

Relatório 1 - Hidrostática

Felipe Magina (15451791); Luan Leal (15470820);
Matheus Justino (14598021); Matheus Queiroz (15479562); Micael Baruch (15578823)

31 de março de 2025

1 Introdução

Esta introdução fundamenta-se no conteúdo apresentado no livro-texto referência da disciplina: Curso de Física Básica – Vol. 2, 4ª Edição, de H. Moysés Nussenzveig. O estudo da mecânica dos fluidos é essencial para a compreensão de uma ampla gama de fenômenos naturais e tecnológicos, desde o comportamento da atmosfera terrestre até o funcionamento de dispositivos utilizados em medição e controle de pressão. Fluidos são substâncias que podem escoar e assumir a forma do recipiente que os contém, sendo divididos em líquidos e gases. O comportamento dessas substâncias é descrito por diversas leis e princípios fundamentais, como o princípio de Pascal, os efeitos da tensão superficial, os conceitos de densidade e pressão atmosférica. O presente relatório tem como objetivo discutir quatro experimentos que abordam aspectos fundamentais da mecânica dos fluidos: densidade, pressão, pressão atmosférica e equilíbrio de pressões. Através desses experimentos, buscou-se entender como os fluidos interagem com seu meio e como as forças atuantes nesses sistemas influenciam diferentes fenômenos físicos.

1.1 Considerações Históricas

O estudo da mecânica dos fluidos tem história rica e fundamental na evolução da física. O trabalho de Blaise Pascal no século XVII foi essencial para a compreensão da transmissão da pressão em fluidos, enquanto Otto Von Guericke demonstrou de forma impressionante a força da pressão atmosférica com os Hemisférios de Magdeburg. Essas descobertas foram cruciais para o desenvolvimento de tecnologias modernas, como sistemas hidráulicos e pneumáticos.

1.2 Experimentos

Os experimentos que serão realizados explorarão aplicações práticas dos conceitos discutidos nas demonstrações

O primeiro experimento envolverá um densímetro em U, um dispositivo utilizado para medir a densidade de fluidos. Para a melhor compressão, é essencial lembrar que a pressão (p) em um fluido em repouso é determinada pela equação $p = \rho g h$, onde ρ representa a densidade do fluido, g a aceleração gravitacional e h a altura da coluna líquida. No densímetro em U, dois fluidos imiscíveis ajustam suas alturas de modo que as pressões nos pontos de equilíbrio se igualem. Com base nesse princípio, o objetivo do experimento é determinar a densidade de um líquido desconhecido a partir da altura relativa das colunas líquidas. Espera-se observar que quanto menor a densidade do líquido desconhecido em relação ao fluido de referência, maior será sua altura na coluna. Esse conceito tem aplicações práticas importantes, como na calibração de misturas na indústria química e na análise de fluidos biológicos, como urina e plasma sanguíneo.

No segundo experimento, será utilizado um manômetro de tubo aberto, um instrumento projetado para medir pressões relativas. A relação fundamental que rege seu funcionamento é dada pela equação de Steven $\Delta P = \rho g \Delta h$, indicando que a diferença de pressão entre dois pontos é proporcional à diferença de altura do fluido no manômetro. Assim, o objetivo deste experimento é demonstrar a relação entre pressão e altura da coluna líquida, além de medir pressões relativas. Durante a observação, espera-se que o nível do líquido manométrico varie proporcionalmente à diferença de pressão aplicada entre os dois lados do tubo. Essa propriedade torna os manômetros de tubo aberto amplamente utilizados em diversas áreas, como no monitoramento de pressões em tubulações industriais, em sistemas de combustão e até mesmo em dispositivos médicos, como esfigmomanômetros.

Seguindo para o terceiro experimento, serão utilizados os Hemisférios de Magdeburg, um experimento clássico realizado por Otto von Guericke no século XVII para demonstrar a força da pressão atmosférica e o princípio do vácuo parcial. A pressão atmosférica atua em todas as direções e pode ser calculada pela equação $p = \frac{F}{A}$. Quando o ar dentro dos hemisférios é removido, a força exercida pela atmosfera no exterior impede que eles sejam separados. O objetivo desta demonstração é evidenciar a magnitude da pressão atmosférica, algo que ficará claro ao observar que, mesmo aplicando uma força significativa, os hemisférios não se desprendem. Esse princípio é amplamente explorado em tecnologias modernas, como ventosas, seringas e dispositivos de sucção utilizados na engenharia e na medicina.

Por fim, o último experimento explora o equilíbrio de pressões, ilustrando como a interação entre pressão atmosférica e tensão superficial pode manter um sistema em equilíbrio. A diferença de pressão entre o interior e o exterior do copo cria uma força resultante que impede a saída da água, mesmo quando a cobertura é removida. Assim, o objetivo é demonstrar esse equilíbrio entre a pressão atmosférica e a força de coesão molecular. Durante a observação, espera-se que a água permaneça dentro do copo devido à ação combinada da pressão externa e das forças intermoleculares. Esse fenômeno tem aplicações diretas em diversas áreas, como no armazenamento de líquidos, na engenharia civil e até mesmo em processos biológicos, como a ascensão da seiva nas plantas.

2 Metodologia

2.1 Densímetro

Neste experimento, um tubo rígido em forma de U **deve ser parcialmente preenchido com água**. Em uma das extremidades do tubo, é adicionado um líquido de densidade indeterminada, ao qual vamos nos referir como líquido misterioso. Então, após deixar o sistema entrar em equilíbrio, são anotadas as alturas das interfaces líquido-ar da água e do líquido misterioso em relação a interface líquido misterioso-água. O aparato montado com ambos os líquidos em equilíbrio pode ser observado na Figura 1

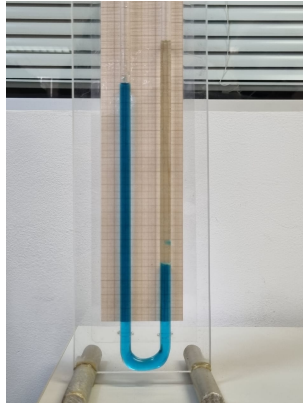


Figura 1: Tubo em U utilizado para determinar densidade do líquido misterioso

2.2 Manômetro

Para realização deste experimento é utilizado um manômetro de tubo aberto. O manômetro é constituído de um tubo rígido em forma de U com uma das extremidades aberta e a outra conectada a um tubo flexível. Ao lado do manômetro é disponibilizado um recipiente com água. O aparato pode ser observado na Figura 2 com a extremidade flexível submersa em água até a marcação de 16 cm. Para a tomada dos dados, criaremos a seguinte notação por conveniência:

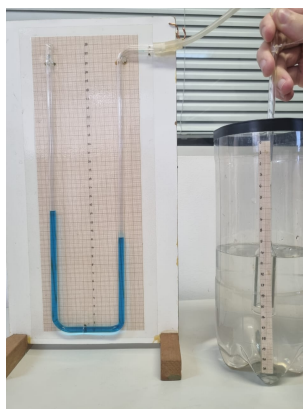


Figura 2: manômetro de tubo aberto

1. Vamos nomear de Extremidade da Atmosfera, E. Atm, a ponta do tubo em U que está exposta ao ar;
2. Vamos nomear de Extremidade do Recipiente, E. Conect, a ponta do tubo em U na qual se conecta o cano móvel a ser submerso no recipiente;

3. Vamos nomear de Extremidade Livre, E. Livre, a ponta de vidro de diâmetro maior do cano móvel que submergimos no líquido;

Para tomar uma medida, a E. Livre é submersa até a profundidade de interesse no recipiente e são anotadas as alturas dos pontos de interface líquido-ar na E. Atm e na E. Recip. Na Figura 2 é possível observar a tomada de medida do ponto de profundidade de 16 cm do recipiente.

2.3 Hemisférios de Magdeburg

Para este experimento, são utilizados dois pratos de borracha, cada um com 0,35 m de diâmetro e área de $0,0962\text{ m}^2$. Os dois pratos são alinhados e pressionados um contra o outro. Então, pode-se realizar força normal ao plano de interface entre os pratos. Uma maneira possível de exercer esta força é evidenciado na Figura 3.

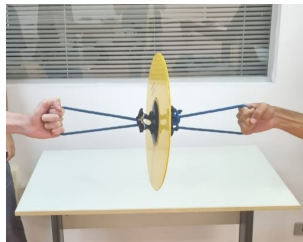


Figura 3: Dois estudantes fazendo força normal em sentidos opostos na tentativa de separar os hemisférios

2.4 Equilíbrio de Pressões

No experimento ora descrito, são utilizados: um recipiente de vidro, uma membrana fina, um pedaço de cartolina e água. O recipiente tem a abertura coberta pela membrana e é parcialmente preenchido com água. Então, a cartolina é utilizada para cobrir a membrana. Por fim, o recipiente é virado rapidamente de ponta cabeça. Em seguida, a cartolina pode ser removida. Deve-se, então, observar o que ocorre com o líquido. Feito isto, pode-se observar o efeito de inclinar o recipiente, observando os fenômenos que levam a água a escorrer ou não. É possível observar o copo completamente na vertical e com a cartolina na Figura 4a e sem a cartolina, porém ligeiramente inclinado na Figura 4b.



(a)



(b)

Figura 4: Inclinação dos copos. (a) Copo com água de ponta cabeça com cartolina. (b) Copo com água sem cartolina virado de ponta cabeça e ligeiramente inclinado

3 Resultados

3.1 Densidade do líquido

Definindo a linha paralela à separação da fase de água com a fase do líquido misterioso como ponto de altura $h = 0$, determinamos a altura em que a água fica exposta ao ar como $h_w = 0,123\text{ m}$ e a altura na qual o líquido misterioso fica exposto ao ar como $h_l = 0,153\text{ m}$.

3.2 Manômetros

Os valores obtidos estão sintetizados na Tabela 1.

E. Livre (cm $\pm 0,5$)	E. Atm (cm $\pm 0,5$)	E. Conect (cm $\pm 0,5$)
0,0	12,2	12,2
5,0	14,5	11,1
10,0	16,2	9,0

Tabela 1: Valores mensurados com o manômetro de tubo aberto

3.3 Discos de Magdeburg

Durante a realização do experimento, não foi possível separar os discos. Além disso, não foi observada nenhuma deformação significativa, isto é, não foi observada qualquer tendência de movimento.

3.4 Frasco com membrana

Após a retirada da interface plástica o líquido se manteve dentro do frasco. Em seguida, na análise da inclinação com o software Traker, obtemos a Figura 5. Veja

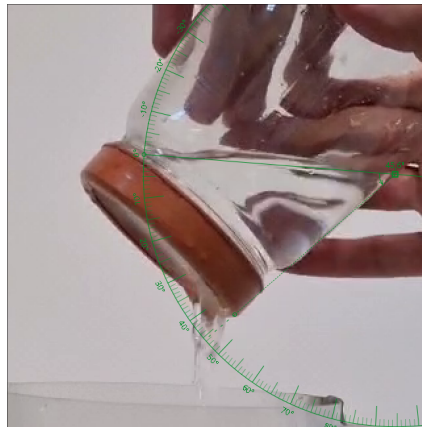


Figura 5: Ângulo de inclinação do copo para equilíbrio de pressões

Note a inclinação do frasco em relação ao nível da água, em torno de $45,6^\circ$.

4 Discussão

4.1 Densímetro

A partir dos resultados, a lei de Stevin nos permite calcular a densidade do líquido misterioso:

$$\begin{aligned}\rho_l \cdot h_l &= \rho_w \cdot h_w \\ \rho_l &= \frac{\rho_w \cdot h_w}{h_l} \\ \rho_l &= \frac{966,5 \cdot 0,123}{0,153} = 767,0 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Logo, a densidade do líquido misterioso é de $767,0 \text{ kg/m}^3$. Consultando uma tabela de referência, não foi possível atribuir essa densidade a nenhum líquido. Em seguida, vejamos o cálculo de erro.

4.1.1 Cálculo de erro

Considerando os erros experimentais $\sigma h_w = \pm 0,0005m$ e $\sigma h_l = \pm 0,0005m$, temos pela propagação de erro:

$$\begin{aligned}\sigma_l &= \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_l}{\partial h_w}\right)^2 \sigma_{h_w}^2 + \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial h_l}\right)^2 \sigma_{h_l}^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\rho_w}{h_l}\right)^2 \sigma_{h_w}^2 + \left(\frac{-\rho_w \cdot h_w}{h_l^2}\right)^2 \sigma_{h_l}^2} \\ &= 4,05 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Por fim, mesmo considerando o erro, não conseguimos encontrar um líquido cuja densidade seja compatível com a ora calculada.

4.2 Manômetro

Em relação aos resultados obtidos, é possível diferenciar os dados em dois casos: (a) equilíbrio atmosférico, onde h_{atm} é igual a h_{Conect} ; e (b) submersão da extremidade livre sem vazamento de ar, onde $h_{\text{atm}} > h_{\text{Conect}}$.

No caso (a), temos apenas uma aplicação direta da Lei de Stevin, onde pontos de mesma altura no líquido possuem a mesma pressão. Enquanto, no caso (b), temos um deslocamento da coluna de água do recipiente, gerando um aumento da pressão nos pontos inferiores e, conseqüentemente, gerando uma diferença de pressão no manômetro, que pode ser observada pela mudança de alturas em relação ao equilíbrio. De fato, quanto mais submersa é a extremidade livre, maior o deslocamento da coluna de água do recipiente que, por sua vez, gera maior diferença de alturas no manômetro.

4.3 Discos de Magdeburg

O resultado observado pode ser explicado pela diferença entre as pressões interna e externa aos discos. Em especial, consideramos um vácuo parcial onde adotamos a pressão interna como zero. Vejamos:

$$\begin{aligned}\Delta p &= p_{\text{ext}} - p_{\text{int}} \\ &= p_{\text{ext}} \\ &= p_{\text{atm}}\end{aligned}$$

Podemos considerar, então, a existência de uma “força atmosférica” distribuída por toda a superfície dos discos dada por:

$$F_{\text{atm}} = p_{\text{atm}} \cdot A_{\text{disco}}$$

Em particular, podemos olhar para um dos discos num modelo de corpo livre. Assim temos:

$$\sum F = F_{\text{atm}} - T - n = 0$$

onde T é a força de tração exercida e n é a força normal exercida entre um disco e outro. Como n depende da força exercida entre os discos e a força T reduz esse contato, temos que conforme T aumenta n diminui. Logo, T deve ser superior ao valor máximo de n^1 para que haja movimento do disco, ou seja, $T > F_{\text{atm}}$ para que haja movimento.

Agora, podemos avaliar a força de tração necessária:

$$\begin{aligned} F_{\text{atm}} &= p_{\text{atm}} \cdot A_{\text{disco}} \\ &= (9,235 \cdot 10^4 \text{Pa}) \cdot (9,62 \cdot 10^{-2} \text{m}) \\ &= 8,884 \cdot 10^3 \text{N} \end{aligned}$$

Logo, a força de tração necessária é de $8,884 \cdot 10^3 \text{N}$. Aqui, usamos a pressão atmosférica medida pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo².

4.3.1 Cálculo de erro

A área foi calculada a partir do diâmetro do hemisfério, de 35 cm, cujo erro associado é $\sigma_R = \pm 0,5 \text{cm} = \pm 0,5 \cdot 10^{-2} \text{m}$. Enquanto o erro associado à pressão atmosférica é $\sigma_P = \pm 5 \text{Pa}$.

Por propagação de incerteza (tome R como raio e P como pressão):

$$\begin{aligned} &\sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial R} R^2 \pi P \cdot \sigma_R\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial P} R^2 \pi P \cdot \sigma_P\right)^2} \\ &= \sqrt{(2 \cdot 0,175 \pi 92350 \cdot 0,005)^2 + (0,175^2 \pi \cdot 5)^2} \\ &\cong \pm 5,07 \cdot 10^2 \text{N} \end{aligned}$$

Dessa forma, podemos afirmar com mais precisão que seriam necessários $(8884,07 \pm 507) \text{N}$ de força para separar as esferas.

4.4 Frasco com membrana

Podemos atribuir a permanência do líquido no frasco a dois fenômenos: (1) a tensão superficial da água em contato com a membrana; (2) a diferença de pressões interna e externa ao frasco. Inclusive, a inclinação realizada, que quebra o estado de equilíbrio, se relaciona com o último.

Podemos afirmar, pela Lei de Stevin, que a pressão da água na membrana, quando o frasco se encontra alinhado com a vertical é a mesma em todos os pontos. Contudo, ao ser inclinada, cada altura da membrana possui uma pressão distinta, em especial, o ponto mais alto da membrana possui a menor pressão. Assim, a inclinação de desequilíbrio é aquela tal que a pressão da água na membrana se torne

¹que ocorre quando $T = 0$, assim assume o valor de F_{atm}

²Retirado de <http://www.estacao.iag.usp.br/index.php>

menor que a pressão atmosférica, permitindo a entrada de ar. A partir desse instante, há uma ruptura do equilíbrio e o líquido escorre.

5 Conclusão

Para concluir, após os dados coletados e analisados, foi possível demonstrar como os princípios físicos de hidrostática citados na introdução possibilitaram a explicação dos fenômenos de cada experimento.

Primeiramente, para o experimento dos discos de Magdeburgo, concluiu-se que devido a diferença de pressão encontrada nos discos a força necessária para a separação dos dois discos se tornou muito grande, o que fez com que não fosse possível com uma força humana, realizar tal separação.

Segundamente, para o experimento do frasco com água e membrana, foi possível concluir-se que devido a diferença de pressões, e a tensão superficial da água fez com que a água invertida não vazasse do frasco, esse equilíbrio foi alterado com base na inclinação do copo devido a diferença de pressão da água nos pontos da membrana.

Por fim, foi possível concluir que o manômetro segue completamente a lei de Stevin. Uma vez que, foi perceptível a variação de altura influenciada pela variação de pressão ao imergir a extremidade móvel na água.

6 Referências

NUSSENZVEIG, H. Moysés. Curso de física básica: fluidos, oscilações e ondas, calor. São Paulo: E. Blücher, 2014.