

## Experimento 6

### VISCOSIDADE: LEI DE STOKES

#### 1. Introdução:

O movimento de um corpo em um meio viscoso é influenciado pela ação de uma força viscosa,  $F_v$ , proporcional à velocidade,  $v$ , conhecida como lei de Stokes. No caso de esferas em velocidades baixas,  $F_v = 6\pi\eta rv$ , onde  $r$  o raio da esfera e  $\eta$  o coeficiente de viscosidade do meio. Se uma esfera de densidade maior que a de um líquido for solta na superfície do mesmo, no instante inicial a velocidade é zero, mas a força resultante acelera a esfera de forma que sua velocidade vai aumentando. Pode-se verificar que a velocidade aumenta não-uniformemente com o tempo e atinge um valor limite, que ocorre quando a força resultante for nula. As três forças que atuam sobre a esfera estão representadas na Fig. 1 e são, além da força viscosa, o peso da esfera,  $P$ , e o empuxo,  $E$ . Igualando a resultante dessas três forças a zero, obtém-se a velocidade limite,  $v_L$ :

$$v_L = (2/9) [(\rho - \rho')/\eta] g r^2 \quad (1)$$

onde  $\rho$  e  $\rho'$  são as densidades da esfera e do meio, respectivamente, e  $g$  é a aceleração da gravidade.

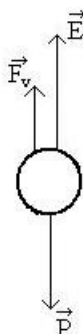


Figura 1. Forças que atuam numa esfera num meio viscoso.

#### 2. Objetivos

O objetivo deste experimento é investigar o movimento de uma esfera em um meio viscoso (glicerina com água), e determinar a viscosidade da mistura e o percentual de água na glicerina.

Será empregado um tubo de vidro com uma escala graduada, na posição vertical, contendo a mistura (Fig. 2). A velocidade limite, entretanto, não é exatamente dada pela Eq. (1), pois as paredes do tubo afetam o movimento da esfera. Para levar em conta este efeito, considera-se a correção de Ladenburg que depende do raio da esfera, do raio do tubo e da sua altura. Assim a força viscosa no tubo, em realidade, deve ser escrita por  $F_v = K(6\pi\eta rv)$ , onde  $K$  é o fator de Ladenburg:  $K = (1+2,4r/A)(1+3,3r/H)$ , onde  $A$  e  $H$  são respectivamente o raio do tubo e a altura total do fluido no tubo. Portanto, temos que multiplicar a velocidade da esfera no tubo,  $v'_L$ , por  $K$ , para se obter a velocidade conforme dada pela Eq. (1). Ou seja,

$$v_L = K v'_L = (2/9) [(\rho - \rho')/\eta] g r^2 \quad (2)$$

### 3. Material usado

Tubo de vidro com glicerina, suporte com marcas graduadas, conjunto de esferas, paquímetro, micrômetro, cronômetro e termômetro de mercúrio.

### 4. Procedimento e tratamento de dados

O arranjo experimental deve ser montado conforme mostra a Fig. 2. A velocidade limite,  $v'_L$ , será determinada experimentalmente a partir da distância,  $L$ , entre as marcas ajustáveis, medida com uma régua, e o tempo de percurso,  $t$ , entre as marcas, medido com um cronômetro. Serão utilizadas esferas de aço com diâmetro variando de 1 a 6mm. A densidade do aço é  $\rho = 7.82 \text{ g/cm}^3$  e a da mistura água-glicerina no tubo é  $\rho' = 1.2 \text{ g/cm}^3$

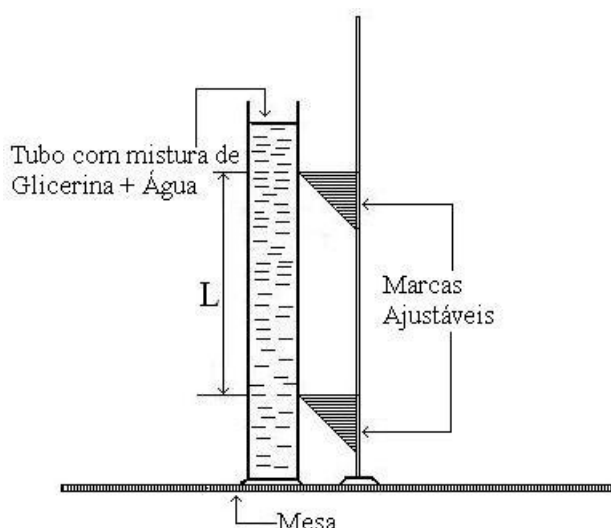


Figura 2. Arranjo experimental.

Antes de iniciar o experimento, faça um cálculo do fator de correção de Ladenburg para cada esfera, colocando os resultados numa tabela que deverá conter também colunas para o tempo de percurso,  $t$ , a velocidade medida,  $v'_L$ , e a velocidade corrigida,  $v_L$ .

Preencha a tabela à medida que seu experimento vai sendo executado e a seguir lance em gráfico  $v'_L \times r^2$ . Neste mesmo gráfico lance também  $v_L \times r^2$ . Obtenha a partir do gráfico apropriado o coeficiente de viscosidade e seu erro.

Determinando a temperatura do líquido e consultando o gráfico em anexo (Fig. 3), estime a concentração de água na glicerina.

#### Principais cuidados:

- (i). É importante estimar o espaço necessário para atingir a velocidade limite, a partir da superfície da glicerina antes de posicionar os marcadores.
- (ii). Faça repetidas medidas de tempo de queda das esferas para diminuir o erro, principalmente para as esferas maiores.
- (iii). Retire cada esfera depois de cada medida.

(iv). Não jogue as esferas mas coloque-as na superfície do líquido usando uma pinça para minimizar sua velocidade inicial.

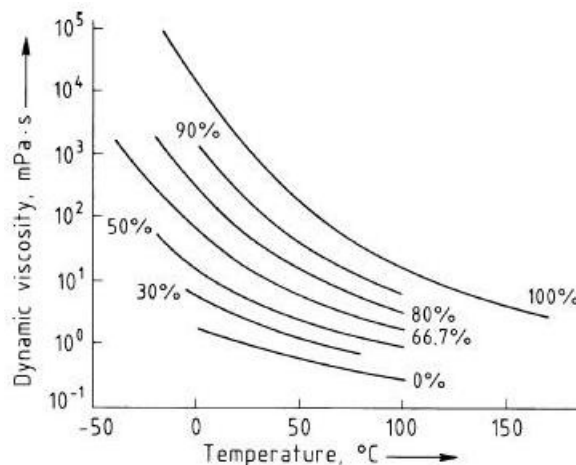


Figura 3. Viscosidade da mistura glicerina-água. As concentrações são dadas em percentual de massa de glicerina. (Gráfico reproduzido da Ref. 5).

## BIBLIOGRAFIA

1. M. Alonso e E.J. Finn, *Física - Um Curso Universitário*, Vol. 1, Mecânica, Editora Edgar Blücher Ltda., 1972, cap. 7.10.
  2. *Methods of Experimental Physics*, Vol. 1, Classical Methods, cap. 4.1 e 4.2.2.2 e figura 7, p. 149. (Biblioteca IFGW #530.078.M566).
  3. *Thermophysical Properties of Matter*, Vol. 11, Viscosity, p. 149 e cap. 4.2. (Biblioteca IFGW #R536.021).
  4. *Handbook of Chemistry and Physics*. (Biblioteca IFGW #R540.2.C841), densidades (pp. 15-43 até 15-50), viscosidades (p. 6-158).
  5. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Vol. A12, p. 479. (Biblioteca do IQ, Unicamp # R660 ULM5 IQ/10.183 V.A12).
- Leitura complementar:* C.W. Peterson, The Physics of Parachute Inflation, *Physics Today*, agosto de 1993, pp. 32-39.