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. No caso de esferas, assumindo velocidades baixas e um fluido homogêneo e infinito em todas as direções, chega-se a uma força de atrito dada pela lei de Stokes: $F_V = 6\pi\eta r v$, onde r é o raio da esfera e η 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:

$$v_L = \frac{2}{9}\frac{\rho - \rho'}{\eta} g r^2,$$

onde ρ e ρ' são as densidades da esfera e a densidade do meio, respectivamente, e g é a aceleração da gravidade. A figura abaixo mostra esquematizado as forças que atuam na esfera de aço durante um dado momento de sua trajetória ao longo do tubo de vidro contendo mistura de glicerina e água:

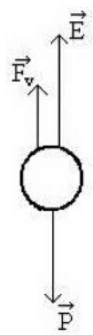

Figura 1: Forças que atuam numa esfera num meio viscoso.

No experimento dado, como as paredes do tubo de vidro são finitas, logo elas exerceram algum efeito sobre a esfera de aço, alterando a sua velocidade limite, fazendo com que ela não seja exatamente a velocidade da equação v_L dada, então a equação com a correção dessa nova situação é dada da seguinte forma:

$$k \cdot v_L' = \frac{2}{9}\frac{\rho - \rho'}{\eta} g r^2,$$

onde

$$k = (1 + 2,4 \cdot \frac{r}{R})(1 + 3,3 \cdot \frac{r}{H})$$

é decorrente do efeito de Ladenburgh, sendo R e H, respectivamente, o raio do tubo e a altura total do fluído no tubo. Portanto, temos que multiplicar a velocidade limite da esfera no tubo, v_L', por k, para se obter a velocidade limite prevista pela equação de v_L.

2. **Materiais necessários**

   - Tubo de vidro com mistura de glicerina e água
   - Suporte com marcas graduadas
   - Conjunto de esferas
   - Trena
   - Paquímetro
   - Micrômetro
   - Cronômetro
   - Termômetro de Aço

3. **Objetivos do Experimento**

   - Investigar o movimento de uma esfera de aço em um meio viscoso (mistura de água e glicerina);
   - Determinar a viscosidade da mistura
   - Determinar o percentual de água na glicerina

4. **A equação linearizada**

   A equação $v'_L = \frac{2}{9}\frac{\rho - \rho'}{\eta} g \cdot \frac{r^2}{k}$ pode ser linearizada tomando a seguinte relação:

$$v'_L \longrightarrow y;$$
$$\frac{2}{9}\frac{\rho - \rho'}{\eta} g \longrightarrow a$$
$$\frac{r^2}{k} \longrightarrow x$$

   que representa uma equação de uma reta do tipo $y = a \cdot x$, teoricamente centrada na origem.

5. **Procedimentos para Realização do Experimento**

   O primeiro passo é medir o diâmetro de cada uma das esferas com o micrômetro. Para determinar a velocidade limite, nós faremos alguns lançamentos preliminares para determinar uma altura que possa conter o percurso com velocidade constante da esfera afundando na glicerina. Essa altura será medida com uma trena.

   Depois disso, cada membro do grupo fará respectivos lançamentos com cada esfera (de 2 - 3 lançamentos por pessoa por esfera), sempre no centro do tubo – para evitar variações na constante k. Um termômetro também precisa estar alocado dentro do tubo, para auxiliar nos resultados finais, que precisam da temperatura do conjunto – assumida constante. Em cada lançamento, o tempo de queda será aferido por um cronômetro digital e, dada a altura e o intervalo de tempo, calcularemos a velocidade limite (que é constante) com $v = \frac{\Delta h}{\Delta t}$.

   Essa mesma velocidade também será comparada utilizando o *software* Tracker, a partir de filmagens do experimento, feitas com um celular de um dos membros do grupo. Dados os valores das densidades das esferas de aço e do líquido, bem como o da gravidade, podemos escrever a equação linearizada que é algo da forma *velocidade terminal em função do raio da esfera* – claro, conhecidos os valores dos raios e suas incertezas. Um plot gráfico também será feito para melhor análise.

Feita a regressão linear, poderemos calcular o valor da viscosidade (que está ligado ao coeficiente angular da reta ajustada) e, conhecidos agora tanto a viscosidade quanto a temperatura, poderemos descobrir qual a concentração de água na nossa glicerina, utilizando o gráfico abaixo, que foi retirado da ref. 5 do roteiro.

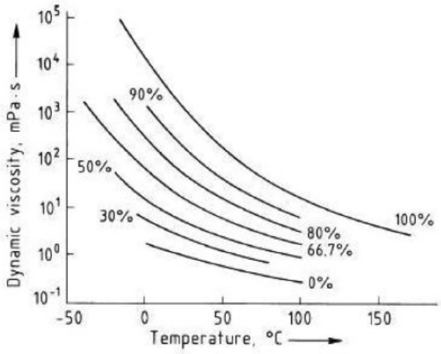

Figura 2: Viscosidade da mistura glicerina-água. As concentrações são dadas em percentual de massa de glicerina.

Na falta de uma curva que corresponda adequadamente ao resultado encontrado, mesmo se considerarmos a incerteza do termômetro, podemos supor uma curva intermediária, com um comportamento semelhante ao de suas vizinhas, naquela região. Daí, poderemos tirar o resultado da concentração. Alguns cuidados devem ser tomados para a execução do experimento:

- É recomendado soltar as esferas com velocidade inicial nula (da mesma altura do tubo);
- É importante que se tome cuidado com a separação natural da água e da glicerina, que ocorrerá ao longo do tempo do experimento. Nesse caso, o sistema deixará de ser homogêneo e uma camada de água se formará no topo do tubo. Basta soltar a esfera abaixo dessa camada;
- Mais importante: jamais soltar duas bolinhas dentro do tubo. É necessário retirar uma antes de jogar a outra, porque elas podem entupir a válvula e impossibilitar que sejam ambas removidas;
- Cuidar para manter sempre o lançamento do centro e da mesma altura, para não modificar o valor da constante do efeito de Ladenburgh.