

Experiência 2 - Empuxo

1. OBJETIVO

O objetivo desta aula é discutir e realizar um experimento para medir o empuxo exercido por um líquido sobre um corpo sólido parcialmente submerso e, através dessa medida, determinar a densidade do líquido.

2. INTRODUÇÃO

Por que icebergs e navios podem flutuar nos oceanos? Por que você parece ficar mais leve dentro da água? Por que balões podem subir pelos ares e também descer? As respostas a essas perguntas dependem todas de um mesmo princípio físico – o *princípio de Arquimedes*. Esse princípio estabelece que quando um corpo está completamente ou parcialmente imerso em um fluido, ele experimenta uma força vertical, dirigida para cima, de módulo igual ao peso do volume de fluido deslocado pelo corpo. Essa força, exercida pelo fluido sobre o corpo, é chamada **empuxo** e é aplicada no seu centro de gravidade. Segundo esse princípio, o que determina se um corpo flutuará ou afundará em um dado fluido é a densidade relativa do corpo com relação à densidade do fluido. Se o corpo for menos denso que o fluido, ele flutuará, ou, como no caso de um balão, ele subirá. Se o corpo for mais denso que o fluido, ele afundará. É também a densidade relativa que determina a proporção de volume submerso de um corpo flutuando em um dado fluido. Se a densidade do corpo for, por exemplo, um terço da densidade do fluido, então um terço do volume do corpo ficará submerso.

O princípio de Arquimedes tem várias aplicações importantes. Entre elas está a medida da densidade de corpos sólidos de formato irregular e de líquidos. Nesta aula usaremos o princípio de Arquimedes para medir a densidade da água e da glicerina.

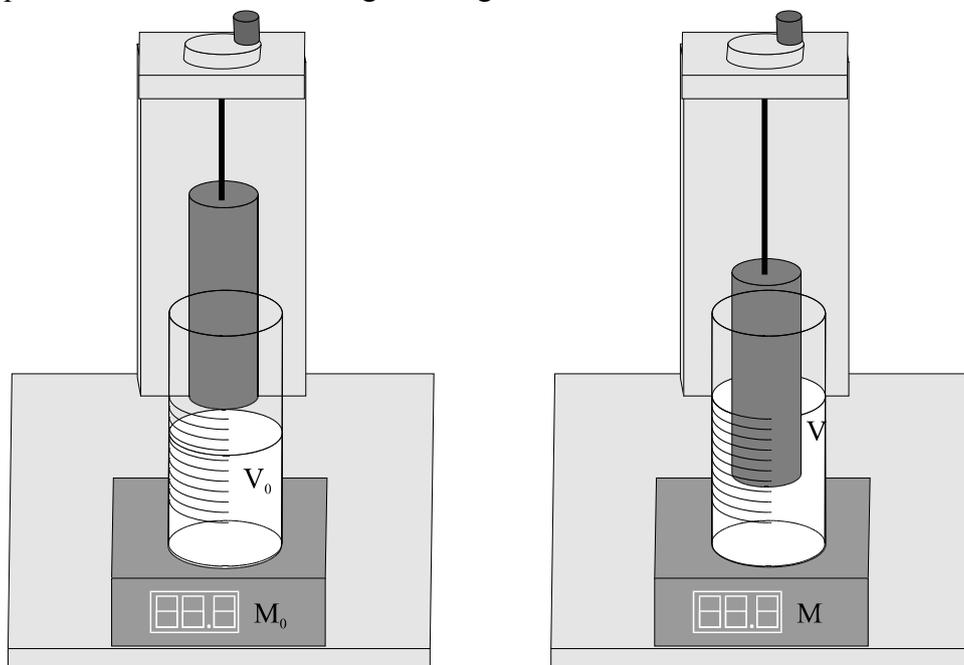


FIG. 1 – Proveta contendo um certo volume de líquido em repouso sobre uma balança. O sistema é mostrado antes e depois da barra ser parcialmente imersa no líquido.

Considere o arranjo mostrado na figura 1, onde uma proveta, contendo um certo volume de um dado líquido, está em repouso sobre uma balança. Se uma barra de um material qualquer for imersa parcialmente no líquido, o que deverá acontecer? Como o líquido é incompressível, uma porção do

líquido, de volume igual ao volume submerso da barra, será deslocada e o nível do líquido na proveta subirá. Se a proveta for graduada, poderemos determinar através da nova posição do nível do líquido qual foi o volume deslocado pela barra. Além disso, segundo o princípio de Arquimedes, quando a barra é parcialmente imersa no líquido, este exerce sobre a barra uma força vertical, dirigida para cima, de módulo igual ao peso da porção de líquido deslocada pela barra.

Essa força, como acabamos de ver, é chamada empuxo. Agora, segundo a Terceira Lei de Newton, a barra exercerá sobre o líquido uma força de módulo igual ao empuxo e de sentido contrário a esse. Essa força será transmitida à balança, que acusará um aumento no “peso” da proveta. Esse aumento no peso aparente da proveta nos permitirá medir o empuxo exercido pelo líquido sobre a barra. Suponha que antes da barra ser imersa no líquido, a balança estivesse medindo uma força de módulo $F_0 = M_0g$, correspondente ao peso da massa conjunta M_0 da proveta e do líquido. A figura 2 mostra um diagrama das forças que atuam sobre a barra e sobre o líquido após a imersão parcial da barra. Vemos que todas as forças atuam na mesma direção, por esta razão podemos tratar as forças como se fossem escalares.

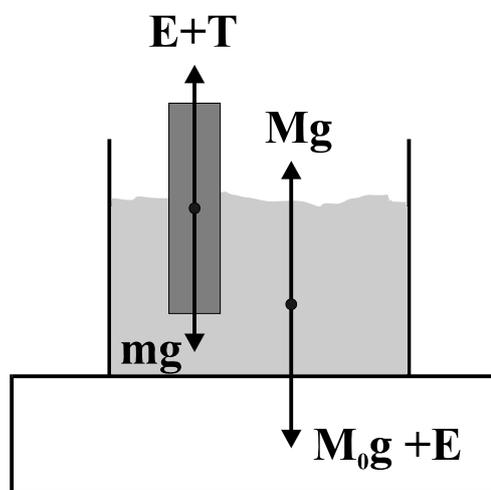


FIG. 2 – Diagrama das forças que atuam sobre a barra e sobre o líquido, após imersão parcial.

Analisando as forças que atuam na barra, verificamos que antes da imersão da barra, a balança media apenas o peso do líquido+proveta M_0g , mas após a imersão da barra o valor da leitura aumenta, por conta da força de empuxo:

$$F = Mg = M_0g + E, \quad (1)$$

onde chamamos de Mg a força devida ao peso do líquido + proveta mais a força de empuxo. Na equação (1), E é o empuxo exercido pelo líquido. Com isso, podemos ver que o empuxo pode ser determinado através da leitura da balança, antes e depois da imersão parcial da barra, através da expressão:

$$E = (M - M_0)g \rightarrow \frac{E}{g} = (M - M_0). \quad (2)$$

O diagrama das forças que atuam sobre a barra, ainda na figura 2, serve para nos mostrar que a força de empuxo contribui para a manutenção da barra em sua posição de equilíbrio, sustentando seu peso mg junto com a tensão T no suporte da barra.

Neste experimento, desejamos ainda associar a força de empuxo com a densidade do líquido. Isto nos fornecerá um método de medida de densidade de líquidos. Vamos lembrar então que, inicialmente, a proveta continha um volume V_0 do líquido cuja densidade volumétrica é ρ e que, após a imersão parcial da barra, a leitura da graduação da proveta indica um volume maior V . Então, segundo

a nossa discussão anterior, o volume da porção de líquido deslocada pela barra será $\Delta V = V - V_0$ e o peso dessa porção de líquido é igual ao empuxo exercido sobre a barra:

$$E = \rho(V - V_0)g. \quad (3)$$

Podemos escrever a expressão acima como:

$$\frac{E}{g} = \rho(V - V_0). \quad (4)$$

Agora devemos nos lembrar que o valor da grandeza $\frac{E}{g}$, aparece também na equação (2), e é fornecido pela diferença $\Delta M = M - M_0$, entre as leituras da balança antes e depois da imersão da barra, enquanto o valor de $\Delta V = V - V_0$ é fornecido pela diferença entre as leituras da graduação da proveta, antes e depois da imersão da barra. Portanto, as medições feitas com a balança e a proveta, antes e depois da imersão da barra, possibilitam também a determinação do valor da densidade volumétrica ρ do líquido, como o coeficiente angular das equações:

$$(M - M_0) = \rho(V - V_0) \rightarrow (V - V_0) = \frac{1}{\rho}(M - M_0). \quad (5)$$

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

1 – Coloque 150ml de água na proveta graduada.

2 – Meça a massa da proveta com o líquido dentro. Deixe a proveta sobre a balança.

3 – Faça medidas da massa M , em função do volume deslocado V . Para isto você deve mergulhar uma das peças metálicas na água, pouco a pouco, de forma a variar a leitura de volume na escala da proveta entre os 150ml iniciais até o máximo. Utilize variações de volume que permitam a obtenção de 10 pontos.

Note que a massa será dada pela leitura da balança. A balança na verdade mede o peso, mas a sua escala já está calibrada para fornecer uma leitura da massa.

4 – Na primeira tomada de dados, utilizando água, não faça todas as medidas com uma única peça. Faça os cinco primeiros pontos com uma peça e os últimos cinco com outra peça. Com isto você mostrará que a força de empuxo não depende das propriedades da peça.

5 – Repita as medidas, substituindo a água por glicerina. Agora as dez medidas deverão ser feitas com apenas uma das barras.

4 – TRATAMENTO DOS DADOS

Que curva melhor descreve graficamente meus dados experimentais?

Após realizar suas medidas, você deverá analisar seus resultados. Frequentemente você desejará descobrir, ou comprovar, o comportamento de uma grandeza medida em função de outra. Como um exemplo, tomemos a Equação (3), que relaciona as grandezas E/g e $V - V_0$. Ela nos diz que essas grandezas se relacionam de maneira linear, ou seja, elas obedecem uma relação do tipo

$y = ax + b$, onde, no nosso caso, $b=0$. Com os dados que obtivemos, poderíamos fazer um gráfico de E/g por $V - V_0$. Se nosso modelo estiver correto, esse gráfico deveria representar uma reta e o coeficiente angular dessa reta nos forneceria a densidade volumétrica do líquido usado. O problema é que cada uma de nossas medidas está sujeita a erros aleatórios e os pontos obtidos nem sempre formarão uma linha perfeita. Eles mostrarão uma certa componente aleatória em sua distribuição. Além disso, os pontos podem apresentar incertezas diferentes, que também devem ser levadas em conta. Por esse motivo, existem várias retas com coeficientes a e b diferentes, que passam perto dos pontos experimentais. A questão é então, saber qual é a reta que **melhor** descreve os pontos experimentais. No curso de Fisexp I você aprendeu a fazer isso visualmente. No entanto, existem métodos mais rigorosos que permitem determinar matematicamente a curva ou função que melhor descreve o comportamento de um dado conjunto de dados experimentais. Um desses métodos é o *método dos mínimos quadrados*. No curso de Fisexp II nós usaremos esse método para determinar que curva melhor se ajusta a um dado conjunto de medidas. No Apêndice A você encontrará um texto introdutório sobre esse método, bem como referências a textos que apresentam um tratamento detalhado do mesmo. É muito importante que, antes de responder ao questionário abaixo, você tenha lido o texto do Apêndice A e tenha tirado possíveis dúvidas com seu professor. Durante todo o curso nós faremos uso do método de mínimos quadrados. Por isso, é essencial que você, pelo menos, tenha compreendido o porque da utilização do mesmo. Aprenda também a usar os programas de ajuste de curvas, que estarão à sua disposição no laboratório.

4. QUESTIONÁRIO

1 – Com os dados obtidos para a água e a glicerina, monte uma tabela contendo as grandezas $V, M, V - V_0$ e $M - M_0$ e suas respectivas incertezas. Identifique em cada tabela os dados correspondentes a cada barra.

2 – Calcule as incertezas relativas dos dados correspondentes a $V - V_0$ e $M - M_0$. Em função deste resultado, qual destas variáveis deverá ser usada no eixo y durante o processo de regressão linear? Lembre-se de que apenas as incertezas na variável y serão consideradas na regressão.

Dica: A incerteza relativa da variável x é dada por $\varepsilon_R = \frac{\sigma_x}{x}$.

3 – Faça um gráfico de $(V - V_0) \times (M - M_0)$ ou $(M - M_0) \times (V - V_0)$, dependendo de qual seja mais adequado, contendo para cada líquido, os pontos experimentais obtidos com as duas barras metálicas. Utilize símbolos para diferenciar os pontos obtidos com cada barra (Ex.: círculos para uma das barras e quadrados para outra). Para encontrar a melhor curva descrevendo seus dados experimentais, realize uma regressão linear e apresente os resultados e suas incertezas. Não esqueça de incluir as barras de erro e os rótulos dos eixos com suas respectivas unidades.

4 - Analisando os gráficos para as medidas com água, nota-se que não é possível determinar, a partir do comportamento dos mesmos, qual das duas barras metálicas foi usada. Explique por que razão as medidas feitas com duas barras metálicas diferentes podem ser representadas no mesmo gráfico.

5 – Os resultados obtidos estão de acordo com o princípio de Arquimedes? Justifique sua resposta.

6 – Com os resultados das regressões lineares, calcule as densidades da água ρ_A e da glicerina ρ_G , assim como suas respectivas incertezas.

7 - A densidade da água é $\rho_A \approx 0,997 \text{ g/ml}$ e a da glicerina é $\rho_G \approx 1,26 \text{ g/ml}$. Os valores que você obteve são compatíveis com esses? Se não, enumere as possíveis causas para a discrepância observada.