, e suas incertezas associadas, obtidas via lançamento horizontal (em vermelho) e via equação de Bernoulli (em azul).

Onde está o problema? A discussão aqui pode levar o professor de física a discutir a equação de Bernoulli, que é baseada na conservação da energia mecânica, como um caso particular do princípio geral da conservação de energia. Nas proximidades do orifício, um grande número de moléculas de água tenta sair ao mesmo tempo, onde acabam colidindo umas com as outras, e também com o orifício, ocasionando a perda de parte da energia [1].

Levando-se em consideração a perda de energia, a equação da velocidade de Bernoulli (2) pode ser reescrita como

$$v = c_v \sqrt{2gh}, \quad (6)$$

onde c_v é conhecido como *coeficiente de velocidade* dado pela razão da velocidade média real (velocidade obtida via lançamento horizontal) pela velocidade média ideal (velocidade obtida via equação de Bernoulli) que ocorreria se não houvesse perda de energia por atrito [1]

$$\begin{aligned} c_v &= \frac{v_{\text{real}}}{v_{\text{ideal}}} = \frac{v_{\text{lançamento horizontal}}}{v_{\text{Bernoulli}}} = \\ &\frac{A\sqrt{\frac{g}{2H}}}{\sqrt{2gh}} = \frac{A}{2\sqrt{Hh}} = (0,890 \pm 0,017). \quad (7) \end{aligned}$$

A avaliação da incerteza foi feita com base na Eq. (8)

$$\begin{aligned} \delta c_v &= \left[\left(\frac{\partial c_v}{\partial A} \right)^2 (\delta A)^2 + \left(\frac{\partial c_v}{\partial H} \right)^2 (\delta H)^2 + \left(\frac{\partial c_v}{\partial h} \right)^2 (\delta h)^2 \right]^{1/2} = \\ &\left[\left(\frac{1}{2\sqrt{Hh}} \right)^2 (\delta A)^2 + \left(-\frac{1}{4}\sqrt{\frac{A^2}{H^3h}} \right)^2 (\delta H)^2 + \left(-\frac{1}{4}\sqrt{\frac{A^2}{Hh^3}} \right)^2 (\delta h)^2 \right]^{1/2}. \quad (8) \end{aligned}$$

A Eq. (6) passa a representar a velocidade real de saída do jato d'água pelo orifício. Assim, a equação de Bernoulli (1) pode ser reescrita como

$$\left(\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 + \rho g z_1\right) - \left(\frac{1}{c_v^2} - 1\right) \frac{v_2^2}{2g} = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2 + \rho g z_2, \quad (9)$$

onde o termo $\left(\frac{1}{c_v^2} - 1\right) \frac{v_2^2}{2g}$ representa a perda de carga em orifícios, tubos, bocais e medidores Venturi [2].

Com o valor da velocidade de saída do jato obtido diretamente pela cinemática pode-se pedir uma estimativa da vazão. Uma vez com o valor da vazão em mãos, uma pergunta pode ser feita aos estudantes: este é um valor fixo ou variável? Aqui caberá a discussão do volume total de água, que é muito pequeno e, certamente, seria constante se fosse feito o mesmo experimento com uma caixa d'água cilíndrica de diâmetro muito maior que aquele da garrafa PET em questão. A medida poderia ser feita também com tranquilidade e precisão, mas o experimento seria um pouco mais complicado de ser feito. Aqui, o fato de podermos parar o fluxo de água quando a tampa da garrafa é rosqueada, em certo instante de tempo escolhido, permite fazer o experimento similar, sem as dificuldades experimentais impostas pela proposta da utilização da caixa d'água.

Para responder a pergunta proposta aos estudantes sobre o valor fixo ou variável da vazão, um gráfico de h em função de t pode ser feito, utilizando para isso um cronômetro e uma régua. A Tabela 2 mostra os valores obtidos para as medidas de h e de t .

Tabela 2 - Medidas da altura (h), do tempo (t) e de suas respectivas incertezas δh e δt .

h (m)	δh (m)	t (s)	δt (s)
0,200	0,002	0,00	0,01
0,180	0,002	25,80	0,01
0,160	0,002	55,11	0,01
0,140	0,002	83,99	0,01
0,120	0,002	116,77	0,01
0,100	0,002	151,36	0,01
0,080	0,002	190,14	0,01
0,060	0,002	233,71	0,01
0,040	0,002	287,93	0,01

A representação gráfica de h em função de t pode ser vista na Fig. 3. Os pontos experimentais são repre-

sentados por quadrados. Somente o lado do quadrado paralelo à altura (h) possui a mesma ordem de grandeza da incerteza de medição (δh).

A equação que representa a variação de h em função de t pode ser encontrada da seguinte maneira: considere a vazão decrescente $Q = A_0 dh/dt = -a_0 v_2$, sendo $A_0 = \pi D^2/4$ a área da seção reta da garrafa PET, $a_0 = \pi d^2/4a$ área do orifício e v_2 a velocidade de saída do jato no ponto 2. Sabendo que $v_2 = c_v \sqrt{2gh}$ (Eq. (6)) podemos escrever a integral

$$\int_{h_0}^h \frac{dh}{\sqrt{h}} = -c_v \sqrt{2g} \left(\frac{d}{D}\right)^2 \int_0^t dt.$$

A solução é dada por

$$h(t) = h_0 - c_v \left(\frac{d}{D}\right)^2 (2gh_0)^{\frac{1}{2}} t + c_v^2 \left(\frac{g}{2}\right) \left(\frac{d}{D}\right)^4 t^2. \quad (10)$$

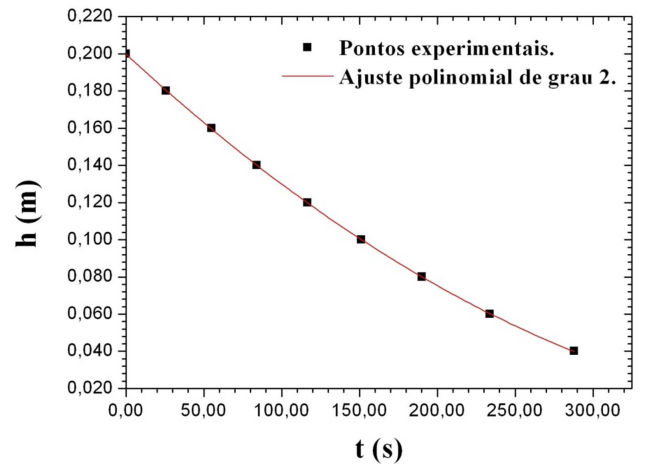


Figura 3 - Gráfico de h vs. t . A equação do ajuste polinomial é dada por $h(t) = 0,19993 - 7,754 \times 10^{-4}t + 7,61 \times 10^{-7}t^2$. A incerteza de cada termo encontra-se na Tabela 3.

Na equação acima h_0 , d e D representam, respectivamente, a altura inicial da coluna d'água (quando $t = 0$), o diâmetro do orifício e o diâmetro da seção reta da garrafa. A Eq. (10) pode ser vista como uma equação polinomial de grau 2: $h(t) = h_0 - At + Bt^2$. A comparação entre as duas equações resulta para h_0 , A e B , e suas respectivas incertezas δh_0 , δA e δB , os valores mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de h_0 , A e B , e de suas respectivas incertezas δh_0 , δA e δB obtidos a partir do ajuste polinomial de grau 2 (Fig. 3).

h_0	δh_0	A	δA	B	δB
0,19993	0,00025	$7,754 \times 10^{-4}$	$0,042 \times 10^{-4}$	$7,61 \times 10^{-7}$	$0,14 \times 10^{-7}$

Podemos estimar o valor do diâmetro do orifício, d , através da razão entre B e A

$$\frac{B}{A} = \frac{c_v^2 \left(\frac{g}{2}\right) \left(\frac{d}{D}\right)^4}{c_v \left(\frac{d}{D}\right)^2 (2gh_0)^{1/2}}. \quad (11)$$

Isolando d na equação acima, temos

$$d = D \sqrt{\frac{4}{c_v} \left(\frac{B}{A}\right) \left(\frac{h_0}{2g}\right)^{1/4}}. \quad (12)$$

O valor de D foi obtido através da medida do perímetro (C) da seção reta da garrafa, que neste caso, foi de $(31,1 \pm 0,1)$ cm. Esta medida pode ser feita passando-se um pedaço de barbante fino, ou linha, ao redor da garrafa, e depois, comparando-o com a escala de uma régua graduada em centímetros. Assim, a equação acima se torna

$$d = 2^{3/4} \frac{C}{\pi} \sqrt{\frac{1}{c_v} \left(\frac{B}{A}\right) \left(\frac{h_0}{g}\right)^{1/4}}. \quad (13)$$

Substituindo as variáveis acima por seus respectivos valores, o valor de d encontrado é de: $(2,09 \pm 0,03)$ mm. A avaliação da incerteza foi feita com base nas Eqs. (14) e (15)

$$\delta d = \left[\left(\frac{\partial d}{\partial C}\right)^2 (\delta C)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial c_v}\right)^2 (\delta c_v)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial B}\right)^2 (\delta B)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial A}\right)^2 (\delta A)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial h_0}\right)^2 (\delta h_0)^2 \right]^{1/2}, \quad (14)$$

$$\delta d = \left[\left(\frac{2^{3/4}}{\pi} \sqrt{\frac{1}{c_v} \left(\frac{B}{A}\right) \left(\frac{h_0}{g}\right)^{1/4}}\right)^2 (\delta C)^2 + \left(-\frac{2^{-1/4}}{\pi} \sqrt{\frac{1}{c_v^3} \left(\frac{C^2 B}{A}\right) \left(\frac{h_0}{g}\right)^{1/4}}\right)^2 (\delta c_v)^2 + \left(\frac{2^{1/4}}{\pi} \sqrt{\frac{1}{c_v} \left(\frac{C^2}{BA}\right) \left(\frac{h_0}{g}\right)^{1/4}}\right)^2 (\delta B)^2 + \left(-\frac{2^{1/4}}{\pi} \sqrt{\frac{1}{c_v} \left(\frac{C^2 B}{A^3}\right) \left(\frac{h_0}{g}\right)^{1/4}}\right)^2 (\delta A)^2 + \left(\frac{2^{-5/4}}{\pi g} \sqrt{\frac{1}{c_v} \left(\frac{C^2 B}{A}\right) \left(\frac{h_0}{g}\right)^{-3/4}}\right)^2 (\delta h_0)^2 \right]^{1/2}. \quad (15)$$

Podemos observar que o valor do diâmetro obtido a partir do ajuste polinomial $(2,09 \pm 0,03)$ mm) é menor que aquele medido diretamente, $(2,50 \pm 0,05)$ mm).

A menor medida da área da seção reta de um jato, geralmente localizada próxima do orifício, é conhecida como *veia contraída* [3]. Pela introdução do coeficiente c_v na Eq. (13), o diâmetro d torna-se o diâmetro real do jato d'água, ou mais precisamente, o diâmetro da veia contraída (d_c). A razão entre a área da veia contraída (A_c) e a área do orifício (A), ou entre o quadrado de seus diâmetros d_c e d , dá origem a um coeficiente conhecido como *coeficiente de contração* (c_c) [3]

$$c_c = \frac{A_c}{A} = \left(\frac{d_c}{d}\right)^2 = \left(\frac{2,09}{2,50}\right)^2 = 0,699. \quad (16)$$

Este coeficiente depende da forma e tamanho do orifício (veja o orifício ampliado 10 e 60 vezes na Fig. 4), bem como da altura entre a superfície livre da água e o orifício. O valor do coeficiente de contração varia entre 0,60 e 1, sendo 1, representativo de um orifício

perfeitamente circular. Para as nossas medidas, o valor encontrado para o coeficiente de contração é de $(0,699 \pm 0,021)$. A avaliação da incerteza foi feita com base na Eq. (17)

$$\delta c_c = \left[\left(\frac{\partial c_c}{\partial d_c}\right)^2 (\delta d_c)^2 + \left(\frac{\partial c_c}{\partial d}\right)^2 (\delta d)^2 \right]^{1/2} = \left[\left(\frac{1}{d}\right)^2 (\delta d_c)^2 + \left(-\frac{d_c}{d^2}\right)^2 (\delta d)^2 \right]^{1/2}. \quad (17)$$

Uma observação interessante pode ser feita quando se enche uma garrafa com orifício e outra intacta. Se no momento em que ambas estiverem cheias, forem simultaneamente colocadas de ponta cabeça e esvaziadas na vertical, será observada naquela sem orifício a formação de bolhas que seguem para a parte superior onde se encontra um bolsão de ar, alternando com pequenos volumes de água que saem da garrafa. Já na garrafa com um orifício no fundo, a água fluirá para baixo continuamente sem formação de bolhas. Neste momento

seria interessante questionar os alunos sobre a razão dos diferentes comportamentos. Uma explicação qualitativa baseada na diferença de pressão interna e externa no primeiro caso e exatamente o oposto no segundo será algo motivador para a discussão da pressão atmosférica e sua influência no dia-a-dia. Aqui a ligação

deste experimento com o motivo de se fazer dois orifícios opostos na lata de azeite e duas pequenas aberturas em caixas de leite, será muito interessante para o estudante. Aqui pode ser mostrada a conexão da hidrodinâmica com o seu dia-a-dia.

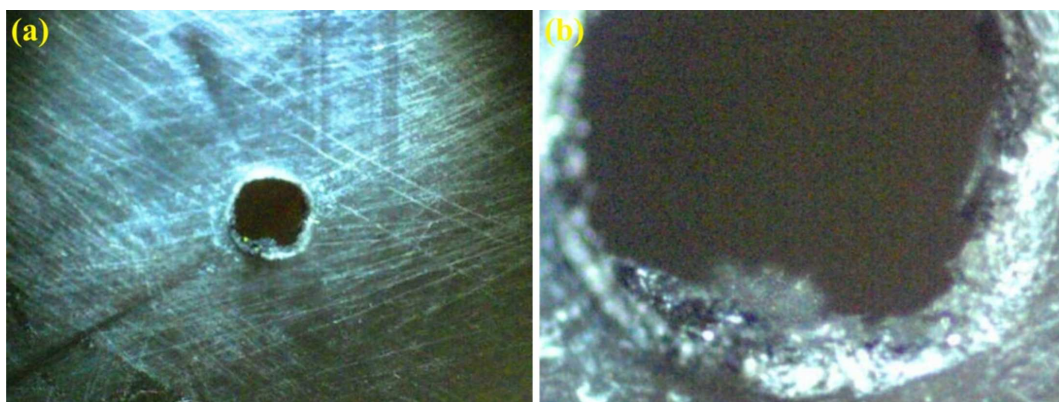


Figura 4 - Observação do orifício ao microscópio. Em (a), com um aumento de 10 vezes, e em (b), com um aumento de 60 vezes.

2.2. Atividade 2

Nesta atividade discutimos a vazão caso em que são feitos dois orifícios alinhados horizontalmente na parte inferior de uma garrafa PET de 2 L, como mostra a Fig. 5, e no caso em que os dois orifícios estão alinhados verticalmente, como mostra a Fig. 6.

Na Fig. 5 é mostrada uma garrafa PET de 2 L que possui dois orifícios alinhados horizontalmente. Quando se tem a garrafa cheia com água e a tampa não está rosqueada, observa-se que a água sai pelos

dois orifícios continuamente e com alcances similares (Fig. 5 - foto à esquerda). Esta observação remete ao fato de as distâncias da linha d'água até os orifícios serem idênticas. Quando a tampa é fechada, observa-se que o fluxo de água em ambos os orifícios é interrompido (Fig. 5 - foto à direita). Aqui cabe mais uma vez questionar tal fato. A explicação será a mesma dada na seção 2.1 para um único orifício, já que ambos os orifícios estão a uma mesma altura, h , da linha d'água.

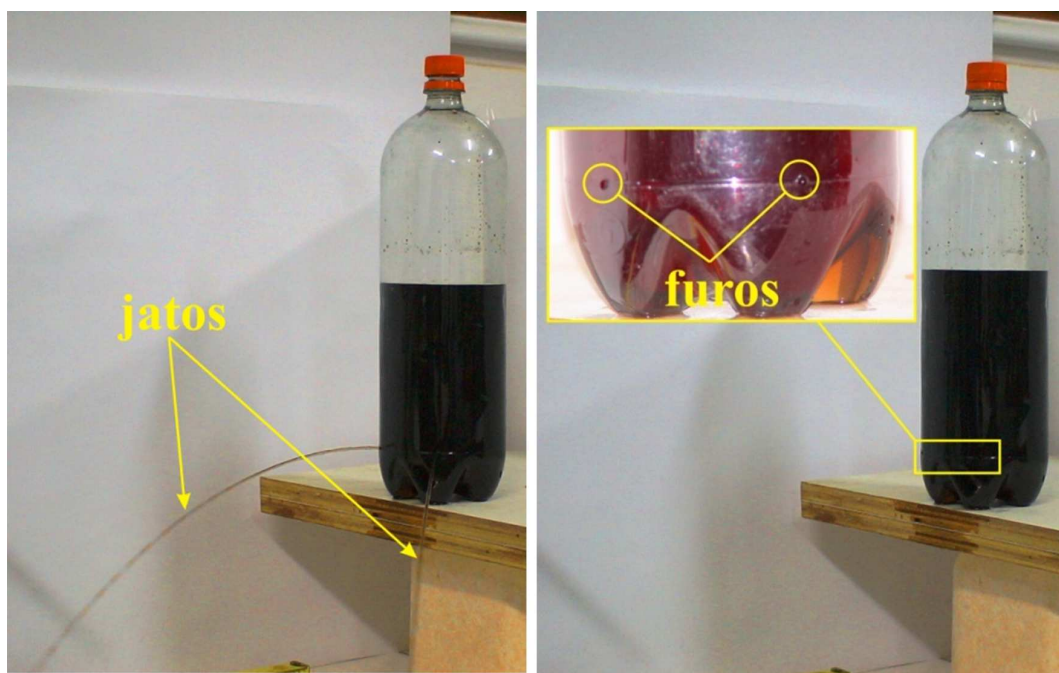


Figura 5 - Garrafa PET de 2 L com dois orifícios alinhados horizontalmente. À esquerda a garrafa está cheia e com a tampa totalmente aberta. À direita a garrafa está cheia e com a tampa fechada. Observe que neste caso o fluxo de água foi interrompido em ambos os orifícios.

Na Fig. 6 é mostrada uma garrafa PET de 2 L que possui dois orifícios alinhados verticalmente. Quando a garrafa está cheia de água e a tampa não está rosqueada, observa-se que a água sai pelos dois orifícios com alcances distintos (Fig. 6 - foto à esquerda) que pode ser remetido ao fato de cada orifício estar a uma distância diferente da linha d'água. Para uma discussão detalhada sobre os diferentes alcances ver Ref. [4]. Quando a tampa é fechada, observa-se que o fluxo de água em ambos os orifícios não é interrompido (Fig. 6 - foto à direita). Aqui cabe mais uma vez questionar tal fato. O fenômeno observado pode ser explicado da seguinte maneira: tomemos uma garrafa PET de 2 L com dois orifícios alinhados verticalmente. Tampemos inicialmente com uma fita adesiva, ou mesmo com o dedo, o orifício superior da garrafa. Quando a garrafa está cheia e fechada, observa-se que não há saída de

água pelo orifício inferior, como explicado na seção 2.1. Os orifícios verticais são separados por uma distância Z (Fig. 6). Antes de retirarmos a fita adesiva do orifício superior da garrafa, devemos determinar a pressão inicial (p_0) para este ponto e para o bolsão de ar confinado entre a linha d'água e a tampa da garrafa. A pressão da água na altura do orifício superior (ainda fechado) é dada pela Eq. (18) e a pressão inicial do bolsão de ar pela Eq. (19), onde z representa a distância do orifício superior até a superfície da linha d'água

$$p_0 = p_{atm} - \rho g Z, \quad (18)$$

$$p_{0(Bolsão\ ar)} = p_{atm} - \rho g (Z + z). \quad (19)$$

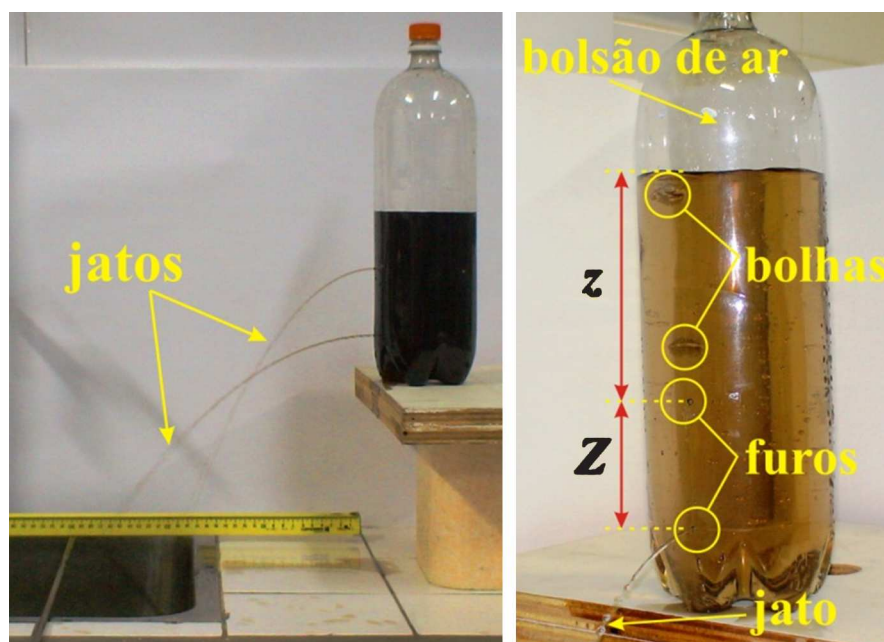


Figura 6 - Garrafa PET de 2 L com dois orifícios alinhados verticalmente. À esquerda a garrafa está cheia e com a tampa aberta. Observa-se o fluxo contínuo de água pelos dois orifícios. À direita a garrafa está cheia e com a tampa fechada. Observe que neste caso o fluxo de água pelo orifício inferior torna-se pulsado, em sincronismo com as bolhas de ar que entram pelo orifício superior indo em direção ao bolsão de ar localizado na parte superior da garrafa, entre a linha d'água e a tampa.

Uma vez retirada a fita adesiva, a pressão externa para esse orifício também será a pressão atmosférica (p_{atm}). O valor da pressão encontrado pela Eq. (18) é menor que a p_{atm} e, por este motivo, as bolhas de ar entram pelo orifício e dirigem-se até a superfície da linha d'água, como mostra a Fig. 6 (foto à direita). A diferença entre as pressões externa e interna no orifício superior é dada por $\rho g Z$. Como o acréscimo de pressão é aplicado em todos os pontos do fluido (princípio de Pascal), a pressão na linha d'água passa a ser

$$p_{0(Bolsão\ ar)} + \rho g Z = p_{atm} - \rho g z, \quad (20)$$

e a água começa fluir pelo orifício inferior. Utilizando a

equação de Bernoulli (1) para os pontos 1, localizado na linha d'água, e 2, localizado no orifício inferior, pode-se mostrar que a velocidade máxima de saída do jato de água depende somente da distância Z entre os dois orifícios

$$v_{max} = \sqrt{2gZ}. \quad (21)$$

Observa-se assim uma pequena oscilação do alcance. Isso se deve ao fato de o nível de água descer e a pressão interna ao nível do orifício superior tornar-se novamente menor que a pressão atmosférica externa. Neste instante, as pressões interna e externa do orifício inferior voltam a se igualar, e o fluxo de água é interrompido.

Apesar disso, temos a impressão de saída contínua de água, e não se observa uma interrupção do fluxo! Onde está o problema? Na verdade não existe problema. O fluxo de água é realmente interrompido no orifício. A questão é que no momento da interrupção do fluxo de água, já existia determinada quantidade de água, expelida da garrafa, na forma de jato. A parte inicial desse jato d'água atinge seu alcance máximo, que por sinal, é idêntico ao seu alcance no momento em que o fluxo é interrompido. Com o passar do tempo, o alcance do jato vai diminuindo, por não haver realimentação do fluxo de água, até o momento em que definimos um alcance mínimo, que ocorre quando todas as partes do fluido sofrem novamente acréscimo de pressão pela diferença entre as pressões interna e externa no orifício superior. Assim, como a pressão interna no orifício inferior torna-se novamente maior que a pressão externa atmosférica, o fluxo de água é normalizado, voltando a ter o alcance inicial. Todo esse processo é um ciclo que se repete somente enquanto o nível de água estiver acima do orifício superior. Quando o nível de água e o orifício superior estiverem à mesma altura, a velocidade de saída do jato de água passa a ser descrita como o problema da seção 2.1. Algo similar acontece com o experimento conhecido como "Garrafa de Mariotte" [5] onde, ao invés de utilizarmos dois orifícios na vertical, utiliza-se um canudo fixo introduzido na tampa da garrafa, ligando-se um determinado nível do fluido à parte externa da garrafa. O canudo é imerso no fluido até obter-se uma distância Z do orifício inferior. Neste caso não há oscilação do alcance do jato de água já que a pressão em Z será sempre a pressão atmosférica graças ao canudo.

3. Conclusões

A proposta experimental sugerida neste artigo permite mostrar a diversidade de tópicos que podem ser abordados sobre hidrodinâmica, desde uma descrição mais

qualitativa do experimento, encontrada na seção 2.2, até uma descrição mais precisa, baseada na medição cuidadosa e comparação dos resultados obtidos por diferentes métodos, encontrada na seção 2.1. É possível obter dados experimentais de qualidade utilizando experimentos de baixo custo.

Os autores acreditam que uma abordagem mais profunda do tema em cursos de licenciatura em física pode contribuir para melhorar a formação dos futuros professores, no caso do ensino superior, e um incentivo à prática experimental no caso do ensino médio. O artigo também dá a oportunidade dos estudantes vivenciarem as dificuldades e minúcias inerentes à investigação científica, objetivando a busca por resultados confiáveis.

Agradecimentos

O autor V.L.B. de Jesus é Bolsista do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência – PIBID, da CAPES – Brasil. O autor M.A.V. Macedo Junior agradece ao IFRJ pelo suporte financeiro (bolsa de monitoria no laboratório de física do IFRJ). Os autores gostariam de agradecer ao apoio do projeto FINEP - Ciências para Todos (2006), cujos recursos ajudaram a divulgar a ciência em nossa Instituição.

Referências

- [1] R.V. Giles, *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica* (McGraw-Hill, São Paulo, 1972), 401 p.
- [2] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica* (Edgard Blucher, São Paulo, 2002), 4^a ed. rev., v. 2.
- [3] I.H. Shames, *Mechanics of Fluids* (McGraw-Hill, New York, 1962).
- [4] J.B.G. Canalle, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **16**, 101 (1999).
- [5] J.A. Maroto and J. Dios, *American Association of Physics Teachers* **70**, 698 (2002).