



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE INOVAÇÃO - INOVA USP
Curso de Ciências Moleculares



ALICE ALVES BOZZI
BRUNA RODRIGUES DA SILVA
LUIZA LUCCHETTI ODDI LOURENÇO
SOFIA FIGUEIREDO FORTI

Nota: 9,0/10

Descontos:

- 0,2 Por não mencionarem a imagem no texto antes de ela aparecer;
- 0,5 Por não discutirem com relação a aproximações implementadas e também por omitirem alguns importantes detalhes;
- 0,1 Pelos problemas com as figuras;
- 0,2 Por não retomarem os resultados quantitativos do viscosímetro na conclusão;

RELATÓRIO Nº3 DE AULA PRÁTICA:

Hidrodinâmica

SÃO PAULO,
2025

ALICE ALVES BOZZI
BRUNA RODRIGUES DA SILVA
LUIZA LUCCHETTI ODDI LOURENÇO
SOFIA FIGUEIREDO FORTI

RELATÓRIO Nº3 DE AULA PRÁTICA:

Hidrodinâmica

Relatório referente à aula prática ministrada no dia 31/03/2024 na disciplina CCM0122 - Física II do Curso de Ciências Moleculares da Universidade de São Paulo, na modalidade de bacharelado, como requisito parcial avaliativo para aprovação semestral.

Orientador: Prof. Dr. Caetano Rodrigues Miranda

SÃO PAULO,
2025

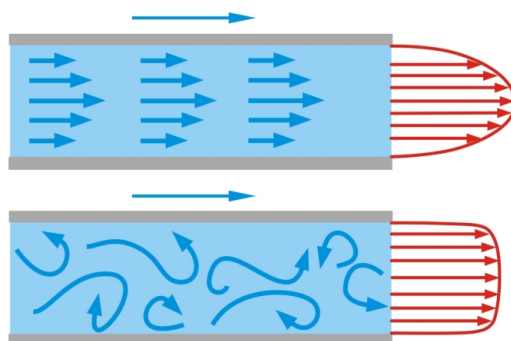
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	4
2	OBJETIVOS.....	5
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
	3.1. Viscosímetro de Stokes.....	5
	3.2. Planagem.....	6
	3.3. Diferentes fluidos em tubos.....	8
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
	4.1. Viscosímetro de Stokes.....	9
	4.2. Planagem.....	11
	4.3. Diferentes fluidos em tubos.....	13
5	CONCLUSÃO.....	13
	REFERÊNCIAS.....	14

1 INTRODUÇÃO

O movimento dos fluidos é uma área ampla e muito estudada até os dias de hoje. Descrever corretamente o movimento de um fluido pode ser uma tarefa complexa, e para esse propósito, foram elaborados diversos modelos teóricos, cada qual com um domínio de validade. Por exemplo, para fluidos em baixas velocidades, o regime de escoamento é o escoamento laminar, enquanto para fluidos em velocidades altas, passa a valer o escoamento turbulento; cada qual destes regimes é descrito por equações físicas simples, no caso do escoamento laminar, ou complexas, no escoamento turbulento.

Figura 1: Modelos de escoamento laminar (acima) e escoamento turbulento (abaixo).



Fonte: Google Imagens.

Os experimentos que serão apresentados se baseiam no movimento de fluidos, ou no movimento de objetos no meio de fluidos, o qual também pode ser descrito pelo escoamento laminar ou turbulento. No experimento da planagem, o fluido analisado foi o ar em movimento através da ação de um ventilador, e as características do movimento do ar foram evidenciadas pelo efeito que surtiram numa asa de isopor. No experimento dos tubos, foi analisado o movimento de uma bolinha caindo dentro de dois fluidos distintos, e a diferença no movimento descrito por ela é uma consequência das diferentes propriedades entre os fluidos. O experimento do Viscosímetro de Stokes, por sua vez, se baseia diretamente na Lei de Stokes.

A lei de Stokes refere-se à força de fricção experimentada por objectos esféricos que se movem no seio de um fluido viscoso, num regime de escoamento laminar de números de Reynolds de valores baixos; o qual é comum em velocidades baixas ou em fluidos muito viscosos. Tal força é dada pela equação:

$$F_{viscosa} = - 6\pi\eta r v \quad (1)$$

Essa força é uma consequência da tensão de cisalhamento no fluido, e sempre possui sentido oposto ao da velocidade do objeto, agindo em sentido contrário ao seu movimento. Na equação (1), η é a viscosidade do fluido, r é o raio do objeto esférico e v é a sua velocidade. A ação da $F_{viscosa}$ equilibra o peso da esfera, e faz com que atinja rapidamente uma velocidade terminal constante.

2 OBJETIVOS

Este relatório visa realizar uma análise quantitativa do viscosímetro de Stokes, determinando parâmetros fundamentais como o diâmetro interno do tubo, o tempo de queda de esferas em diferentes fluidos, os diâmetros das esferas utilizadas e a altura do tubo. Paralelamente, busca-se uma análise qualitativa do fenômeno de planagem, comparando o comportamento dos fluidos testados em termos de resistência viscosa e estabilidade do fluxo. Adicionalmente, objetiva-se comparar experimentalmente tubos fechados com esferas, estimando o tempo de descida e avaliando como a restrição ao fluxo influencia a dinâmica do sistema.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Viscosímetro de Stokes.

Para o experimento do viscosímetro utilizou-se os seguintes materiais:

- Viscosímetro de Stokes com funil para lançar as esferas, escala milimetrada, prumo e regulagem do prumo (Figura 2);
- Densímetro;
- Termômetro digital;
- Cronômetro;
- Paquímetro;
- Micrômetro;
- Esferas de aço com diâmetro variado.

Figura 2: Viscosímetro de Stokes.



Fonte: Slides de aula.

De início, mediu-se o diâmetro de 4 esferas utilizando micrômetro e 4 vezes o diâmetro interno do cilindro do viscosímetro utilizando paquímetro. Utilizando o densímetro e o termômetro digital também mediu-se a densidade e temperatura do fluido.

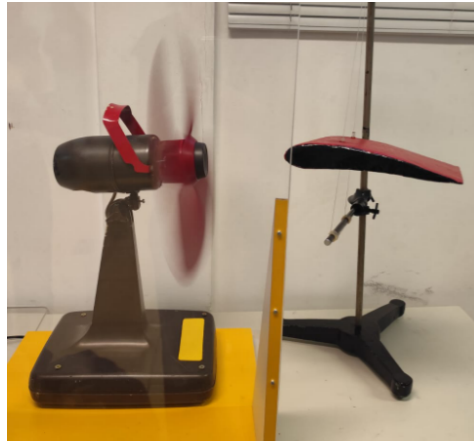
Após as medições, colocou-se uma a uma as esferas no densímetro e cronometrou-se o tempo de queda delas, utilizando o cronômetro.

Cada grupo fez todos esses procedimentos para esferas de um diâmetro específico, diferentes para cada um dos grupos.

3.2. Planagem

Uma asa foi posicionada diante de um ventilador de fluxo constante, como vê-se na Figura 3, fixada por quatro fios de nylon que restringiam movimentos rotacionais, mas permitiam deslocamento vertical. O ângulo de ataque foi mantido neutro, isolando o efeito do formato aerodinâmico. Ao acionar o ventilador, a asa elevou-se verticalmente, evidenciando a geração de sustentação. Os fios serviram apenas como guias, sem influenciar a dinâmica do sistema.

Figura 3: Asa de isopor presa em um suporte de metal com fios de nylon em frente a um ventilador.



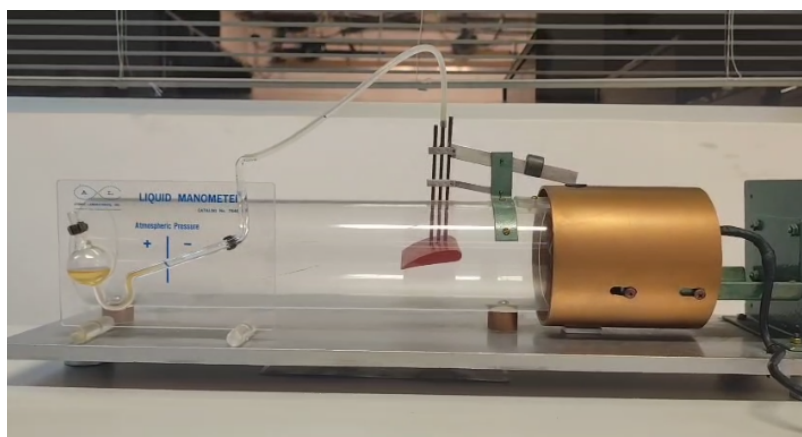
Fonte: Autores.

Uma segunda asa foi instalada em um túnel de vento improvisado (tubo transparente com ventilador acoplado), como na Figura 3. Três sensores de pressão foram conectados a pontos estratégicos:

- **P1:** Região frontal (onde o ar colide diretamente).
- **P2:** Superfície superior (curvatura acentuada).
- **P3:** Superfície inferior (geometria menos curvada).

Um manômetro de líquido registrou as diferenças de pressão entre os pontos durante o escoamento. A análise focou-se na relação entre curvatura do fluxo, gradientes de pressão e força resultante.

Figura 4: Asa com tubos de Pitot dentro de um túnel de vento.



Fonte: Autores.

3.3. Diferentes fluidos em tubos

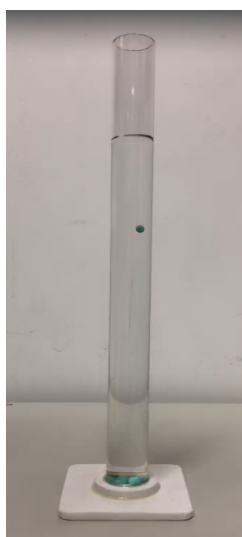
Para o experimento do viscosímetro utilizou-se dois tubos fechados, com diferentes fluidos, uma esfera e uma bolha de ar dentro (Figura 5), além de um tubo aberto com água e uma esfera para colocar dentro (Figura 6).

Figura 5: Tubos fechados.



Fonte: Autores.

Figura 6: Tubo aberto.



Fonte: Autores.

Por meio de vídeos gravados pelos celulares dos integrantes do grupo, estimou-se o tempo de queda das esferas nos diferentes fluidos e, assim, pode-se comparar os diferentes fluidos e suas propriedades.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Viscosímetro de Stokes.

Das medições, os seguintes resultados foram obtidos para cada grupo (Tabela 1):

Tabela 1: Dados do experimento do Viscosímetro de Stokes.

	MICAEL	LARISSA	GIOVANA	JOSÉ	LUIZA	JOAQUIM	
TEMPERATURA	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	24,6	25,1
DENSIDADE	0,88	0,879	0,88	0,883	0,88	??	0,880 4
d1 (mm)	3,252	2,752	3,948	5,494	4,754	1,998	
d2	3,167	2,768	3,959	5,497	4,753	1,991	
d3	3,184	2,765	3,958	5,5	4,754	1,983	
d4	3,186	2,768	3,934	5,496	4,754	1,991	
dMED	3,19725	2,76325	3,94975	5,49675	4,75375	1,99075	
rMED ²	2,555601891	1,9088876 41	3,90013126 6	7,5535651 41	5,649534766	0,99077139 1	
t1	3,34	4,32	2,28	1,41	1,66	8,19	
t2	3,56	4,34	2,42	1,34	1,78	8,4	
t3	3,66	4,38	2,53	1,4	1,72	8,31	
t4	3,35	4,4	2,31	1,5	1,78	4,44	
TMED	3,4775	4,36	2,385	1,4125	1,735	7,335	
D1 (mm)	4,7	4,88	4,86	4,844	4,8	4,932	
D2	??	4,899	4,84	4,944	4,9	4,84	
D3	??	4,864	4,88	4,84	4,903	4,842	
D4	??	4,864	4,94	??	4,878	4,936	
DMED	4,7	4,87675	4,88	4,876	4,87025	4,8875	
H	30	30	30	30	30	30	30
VMED							

Fonte: Elaborado pelo monitor da disciplina, Pedro.

Quando uma esfera de raio r e densidade ρ_{esf} cai em um fluido de densidade ρ_{fluido} , ela sofre ação de três forças principais: a força peso P , que é responsável pela queda da esfera, o empuxo E e a $F_{viscosa}$, ambas agem em direção oposta ao movimento da esfera.

$$P = m_{esf} \cdot g = \rho_{esf} \cdot V_{esf} \cdot g$$

$$E = \rho_{fluido} \cdot V_{esf} \cdot g$$

$$F_{viscosa} = -6\pi\eta r v$$

A força resultante é dada pela soma vetorial destas 3 forças:

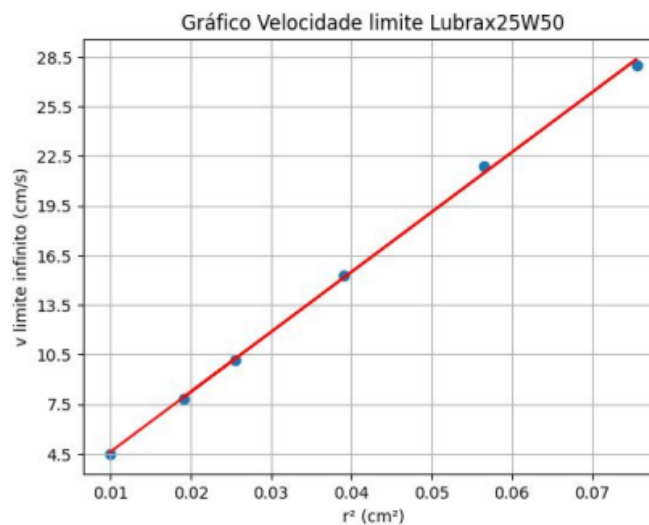
$$\overline{F}_R = m_{esf} \overline{a} = P + E + F_{viscosa}$$

Quando a força resultante sobre a esfera for igual a zero, consequentemente, a aceleração do movimento também será zero, e isso indica que a velocidade atinge seu valor limite, a partir do qual não irá mais variar. Igualando $\overline{a} = 0$ na equação X, e fazendo uma série de manipulações algébricas, obtemos a expressão para a velocidade limite:

$$V_{limite} = \frac{2g}{9\eta} (\rho_{esf} - \rho_{fluido}) r^2 \quad (2)$$

A figura 7 é um gráfico ajustado com os dados obtidos experimentalmente para a velocidade limite em função do raio ao quadrado das esferas. O ajuste feito foi um ajuste linear do tipo $y = ax + b$, onde $y = v_{limite}$ e $x = r^2$. Assim, considerando a equação usada no ajuste, teremos que o coeficiente linear $a = \frac{2g}{9\eta} (\rho_{esf} - \rho_{fluido})$.

Figura 7: Gráfico da velocidade limite.



Fonte: Elaborado pelo monitor da disciplina, Pedro.

Caso tanto ρ_{esf} quando ρ_{fluido} sejam conhecidos, é possível obter a viscosidade do fluido η , uma vez que o ajuste gráfico forneceu o valor de a . Substituindo estes valores, obtém-se o resultado $\eta = 476 \pm 35$ cSt (centistokes). O valor de referência fornecido para a viscosidade, em condições de temperatura ambiente, é $\eta_{ref} = 438$ cSt.

Para constatar a validade do ajuste realizado, vamos usar o teste Z para comparar η e η_{ref} :

$$Z = \frac{\eta - \eta_{ref}}{\sqrt{\sigma^2}} = \frac{38}{35} = 1,09$$

Como o resultado do teste Z foi menor do que 3, isto indica que o η é compatível com o valor de referência dentro do intervalo de incerteza considerado.

4.2. Planagem

Pela terceira Lei de Newton, sabemos que $F = ma$. Na situação em análise, como estamos lidando com curvaturas percorridas pelo fluxo de ar, a aceleração em questão é centrípeta, $a = \frac{v^2}{R}$. Logo, $F = m \frac{v^2}{R}$, onde v é a velocidade do ar e R o raio da curvatura da trajetória. Para um fluido não viscoso e incompressível em regime estacionário, a equação de Euler descreve o gradiente entre pressão em relação a aceleração e densidade:

$$\rho \left(\frac{dv}{dt} \right) = - \nabla p$$

Onde ρ é a densidade do fluido.

Em escoamentos curvos, a aceleração centrípeta é dada por: $\frac{dv}{dt} = \left(\frac{v^2}{R} \right) n$, onde n é o versor apontado para o centro da curvatura;

Assim, substituindo na equação, obtemos:

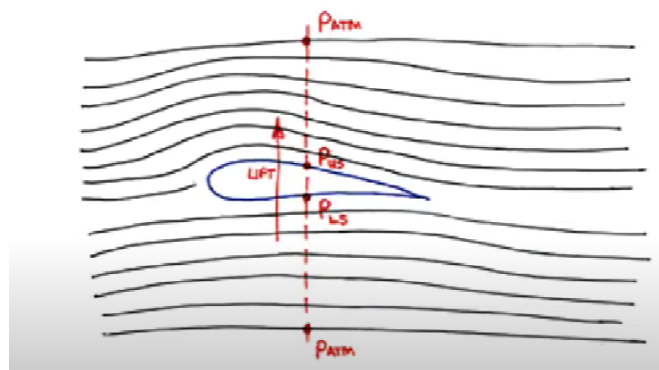
$$\nabla p = - \rho \left(\frac{v^2}{R} \right) n$$

Percebe-se que o ar segue uma trajetória curva, gerando um gradiente de pressão negativo, ou seja, o gradiente de pressão aponta no sentido oposto ao centro da curvatura. Isso implica que a

pressão junto à superfície (região interna da curva) é reduzida em comparação com a externa à curva.

No caso da asa do avião, duas curvaturas diferentes estão presentes, uma com centro acima e outra com centro abaixo da asa, como na Figura 8. Desse modo, a pressão acima da asa (P_{US}) é menor que a atmosférica (P_{ATM}) pois está na borda da curva, e a pressão abaixo da asa (P_{LS}) é maior que a atmosférica pois está perto do centro da curvatura, levando à conclusão que a pressão na superfície da asa é maior do que na parte inferior. A diferença de pressão entre as superfícies cria uma força resultante para cima, fazendo com que a asa se sustente no ar (Lift). Essa discussão se aplica tanto ao ventilador quanto ao tubo, sendo exatamente o que está acontecendo neles, adicionalmente a alguns detalhes específicos do segundo experimento. A interpretação tradicional da sustentação da asa, fundamentada na Lei de Bernoulli, afirma que a pressão reduzida acima dela é resultado de uma velocidade do ar superior. No entanto, essa distribuição de velocidades é um efeito do campo de pressões, e não sua origem. A trajetória do fluido é determinada pelo campo de forças, e ele só consegue seguir uma curva se existir um gradiente de pressão apropriado para tal.

Figura 8: Linhas de escoamento em torno da asa de um avião.



Fonte: [Youtube](#)

Os resultados do segundo experimento confirmaram a teoria apresentada e evidenciaram a relação entre a curvatura do escoamento, os gradientes de pressão e a geração de sustentação. As medições dos tubos de pressão conectados à asa revelaram:

Ponto de Estagnação (P1): Pressão máxima, correspondendo à região frontal onde o ar colide e sua velocidade se aproxima de zero.

Superfície Superior (P2): Pressão mínima, associada à curvatura acentuada do fluxo acima da asa.

Superfície Inferior (P3): Pressão intermediária, próxima à pressão atmosférica, devido à menor curvatura do fluxo abaixo da asa.

4.3. Diferentes fluidos em tubos

Tempo de queda da esfera no tubo fechado 1: 3,27 s para passar por dois intervalos e, como o tubo tem 13 marcações, para passar por elas é necessário aproximadamente 19,62 s, contando que a primeira inicia o cronômetro e a última interrompe a contagem.

Tempo de queda da esfera no tubo fechado 2: 13,52 para passar por uma marcação e como o tubo tem 13 marcações, para passar por elas é necessário aproximadamente 162,24 s, contando que a primeira inicia o cronômetro e a última o para.

Sabendo que, segundo a Lei de Stokes, a força de resistência viscosa age sobre uma esfera em queda em um fluido de regime laminar (equação (1)) e que no equilíbrio de forças, a esfera atinge uma velocidade terminal proporcional à diferença de densidade entre a esfera e o fluido, ao quadrado do raio da esfera e inversamente proporcional à viscosidade do fluido (equação (2)), isto é, a velocidade terminal de uma esfera em queda livre em um fluido viscoso é inversamente proporcional à viscosidade do fluido, podemos concluir que o fluido presente no tubo 1 possui uma viscosidade consideravelmente menor do que o do tubo 2. Como a água é um fluido amplamente conhecido por sua viscosidade muito pequena em comparação com outros líquidos como óleos ou glicerina, concluímos que o fluido 1 é, possivelmente, água.

5 CONCLUSÃO

Os experimentos realizados proporcionaram uma valiosa oportunidade para observar na prática os princípios teóricos estudados em dinâmica dos fluidos. Através da análise comparativa entre diferentes configurações experimentais, foi possível compreender como as propriedades dos fluidos influenciam o comportamento dos sistemas físicos.

No estudo do viscosímetro de Stokes, com as diversas medições do diâmetro interno do tubo, tempo de queda das esferas e seus diâmetros, e altura do tubo foi possível analisar o movimento de esferas em queda livre sob a ação da gravidade, do empuxo e da força viscosa, relacionando-as à velocidade terminal das esferas, por meio da Lei de Stokes. Os resultados fornecidos comparados com o valor de referência indicaram compatibilidade entre os valores, validando a metodologia experimental.

O experimento da planagem comprovou a relação direta entre a curvatura aerodinâmica, os gradientes de pressão e a geração de sustentação. Também demonstrou que a distribuição assimétrica de pressões superior e inferior, resulta na força de sustentação observada, validando os princípios da dinâmica de fluidos estudados.

Já os experimentos com tubos fechados e abertos destacaram novamente a validade da lei de Stokes, que diz sobre a força de atrito em esferas que se movem em fluido viscoso - num regime laminar - e é proporcional a densidade do fluido.

A realização destes experimentos não apenas reforçou o entendimento dos princípios físicos fundamentais, mas também desenvolveu habilidades importantes na análise crítica de dados e na compreensão dos modelos teóricos.

REFERÊNCIAS

NUSSENZVEIG, Moysés. Curso de Física Básica 2: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2012.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. Física 2: termodinâmica e ondas. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2016.

UNIVESP. Lei de Stokes - Experimento. YouTube, 19 jan. 2018. 3 min 34 s. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=QY2pS-xXC_U>. Acesso em: 11 abr. 2025.

WELTNER, Klaus; INGELMAN-SUNDBERG, Martin; ESPERIDIÃO, Antonio Sergio; MIRANDA, Paulo. A dinâmica dos fluidos complementada e a sustentação da asa. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 23, n. 4, p. 430–441, dez. 2001. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/FCv7M5JNVv6yVJjSr3CPKtS/?lang=pt>>. Acesso em: 11 abr. 2025.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). Bernoulli's Principle (K–4). [S.l.]: NASA, 2017. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/bernoullis-principle-k-4-02-09-17-508.pdf>>. Acesso em: 11 abr. 2025.