Giovanna Fleming - n°USP: 11321364 e Lucas Tessarotto Roque - n°USP: 11298302

7,2

Experimento 6: Viscosidade

Universidade de São Paulo

Julho - 2020

1. Resumo

indice

O experimento tem como objetivo determinar a viscosidade de um fluido em um tubo por meio do cálculo da velocidade limite (Método de Stokes) de oito esferas de mesmo material e de diâmetros diferentes. As esferas percorrem um caminho de 65 cm no fluido e o tempo dessa queda foi ~~por um~~ cronometrada por um cronômetro de celular. A princípio, nos cálculos feitos, não foi considerada a influência das paredes do tubo e foi visto que, quando os diâmetros das esferas crescem, o gráfico de velocidade por raio ao quadrado deixa de ser linear. Para corrigir esse problema, foi feita a correção de Landenburg, para fazer considerar o recipiente infinito. Foi notado, no final do experimento, que por mais que a correção leva em conta o efeito das paredes na queda do corpo esférico, ela não foi o suficiente para obter exatamente o valor real do coeficiente de viscosidade.

2. Introdução ~~Teórica~~

introdução pode conter teoria, mas deve ter justificativa e objetivos...

Fluidos são substâncias, gasosos ou líquidos, capazes de se moldar de acordo com o recipiente que os contêm, devido à ligação de suas moléculas não serem muito rígidas por conta de seu estado. Além disso, os fluidos são todos compressíveis, o que diferencia é o grau de compressibilidade, por exemplo, os líquidos são pouco compressíveis, logo, podem ser tratados como incompressíveis em alguns casos.

Quanto às velocidades, quando essas são pequenas, o escoamento de um fluido pode ser descrito como um deslizamento de camadas, esse escoamento é chamado de *escoamento laminar*. No entanto, em altas velocidades, essas camadas tendem a se desfazer, e o movimento do fluido fica complexo, é o caso do *escoamento turbulento*.

Uma característica importante dos fluidos é a sua *viscosidade*, que é a sua resistência ao movimento do fluido, ou seja, dificulta o escoamento. A viscosidade depende da temperatura, por exemplo, para os líquidos, quanto maior a temperatura, menor a viscosidade. Além disso, em um escoamento laminar, a viscosidade pode ser encontrada a partir da força necessária para manter duas camadas próximas em movimento com velocidade constante. A unidade da viscosidade no Sistema Internacional (S.I.) é N·s/m² (Pa.s = pascal vezes segundo), contudo, é bastante usado também, o poise (1 P = 1 g/cm·s).

Ao observar um corpo submerso em um fluido, pode-se notar que existe uma força presente para cima, que é devido à diferença de pressão entre as bases do objeto por causa da profundidade. Essa força é chamada de empuxo.

Com a Lei de Stokes, é possível descrever o movimento de um objeto esférico submerso em um fluido, em escoamento laminar.

A força de atrito, devido à viscosidade do fluido é dado por:

$$\vec{F_a} = -6\,\pi\,\eta\,r\,\vec{v} \tag{1}$$

onde r é o raio do corpo esférico, η é a viscosidade do fluido e v é a velocidade da esfera. Além disso, o sinal negativo se deve ao fato da força ser contrária a velocidade.

Quando a força de atrito, em um meio viscoso, segue a lei de stokes, é possível usar a ideia de força resultante, e, com isso, é possível escrever a equação de movimento de um corpo esférico em um meio viscoso. Logo, temos:

$$m\frac{dv}{dt} = mg - F_e - F_a = m^* g - bv \tag{2}$$

onde b é o coeficiente de proporcionalidade da força de atrito viscoso e m^* é massa aparente.

$$m^* = V(\rho_c - \rho_m) \tag{3}$$

V é o volume do corpo, ρ_c é a densidade do corpo e ρ_m é a densidade do meio.

Com a expressão 2, é possível escrever como uma equação diferencial. Contudo, a equação (4) é uma equação diferencial não homogênea, logo, é possível escrever a sua solução como a resolução da equação homogênea mais a solução particular.

$$m\frac{dv}{dt} + bv = m^* g \tag{4}$$

A solução particular é dada por:

$$v\,(t) = v_\infty = \frac{m^* g}{b} \tag{5}$$

A solução da equação homogênea é:

$$v = v_0 e^{-\frac{bt}{m}} \tag{6}$$

Logo, já que o resultado da expressão 4 é a soma da solução particular (5) com a solução da equação homogênea (6), temos que:

$$v = v_0 e^{-\frac{bt}{m}} + \frac{m^* g}{b} \tag{7}$$

Da condição v (0)=0, temos:

$$v_0 = \frac{-m^* g}{b} \tag{8}$$

Substituindo (8) em (7), tem-se que:

$$v = \frac{m^* g}{b}(1 - e^{-\frac{bt}{m}}) \tag{9}$$

Contudo, se considerado tempos muito grandes, como $t \to \infty$, tem-se a expressão final, que é dada por:

$$v_\infty = \frac{m^* g}{b} \tag{10}$$

Colocando a expressão (3) na equação (10) e sabendo que $b = 6\pi\eta r$, e lembrando que o volume de um corpo esférico é dado por $V = \frac{4\Pi r^3}{3}$, tem-se que, isolando a viscosidade:

$$\eta = \frac{2}{9}(\rho_c - \rho_m)\frac{r^2 g}{v_\infty} \tag{11}$$

Contudo, é necessário fazer uma correção na equação (1), já que, a equação de força de atrito viscoso, não leva em consideração a influência das paredes do tubo durante o movimento. Logo, tem-se que a força de atrito é:

$$F_{a\,r} = (1 + C)F_a \tag{12}$$

Sendo C um fator correção da fórmula, pode-se escrever C como:

$$C = \propto \frac{r}{R} + (\propto \frac{r}{R})^2 \tag{13}$$

onde R é o raio do tubo, r o raio da esfera e α é uma constante que foi considerada no valor de, aproximadamente, 2,4.

Uma velocidade que faz com que a força peso menos a força de empuxo, seja igual a força de atrito, é a velocidade limite. Já que a força de atrito em um meio viscoso (expressão 1) depende da velocidade, tem-se que a correção do atrito também está na expressão da velocidade limite, logo, a equação da velocidade limite é dada por:

$$v_{limite} = \frac{v_\infty}{(1+C)} \tag{14}$$

onde v_{limite} a velocidade real da esfera dentro do tubo e v_∞ é o parâmetro sem correção usados na fórmula (11).

Objetivos?

3. Descrição Experimental

O experimento foi realizado por uma animação virtual, onde foram encontrados dez conjuntos de dados, nos quais, foram escolhidos apenas dois conjuntos para tirar a medida. O critério para a escolha dos conjuntos foi o final do número USP de cada aluno. Logo, o aluno 1 analisou o conjunto 4, cuja a temperatura era de 26 ± 0,1 °C, e o aluno 2, o conjunto 2, com a temperatura de 27,9 ± 0,1°C.

Imagem 1: interface do site usado no experimento.

grupo de

Cada conjunto possui oito esferas, de mesmo material, porém, de tamanhos diferentes e com densidade de 7,85 ± 0,001 g/cm^3. Para medir o diâmetro de cada esfera, foram feitas quatro medidas para cada tamanho com ajuda de uma micrômetro. Após feita a medida do diâmetro de cada esfera, foi calculado o tempo de queda, com ajuda de um cronômetro de celular, em um fluido de densidade 0,883 ± 0,001 g/cm^3 e viscosidade η, num tubo com diâmetro de 50,32 ± 0,07 cm. Para isso, foram cronometradas cinco vezes o tempo de queda para cada esfera. A distância percorrida pela esfera foi de 65 ± 0,2 cm.

Após todas as tomadas de medidas, foi possível calcular a viscosidade η do fluido e corrigir alguns parâmetros que afetam a medida, porém tinham sido desprezados, como o raio do tubo e a temperatura ambiente, considerada como 25°C.

hipóteses assumidas para os cuidados no experimento?

incertezas fornecidas ou avaliadas?

Imagem 2: os oitos grupos de esferas, sendo que, cada grupo, continha quatro esferas para medir o diâmetro.

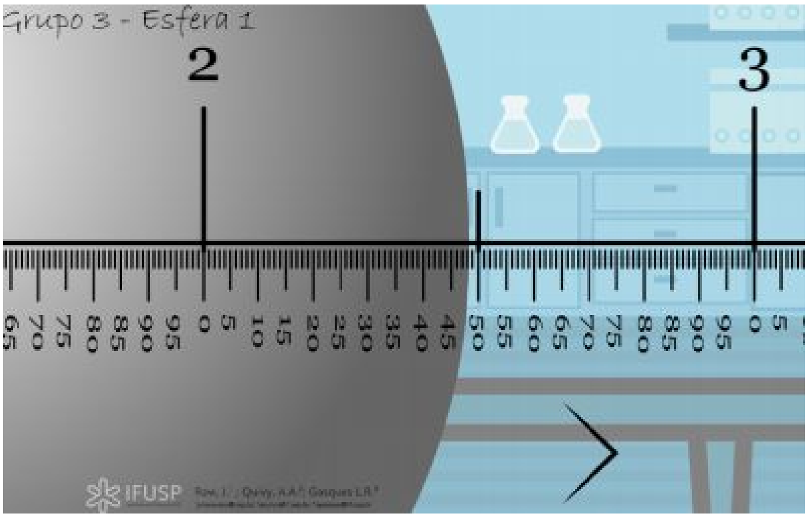


Imagem 3: régua digital usada para medir o diâmetro.

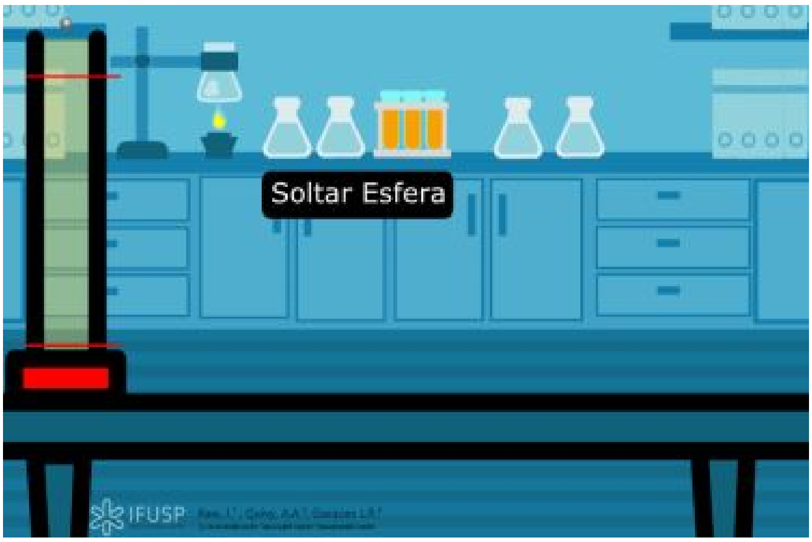


Imagem 4: simulação da esfera caindo no fluido, utilizada para cronometrar o tempo de queda. As marcações vermelhas no tubo, foram a distância percorrida.

4. Dados obtidos e análise de dados

	Temp (°C)	Dens óleo (g/cm³)	Dens esfera (g/cm³)	Dist (cm)	Raio cil (cm)	g (cm/s²)	Inc Mic (cm)	Inc cron (s)
Aluno 1	26 ± 0,1	0,883 ± 0,001	7,85 ± 0,001	65 ± 0,2	2,516 ± 0,007	978,64 ± 0,01	0,0005	0,1
Aluno 2	27,9 ± 0,1							

Tabela 1. Dados fornecidos sobre o experimento e as temperaturas para cada aluno.

Nas tabelas a seguir, será mostrado os dados e cálculos feitos sem correções para o aluno 1, e o aluno 2 e do grupo. Para o cálculo do diâmetro médio e do tempo médio, nas tabelas 2 e 4, foi feita a média aritmética dos valores do diâmetro e do tempo cronometrado. Além disso, para o cálculo da incerteza final do diâmetro e do tempo de queda, foram usadas as fórmulas (15) e (16), respectivamente.

$$\sigma_{Dm} = \sqrt{\left(\frac{Dp}{\sqrt{n}}\right)^2 + (\text{Inc Mic})^2} \qquad (15)$$

$$\sigma_{Tm} = \sqrt{\left(\frac{Dp}{\sqrt{n}}\right)^2 + (\text{Inc Cron})^2} \qquad (16)$$

Nas tabelas 3 e 5, no cálculo de r^2, foi feito o diâmetro dividido por 2, e, após isso, elevado ao quadrado. Para velocidade, foi feito a distância percorrida, 65 cm, dividida pelo tempo médio de cada aluno, para cada esfera. Para o cálculo de η foi utilizada a expressão (11). Além disso, para o cálculo da incerteza de r^2, v e η, foram utilizadas as equações (17), (18) e (19), respectivamente.

$$\sigma_{R^2} = R^2 . \sqrt{2.\left(\frac{\sigma_{Dm}}{\frac{Dm}{2}}\right)^2} \qquad (17)$$

$$\sigma_v = V . \sqrt{\left(\frac{\sigma_{Dm}}{Dm}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{Tm}}{Tm}\right)^2} \qquad (18)$$

$$\sigma_\eta = \eta \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\rho liq}}{\rho_{liq}}\right)^2 + \left(\frac{0{,}01}{g}\right)^2 + \left(\frac{2\sigma_{R^2}}{R^2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2} \qquad (19)$$

	Aluno 1							
	Esfera 1	**Esfera 2**	**Esfera 3**	**Esfera 4**	**Esfera 5**	**Esfera 6**	**Esfera 7**	**Esfera 8**
	Diâmetro (cm)							
d1	0,1503	0,1952	0,2491	0,3179	0,3988	0,4755	0,55	0,6344
d2	0,1517	0,2009	0,2482	0,3191	0,3951	0,4759	0,5506	0,6339
d3	0,1477	0,1971	0,2495	0,3122	0,3968	0,477	0,5489	0,6352
d4	0,15	0,199	0,2509	0,3167	0,3959	0,4748	0,5509	0,6361
Diam médio	0,15	0,198	0,249	0,316	0,397	0,476	0,55	0,635
Desvio padrão	0,002	0,002	0,001	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001
Incerteza final	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
	Tempo de queda (s)							
t1	17,76	10,65	7,13	4,59	3,22	2,55	2,15	1,64
t2	17,74	10,69	7,06	4,65	3,21	2,42	2,11	1,58
t3	17,8	10,61	7,07	4,71	3,25	2,49	2,16	1,57
t4	17,86	10,6	7,08	4,65	3,27	2,48	2,12	1,57
t5	17,75	10,61	7,08	4,72	3,22	2,48	2,1	1,57
Tempo médio	17,8	10,6	7,1	4,7	3,2	2,5	2,1	1,6
Desvio padrão	0,04	0,03	0,02	0,05	0,02	0,04	0,02	0,03
Incerteza final	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabela 2. Dados sobre as medições dos diâmetros e do tempo de queda das esferas do aluno 1.

Raio^2 (cm)	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,1
σ (cm)	0,0003	0,0005	0,0003	0,0009	0,0007	0,0005	0,0006	0,0007
Veloc (cm/s)	3,66	6,11	9,18	13,94	20,1	26,17	30,55	40,98
σ (cm/s)	0,03	0,06	0,14	0,33	0,64	1,14	1,48	2,68
eta (cgs)	2,33	2,43	2,57	2,72	2,97	3,28	3,75	3,73
σ (cgs)	0,22	0,25	0,11	0,22	0,14	0,15	0,19	0,25

escrever com maior precisão

Tabela 3. Valores obtidos de raio ao quadrado, velocidade e viscosidade, além de suas incertezas do aluno 1.

1 sig...

	Aluno 2							
	Esfera 1	**Esfera 2**	**Esfera 3**	**Esfera 4**	**Esfera 5**	**Esfera 6**	**Esfera 7**	**Esfera 8**
	Diâmetro (cm)							
d1	0,1491	0,1985	0,2482	0,3171	0,3943	0,4759	0,5495	0,6355
d2	0,1505	0,2008	0,2495	0,316	0,3962	0,477	0,549	0,6339
d3	0,1559	0,1998	0,25	0,3182	0,3959	0,4764	0,5501	0,6361
d4	0,1512	0,1991	0,2489	0,3178	0,3962	0,475	0,551	0,6341
Diam médio	0,152	0,2	0,249	0,317	0,396	0,476	0,55	0,635
Desvio padrão	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Incerteza final	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	Tempo de queda (s)							
t1	17,35	10,39	6,73	4,59	3,28	2,65	2,09	1,77
t2	17,35	10,4	6,7	4,64	3,26	2,48	2,1	1,72
t3	17,39	10,51	6,81	4,53	3,21	2,49	2,1	1,7
t4	17,15	10,42	6,79	4,51	3,21	2,48	2,09	1,65
t5	17,4	10,45	6,8	4,51	3,2	2,42	2,09	1,71
Tempo médio	17,3	10,4	6,8	4,6	3,2	2,5	2,1	1,7
Desvio padrão	0,09	0,04	0,04	0,05	0,03	0,08	0,005	0,04
Incerteza final	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabela 4: Dados sobre as medições dos diâmetros e do tempo de queda das esferas do aluno 2.

Raio^2 (cm)	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,1
σ (cm)	0,0005	0,0002	0,0002	0,0003	0,0004	0,0005	0,0005	0,0008
Veloc (cm/s)	3,75	6,23	9,61	14,27	20,11	25,96	31,04	38,01
σ (cm/s)	0,03	0,07	0,16	0,35	0,66	1,31	1,49	2,38
eta (cgs)	2,32	2,42	2,45	2,67	2,95	3,31	3,69	4,02
σ (cgs)	0,37	0,11	0,08	0,1	0,11	0,18	0,18	0,26

Tabela 5: Valores obtidos de raio ao quadrado, velocidade e viscosidade, além de suas incertezas do aluno 2.

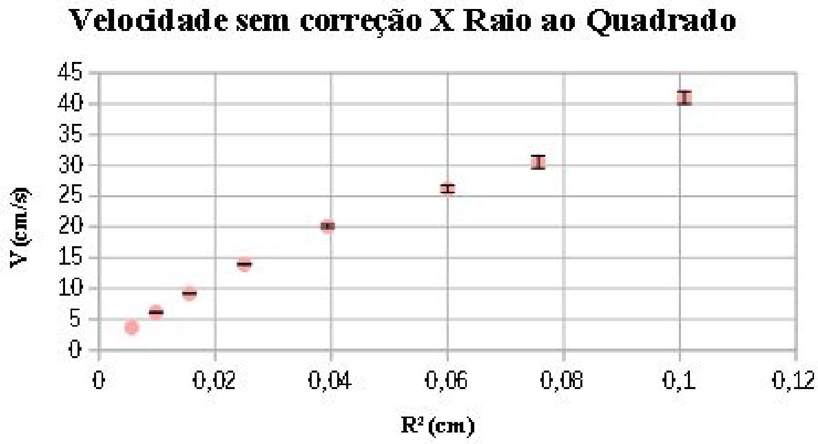
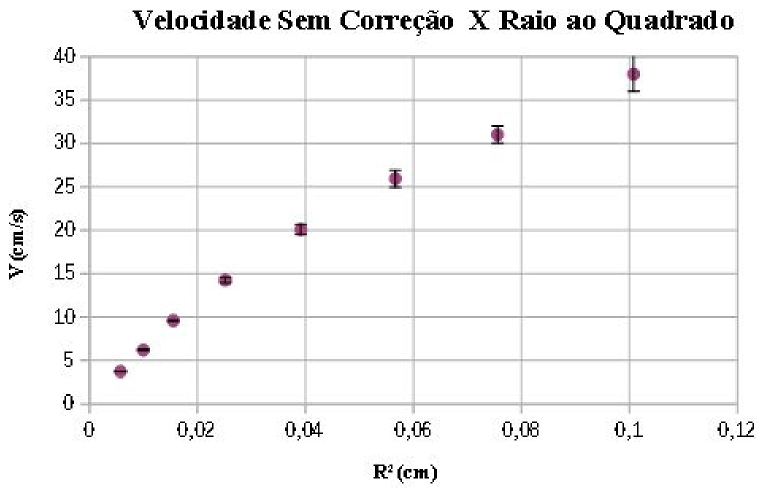


Gráfico 1. Velocidade sem correção em função do raio ao quadrado do Aluno 1, com base na tabela 3.



bastava um gráfico com os três conjuntos de dados

Gráfico 2. Velocidade sem correção em função do raio ao quadrado do Aluno 2, com base na tabela 5.

Para minimizar a incerteza estatística, foi feita a análise de dados do grupo (tabela 6), ou seja, dos aluno 1 e aluno 2 juntos. Para o diâmetro médio, foi feito a média aritmética dos diâmetros obtidos para cada esfera, de cada aluno - o mesmo procedimento foi feito para o tempo médio e para o r^2. Além disso, para suas incertezas, foram usadas as expressões (15), (16) e (20) respectivamente.

era para considerar um unico conjunto de dados 9 a soma dos dois...

$$\sigma_{Rg^2} = \frac{Dm_g \, . \, \sigma_{Dm_g}}{2} \qquad (20)$$

Para o cálculo da velocidade, foi feito a distância de 65 cm, dividido pelo tempo médio do grupo e para sua incerteza, foi usada a equação (21). Para obter η, foi usado a expressão (22), e para sua incerteza, a fórmula (23).

$$\sigma_{V_g} = V_g \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{Dm_g}}{Dm_g}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{Tm_g}}{Tm_g}\right)^2} \tag{21}$$

$$\eta_g = \frac{2.R_g^2.g.(\rho_{cor} - \rho_{liq})}{9.V_g} \tag{22}$$

$$\sigma_{\eta_g} = \eta_g \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\rho_{liq}}}{\rho_{liq}}\right)^2 + \left(\frac{0,01}{g}\right)^2 + \left(\frac{2\sigma_{R_g^2}}{R_g^2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{V_g}}{V_g}\right)^2} \tag{23}$$

	Grupo							
Diam Médio	0,15	0,20	0,25	0,32	0,40	0,48	0,55	0,63
Desvio padrão	0,002	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
Incerteza final	0,0010	0,0008	0,0006	0,0009	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006
Tempo médio	17,56	10,53	6,93	4,61	3,23	2,49	2,11	1,65
Desvio padrão	0,25	0,11	0,17	0,08	0,03	0,07	0,03	0,07
Incerteza final	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Raio^2 (cm)	0,00569	0,00988	0,01554	0,0251	0,0392	0,0566	0,0756	0,1008
σ (cm)	0,00007	0,00008	0,00007	0,00014	0,00014	0,00014	0,00016	0,00019
Veloc (cm/s)	3,70	6,17	9,4	14,1	20,1	26	31	39
σ (cm/s)	0,04	0,09	0,2	0,4	0,9	1	2	3
eta (cgs)	2,33	2,43	2,51	2,70	3,0	3,3	3,7	3,9
σ (cgs)	0,06	0,05	0,06	0,09	0,1	0,2	0,3	0,3

Tabela 6. Dados do grupo.

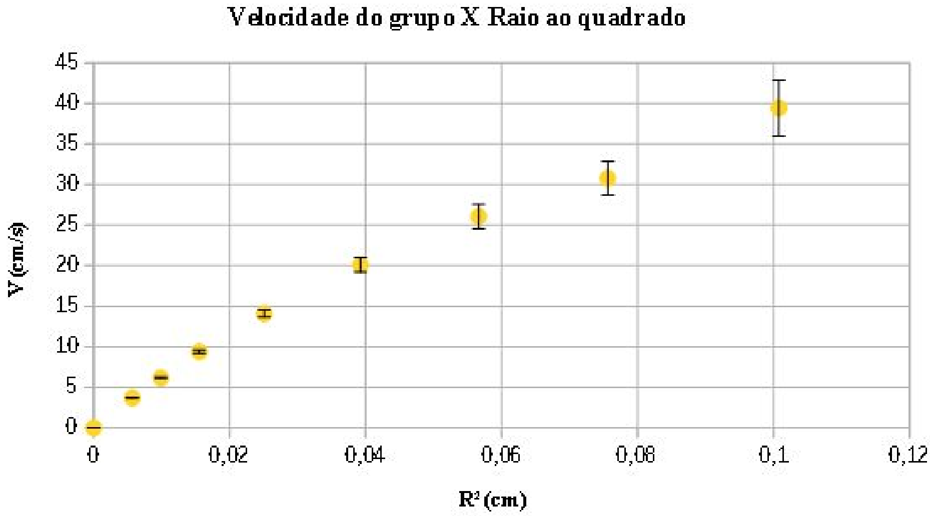


Gráfico 3: Velocidade do grupo em função do raio ao quadrado.

Depois disso, foi observado que a viscosidade do fluido não é constante. Logo, foi necessário fazer a correção do resultado, ou seja, foi levado em consideração a parede do tubo. Para isso, foram usadas as equações (11), (13) e (14).

	Aluno 1							
Fator C	0,08	0,10	0,13	0,17	0,22	0,28	0,33	0,39
Vel cor (cm/s)	3,94	6,75	10,4	16,4	24,6	33,5	41	57
σ (cm/s)	0,02	0,06	0,1	0,3	0,5	0,8	1	2
eta cor (cgs)	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4	2,6	2,8	2,7
σ (cgs)	0,1	0,1	0,06	0,1	0,09	0,11	0,1	0,2

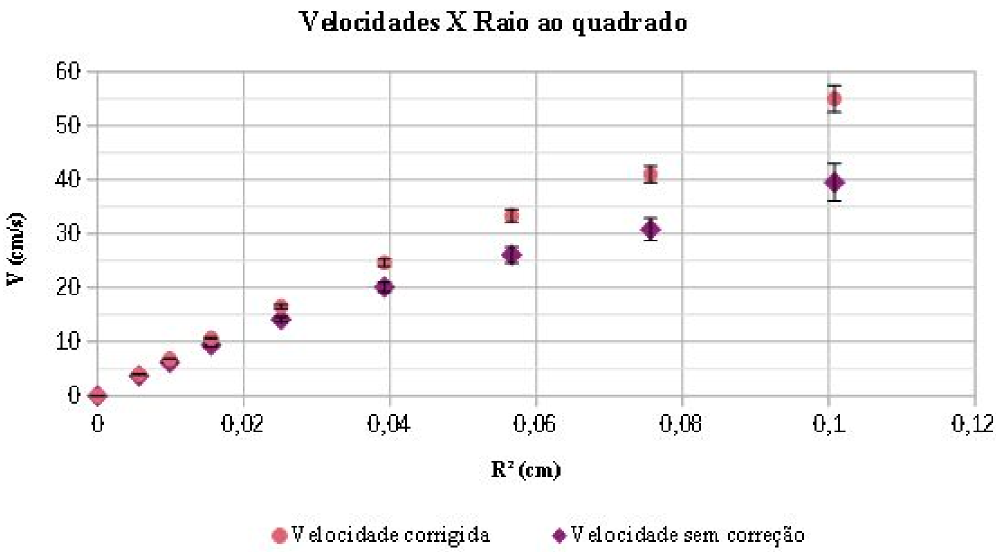
	Aluno 2							
Fator C	0,08	0,10	0,13	0,17	0,22	0,28	0,33	0,39
Vel cor (cm/s)	4,04	6,88	10,88	16,75	24,62	33,19	41,32	53,01
σ (cm/s)	0,02	0,06	0,13	0,28	0,52	0,86	1,12	1,62
η cor (cgs)	2,2	2,2	2,2	2,3	2,4	2,6	2,8	2,9
σ (cgs)	0,2	0,06	0,05	0,06	0,07	0,1	0,1	0,1

Tabela 7. Para o cálculo do fator C, da velocidade e do η , foram usadas, respectivamente, as expressões (13), (14) e (11).

Visando diminuir a incerteza estatística, foi feita uma análise do grupo.

	Grupo							
Fator C	0,08	0,10	0,13	0,17	0,22	0,28	0,33	0,39
Vel cor (cm/s)	3,99	6,81	10,63	16,55	24,62	33	41	55
σ (cm/s)	0,03	0,08	0,2	0,4	0,7	1	2	2
eta cor (cgs)	2,01	1,99	1,95	1,96	1,97	2,0	2,1	2,0
σ (cgs)	0,06	0,04	0,05	0,07	0,09	0,1	0,1	0,2

Tabela 8. Para o cálculo do Fator C e de eta, foi feita a média aritmética entre o Aluno 1 e o Aluno 2. Além disso, foi usada a expressão 14 para calcular a velocidade do grupo.



para quem? aluno 1?

Gráfico 4. Comparação entre a velocidade corrigida e sem correção.

Para verificar o valor da viscosidade para os dois alunos, foi necessário fazer uma normalização para a mesma temperatura, 25 °C. Pelo gráfico 3, disponibilizado pelo professor da disciplina, foi visto que a viscosidade, para essa temperatura, é de 2,85 stokes. Logo, para o cálculo no novo fator de correção Ct, foi utilizada a expressão (24).

$$C_t = \frac{\eta_{(t\ ref)}}{\eta_{(t\ medida)}} \qquad (24)$$

Ao multiplicar a equação (24) por (11), é obtido o valor de η normalizado para cada aluno. A incerteza foi determinada por (25).

$$\sigma_{\eta_{Ct}} = \frac{C_t}{\sigma_{\eta_C}} \qquad (25)$$

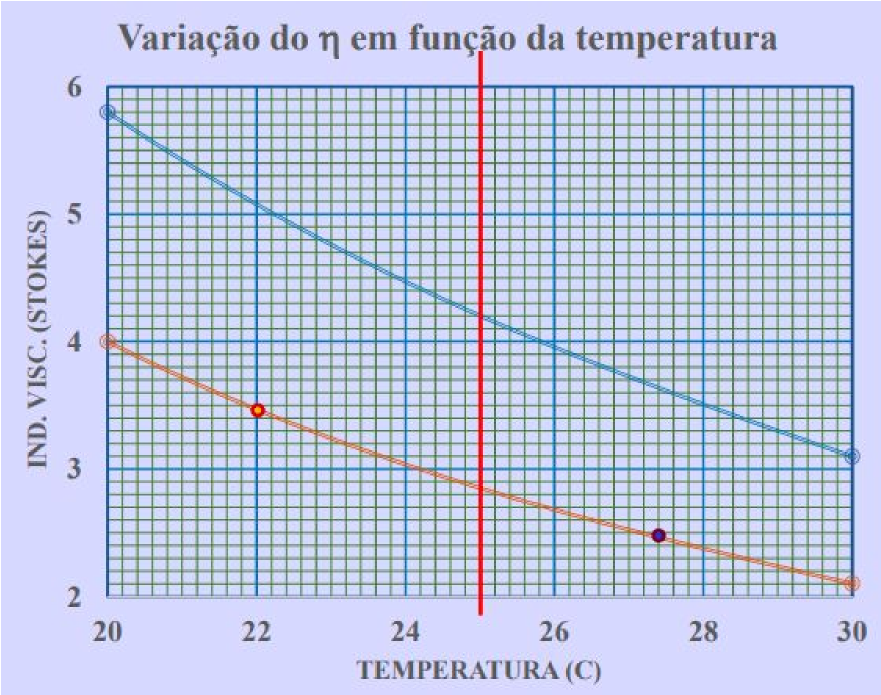


Gráfico 4. Viscosidade por temperatura. Gráfico apresentado pelo professor.

	Aluno 1							
Fator Ct	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
eta cor 2 (cgs)	2,3	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	3,0	2,8
σ (cgs)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2

	Aluno 2							
Fator Ct	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19
eta cor 2 (cgs)	2,6	2,6	2,57	2,70	2,9	3,1	3,3	3,4
σ (cgs)	0,1	0,1	0,04	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabela 9 . Normalização para a temperatura de 25°C para o aluno 1 e aluno 2.

Grupo								
Conjunto de esferas	1	2	3	4	5	6	7	8
eta médio	2,4 0,2	2,5 0,1	2,5 0,1	2,6 0,1	2,7 0,1	2,9 0,1	3,1 0,2	3,1 0,2

Tabela 10. Valores de eta do grupo para cada conjunto de esfera, após a segunda correção.

Foi feito um ajuste de reta para os pontos de V corrigido, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Logo, foram obtidos os seguintes coeficientes e o seguinte gráfico.

Coeficientes	
a	**b**
608,2	0,63
σ a	**σ b**
8,9	0,08

Tabela 10. Coeficientes, linear e angular, obtido pelo MMQ.

qual dos dois é mmq?
incertezas?

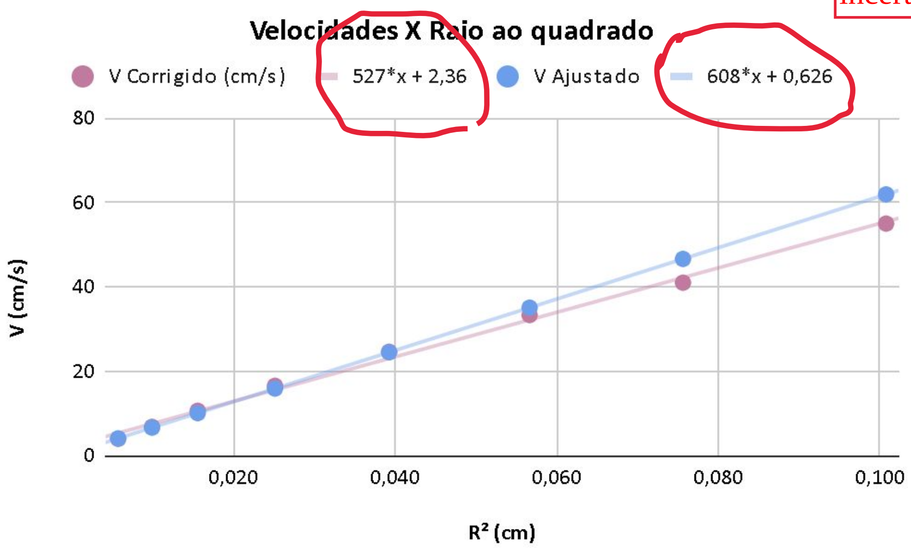


Gráfico 5. Em rosa é a velocidade corrigida usando o fator C. Em azul, é a velocidade ajustada MMQ.

Após realizado o MMQ, foi calculado a viscosidade por meio do coeficiente angular usando a fórmula (26) e sua incerteza é dada por (27), onde *a* é o coeficiente angular obtido pelo ajuste e η a viscosidade. Obteve-se um valor para η de 2,49 $\pm$0,04 (cgs).

$$a = (\rho_{cor} - \rho_{liq})\,\frac{2}{9}\,\frac{g}{\eta} \tag{26}$$

$$\sigma_\eta = \eta \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\rho_{liq}}}{\rho_{liq}}\right)^2 + \left(\frac{0{,}01}{g}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^2} \tag{27}$$

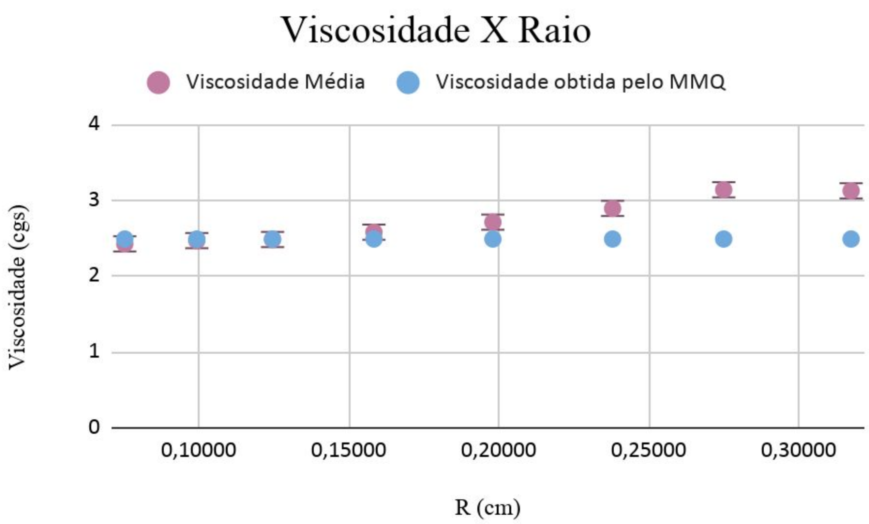


Gráfico 6: comparação entre a viscosidade média do grupo após a segunda correção, com a viscosidade obtida pelo MMQ. Nota-se, que todos os valores obtidos pelo grupo, flutuam em torno do valor obtido pelo MMQ (2,49 $\pm$0,04 cgs).

Foi calculado, também, o tempo para que cada esfera alcançasse a velocidade limite, para que pudéssemos verificar se a distância de 10 cm era adequada. Para isso, foi utilizada a expressão (9), onde foi isolado o tempo t. Com isso, foi obtida a seguinte equação:

$$t = -(\rho_c - \rho_{fluido})\frac{2r^2}{9\eta} ln(0,01) \qquad (28)$$

Grupo de esferas	Tempo para atingir 99% de V∞ (s)	Tempo para atingir a 1° marca vermelha (s)
1	0,017	3,28
2	0,029	2,16
3	0,045	1,54
4	0,069	1,13
5	0,103	0,89
6	0,140	0,74
7	0,172	0,70
8	0,230	0,56

como calculou?

Tabela 11. Tempo para atingir a velocidade limite de cada grupo de esferas e o tempo para chegar à primeira marca vermelha.

5. Discussão

Foi observado, a partir do gráfico 3, que para as esferas menores, o aumento da velocidade foi praticamente linear. Contudo, para as esferas com o diâmetro maior, foi notado que o aumento da velocidade não é linear. Isso pode ser explicado por causa das fórmulas usadas, sem correção, na primeira parte do experimento, já que todas essas equações são feitas para tubos infinitos. Isso se deve ao fato, de que quanto maior a esfera, menor é a distância entre o corpo e a parede do recipiente, ou seja, não pode ser considerado um tubo infinito.

Para o ajuste desse resultados, foi feita a correção de Landenburg, ou seja, a correção para recipientes infinitos. Foi observado, através do gráfico 4, que os valores sobrepostos da velocidade corrigida e não corrigida, que em valores próximos à origem as retas se sobrepõem, confirmando que em valores pequenos de diâmetro o gráfico é aproximadamente linear.

Outro fator que também foi levado em consideração no momento de obter as medidas, foi a distâncias entre as duas marcações de começo da contagem no cronômetro e do fim. Já que as fórmulas só são válidas para recipientes infinitos, foi determinado uma distância de 10 cm entre a superfície e o início da marcação. Isso colaborou para uma maior precisão das medidas, uma vez que o tempo que a esfera demora para percorrer essa distância é maior do que o tempo para atingir a velocidade limite, mostrada na tabela 11, onde mostra que o tempo para percorrer esses 10 cm, é maior do que o tempo necessário para atingir a velocidade limite.

Uma outra consideração para essa marcação, é que o diâmetro das esferas eram muito pequenos em relação a essa distância. Isso é parecido ao que ocorreu quando foi medido a velocidade, ou seja, quanto menor a razão entre o diâmetro das esferas e do recipiente, mais linear é a relação entre elas, já que o recipiente fica mais perto de ser infinito, e, com isso, a velocidade real se aproxima mais ainda da velocidade ideal.

Pelo MMQ, com ajuda da reta ajustada, foi possível calcular o eta para a temperatura de 25°C. Além disso, feita a média ponderada para cada aluno, foi obtido para o aluno 1 $2{,}5 \pm 0{,}1$ cgs, e para o aluno 2 $2{,}7 \pm 0{,}1$ cgs. Quando comparados com o valor da viscosidade obtido, por meio do MMQ, com o valor da média de ponderada de cada aluno, foi visível a

incerteza da média ponderada deveria ser menor do que essa...

valor de Z?

proximidade entre os resultados, sendo a compatibilidade de 1σ entre o aluno 1 e a viscosidade obtida pelo MMQ e, 2σ entre o aluno 2 e a viscosidade obtida pelo MMQ.

Contudo, quando feito o teste Z entre os valores do aluno 1 ($2{,}5 \pm 0{,}1$ cgs) e o valor da viscosidade para 25°C (2,85), obtida no gráfico 5, eles não se mostraram compatíveis. Talvez seja por algum erro na obtenção dos dados do diâmetro e do tempo do próprio aluno. Por outro lado, a compatibilidade dos valores do aluno 2 ($2{,}7 \pm 0{,}1$ cgs) e o valor obtido do gráfico, foi de 1σ

o gráfico estava em Stokes e não em Poise...

Além disso, quando comparadas o valor obtido da viscosidade pelo MMQ, e o valor médio da viscosidade do grupo, foi possível notar, pelo gráfico 6 que os dados do grupo flutuam em torno do valor encontrado usando MMQ.

6. Conclusão

A partir da análise dos dados obtidos, pode-se notar que os resultados foram parcialmente satisfatórios, já que os valores da viscosidade se aproximaram bastante do esperado, mas somente um deles foi compatível com o resultado ideal de 2,85. Como observado, as correções feitas, como a de Ladenburg e a cronometragem após 10 cm, foram boas, o que se comprova pela linearidade do gráfico 4 e do MMQ. Além disso, foi perceptível que para menores raios das esferas, a velocidade aumenta linearmente, isso se comprovou pela correção usada, já que no gráfico 2, os primeiros pontos se sobrepuseram.

resíduos

Além disso, a correção para 25°C se mostrou boa, pois os valores de densidade entre o aluno 1 e o aluno 2, que pegaram dados em temperaturas diferentes, após essa correção, foram compatíveis entre si.

Portanto, o objetivo do experimento foi atingido, uma vez que foram encontrados e comparados os valores experimentais da viscosidade obtidos e o valor ideal esperado pela teoria.

7. Referências Bibliográficas

https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=2976050