

Relatório: Viscosidade

Licenciatura Diurna - Laboratório de Mecânica

Igor Oliveira
Nº USP: 11223799

Leonardo Lettiere
Nº USP: 11223628

Maio, 2020

6,0

1 Resumo

Nesse experimento buscávamos medir o índice de viscosidade de um fluido, considerando a influência de parâmetros, tais como: raio do tubo, diâmetro da esfera, temperatura ambiente e movimento no meio (fluido). Para isso medimos a velocidade de queda de oito esferas de diâmetro distintos em um cilindro contendo um determinado fluido (óleo) a uma dada temperatura. Sabendo a densidade do fluido e do corpo, raio das esferas e medindo os diferentes tempos de queda para diferentes esferas podemos chegar à viscosidade do fluido e, posteriormente, corrigir este valor, levando em consideração os fatores temperatura e raio do tubo.

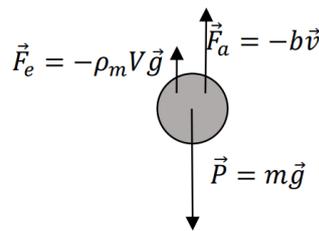
O experimento foi analisado de forma virtual, utilizando um aplicativo online pelo site Moodle. Tal aplicativo foi desenvolvido pelo grupo de Física Experimental da Poli. Para utilizar o aplicativo, o professor da disciplina Laboratório de Mecânica forneceu um tutorial de como usar o aplicativo. Este aplicativo possuía 10 situações distintas, variando do 0 ao 9, e o aluno escolherá a situação de acordo com o último dígito do seu número USP.

grupo

resultados?

2 Introdução Teórica

Para desenvolver uma análise quantitativa do experimento de viscosidade, é necessário utilizar de algumas equações. Inicialmente, é feita uma análise das forças envolvidas no corpo em queda e imerso no fluido.



objetivo?

definição dos parâmetros...

Figura 1: Diagrama de forças, existe uma força resultante para baixo (direção da força peso \vec{P}), promovendo um movimento acelerado.

Para este experimento, considerou-se que um fluido laminar, o corpo não possui rotação e não há perda de energia, influência, por cavitação (bolhas).

Com base no diagrama de forças, tem-se o seguinte:

descrição do arranjo

$$\frac{dv}{dt} + \frac{b}{m}v = \frac{(p_c - p_{oleo})}{m}gv \quad (1)$$

A velocidade infinita, dada pela distância percorrida (h) e o respectivo tempo (Δt)

$$V_\infty = \frac{h}{\Delta t} \quad (2)$$

Em que a força de atrito \vec{F}_{at} pode ser igualada a força viscosa. Posteriormente, os termos $6\eta\pi r$ serão igualados a b, para simplificação.

$$\vec{F}_{at} = -6\eta\pi r\vec{v} \quad (3)$$

O corpo ao entrar no líquido começa a ter um aumento gradual da sua velocidade, até chegar em uma velocidade limite. Esta ideia é descrita pela equação a seguir:

$$V(t) = (1 - e^{-\frac{bt}{m}})V_{lim} \quad (4)$$

A ideia nas medições, é que esta seja a velocidade medida, já que o tubo possui uma marcação com 10cm de distância do topo do tubo, ignorando então o movimento inicial. Desta forma, é possível desenvolver a seguinte equação da velocidade limite.

$$V_{lim} = \frac{2(p_c - p_{oleo})gr^2}{9\eta} \quad (5)$$

O problema da equação 4 é que ela se desenvolve em um recipiente com dimensões infinitas, o que não é o caso deste experimento. Assim, deve se considerar este fator, para isso desenvolve-se a seguinte correção:

$$F_{realat} = (1 + C)F_{at} \quad (6)$$

Em que C é dado da seguinte forma. Com $\alpha \approx 2,4$ uma grandeza já determinada.

$$C = \left(\alpha \frac{r_{esf}}{R_{tubo}}\right) + \left(\alpha \frac{r_{esf}}{R_{tubo}}\right)^2 \quad (7)$$

Assim a equação da velocidade limite com a correção de Ladenburg fica:

$$V_{real} = \frac{2(p_c - p_{oleo})gr^2}{9(1 + C)\eta} \quad (8)$$

Outra correção feita é em relação a temperatura ambiente. Algumas situações estão com temperaturas diferentes da exigida, T=25°C. Assim é necessário considerar o fator C_t .

$$C_t = \frac{\eta(t_{ref})}{\eta(t_{medida})} \quad (9)$$

O fator acima é expresso com base na imagem abaixo:

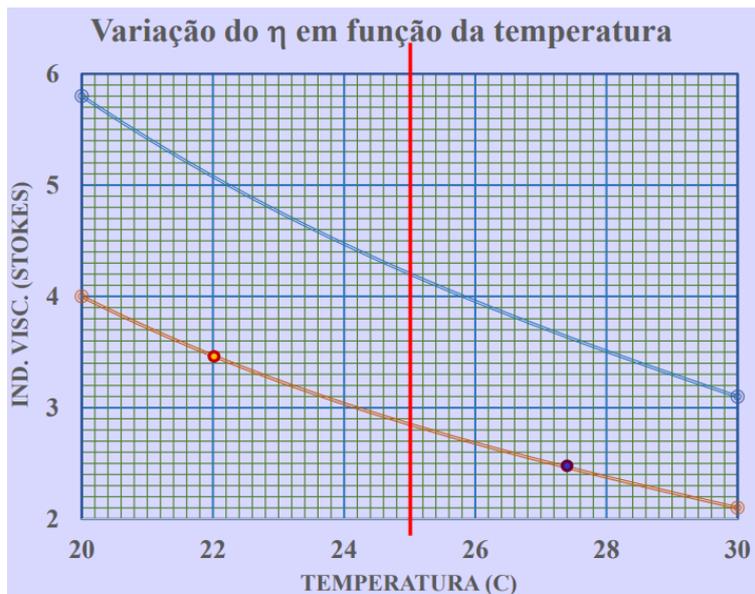


Figura 2: Gráfico da variação do coeficiente de viscosidade η em função da temperatura. Gráfico necessário para expressar o fator de correção da temperatura.

análise de dados...

Utiliza-se neste experimento uma análise dos dados com base na média e no desvio padrão. Esse procedimento estatístico é feito para análise dos dados experimentais coletados.

$$\bar{m} = \frac{\sum_i^N x_i}{N} \quad (10)$$

É possível desenvolver o cálculo do tempo necessário para chegar na velocidade limite. A relação entre v/v_{lim} é aproximada para 0,99.

$$t = -\frac{2r^2}{9\eta/\rho} \ln\left(1 - \frac{v}{v_{lim}}\right) \quad (11)$$

A seguir, é exposto as incertezas. Para desenvolver as incertezas, utilizou-se a técnica de incerteza relativa.

Com base na equação da velocidade, (2), tem-se a seguinte incerteza:

$$\sigma_{V_\infty} = V_\infty \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\Delta t}\right)^2} \quad (12)$$

A incerteza da viscosidade é dada pela equação (5) explicitada para η .

$$\sigma_\eta = \eta \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{p_c}}{p_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{p_{oleo}}}{p_{oleo}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_g}{g}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{r^2}}{r^2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{V_\infty}}{V_\infty}\right)^2} \quad (13)$$

A incerteza da viscosidade é dada pela equação (8) com o fator de correção C. Não relaciona-se uma incerteza com o fator de correção C, desconsiderando.

$$\sigma_{\eta_{real}} = \eta_{real} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{p_c}}{p_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{p_{oleo}}}{p_{oleo}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_g}{g}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{r^2}}{r^2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{V_{real}}}{V_{real}}\right)^2} \quad (14)$$

As incertezas para o diâmetro médio e tempo médio é calculado com base nas incertezas estatísticas e instrumentais, a incerteza final.

$$\sigma_{final} = \sqrt{\sigma_{inst}^2 + \sigma_m^2} \quad (15)$$

sendo que a incerteza estatística é o desvio padrão da média:

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (16)$$

e a incerteza instrumental para o tempo é por conta da reação humana ($\approx 0,2s$) e o cronômetro de 0,01s. Para o paquímetro é uma incerteza de 0,0005cm.

pq assumiu 0,2 se o experimento afirmava que era 0,1?

3 Descrição Experimental e Análise de Dados

DESCRIÇÃO E ARRANJO EXPERIMENTAL

O experimento consiste em um cilindro preenchido com um fluido, no qual colocamos uma esfera no topo e calculamos o tempo de queda da mesma ao longo do cilindro. Para realizar o experimento utilizamos um aplicativo¹, o experimento online na plataforma Moodle, que nos possibilitou medir 4 vezes cada esfera, sendo necessário medir um conjunto de 8 esferas. diametros

O experimento possui 10 situações distintas, variando de 0 a 9, sendo que os alunos deverão escolher a situação de acordo com o último dígito do número USP.

Na aula 11, fizemos a medida dos diâmetros, avaliando um conjunto de 8 esferas, sendo feitas 4 medições para cada esfera. Em seguida, mediu-se o tempo de queda de cada uma das esferas sobre o fluido, sendo que o cronômetro era ativado quando a esfera passava pela linha vermelha superior no tubo e o cronômetro era desativado assim que a esfera passava pela linha vermelha inferior do tubo. Cronometramos o tempo de queda de cada esfera 5 vezes com cronômetro do celular. Com os dados de diâmetro, tempo e os fornecidos na prancheta disponibilizada no experimento calculamos o raio², a velocidade de queda das esferas e o índice de viscosidade com suas respectivas incertezas.

Na aula 12, calculamos um índice de correção (Fator C), com base nas medidas do diâmetro das esferas na aula 11 e na medida do raio do tubo, que corrige a velocidade tentando diminuir a influência das bordas do tubo sobre o movimento da esfera. E, calculamos também, um segundo índice para corrigir a diferença de temperatura de cada aluno. Normalizando-as para 25°C.

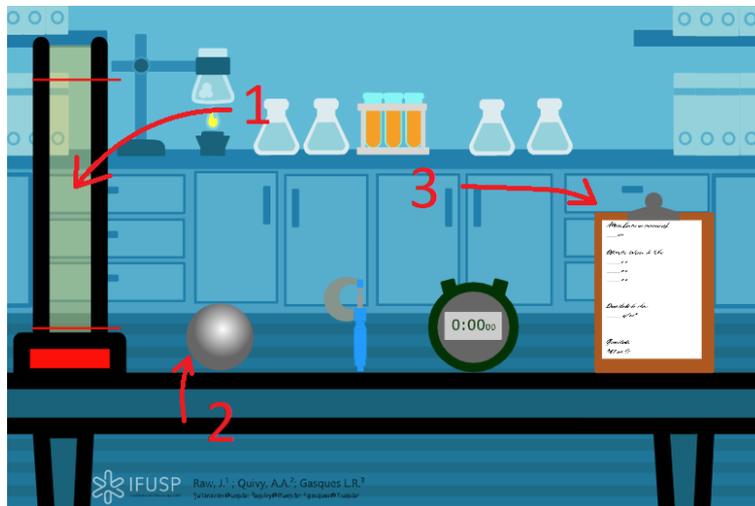


Figura 3: Tela inicial do aplicativo utilizado no experimento de viscosidade. Na imagem aparece algumas setas e numerações. Em 1, está o vaso cilíndrico com um determinado fluido, onde as esferas serão soltas. Em 2 disponibiliza as 8 esferas para a medição utilizando um paquímetro. Em 3 há uma opção para ver informações de temperatura, incertezas dos instrumentos, temperatura ambiente e outras grandezas.

¹O aplicativo foi desenvolvido por um grupo de Física Experimental A (Poli).

DADOS OBTIDOS

vctinha mais precisão do que a apresentada...

Utilizando do aplicativos e das fórmulas mencionadas na **Introdução Teórica**, assim como a suas respectivas incertezas.

Aluno 1								
	esf 1	esf 2	esf 3	esf 4	esf 5	esf 6	esf 7	esf 8
	diâmetro (cm)							
d1	0,150	0,199	0,248	0,317	0,397	0,477	0,550	0,633
d2	0,150	0,200	0,249	0,317	0,396	0,476	0,550	0,634
d3	0,150	0,199	0,249	0,317	0,396	0,476	0,551	0,635
d4	0,150	0,199	0,250	0,319	0,397	0,476	0,550	0,635
Diam médio	0,1500	0,1992	0,2491	0,3175	0,3962	0,4762	0,5503	0,6342
Desv Pad	0,0001	0,0006	0,0008	0,0009	0,0007	0,0007	0,0006	0,0011
Inc final	0,0005	0,0006	0,0006	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006	0,0007

Tabela 1: Diâmetro das esferas do Aluno 1, assim como uma análise estatística dos dados e sua incerteza.

Tempo de Queda (s)								
t1	22,26	12,97	8,66	5,82	3,96	2,87	2,31	1,80
t2	22,16	13,1	8,44	5,63	3,76	2,78	2,45	1,78
t3	22,22	12,93	8,52	5,6	3,92	2,73	2,14	1,80
t4	22,23	12,91	8,49	5,75	3,97	2,85	2,32	1,82
t5	22,26	13,05	8,50	5,72	3,91	2,81	2,4	1,78
Tempo médio	22,2	13,0	8,5	5,7	3,9	2,8	2,3	1,80
Desv pad	0,04	0,08	0,08	0,09	0,08	0,06	0,12	0,02
Inc final	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Tabela 2: Tempos obtidos do Aluno 1, uma análise estatística dos dados e sua incerteza, levando em consideração o tempo de reação humano 0,2s e a incerteza do cronômetro do celular 0,01s.

raio ² (cm ²)	0,00562	0,00992	0,01551	0,0252	0,0392	0,0567	0,0757	0,1005
inc (cm ²)	0,00004	0,00006	0,00008	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002
Veloc (cm/s)	2,92	5,00	7,6	11,4	16,6	23	28	36
inc (cm/s)	0,03	0,08	0,2	0,4	0,9	2	3	4
eta (cgs)	2,91	3,00	3,08	3,4	3,6	3,7	4,1	4,2
inc (cgs)	0,05	0,06	0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5

Tabela 3: Raio², velocidade e índice de viscosidade do Aluno 1

valor dos parâmetros usados?

Errou na conta de C

Aluno 1 - Dados com correção C								
Fator C	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,13	0,15	0,17
Vel cor (cm/s)	3,03	5,25	8,1	12,3	18	26	32	42
inc (cm/s)	0,03	0,09	0,2	0,5	1	2	3	5
eta cor (cgs)	2,71	2,72	2,73	2,9	2,9	2,9	3,1	3,1
inc (cgs)	0,05	0,06	0,07	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4

25 C?

Tabela 4: Índice de correção, velocidade corrigida e eta corrigido de Aluno 1

Aluno 1								
Fator correção	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
eta cor 2 (cgs)	2,71	2,72	2,73	2,9	2,9	2,9	3,1	3,1
inc (cgs)	0,05	0,06	0,07	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4

Tabela 5: Eta corrigido 2 aluno 1

Aluno 2								
	esf 1	esf 2	esf 3	esf 4	esf 5	esf6	esf 7	esf 8
	Diâmetro (cm)							
d1	0,150	0,198	0,248	0,317	0,396	0,477	0,549	0,635
d2	0,151	0,197	0,249	0,317	0,396	0,475	0,550	0,634
d3	0,150	0,198	0,250	0,316	0,395	0,476	0,550	0,635
d4	0,151	0,198	0,250	0,318	0,397	0,476	0,551	0,634
Diam médio	0,1503	0,1977	0,2492	0,3170	0,3959	0,4759	0,5501	0,6343
Desvio padrão	0,0005	0,0005	0,0008	0,0006	0,0010	0,0011	0,0010	0,0008
Incerteza final	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0007	0,0008	0,0007	0,0006

Tabela 6: Diâmetro das esferas do Aluno 2

Tempo de Queda (s)								
t1	18,51	10,83	7,15	4,94	3,41	2,6	1,94	1,67
t2	18,5	10,87	7,38	4,84	3,29	2,67	2,17	1,75
t3	18,52	11,04	7,28	4,8	3,34	2,36	2,11	1,65
t4	18,37	11,04	7,45	4,71	3,35	2,57	2,09	1,72
t5	18,53	10,92	7,19	4,76	3,44	2,57	2,12	1,72
Tempo médio	18,5	10,9	7,3	4,8	3,4	2,6	2,1	1,7
Desv pad	0,066	0,097	0,126	0,087	0,059	0,116	0,087	0,041
Inc final	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Tabela 7: Tempo obtido do Aluno 2, uma análise estatística dos dados e sua incerteza, levando em consideração o tempo de reação humano 0,2s e a incerteza do cronômetro do celular 0,01s.

raio ² (cm ²)	0,00562	0,00992	0,01551	0,0252	0,0392	0,0567	0,0757	0,1005
inc (cm ²)	0,00004	0,00006	0,00008	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002
Veloc (cm/s)	2,92	5,00	7,6	11,4	16,6	23	28	36
inc (cm/s)	0,03	0,08	0,2	0,4	0,9	2	3	4
eta (cgs)	2,91	3,00	3,08	3,4	3,6	3,7	4,1	4,2
inc (cgs)	0,05	0,06	0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5

Tabela 8: Raio², velocidade e índice de viscosidade do Aluno 2, com suas respectivas incertezas.

Aluno 2 - Dados com correção C								
Fator C	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,13	0,15	0,17
Vel cor (cm/s)	3,03	5,25	8,1	12,3	18	26	32	42
inc (cm/s)	0,03	0,09	0,2	0,5	1	2	3	5
eta cor (cgs)	2,71	2,72	2,73	2,9	2,9	2,9	3,1	3,1
inc (cgs)	0,05	0,06	0,07	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4

Tabela 9: Índice de correção, velocidade corrigida e eta corrigido de Aluno 2

Aluno 2								
Fator correção	1,0962	1,0962	1,0962	1,0962	1,0962	1,0962	1,0962	1,0962
eta cor 2 (cgs)	2,48	2,48	2,56	2,6	2,8	2,9	3,1	3,2
inc (cgs)	0,05	0,06	0,08	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4

Tabela 10: Aluno 2 - Eta corrigido 2 com base na temperatura, contendo a respectiva incerteza.

como calculou?

incoerente

Grupo								
diam médio	0,1502	0,1984	0,2491	0,3173	0,3961	0,4760	0,5502	0,6342
Desvio padrão	0,0003	0,0006	0,0008	0,0007	0,0008	0,0009	0,0008	0,0009
Incerteza final	0,0005	0,0006	0,0006	0,0006	0,0007	0,0007	0,0006	0,0007
Tempo médio	20,4	12,0	7,9	5,3	3,6	2,7	2,2	1,7
Desvio padrão	0,05	0,09	0,10	0,09	0,07	0,09	0,10	0,03
Incerteza final	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
raio ² (cm ²)	0,00564	0,00984	0,01551	0,0252	0,0392	0,0567	0,0757	0,1006
inc (cm ²)	0,00004	0,00006	0,00008	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002
Veloc (cm/s)	3,22	5,5	8,3	12,5	18	24	30	37
inc (cm/s)	0,04	0,1	0,2	0,5	1	2	3	4
eta (cgs)	2,67	2,75	2,86	3,1	3,3	3,5	3,9	4,1
inc (cgs)	0,05	0,06	0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5

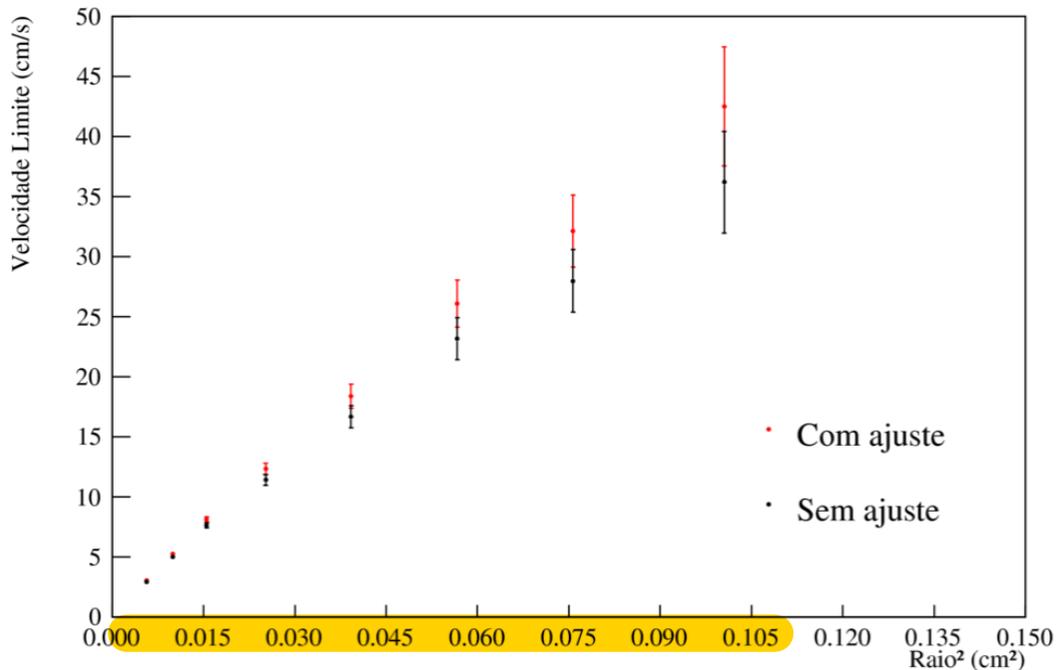
Tabela 11: Dados do grupo, obtidos com base nos dados dos alunos.

Grupo								
Fator C	0,037	0,050	0,063	0,081	0,103	0,126	0,148	0,174
Vel cor (cm/s)	3,34	5,7	8,8	13,5	20	27	34	44
inc (cm/s)	0,04	0,1	0,2	0,6	1	2	3	5
eta cor (cgs)	2,49	2,49	2,53	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
inc (cgs)	0,04	0,05	0,07	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4

Tabela 12: Dados do grupo com a correção do fator C.

Com base nas tabelas acima é possível desenvolver uma análise gráfico. Assim, é feito três gráficos visando a velocidade limite em função do Raio². O título dos gráficos estão errados por conta do aplicativo utilizado, os títulos deveriam ser "Velocidade Limite pelo Raio²", mas isto não influencia na análise. Os gráficos abaixo, mostram como são os dados com e sem o ajuste do fator C.

Aluno 1 - Raio² pelo Velocidade Limite



era para fazer um gráfico antes da correção e outro depois a correção.

escala ruim

Figura 4: Dados da velocidade limite por raio² considerando os dados do aluno 1, com e sem a correção do fator C.

Na discussão será feito uma análise gráfica, observando o coeficiente angular da função que rege os dados ajustados. Assim, é exposto os dados ajustados do Aluno 1, Aluno 2 e Grupo.

Aluno 2 - Raio² pelo Velocidade Limite

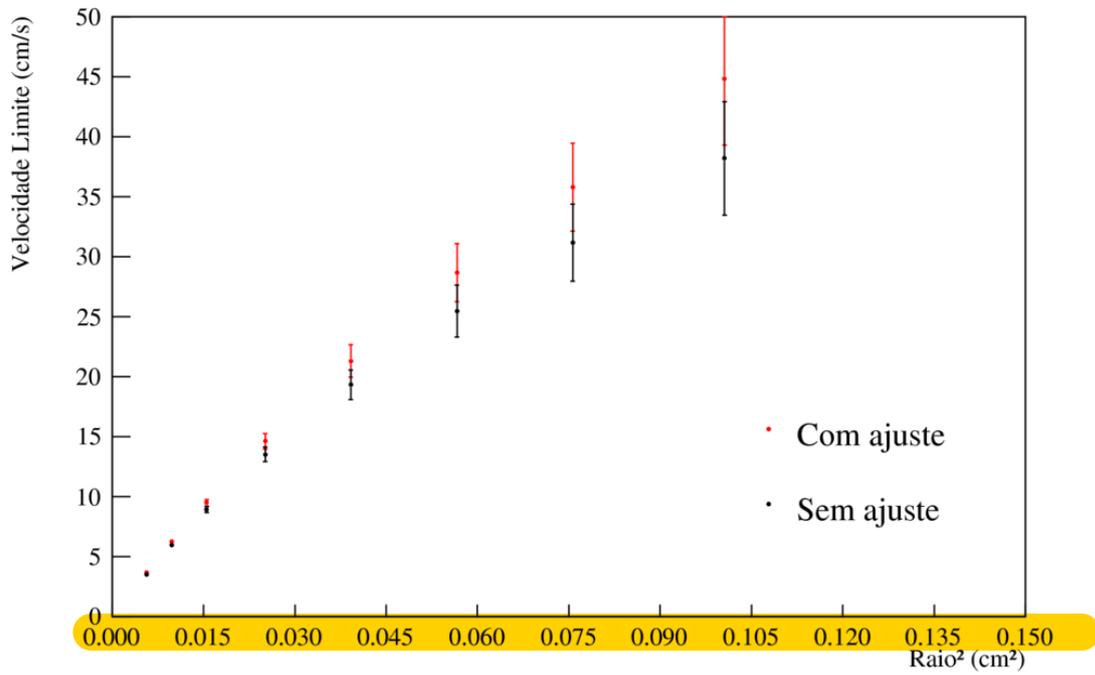


Figura 5: Dados da velocidade limite por $raio^2$ considerando os dados do aluno 2, com e sem a correção do fator C.

Grupo - Raio² pelo Velocidade Limite

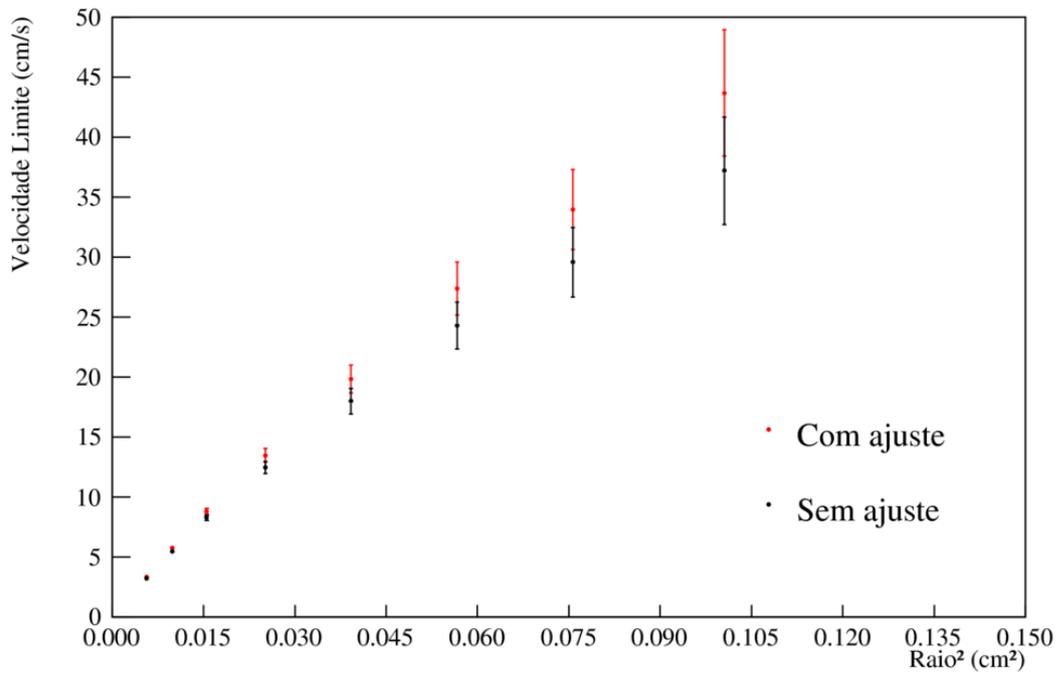


Figura 6: Dados da velocidade limite por $raio^2$ considerando os dois alunos, com e sem a correção do fator C.

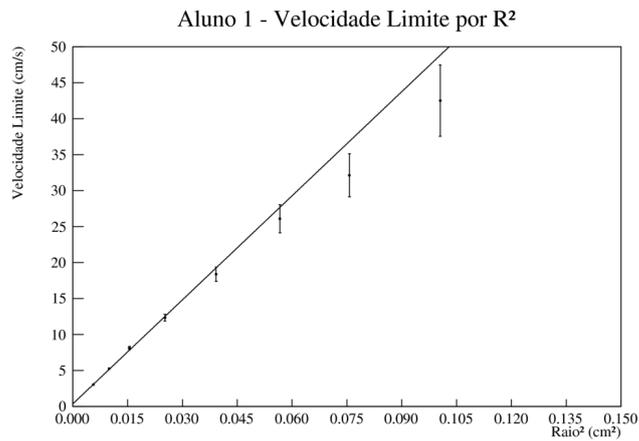


Figura 7: Velocidade limite com ajuste por R^2 , com reta de ajuste calculada por MMQ: $V = 482.037 * r^2 + 0.347$, com incerteza do coeficiente *angular* = 14.9604 e *linear* = 0.107849. Com base no coeficiente angular, tem-se que $\eta = 3,14P$

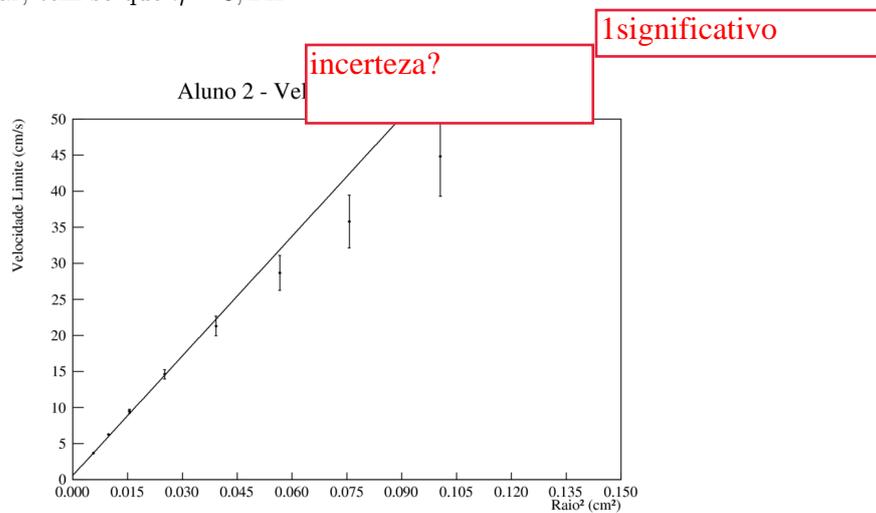


Figura 8: Velocidade limite com ajuste por R^2 , com reta de ajuste calculada por MMQ: $V = 552.863 * r^2 + 0.568$, com incerteza do coeficiente *angular* = 11.0744 e *linear* = 0.0797297. Com base no coeficiente angular, tem-se que $\eta = 2,74P$

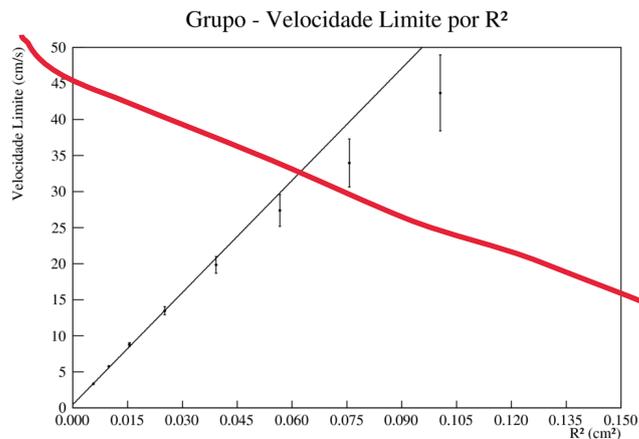


Figura 9: velocidade limite com ajuste por R^2 , com reta de ajuste calculada por MMQ: $V = 518.047 * r^2 + 0.453$, com incerteza do coeficiente *angular* = 13.022 e *linear* = 0.0935907. Com base no coeficiente angular, tem-se que $\eta = 2,92P$

4 Discussão

A seguir, é feito uma discussão dos pontos levantados pelo o texto do experimento.

Como já mencionado na descrição experimental, o tubo contendo o líquido, onde a esfera é solta, possui duas marcações, para auxiliar na cronometragem do tempo e, posteriormente, inferir uma velocidade limite mais próxima do real. A princípio, como mostra a Equação (4) a esfera não entra no fluido, imediatamente, com a velocidade limite. Para ilustrar essa ideia, segue a seguinte imagem:

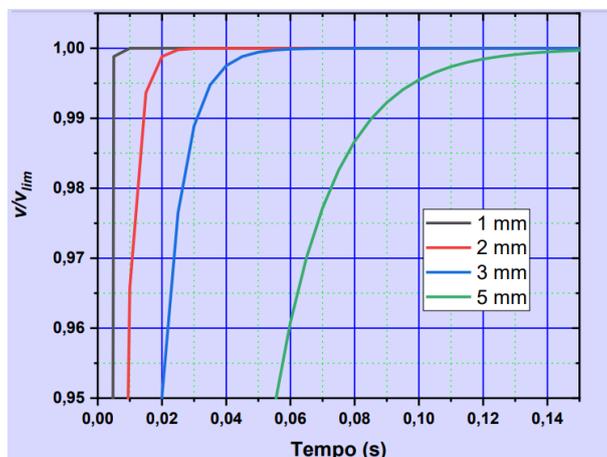


Figura 10: Gráfico da relação entre a velocidade da esfera e a velocidade limite em função do tempo. Diferentes dados, para diferentes esferas, com raios diferentes.

Pela figura acima, é possível constatar que as esferas com maiores raios demoram uma maior quantidade de tempo para atingir a velocidade limite (quando a velocidade fica constante). Desta forma, a marcação superior de 10cm em relação ao topo do tubo, pode ser eficiente para algumas esferas com raio pequeno. A seguir é expresso uma tabela contendo o raio, o tempo para a esfera chegar na velocidade limite e a distância que essa esfera percorre neste tempo. Utilizou-se a Equação (11) para mensurar o tempo.

Tempo para atingir a velocidade limite									
Aluno1	r(cm)	0,075	0,100	0,125	0,159	0,198	0,238	0,275	0,317
	t(s)	0,016	0,028	0,044	0,071	0,111	0,160	0,213	0,283
	veloc(cm/s)	3,033	5,252	8,107	12,324	18,371	26,075	32,121	42,493
	marcação(cm)	0,048	0,147	0,354	0,876	2,032	4,166	6,855	12,043
Aluno2	r(cm)	0,075	0,099	0,125	0,158	0,198	0,238	0,275	0,317
	t(s)	0,016	0,028	0,044	0,071	0,110	0,160	0,213	0,284
	veloc(cm/s)	3,647	6,235	9,478	14,612	21,306	28,666	35,784	44,841
	marcação(cm)	0,058	0,172	0,415	1,035	2,353	4,575	7,630	12,713

Tabela 13: Tabela mostrando os tempos para chegar na velocidade limite de acordo com a posição da marcação, assim como a posição aproximada da marca.

como influencia no tempo para percorrer os outros 65 cm?

Assim, usufruindo da Tabela (13), onde contém os dados das posições aproximadas da marcação, é possível cronometrar o movimento da esfera de acordo com a velocidade limite. Então, é possível constatar que a escolha de 10cm não é eficaz para as esferas de maior raio (acima de 0,3cm), em relação ao conjunto de 8 esferas analisadas.

Com base na Tabela (5) e (10) é possível determinar um valor médio de η para cada aluno. Notando que os valores de η possuem uma incerteza diferente, assim utiliza-se a média ponderada dos dados, onde o peso de cada dado é igual ao inverso do quadrado da incerteza. Como foi utilizado um método de média ponderada, é possível desenvolver da média ponderada, dada como a raiz de 1 sobre soma dos inversos do peso ao quadrado. Os valores obtidos são expressos abaixo:

$$\eta_1 = 2,75P \quad \sigma_1 = 0,02P \quad \eta_2 = 2,53P \quad \sigma_2 = 0,02P$$

Tomando como base a Figura (2), em que a temperatura da situação do aluno 1 é 25°C e do aluno 2 é 26,6°C, tem-se que os valores de η são, respectivamente, 2,85P e 2,58P, considerando uma

incerteza de 0,01 para ambos. Desenvolve-se um teste Z para verificar a compatibilidade entre os dados:

$$TesteZ_1 = 2,49 \quad TesteZ_2 = 1,48$$

Com base no teste Z acima, é possível concluir que asserção teórica com fator de correção (Equação 8) possui uma validade, já que ambos os alunos conseguiram um compatibilidade ao nível 2 sigmas, porém é notável que existe uma discrepância entre o valor experimental obtido e o valor nominal (Figura 2), já que o resultado do teste Z não é inferior a 1.

As bordas do cilindro exercem uma interferência na esfera durante o deslocamento. Desta forma, quanto maior o raio da esfera, mais perto ela estará das bordas do recipiente (tubo). A imagem abaixo mostra que o fluido que está próximo as bordas do recipiente, estão "presos", assim o líquido que está no centro do recipiente possui uma maior velocidade e que está bem próximo da borda do recipiente possui uma velocidade próxima de 0.

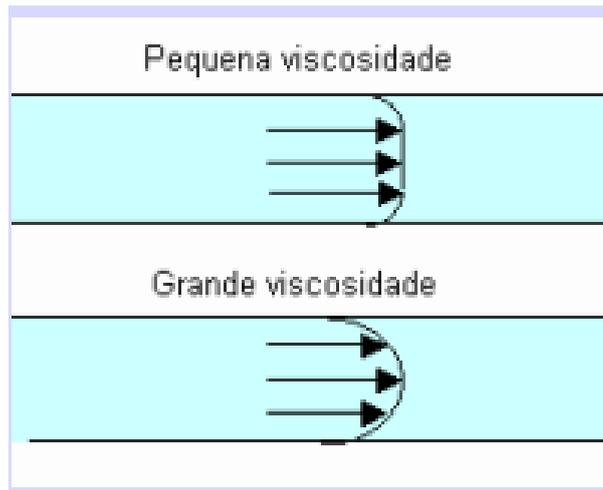


Figura 11: Imagem ilustrativa, para demonstrar a interferência das bordas na esfera

Quanto mais próxima da borda a esfera tiver maior a interferência. Com base nos dados concluímos que um dos motivos para que o gráfico com os dados calculados não nos forneça uma reta se dá por essa interferência, que é maior conforme o raio² aumenta (aproxima-se das bordas).

A correção de Ladenburg tornou os dados mais precisos, porém ainda não foi suficiente para corrigir as velocidades. As mesmas se aproximam de uma reta após a correção, porém ainda não atingem os valores esperados. Isto pode ser facilmente observado vislumbrando as Figuras (7), (8) e (9), em que os dados iniciais (esferas de raio "pequeno") e os conforme o raio² aumenta começa haver uma discrepância entre a reta e os dados. Porém, a correção de certa forma melhora os dados, as Figures (4), (5) e (6), mostram os dados com e sem ajuste, é possível ver que os dados sem ajuste, conforme o raio² aumenta, a velocidade limite fica inferior a velocidade limite com ajuste, assim a correção melhora os dados de uma certa forma.

conclusão?