

## Viscosidade

### 1 - Objetivos Gerais:

- Estudo da velocidade terminal de uma esfera num líquido;
- Determinação da viscosidade do líquido em estudo;

**\*Anote a incerteza dos instrumentos de medida utilizados:  $\sigma_{ap}$**

### 2 – Experimentos:

1. Meça a massa ( $g$ ) e o diâmetro ( $cm$ ) da esfera, e calcule o peso ( $dina$ ) e o volume ( $cm^3$ ). Monte uma tabela com os dados obtidos;
2. Meça na balança a massa da proveta seca,
3. Coloque 50 ml do líquido na proveta e meça a massa do conjunto. Com os dados obtidos, calcule a densidade do líquido;
4. Com a densidade do líquido obtida no *item (3)* Calcule empuxo,  $E$ , e a força de arrasto,  $F_D$ , sobre a esfera;
5. Posicione os sensores  $S_0$  (sensor mais alto) e  $S_1$  (sensor mais baixo) distanciados, inicialmente,  $100,0\ mm$  um do outro, como mostrado na figura 1. O sensor mais baixo deve ser colocado próximo ao final do tudo;
6. Prepare o cronômetro, definindo o uso de 2 sensores sem Inserir Distância;
7. Com o auxílio de um ímã ,abandone a esfera na maior altura possível, como mostra a figura 2, e cronometre o tempo para o deslocamento  $h_1 = y_0 - y_1 = 100,0\ mm$  no fluido. Repita o procedimento de queda da esfera por 3 vezes;
8. Repita os procedimentos dos *item (5)* ao *item (8)* posicionando os sensores para outras deslocamentos  $h_i$  mostrados baixo, movendo o sensor  $S_0$  e mantendo o sensor  $S_1$  na posição inicial:



Figura 1

0

$h_2 = 200,0 \text{ mm}$
$h_3 = 300,0 \text{ mm}$
$h_4 = 400,0 \text{ mm}$
$h_5 = 500,0 \text{ mm}$
$h_6 = 600,0 \text{ mm}$

*\*Observação:* Ao posicionar os sensores verifique se o furo do lado esquerdo do sensor esta totalmente coberto pela luz vermelha do sensor.



Figura 2: Lançamento da esfera

- Complete a tabela 01 com o tempo médio,  $\langle t \rangle$ , para cada uma das distâncias  $h$  percorridas pela esfera entre os sensores, e sua respectiva incerteza  $\delta t$ ;
- Faça um gráfico de  $h$  vs.  $\langle t \rangle$  em papel milimetrado e trace a curva que melhor se ajusta aos pontos;
- Encontre, a partir do gráfico, a velocidade limite (velocidade terminal) de queda da esfera;
- O que você pode concluir sobre o tipo de movimento ocorrido no interior do líquido?
- Com base na suas observações do item (13), existe um limite para a posição do sensor  $S_1$  no qual o tipo de movimento observado na experiência sofra alguma mudança?
- Calcule a viscosidade do líquido utilizando a expressão desenvolvida por Stokes para a força de arrasto.

**TABELA 01**

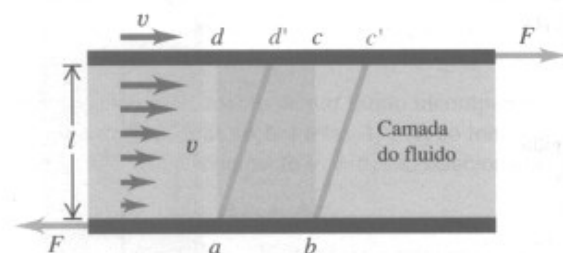
Medida	$h$ (mm)	$t_1$ (s)	$t_2$ (s)	$t_3$ (s)	$\langle t \rangle$ (s)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

### 3- Introdução Teórica:

A *viscosidade* é o atrito interno em um fluido. As forças viscosas se opõem ao movimento de uma parte do fluido em relação à outra. A viscosidade é a razão pela qual você realiza um esforço para remar em uma canoa se deslocando em águas calmas, porém se não existisse viscosidade você também não poderia remar. Os efeitos da viscosidade são importantes para o escoamento de fluidos através de tubos, para o escoamento do sangue, para a lubrificação de diversas partes das máquinas etc.

Um fluido viscoso tende a aderir sobre uma superfície sólida em contato com ele. Existe uma camada fina chamada *camada limite* do fluido nas proximidades da superfície ao longo da qual o fluido está praticamente em repouso em relação à superfície sólida.

O exemplo mais simples de um escoamento com viscosidade é fornecido pelo escoamento de um fluido entre duas placas paralelas conforme figura.



A placa inferior está fixa e a superior se move com velocidade  $v$ . O fluido em contato com a placa possui a mesma velocidade da respectiva placa. As velocidades de escoamento das camadas intermediárias do fluido aumentam uniformemente de uma placa para a outra conforme indicado pelas setas, de modo que as camadas se deslocam suavemente uma sobre as outras; o escoamento é *laminar*.

Uma porção do fluido que possui a forma  $abcd$  em um dado instante possuirá a forma  $abc'd'$  em outro instante e vai se tornando cada vez mais distorcida à medida que o movimento continua. Ou seja, o fluido sofre uma contínua *deformação de cisalhamento*. Sendo  $A$  a área da placa, a razão  $\frac{F}{A}$  é a *tensão de cisalhamento exercida sobre o fluido*.

A deformação de cisalhamento é definida como a razão entre o deslocamento  $dd'$  e o comprimento  $l$ . Em um sólido, a deformação de cisalhamento é proporcional à tensão de cisalhamento. Em um fluido a *deformação de cisalhamento cresce continuamente e sem limite* à medida que a tensão é aplicada. No líquido a deformação de cisalhamento não depende da tensão de cisalhamento mas, sim, da sua *taxa de variação*. A taxa de variação da deformação de cisalhamento, também chamada de *taxa de deformação*, é igual à taxa de variação de  $dd'$  (a velocidade  $v$  da superfície que se move) dividido por  $l$ , ou seja:

$$\text{Taxa de variação da deformação de cisalhamento} = \text{taxa de deformação} = \frac{v}{l} \quad (1)$$

Define-se a **viscosidade** do fluido, designada pela letra  $\eta$  (“eta”), como a razão entre a tensão de cisalhamento  $\frac{F}{A}$  e a taxa de deformação  $\frac{v}{l}$ , assim,

$$\eta = \frac{F/A}{v/l} = \frac{F \times l}{A \times v} \quad (2)$$

As viscosidades dos fluidos são fortemente dependentes da temperatura, aumentando para os gases e diminuindo para os líquidos à medida que a temperatura aumenta. A *redução* das variações da viscosidade com a temperatura é um objetivo importante no projeto de óleos para serem usados como lubrificantes de máquinas.



A unidade da viscosidade no *SI* é  $1 \text{ N m/m}^2 \cdot (\text{m/s}) = 1 \text{ N s/m}^2 = 1 \text{ Pa s}$ . A unidade *cgs* equivalente,  $1 \text{ dyn s/cm}^2$  é a única unidade de viscosidade de uso comum; ela é chamada de **poise**, em homenagem ao cientista francês Jean Louis Marie Poiseuille:

$$1 \text{ poise} = 1 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1} = 1 \text{ dyn s/cm}^2 = 10^{-1} \text{ N s/m}^2$$

$$1 \text{ cp} = 10^{-2} \text{ poise} = 1 \text{ mPa s} \quad (10^{-3} \text{ Pa s})(\text{MKS})$$

## O Viscosímetro de Stokes:

### Resistência de um fluido e velocidade terminal:

Um corpo que se move em um fluido exerce uma força sobre o fluido para afasta-lo do seu caminho. Pela terceira lei de Newton, o fluido exerce sobre o corpo uma força igual e contrária.

Se você colocar a mão para fora da janela de um carro que se move com alta velocidade, ficará convencido da existência **da resistência de um fluido** sobre um corpo que se move através dele.

A força da resistência de um fluido possui *direção e sentido* sempre contrários aos da velocidade do corpo em relação ao fluido. O *módulo* da força da resistência de um fluido normalmente cresce com a velocidade do corpo através do fluido.

Issac Newton desenvolveu a equação geral para a força resistente (**força de arrasto**), que deve atuar sobre uma esfera que se move através de um gás, enquanto investigava o movimento de uma bala de canhão..

Newton estabeleceu teoricamente que a esfera deve empurrar um volume de gás igual a área projetada da esfera multiplicada pela sua velocidade. A equação geral de Newton para a força resistente, é

$$F_D = C_D \frac{\pi}{8} \rho_{\text{liquido}} D^2 v^2 \quad (3)$$

onde:

$F_D$  = força de arrasto sobre a esfera

$C_D$  = coeficiente de arrasto

$D$  = diâmetro da esfera

$v$  = velocidade relativa entre a esfera e o líquido

Osborne Reynolds, um cientista irlandês que estudou especialmente mecânica dos fluidos entre outras coisas, relacionou o coeficiente de arrasto  $C_D$  com o número de Reynolds ( $Re$ ) que é uma constante:

$$Re = \frac{vD}{\nu}, \quad C_D = \frac{24}{Re} \quad \text{ou} \quad C_D = \frac{24\nu}{Dv} \quad (4)$$

onde:

$Re$  é um parâmetro adimensional

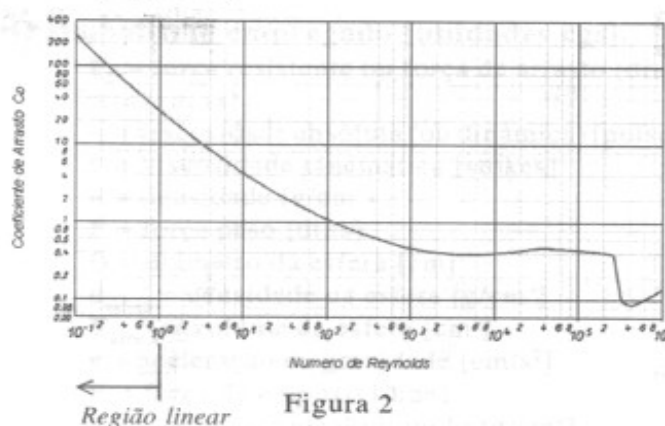
$D$  = diâmetro da esfera

$v$  = velocidade relativa entre a esfera e o líquido

$\nu$  = viscosidade cinemática em Stokes      $Stokes(St) = cm^2 \cdot s^{-1}$

Pode-se observar uma região de linearidade entre o coeficiente de arrasto e o número de Reynolds para  $Re < 1$ , veja figura 2.

Para a esfera esta função é mostrada no gráfico abaixo (Figura 2).



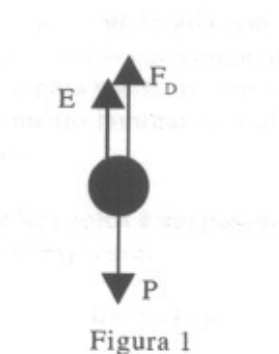
George Gabriel Stokes, físico e matemático irlandês, particularizou para  $Re < 1$  a expressão geral de Newton substituindo  $C_D$  na expressão para a força de arrasto:

$$F_D = 3 \pi \rho_{\text{liquido}} \nu D v \quad (\text{Força de arrasto de Stokes}) \quad (5)$$

A viscosidade absoluta  $\eta$  (viscosidade dinâmica) é a viscosidade relacionada à densidade  $\eta = \nu \times \rho$ .

Quando uma esfera se move verticalmente, com velocidade constante, no interior de um fluido viscoso em repouso, as seguintes forças atuam na esfera - Figura 1.

- $P$  = força peso da esfera
- $E$  = força de empuxo
- $F_D$  = força resistente ( força de arrasto)



onde

$$P = F_D + E \quad (6)$$

A força resistente  $F_D$  pode ser determinada e conseqüentemente o coeficiente de viscosidade cinemática do líquido pode ser obtido pela expressão da força de arrasto de Stokes eq. (6). É possível utilizar a equação de Stocks quando o valor assumido pelo número de Reynolds  $Re$  for menor que 1, isto é  $Re < 1$ . Para determinarmos a  $F_D$  precisamos do peso e do empuxo. Preste atenção para que as unidades utilizadas estejam no sistema cgs.

