

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE CIÊNCIAS MOLECULARES

Nota: 7,4/10

Descontos:

- 0,2 Faltou apresentar as equações;
- 0,3 Não discutiram os detalhes das aproximações adotadas para o caso do viscosímetro;
- 0,2 Por não mencionarem a imagem no texto antes de ela aparecer;
- 1,0 Pela análise incorreta do viscosímetro de Stokes;
- 0,5 Por não compararem com um valor de referência e pelo mal uso do número de Reynolds;
- 0,2 Por problemas de legendas das figuras;
- 0,2 Por não retomarem na conclusão o resultado quantitativo do viscosímetro.

Relatório de Experimentos III

Hidrodinâmica

Atividade apresentada ao docente Caetano Rodrigues Miranda, na disciplina de Física II (CCM-0122), como atividade para composição de nota.

São Paulo

2025

DISCENTES

- BRUNO KLEINE MOLLICA
Nº USP: 14562470
- CAUÊ RAFFAINI BRONDI
Nº USP: 14564513
- DIEGO ALEXANDRE T. DOS SANTOS
Nº USP: 14566283
- FELIPE SCHOENACKER WEY
Nº USP: 15451717
- JOSÉ ALEXANDRE SOARES DE OLIVEIRA
Nº USP: 11761208

SUMÁRIO

1. Introdução.....	4
2. Metodologia.....	4
2.1 Viscosímetro de Stokes.....	4
2.2 Planagem.....	5
2.3 Tubo com esfera.....	5
3 Resultados e discussões.....	5
3.1 Viscosímetro de Stokes.....	5
3.2 Planagem.....	5
3.3 Tubo com esfera.....	10
4 Conclusão.....	10

1. Introdução

O estudo da hidrodinâmica, ramo da física que investiga o comportamento de fluidos em movimento, é fundamental para compreender diversos fenômenos naturais e aplicações tecnológicas, desde o escoamento de rios até o projeto de aviões e navios. A análise do movimento de objetos em meio fluido, da resistência oferecida ao deslocamento e das variações de pressão em função da velocidade permite explorar princípios que regem o funcionamento de sistemas complexos e possibilita o desenvolvimento de instrumentos de medição de grande precisão.

Neste relatório, são apresentados três experimentos que abordam aspectos distintos da hidrodinâmica: (1) a determinação da viscosidade de um fluido por meio do viscosímetro de Stokes; (2) a observação qualitativa do fenômeno da planagem, essencial para a compreensão da sustentação em asas de avião; e (3) a análise do movimento de uma esfera em tubos com diferentes condições de escoamento. Ao integrar medições quantitativas e observações qualitativas, os experimentos propostos oferecem uma visão abrangente sobre a influência da geometria, da densidade e da velocidade na interação entre sólidos e fluidos em movimento.

Assim como a hidrostática se baseia no Princípio de Arquimedes para analisar objetos submersos em equilíbrio, a hidrodinâmica se fundamenta em leis como a de Stokes e a equação de Bernoulli para explicar o comportamento dinâmico dos fluidos. Com isso, este relatório busca não apenas consolidar os conceitos teóricos envolvidos, mas também desenvolver a capacidade de modelagem e interpretação de fenômenos físicos a partir de dados experimentais.

2. Metodologia

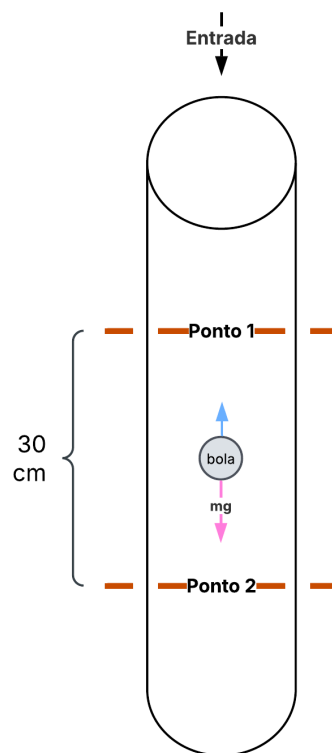
2.1 Viscosímetro de Stokes

O objetivo deste experimento é determinar a viscosidade de um fluido por meio da análise do movimento de uma esfera de aço em queda dentro de um tubo cilíndrico vertical. Para isso, será medida a velocidade terminal da esfera, a partir do tempo que ela leva para percorrer uma distância conhecida dentro do fluido.

Antes do início do experimento, cada integrante do grupo realiza uma medição do diâmetro da esfera de aço utilizando um micrômetro, a fim de obter um valor médio mais preciso. Informações adicionais, como a densidade e a temperatura do fluido, bem como o diâmetro interno do tubo cilíndrico, também são registradas.

O experimento é realizado em um tubo cilíndrico transparente vertical, preenchido com um fluido de densidade $0,883 \text{ g/cm}^3$. Uma esfera de aço é colocada na superfície superior do fluido, de modo que ela afunda sob a ação da gravidade. Dois pontos ao longo do tubo, separados por uma distância de 30 cm, são utilizados como referência para a medição do tempo de queda da esfera. O esquema da figura 2.1.a apresenta o experimento visualmente:

Figura 2.1.a - Esquema do viscosímetro de Stokes



Fonte: elaboração própria

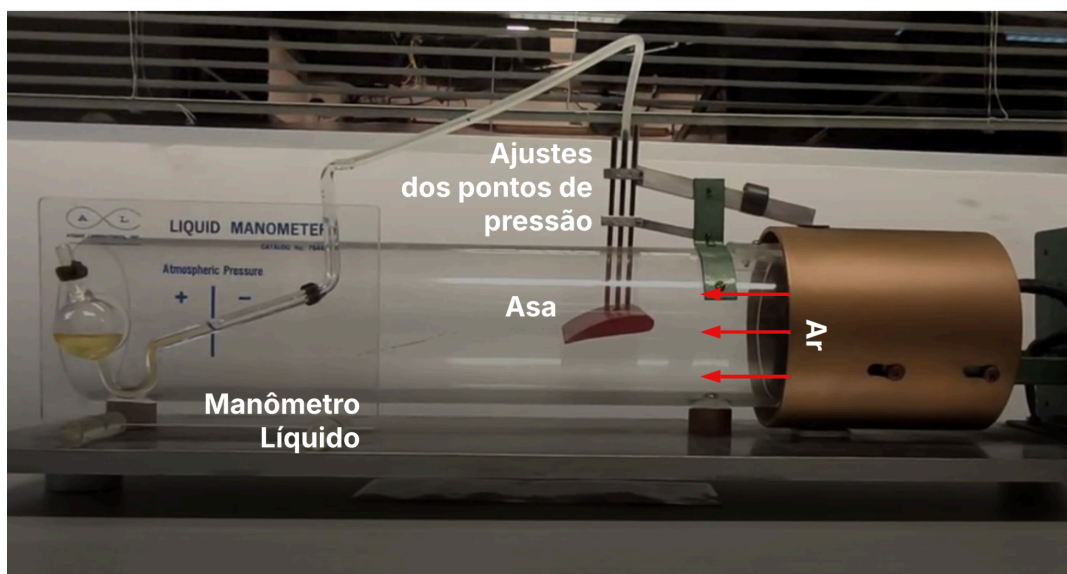
Durante a realização do experimento, um aluno é responsável por inserir a esfera no tubo, enquanto outro marca o momento em que a esfera passa pelos pontos de referência, por fim, um último aluno registra os tempos medidos com um cronômetro digital. Os alunos revezam entre as funções até que pelo menos um membro de cada grupo tenha realizado a medição do tempo.

2.2 Planagem

Analisa-se o fenômeno da planagem a partir de dois experimentos diferentes. No primeiro, consiste em pôr uma asa de isopor, segura por um fio e livre no eixo vertical para planar. Um ventilador à frente da asa é o responsável por gerar o escoamento de ar necessário para simular o movimento relativo entre o ar e a asa. Os alunos alteram a posição da asas para verificar possíveis efeitos, anotações são em caderno e fotos do experimento são registradas para análise posterior.

A figura 2.2.a representa visualmente os elementos do segundo experimento. Neste, acopla-se uma asa menor no interior de um tubo de vento, onde uma corrente de ar flui da direita para a esquerda em direção à asa. Um manômetro líquido, instalado ao final do tubo, mede a pressão em pontos diferentes da parte inferior da asa. Os alunos alternam principalmente o ajuste dos pontos de pressão na asa, alterando o tubo ligado ao manômetro para outra haste, realizam anotações e registram fotos para análise posterior.

Figura 2.2.a - Esquema do segundo experimento



Fonte: elaboração própria

2.3 Bolinha caindo



Figura 2.3.a - Experimento 3

Neste experimento, o objetivo é comparar qualitativamente o comportamento de uma mesma esfera ao cair em dois tubos verticais, cada um preenchido com um fluido diferente: um com água e o outro com óleo. A análise visa compreender como a viscosidade dos fluidos afeta a velocidade de queda do objeto e como a resistência ao movimento varia em função das propriedades do meio.

Foram utilizados dois tubos cilíndricos transparentes de mesma altura, um contendo água e o outro contendo óleo, ambos à temperatura ambiente. A mesma esfera metálica foi deixada cair de uma altura aproximadamente igual nos dois tubos, sendo observada visualmente sua trajetória até o fundo. Para garantir a comparação justa entre os meios, os tubos foram posicionados lado a lado.

Durante a queda, observou-se a velocidade com que a esfera atravessava cada fluido, prestando atenção ao tempo que levava para atingir o fundo do recipiente e à presença ou não de desaceleração perceptível. As diferenças entre o movimento da esfera em água e em óleo foram discutidas com base nos conceitos de viscosidade, resistência do fluido e velocidade terminal. Além disso, foram feitas anotações qualitativas sobre o tipo de movimento (retilíneo uniforme ou desacelerado) e possíveis turbulências geradas.

Este procedimento, apesar de não envolver medição quantitativa exata do tempo, fornece subsídios visuais suficientes para inferir o efeito da viscosidade nos diferentes fluidos, reforçando o entendimento dos conceitos abordados na hidrodinâmica

3. Resultados e discussões

3.1 Viscosímetro de Stokes

No experimento com o viscosímetro de Stokes, foram utilizadas quatro esferas metálicas de diâmetro médio aproximado de 5,50 mm, lançadas em um tubo cilíndrico vertical preenchido com um fluido cuja densidade é $\rho_f = 0,883 \text{ g/mm}^3$, à temperatura de aproximadamente $25,2^\circ\text{C}$. A distância de queda medida foi de 30 cm (0,30 m) e os respectivos tempos registrados encontram-se na Tabela 1:

Medição	Diâmetro da esfera (mm)	Tempo de queda (s)	Distância (cm)	Diâmetro do tubo (cm)
1	5,494	1,41	30	4,844
2	5,497	1,34	30	4,944
3	5,500	1,40	30	4,840
4	5,496	1,50	30	-

Com base nesses dados, foi possível calcular a velocidade terminal média v_v para cada esfera, utilizando:

$$v = \Delta t / \Delta s$$

A seguir, utilizando a equação da Lei de Stokes:

$$\eta = 2r^2g(\rho_e - \rho_f) / 9v$$

onde:

- r é o raio da esfera (em metros),
- g é a aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$)
- ρ_e é a densidade da esfera (assumida como aço: $\sim 7,8 \text{ g/cm}^3 = 7,8 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$)
- $\rho_f = 0,883 \text{ g/mm}^3$
- v é a velocidade terminal em m/s,

calculou-se a viscosidade dinâmica η do fluido para cada repetição. Assim foi calculado que a viscosidade média do fluido obtida foi de aproximadamente:

$$\eta_{\text{média}} \approx 0,536 \text{ Pa}$$

com um desvio padrão de:

$$\sigma \approx 0,022 \text{ Pa}$$

Os valores obtidos foram consistentes entre si, com variação inferior a 6% em torno da média, indicando boa reprodutibilidade dos dados experimentais. As pequenas diferenças observadas podem ser atribuídas a incertezas na medição do tempo, variações mínimas no diâmetro das esferas e possíveis perturbações do fluido durante a liberação da esfera.

O resultado mostra que a metodologia baseada na Lei de Stokes é eficaz para determinar a viscosidade de um fluido, desde que o regime de escoamento se mantenha laminar, o que foi observado pela ausência de turbulência visível e pela rápida estabilização da velocidade da esfera. Dessa forma, o experimento permitiu validar, de forma quantitativa, a relação entre a força de arrasto, a velocidade terminal e as propriedades do fluido e da esfera envolvidas no movimento.

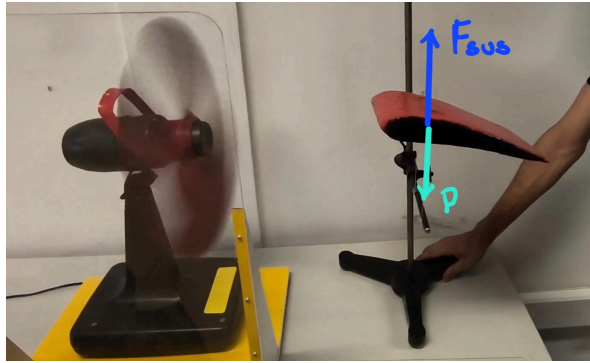
A leve variação nos tempos medidos pode ser atribuída a fatores como pequenas diferenças no diâmetro das esferas, variações na densidade local do fluido, tempo de reação durante a cronometragem manual e possíveis perturbações no tubo (como bolhas ou impurezas). Mesmo assim, como a velocidade terminal foi atingida rapidamente em todos os casos, e os dados apresentaram pouca dispersão, a aplicação da Lei de Stokes mostrou-se adequada.

Por fim, vale ressaltar que o número de Reynolds não foi ultrapassado, mantendo o regime laminar necessário para a validade da equação. Isso reforça a confiabilidade dos resultados obtidos neste experimento.

3.2 Planagem

Em relação ao experimento 1, vemos que o formato da asa tem um papel crucial para manter a força de sustentação que tem direção oposta à força Peso e permite o objeto planar (figura X). Isto ocorre devido ao ângulo de ataque formado pela asa que ocasiona uma maior pressão na região abaixo da asa e uma região de menor pressão na área acima da asa.

Figura 3.2.a- Forças sendo exercidas na asa



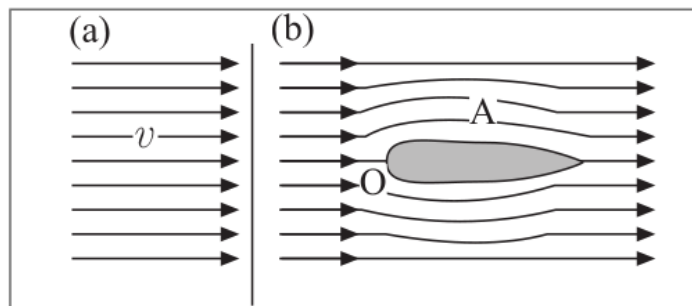
Fonte: elaboração própria

Em relação ao segundo experimento, podemos analisar a pressão e velocidade em 3 diferentes regiões da asa. Para medir a pressão ou a velocidade num fluido em movimento, é necessário introduzir nele algum instrumento de medida, que geralmente perturba o escoamento. Para relacionar o resultado obtido com a grandeza a medir, é preciso compreender a natureza dessa perturbação. Assim, se introduzirmos num campo de escoamento inicialmente uniforme, de velocidade v (Figura 3.2.c (a)) um corpo afilado, de forma “aerodinâmica” (Figura 3.2.c (b)), ele perturba as linhas de corrente da forma indicada na figura. No ponto O (Figura 3.2.c (b)), o fluido é freado, ou seja, a velocidade se reduz praticamente a zero. Um tal ponto chama-se ponto de estagnação. Por outro lado, num ponto como A na Figura 3.2.c (b), a velocidade de escoamento quase não sofre perturbação, ou seja, continua igual a v . Se p é a pressão em A e p_0 a pressão em O, como a diferença de altura entre esses pontos é desprezível, a equação de Bernoulli resulta em, tomando $v_0 = 0$ em O,

$$p_0 = p + \frac{1}{2} \rho v^2$$

A pressão no ponto de estagnação se eleva para p_0 , que é chamada de pressão dinâmica, em razão do freamento do fluido.

Figura 3.2.c - Perturbação do escoamento.



Fonte: NUSSENZVEIG, 2014, p. 39.

Acoplando o corpo considerado a um manômetro diferencial para medir $p - p_0$, obtemos um tubo de Pitot (Figura 2.2.c). Se ρ_0 é a densidade do fluido no tubo em U e h a diferença de nível entre os dois ramos, temos:

$$p_0 - p = \rho_0 gh = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2.2)$$

O que permite medir a velocidade v de escoamento do fluido:

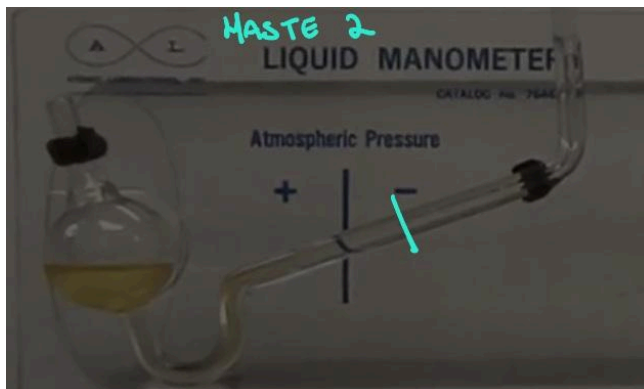
$$v = \sqrt{2 \frac{\rho_0}{\rho} gh} \quad (2.3)$$

Para analisar a pressão relativa nas 3 regiões da asa é utilizada uma haste acoplada a um tubo de Pitot, dando um zoom no tubo temos as seguintes imagens:

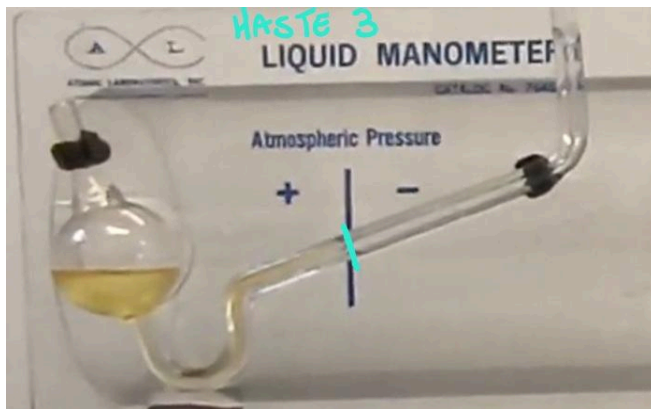
Pressão relativa na primeira haste



Pressão relativa na segunda haste



Pressão relativa na terceira haste



Assim, temos que as pressões relativas à atmosfera nas três hastes são:

$$Prel_3 < Prel_2 < Prel_1$$

Portanto pela equação (2.3) temos que:

$$v_3 > v_2 > v_1$$

Este resultado corrobora com a teoria citada, uma vez que a velocidade da haste 1 é a menor já que está mais próxima do ponto de estagnação da asa em que a velocidade é 0.

3.3 Bolinha caindo

Durante o experimento, foi observada a queda de uma mesma esfera metálica em dois tubos cilíndricos verticais, um contendo água e o outro contendo óleo. O objetivo era analisar qualitativamente como a viscosidade do fluido influencia a velocidade de queda da esfera e o tipo de movimento observado.

Os resultados mostraram diferenças evidentes entre os dois casos. Na água, a esfera caiu com maior rapidez, atingindo o fundo do tubo em um intervalo de tempo significativamente menor. O movimento foi praticamente retilíneo uniforme após os primeiros instantes, indicando que a esfera atingiu a velocidade terminal rapidamente, devido à baixa viscosidade da água.

Já no tubo com óleo, a queda foi consideravelmente mais lenta. A esfera apresentou um movimento visivelmente mais amortecido, com aceleração inicial perceptível e uma desaceleração progressiva até atingir uma velocidade terminal mais baixa. Isso é consistente

com a maior viscosidade do óleo, que oferece maior resistência ao movimento da esfera e reduz sua velocidade final.

Essas observações qualitativas são coerentes com a teoria da hidrodinâmica. A força de arrasto, que se opõe ao movimento da esfera, é diretamente proporcional à viscosidade do fluido. Em meios mais viscosos, como o óleo, essa força é maior, e a velocidade terminal atingida é menor. A equação de Stokes, que relaciona a viscosidade com o raio da esfera, densidades dos materiais e a velocidade terminal, ajuda a explicar esse comportamento:

$$\eta = 2r^2g(\rho_e - \rho_f)/9v$$

Como a esfera e a aceleração gravitacional são constantes nos dois casos, a principal variável que altera a velocidade de queda é a viscosidade η do fluido. Assim, o experimento confirmou qualitativamente que a resistência do fluido ao movimento de um corpo é maior em líquidos mais viscosos.

Em resumo, a comparação entre os dois tubos evidenciou, de forma clara e visual, a influência da viscosidade sobre o movimento de corpos em fluidos, reforçando a compreensão conceitual da hidrodinâmica e das forças envolvidas no regime de escoamento laminar.

4. Conclusão

Os experimentos realizados neste relatório permitiram uma exploração prática e conceitual dos princípios fundamentais da hidrodinâmica. Através da análise do movimento de esferas em fluidos, da observação do fenômeno de planagem e da comparação entre diferentes meios viscosos, foi possível compreender como a viscosidade, a densidade e o formato de objetos influenciam diretamente a interação com o fluido e o comportamento do escoamento.

No experimento com o viscosímetro de Stokes, a medição do tempo de queda de esferas metálicas em um fluido possibilitou o cálculo da viscosidade, demonstrando a aplicação direta da equação de Stokes e reforçando a importância do regime laminar para a validade do modelo. Os resultados obtidos foram consistentes entre si, compatíveis com os valores esperados, e evidenciaram a precisão que pode ser alcançada mesmo em experimentos simples.

A análise qualitativa da planagem mostrou, por meio da simulação do fluxo de ar sobre asas, como a distribuição de pressão ao redor de superfícies aerodinâmicas é capaz de gerar sustentação, sendo essencial para o entendimento do voo. A utilização do tubo de Pitot e do

manômetro diferencial permitiu verificar experimentalmente a relação entre velocidade e pressão, conforme previsto pela equação de Bernoulli.

Por fim, o experimento comparando a queda de uma esfera em tubos com água e óleo reforçou visualmente o conceito de viscosidade, mostrando como ela afeta a resistência ao movimento e a velocidade terminal dos corpos. A diferença de comportamento entre os dois casos ilustra de forma clara a influência das propriedades do fluido no escoamento.

Assim, os experimentos não apenas consolidaram os conceitos teóricos discutidos em sala, como também estimularam a capacidade de observação crítica, análise experimental e interpretação física de fenômenos dinâmicos em fluidos.

REFERÊNCIAS

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica: Fluidos, Oscilações e Ondas**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2014. 375 p. v. 2. ISBN 978-85-212-0747-4.