



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES

Dionatas Santos Brito

VISCOSÍMETRO CASEIRO

Vitória, 11 de dezembro de 2020

Viscosímetro Caseiro

Trabalho apresentado ao cursos Engenharias da
Universidade Federal do Espírito Santo, atribuído
pela disciplina Introdução à Mecânica dos Fluidos

Prof^a. Bruno Furieri

Vitória – ES
11 de dezembro de 2020

Sumário

1.	Objetivo.....	04
2.	Introdução.....	05
3.	Material.....	07
4.	Experimento.....	08
5.	Dedução Da Equação.....	11
6.	Resultados.....	15
7.	Conclusão.....	27
8.	Referência.....	29

1- Objetivo

Aplicar e complementar a teoria de viscosidade e princípios de conservação da massa em regime transiente por meio de um experimento de esvaziamento de um reservatório com uma tubulação horizontal.

2- Introdução

A mecânica dos fluidos em sua definição, se refere ao transporte de uma substância fluida e suas formas de quantificar as interações com a superfície, tendo como fluido em formas líquidas ou gasosas, onde se deforma continuamente sob aplicações de forças de cisalhamento (forças tangenciais).

Cada substância fluida possui uma específica resistência ao escoamento, viscosidade, e é calculada através da lei da viscosidade de newton:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dx}$$

Onde a tensão de cisalhamento τ de um fluido que se encontra em movimento equivale numericamente a viscosidade μ do fluido dividido por sua taxa de deformação $\frac{du}{dx}$.

Com base nessa lei, os fluidos são divididos em dois grupos, os newtonianos e os não newtonianos, sendo que há nos fluidos newtonianos, água, leite por exemplo, uma relação linearmente proporcional entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação do fluido, seguindo assim a lei da viscosidade de newton, enquanto nos fluidos não newtonianos sangue, creme dental por exemplo, essa linearidade não existe, pois os fluidos se comportam de formas particulares.

Se tratando de fluidos em viscosidade cinemática como gases, a viscosidade aumenta à medida que diminuimos a temperatura, enquanto para fluidos líquidos, existe uma relação de proporcionalidade, e pode ser medido através de um viscosímetro, equipamento que determinam a viscosidade de um fluido em uma temperatura específica, que apresentam apenas a viscosidade aparente, não sendo recomendados para medir as propriedades de um fluido não newtonianos.

Os viscosímetros são classificados em dois grupos, primário e secundário, no primário os viscosímetros realizam medida direta da relação de tensão e taxa de deformação do fluido, enquanto o secundário, mede indiretamente.

Dentre esses grupos existem diversos tipos e modelos de viscosímetros, como por exemplo discos paralelos, capilares e cilindros concêntricos.

Nesse experimento irá ser utilizado o modelo capilar do viscosímetro, construído de forma caseira, esse tipo de viscosímetro tem a função de medir o tempo em que o líquido leva para chegar até a tubulação horizontal com um diâmetro menor que o reservatório, onde o tempo que o fluxo leva para passar pela tubulação é dependente da viscosidade do fluido.

3- Materiais

- um recipiente com capacidade de 2 litros, e com diâmetro de 9,5 cm;
- canudo simples com diâmetro de 0,5 cm e comprimento de 19,5 cm;
- Estilete;
- Fita adesiva;
- Caneta esferográfica;
- Gancho Parafuso (para o furo);
- Régua graduada;
- Cola de silicone;
- papel chamex;
- Celular.

4- Experimento

Foi construído um reservatório para o viscosímetro, utilizado o estilete para separar a parte superior da garrafa, que possuía o volume de 2 litros e 9,5 cm de diâmetro, com a parte superior retirada, utilizando um gancho parafuso aquecido foi feito um furo na base inferior da garrafa com diâmetro para a inserção do canudo com 0,5 cm de diâmetro e 19,5cm de comprimento.

Em seguida, com o canudo incluso, a abertura feita pelo parafuso foi vedada utilizando cola de silicone, para haver escoamento apenas de forma horizontal e eliminar a possibilidade de um vazamento ocorrer e causar interferência nos dados do experimento.

Com o uso de uma caneta esferográfica, régua graduada e papel chamex, foi feito uma régua de papel graduada de 17 cm para ser colada, com o uso de fita adesiva, ao reservatório.

Para o modo de execução, foram escolhidos dois tipos distintos de fluidos newtonianos, água e óleo de soja, e com o uso de um celular como cronômetro, foi observado o tempo de escoamento em cada centímetro do reservatório, a partir da altura máxima de 17cm e anotado em uma tabela.

Inicialmente a tubulação feita com o canudo tendeu para baixo e para contornar esse problema de modo que não interferisse no experimento, com o uso de uma caixa de fósforo, foi feito uma base para a tubulação se manter apenas horizontalmente.

Com os dados obtidos e com uso do software excel, foi traçado um linha de tendência com ajuste exponencial em um gráfico altura versus tempo com o resultado da viscosidade do fluido. O experimento em cada fluido foi realizado três vezes.



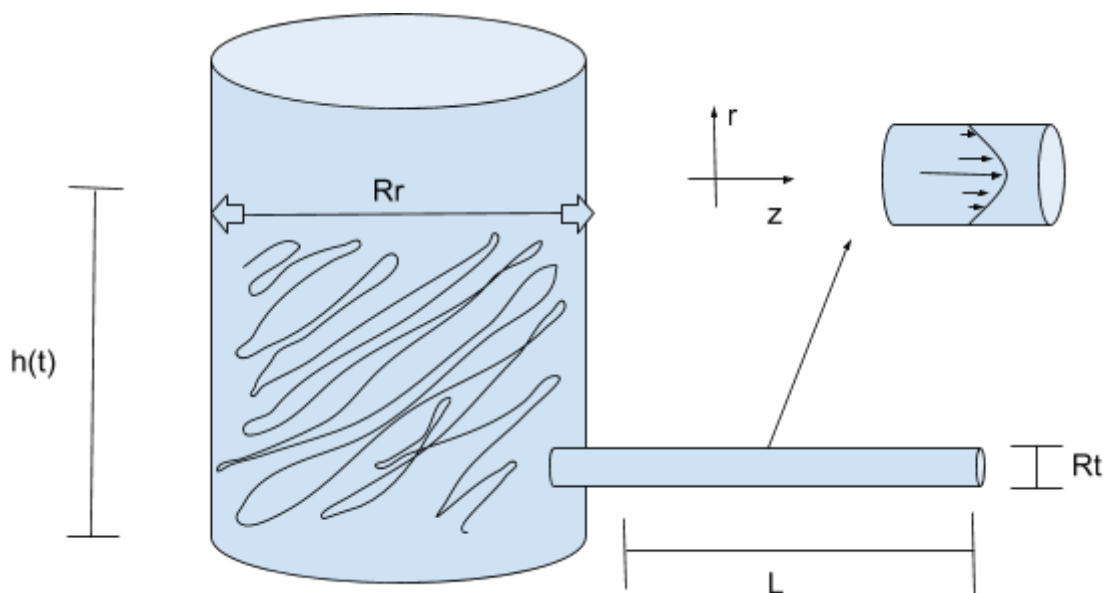
Materiais para a construção do viscosímetro



Viscosímetros do experimento

5- Dedução da Equação

Reservatório Esquemático:



Para iniciar a dedução da equação do viscosímetro, devemos ter como base a equação de Bernoulli, para descrever o comportamento do fluido no interior do tubo e da equação de escoamento de Hagen-Poiseuille (concordar nome), que relaciona a vazão \$Q\$ de um tubo cilíndrico transportando um líquido viscoso, considerando ser um escoamento de fluido incompressível aplicados a equação da massa na forma integral.

$$u_z(r) = \frac{-R^2}{4\mu} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \frac{\partial P}{\partial z} \quad (1)$$

Aplicando a lei de conservação da massa ao volume de controle (reservatório e tubulação), temos que:

$$\frac{dV}{dt} = Q \quad (2)$$

variação temporal do volume no V = Fluxo de fluido

Encontrando a Equação 1:

Equação 1:

Por Navier- Stokes em coordenadas cilíndricas temos :

$$\rho \left(\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{u_r \partial P}{\partial r} + \frac{u_\theta \partial P}{\partial \theta} + \frac{u_z \partial P}{\partial Z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial Z} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right)$$

Como temos escoamento na horizontal e uniforme:

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \right) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} \right) = \frac{r}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z}$$

Realizando Integração indefinida:

$$\frac{r \partial u_z}{\partial r} = \frac{r^2}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) + c_1$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial r} = \frac{r}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{c_1}{r}$$

Realizando novamente a integração com condição de contorno:

$$u_z = \frac{r^2}{4\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) + \ln(r) \cdot c_1 + c_2$$

$$c_1 = 0$$

$$c_2 = -\frac{R^2}{4\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)$$

Chegamos assim na equação de perfil de Poiseuille (perfil radial):

$$u_z(r) = \frac{-R^2}{4\mu} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \frac{\partial P}{\partial Z}$$

Utilizando a fórmula 1 e 2 para encontrar a equação que descreve o viscosímetro :

Integrando a Equação de conservação da massa:

$$\frac{dV}{dt} = \int dQ = \int u_z \cdot dA$$

Temos que o volume no interior do V diminui com o tempo, então o volume pode ser calculado pelo volume do reservatório, onde dA é um elemento diferencial de área de uma seção circular ($2\pi r dr$).

$$\frac{d}{dt} [\pi R^2 h(t)] = - \int_A u_z(r) \cdot dA$$

Integrando ambos os lados com os limites 0 a R:

$$\left[\pi R^2 h(t) \right] = - \int_0^R u_z(r) \cdot 2\pi r dr$$

Considerando a hipótese de está ocorrendo uma variação linear de pressão ao longo da tubulação do experimento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{\Delta p}{\Delta z} \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{p_2 - p_1}{L} \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{0 - \rho gh}{L} \end{aligned}$$

Resolvendo :

$$\frac{d}{dt} \left[\pi R_R^2 h(t) \right] = - \int_0^R - \frac{R_T}{4\mu} \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \left[1 - \frac{r^2}{R^2} \right] 2\pi dr$$

$$\therefore \frac{1}{h(t)} \cdot \frac{dh(t)}{dt} = - \frac{R_T^4}{R_R^2} \cdot \frac{\rho g}{8\mu L}$$

Integrando ambos os lados usando como limites do lado esquerdo h_0 até h , e no lado direito, 0 até t e encontrando a equação que corresponde ao viscosímetro :

$$\int_{h_0}^h \frac{1}{h(t)} \cdot \frac{dh(t)}{dt} = \int_0^t - \frac{R_T^4}{R_R^2} \cdot \frac{\rho g}{8\mu L}$$

$$\therefore h(t) = h_0 \cdot e^{-\left(\frac{R_T^4}{R_R^2} \cdot \frac{\rho g}{8\mu L}\right)t} \cdot \frac{\ln(h_0)}{\ln()}$$

Onde:

- $h(t)$: altura em função do tempo;
- h_0 : altura inicial;
- A : Regressão
- R_T : raio do tubo;
- R_R : raio do reservatório;
- ρ : massa específica do fluido;
- g : aceleração da gravidade;
- t : tempo;
- L : comprimento do tubo de escoamento;
- μ : viscosidade dinâmica do fluido.

6- Resultados:

O experimento foi feito utilizando dois fluidos newtonianos, a água e o gelo, e foi possível mensurar o tempo de escoamento de cada um dos fluidos.

Fluido I: Água

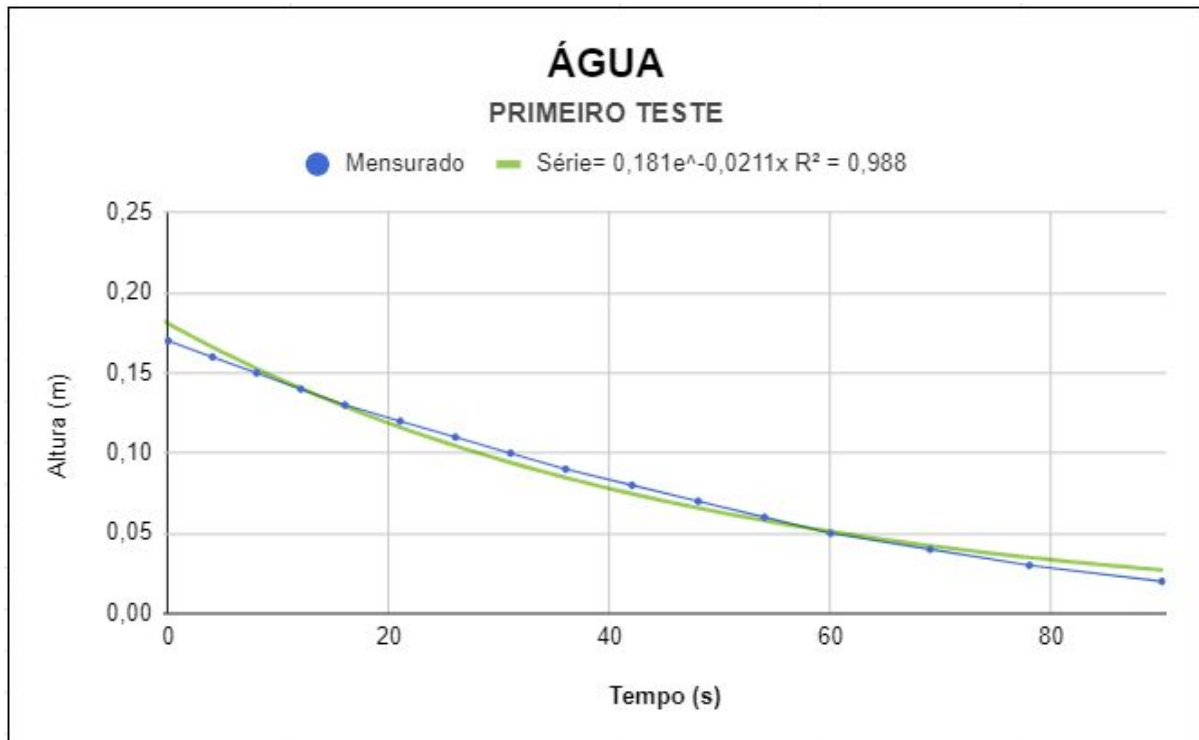
Iniciando pela água, foi realizado três tentativas e com auxílio do software excel uma tabela foi criada contendo os dados coletados:

ÁGUA			
Altura (cm)	PRIMEIRO TESTE (s)	SEGUNDO TESTE (s)	TERCEIRO TESTE (s)
17	0	0	0
16	4	3	4
15	8	8	8
14	12	12	12
13	16	16	16
12	21	20	20
11	26	25	25
10	31	30	30
9	36	35	36
8	42	41	41
7	48	47	47
6	54	53	54
5	60	60	60
4	69	69	69
3	78	78	79
2	90	88	89
1	108	107	106
0	120	120	121

Para reduzir os possíveis erros de curvatura, foi desconsiderado os últimos dois centímetros do escoamento na construção dos gráficos.

FLUIDO 1:

Primeiro teste:



Com resultado do gráfico, temos a viscosidade do fluido em forma de série:

$$Série = 0,181e^{-0,0211x}$$

E com base na dedução demonstrada, a viscosidade do fluido é dado pela fórmula:

$$h(t) = h_0 \cdot e^{-\left(\frac{R^4}{R^2} \cdot \frac{\rho g}{8\mu L}\right)t} \cdot \frac{\ln(h_0)}{\ln()}$$

Que se comporta como:

$$h(t) = A \cdot e^{-bt}$$

Com base nessas informações, podemos igualar as constantes exponenciais e calcular a viscosidade para o primeira tentativa da água:

$$-b = -\left(\frac{R_t^4}{R_R^2} \cdot \frac{\rho g}{8\mu L}\right) \cdot \frac{\ln(h_0)}{\ln()}$$

$$-\mu = -\left(\frac{R_t^4}{R_R^2} \cdot \frac{\rho g}{8bL}\right) \cdot \frac{\ln(h_0)}{\ln()}$$

Pelo gráfico temos b= 0,0211 e A= 0,181.

Pelos dados do experimento temos:

- R_T : 0,0025 m;
- R_R : 0,0475 m;
- ρ : 1000 Kg/m;
- g: 9,8 m/s²;
- L: 0,195 m;
- μ : ?

Calculando:

$$-\mu_1 = -\frac{(0,0025)^4 \cdot (1000) \cdot (9,8)}{(0,0475)^2 \cdot 8(0,195) \cdot (0,0211)} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(0,181)}$$

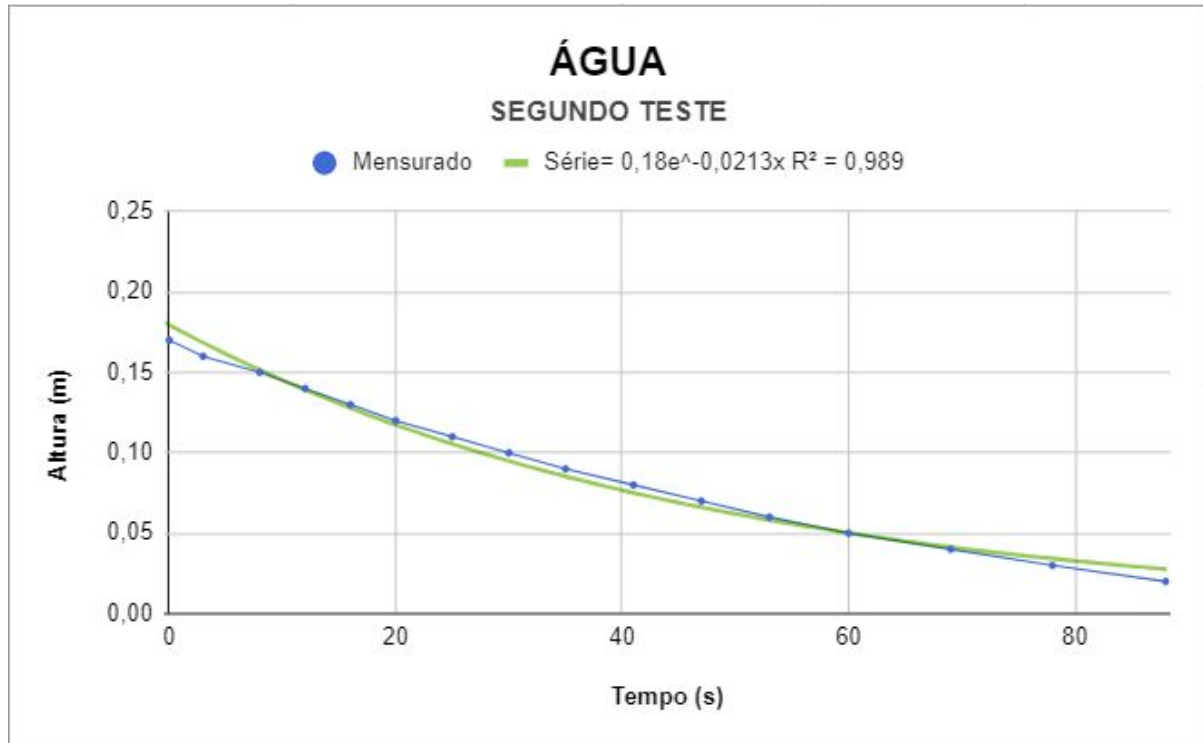
$$-\mu_1 = -\frac{3,830722656 \cdot 10^{-7}}{7,4266725 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(0,181)}$$

$$-\mu_1 = -5,158 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(0,181)}$$

$$\mu_1 = 5.347 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

Segundo teste:

Com resultado do segundo gráfico, temos a viscosidade do fluido em forma de série:



$$Série = 0,18e^{-0,0213x}$$

Repetindo os mesmos passos do primeiro e com $b = 0,0213$ e $A = 0,18$:

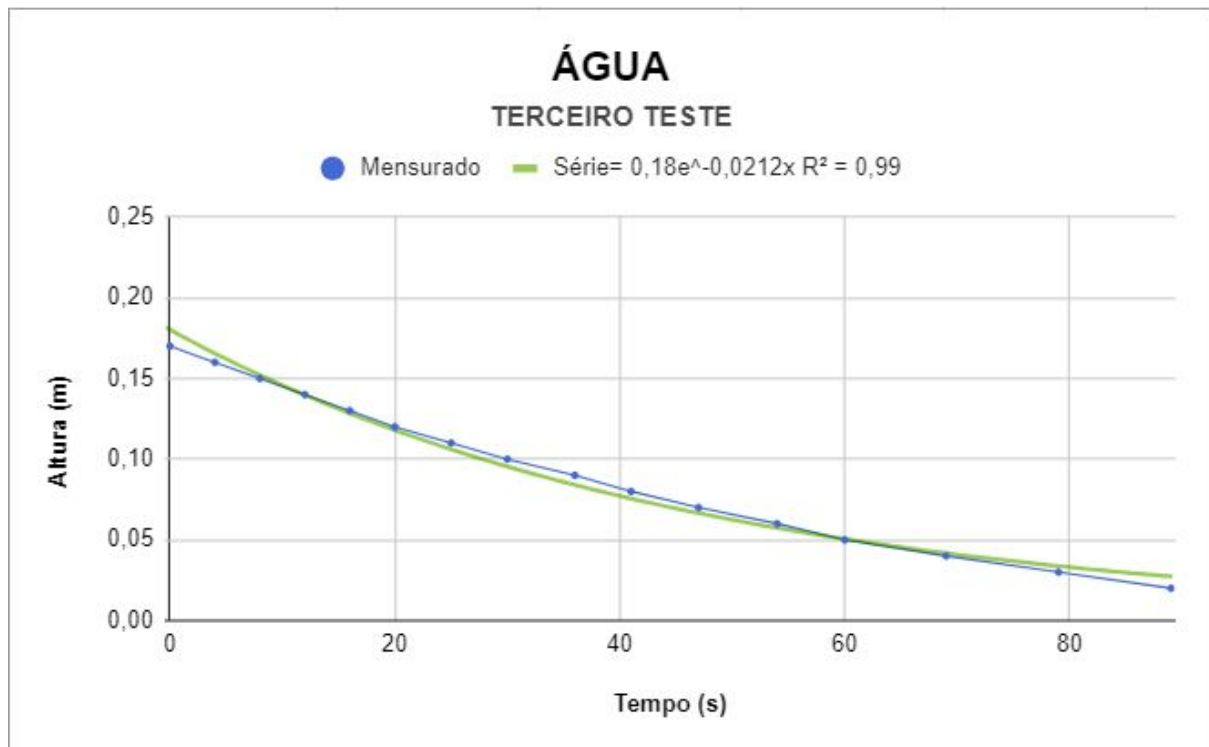
$$-\mu_2 = - \frac{(0,0025)^4 \cdot (1000) \cdot (9,8)}{(0,0475)^2 \cdot 8(0,195) \cdot (0,0213)} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(0,18)}$$

$$-\mu_2 = - \frac{3,830722656 \cdot 10^{-7}}{7,4970675 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(0,18)}$$

$$-\mu_2 = -5,109 \cdot 10^{-3} \frac{\ln(0,17)}{\ln(0,18)}$$

$$\mu_2 = 5,279 \cdot 10^{-3} P.s$$

Terceiro teste:



Com resultado do terceiro gráfico, temos a viscosidade do fluido em forma de série:

$$Série = 0,18e^{-0,0212x}$$

Repetindo os mesmos passos do primeiro e com b = 0,0212 e A= 0,18:

$$-\mu_3 = - \frac{(0,0025)^4 \cdot (1000) \cdot (9,8)}{(0,0475)^2 \cdot 8(0,195) \cdot (0,0212)} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(0,18)}$$

$$-\mu_3 = - \frac{3,830722656 \cdot 10^{-7}}{7,46187 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(0,18)}$$

$$-\mu_3 = -5,133 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(0,18)}$$

$$\mu_3 = 5,304 \cdot 10^{-3} P.s$$

Com os três valores de viscosidade do experimento calculados, para melhor compreensão dos dados é necessário realizar uma média entre eles:

$$\mu_T = \frac{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3}{3}$$

$$\mu_T = \frac{(5,347 \cdot 10^{-3}) + (5,279 \cdot 10^{-3}) + (5,304 \cdot 10^{-3})}{3}$$

$$\mu_T = 5,31 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

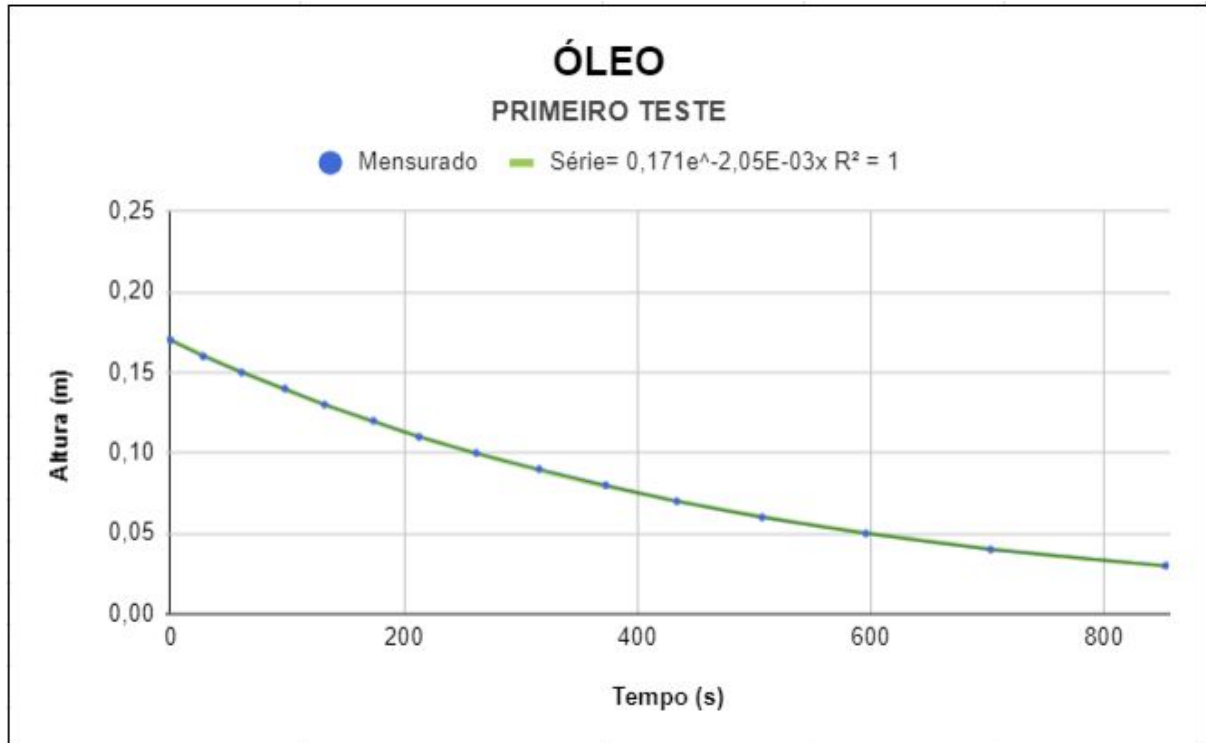
Fluido II : Óleo

Após ter calculado a viscosidade da água, foram realizadas três tentativas com o fluido newtoniano, óleo de soja e , novamente com auxílio do software excel uma tabela foi criada contendo os dados coletados .

ÓLEO			
Altura (cm)	PRIMEIRO TESTE (s)	SEGUNDO TESTE (s)	TERCEIRO TESTE (s)
17	0	0	0
16	28	30	32
15	61	62	65
14	98	100	101
13	132	132	140
12	174	166	172
11	213	208	214
10	262	254	263
9	316	302	316
8	373	371	373
7	434	429	442
6	507	496	501
5	596	589	598
4	703	701	713
3	853	847	854
2	1027	1028	1029
1	1205	1200	1200
0	x	x	x

Para reduzir os possíveis erros de curvatura, foram desconsiderados os últimos três centímetros do escoamento na construção dos gráficos.

Primeiro Teste:



Com resultado do gráfico, temos a viscosidade do fluido em forma de série:

$$Série = 0,171e^{-2,05 \cdot 10^{-3}x}$$

Assim como na água, com base na dedução demonstrada, a viscosidade do fluido é dado pela fórmula:

$$h(t) = h_0 \cdot e^{-\left(\frac{R}{R} \cdot \frac{4}{R^2} \cdot \frac{\rho g}{8\mu L}\right)t} \cdot \frac{\ln(h_0)}{\ln()}$$

Que se comporta como:

$$h(t) = A \cdot e^{-bt}$$

Com base nessas informações, podemos igualar as constantes exponenciais e calcular a viscosidade para o primeira tentativa da água:

$$-b = -\left(\frac{R_t^4}{R_R^2} \cdot \frac{\rho g}{8\mu L}\right) \cdot \frac{\ln(h_0)}{\ln()}$$

$$-\mu = -\left(\frac{R_t^4}{R_R^2} \cdot \frac{\rho g}{8bL}\right) \cdot \frac{\ln(h_0)}{\ln()}$$

Pelo gráfico temos $b = 2,05 \cdot 10^{-3}$ e $A = 0,171$

Pelos dados do experimento temos:

- $R_T : 0,0025 \text{ m};$
- $R_R : 0,0475 \text{ m};$
- $\rho : 920 \text{ Kg/m}^3$
- $g: 9,8 \text{ m/s}^2;$
- $L: 0,195 \text{ m};$
- $\mu : ?$

Calculando:

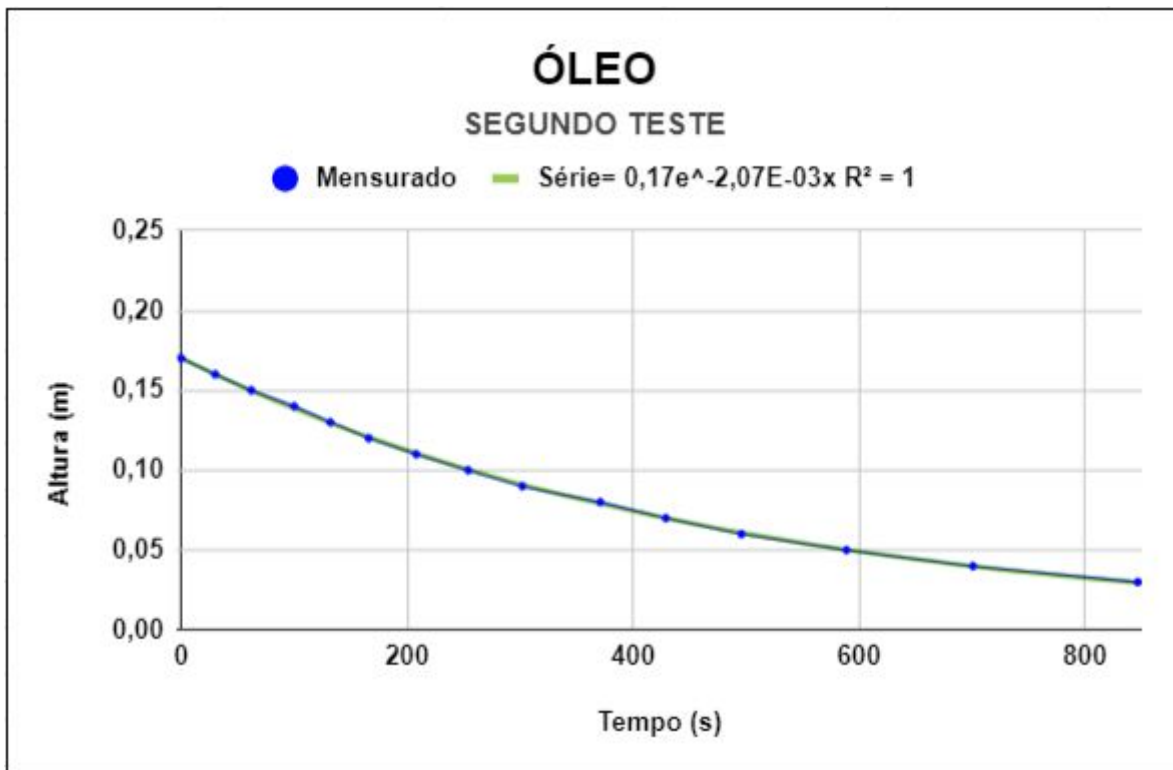
$$-\mu_1 = -\frac{(0,0025)^4 \cdot (920) \cdot (9,8)}{(0,0475)^2 \cdot 8(0,195) \cdot (2,05 \cdot 10^{-3})} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(0,171)}$$

$$\mu_1 = \frac{3,521875 \cdot 10^{-7}}{7,2154875 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(0,171)}$$

$$\mu_1 = 48,80 \times 10^{-4} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(0,171)}$$

$$\mu_1 = 48,97 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

Segundo Teste:



Com resultado do segundo gráfico, temos a viscosidade do fluido em forma de série:

$$Série = 0,17e^{-2,07 \cdot 10^{-3}x}$$

Repetindo os mesmos passos do primeiro e com $b = 2,07 \cdot 10^{-3}$ e $A=0,17$:

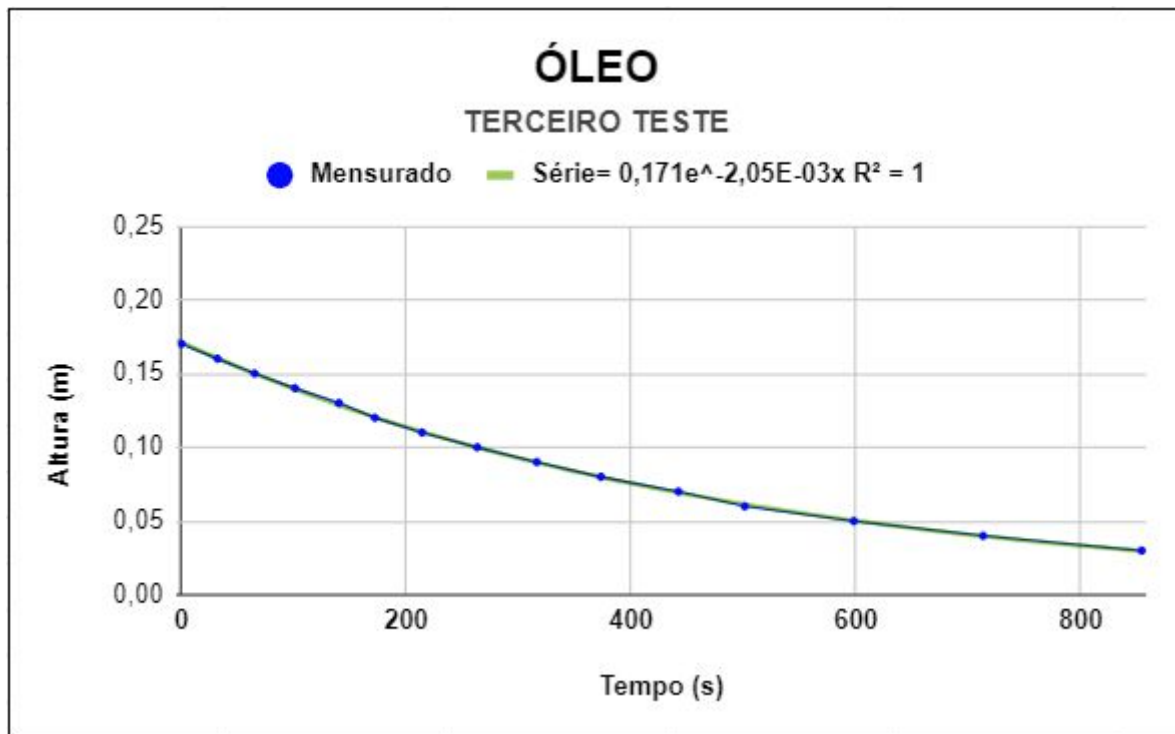
$$-\mu_2 = - \frac{(0,0025)^4 \cdot (920) \cdot (9,8)}{(0,0475)^2 \cdot 8(0,195) \cdot (2,07 \cdot 10^{-3})} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(17)}$$

$$-\mu_2 = - \frac{3,521875 \cdot 10^{-7}}{7,2858825 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(17)}$$

$$-\mu_2 = -48,33 \cdot 10^{-3} \frac{\ln(0,17)}{\ln(17)}$$

$$\mu_2 = 48,33 \cdot 10^{-3} Pa.s$$

Teste três:



Com resultado do segundo gráfico, temos a viscosidade do fluido em forma de série:

$$Série = 0,171e^{-2,05 \cdot 10^{-3}x}$$

Repetindo os mesmos passos do primeiro e com $b = 2.05 \cdot 10^{-3}$ e $A = 0,171$:

$$-\mu_3 = - \frac{(0,0025)^4 \cdot (920) \cdot (9,8)}{(0,0475)^2 \cdot 8(0,195) \cdot (2.05 \cdot 10^{-3})} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(0,171)}$$

$$-\mu_3 = - \frac{3,521875 \cdot 10^{-7}}{6,67899102 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(0,171)}$$

$$-\mu_3 = -52,73 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\ln(0,17)}{\ln(0,171)}$$

$$\mu_3 = 52,90 \cdot 10^{-3} Pa.s$$

Com os três valores de viscosidade do experimento calculados com óleo de soja, para melhor compreensão dos dados, assim como foi feito no fluido água, é necessário realizar uma média entre eles:

$$\mu_T = \frac{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3}{3}$$

$$\mu_T = \frac{(48,97 \times 10^{-3}) + (48,33 \cdot 10^{-3}) + (52,90 \cdot 10^{-3})}{3}$$

$$\mu_T = 50,06 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

7- Conclusão:

Como não foi usado instrumento para medir a temperatura em cada fluido do experimento, e tomando como base a temperatura do ambiente que estava em torno de 20° à 30° é possível comprovar os dados obtidos pelo experimento com os dados reais .

Onde o dado real em função da temperatura para a água é:

Líquidos (a 20 °C):

	viscosidade (Pa·s)
álcool etílico	$0,248 \times 10^{-3}$
acetona	$0,326 \times 10^{-3}$
metanol	$0,597 \times 10^{-3}$
álcool propílico	$2,256 \times 10^{-3}$
benzeno	$0,64 \times 10^{-3}$
água	$1,0020 \times 10^{-3}[5]$

E os dados reais em função da temperatura para o óleo são:

T(°C)	Viscosidade (mPa.s)						
	Soja	Milho	Girassol	Arroz	Algodão	Oliva	Canola
20,0	59,0	67,6	58,3	73,8	67,7	79,7	73,1
30,0	41,2	47,4	41,3	50,5	47,3	55,4	50,5
40,0	29,5	32,3	29,1	34,3	33,4	37,8	35,6
50,0	22,3	24,8	21,3	24,5	24,6	26,2	25,2
60,0	16,7	18,5	16,4	19,2	18,0	21,4	19,1
70,0	12,6	14,0	12,6	14,2	14,0	14,9	14,5

O experimento resultou para a água um valor de viscosidade igual a $5.31.10^{-3} Pa.s$ e para o óleo $50,06.10^{-3} Pa.s$, comparando o real com o obtido, é possível notar que para a água, houve uma diferença em relação ao dado real e para o óleo, o resultado foi bem próximo ao real, essa diferença em relação a água se dá por vários motivos, como por exemplo:

- Imperfeições no reservatório
- Temperatura do fluido;
- Impurezas no fluido;
- Cronometragem errada;
- Aproximações no cálculo;
- Marca do óleo (processo de fabricação);
- Olho humano (coletagem de dados foi relativo e pode possuir erros);
- Efeito da borda das paredes;

Dito isso, podemos considerar que o experimento foi um sucesso em parte, pois apesar dos erros, é possível perceber a aplicação das leis e teorias apresentadas ao decorrer do curso de Introdução à Mecânica dos Fluidos em nosso cotidiano, como por exemplo ao comprar a viscosidade da água e óleo.

8- Referências:

- [1] Determinação experimental da viscosidade e condutividade térmica de óleos vegetais. Disponível em: <
https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612008000300010.
Acesso em: 01 dez. 20.
- [2] Dedução do viscosímetro. Bruno Furieri. Disponível em: <
<https://classroom.google.com/u/0/w/MTUzMzcwMTMwNTY1/t/all>>. Acesso em: 009
dez. 20.
- [3] Viscosidade. Disponível em: <
<https://pt.wikipedia.org/wiki/Viscosidade>>. Acesso em: 009 dez. 20.