

Laboratório de Engenharia Química I

Aula Prática 02

Determinação do coeficiente de viscosidade em líquidos – Método de Stokes

Prof. Dr. Gilberto Garcia Cortez

Introdução

A viscosidade dinâmica (ou absoluta) ou simplesmente viscosidade é o coeficiente de atrito interno entre várias camadas de um fluido em movimento relativo.

A reologia é o ramo da mecânica dos fluidos que estuda as propriedades físicas que influenciam o transporte de quantidade de movimento num fluido. É o ramo da física que estuda a viscosidade, plasticidade, elasticidade e o escoamento da matéria.

O aparecimento das tensões num fluido pode ser explicado através da sua viscosidade. A viscosidade é a propriedade reológica mais conhecida, e a única que caracteriza os fluidos newtonianos.

Objetivos

- Estudar o movimento de uma esfera em um meio viscoso. Verificação da lei de Stokes.
- Determinar experimentalmente o coeficiente de viscosidade de um fluido newtoniano utilizando o método de Stokes.

Viscosidade de um fluido:

→ É a propriedade pela qual um fluido oferece resistência ao corte, ou seja, exprime a resistência oposta pelas camadas do fluido ao escoamento relativo entre si ou relativo à parede sólida, quando submetido à ação de uma força cisalhante externa, ou;

→ É a medida da resistência do fluido à fluência quando sobre ele atua uma força exterior como por exemplo um diferencial de pressão ou gravidade;

A viscosidade mede a resistência de um líquido em fluir (escoar) e não está diretamente relacionada com a densidade do líquido, que é a relação massa/volume. Por exemplo, o óleo de soja utilizado para cozinhar é mais viscoso do que a água, embora seja menos denso.

A maioria dos líquidos viscosos fluem facilmente quando as suas temperaturas aumentam; o comportamento de um fluido quando varia a temperatura, pressão ou tensão depende do tipo de fluido.

Unidades para as grandezas relacionadas

Grandeza	SI	CGS	Britânico
μ	$\text{N.s/m}^2 = \text{Pa.s}$	$\text{g/cm.s} = \text{poise}$	lb/ft.s
ν	m^2/s	$\text{cm}^2/\text{s} = \text{stokes}$	ft^2/s

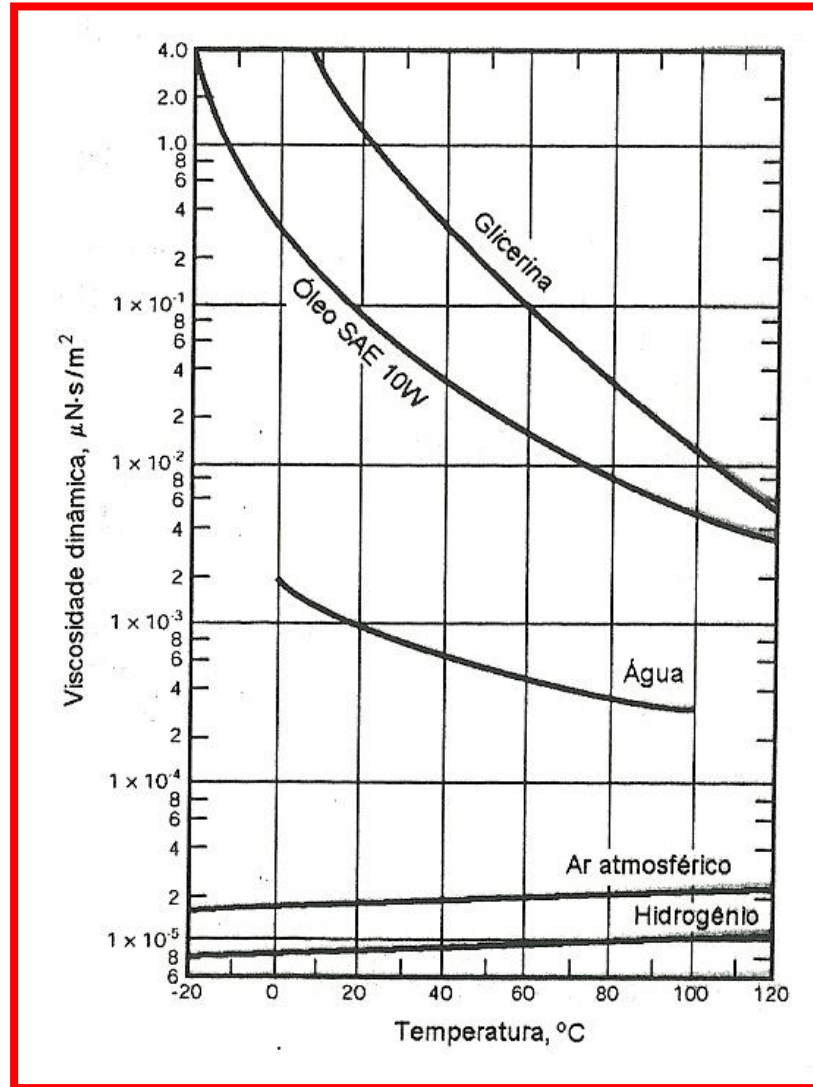
Nota para unidades da viscosidade:

A abreviação para “centipoise” é cP.

$1,0 \text{ cP} = 10^{-2} \text{ poise (g/cm.s)} = 10^{-3} \text{ kg/m.s.}$

$1,0 \text{ stokes (St)} = 1 \text{ cm}^2/\text{s. } 1,0 \text{ centistokes (cSt)} = 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$

Influência da temperatura na viscosidade dinâmica:



Viscosidade dinâmica ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$) versus temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Determinação experimental de propriedades reológicas

Viscosidade:

- Determinação simultânea da tensão de cisalhamento e da taxa de deformação num mesmo ponto do aparelho de medição
- Há viscosímetros: rotacionais e capilares.

Classificados em dois grupos: primários e secundários

Primários

- Instrumentos que realizam medidas diretas da tensão e da taxa de deformação do fluido, $\mu = \text{tensão de cisalhamento/taxa de deformação}$;
- Viscosímetros tipo rotacional: De placas paralelas, de cone-disco, de cilindro concêntricos e misturador;
- Todos eles visando a reprodução do escoamento entre placas planas paralelas.
- Podem ser aplicados para ensaios tanto de fluidos Newtonianos como de fluidos com comportamento tensão versus deformação não-linear e/ou viscoelásticos.

Esquema de viscosímetros primários

μ = viscosidade;

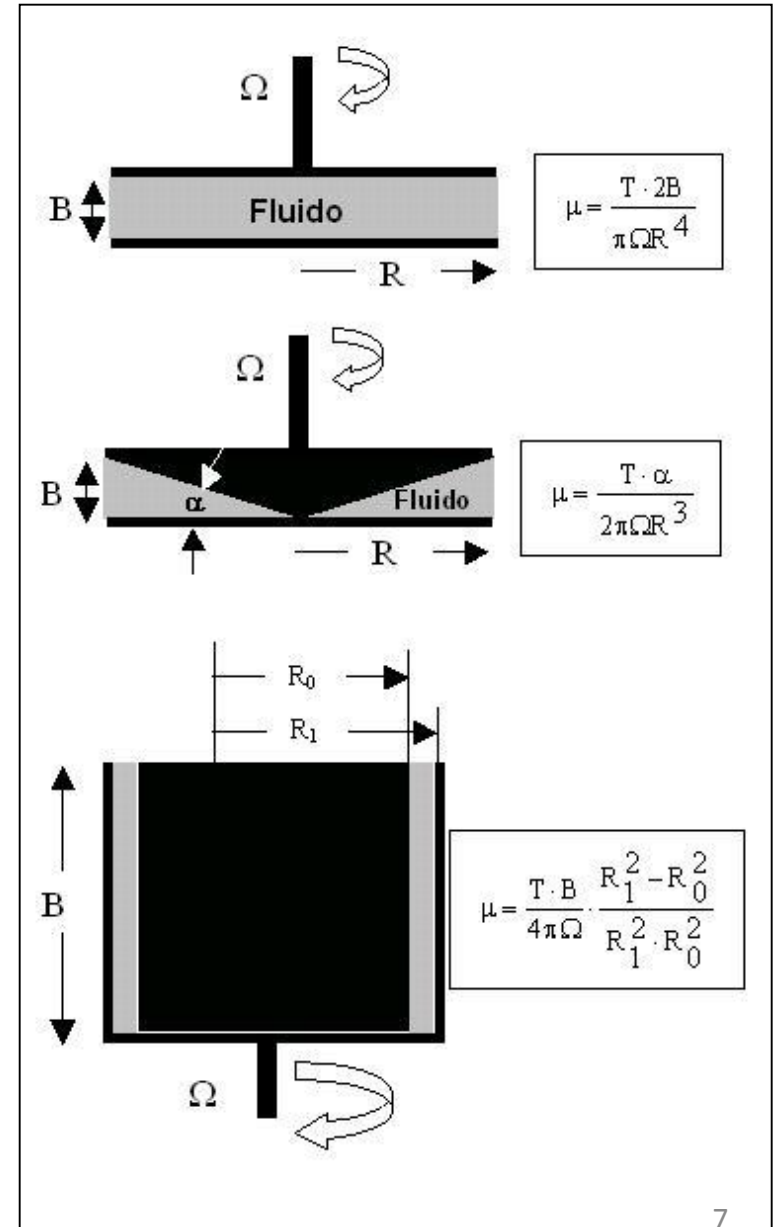
Ω = velocidade angular aplicada

α = ângulo do cone

R = raio

B = distância;

T = torque medido, que resulta da tensão oriunda da deformação do fluido.



Viscosímetro primário de Brookfield

■ Mede-se o torque necessário para manter uma determinada velocidade de rotação. A análise da taxa de deformação neste tipo de geometria é bastante complexa sendo, portanto difícil utilizar esse equipamento para análise de fluidos não-newtonianos.



"spindles" cada um apropriado para medir a viscosidade de fluidos em uma faixa específica:

- Os de menor diâmetro, as maiores viscosidades;
- Os de maior diâmetro, as menores viscosidades.

Secundários

- O viscosímetro secundário não medem a tensão e a taxa de deformação diretamente.
- Aplicam-se somente a fluidos Newtonianos, por medirem a viscosidade indiretamente.
- Ex.: Viscosímetro de tubo capilar (tipo tubular), viscosímetro de Stokes e Copo Ford.

Viscosímetro de tubo capilar

Não se usam para medir características de fluidos não-newtonianos porque a força motriz (a pressão hidrostática) varia durante a descarga, e isso afeta a taxa de deformação.

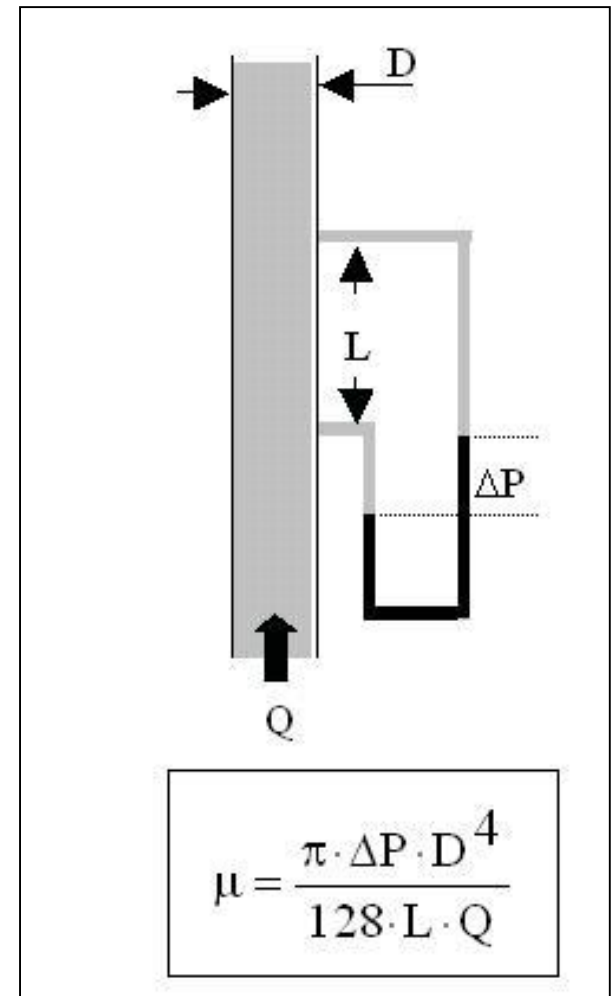
A viscosidade é obtida por meio da medida do gradiente de pressão de um escoamento laminar em um tubo.

Q = vazão volumétrica

L = distância entre as tomadas de pressão

ΔP = diferença de pressão

D = diâmetro do tubo capilar



Viscosímetro de tubo capilar tipo Cannon-Fenske



Viscosímetro de Cannon-Fenske

O fluido a ser analisado é colocado no reservatório superior com tubo de diâmetro maior, com um volume conhecido, a partir do qual ele é descarregado através de um tubo capilar como resultado da força motriz (gravidade). É realizada uma sucção no tubo de menor diâmetro de modo que o fluido suba. Retira-se a sucção e o fluido passa a escoar lentamente por gravidade cruzando uma marca. Entre as duas marcas é medido o tempo de escoamento que normalmente está entre 5 e 10 minutos.

A viscosidade é obtida pela expressão:

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\rho_1 \cdot t_1}{\rho_2 \cdot t_2}$$

onde:

μ_1 é a viscosidade do líquido em teste

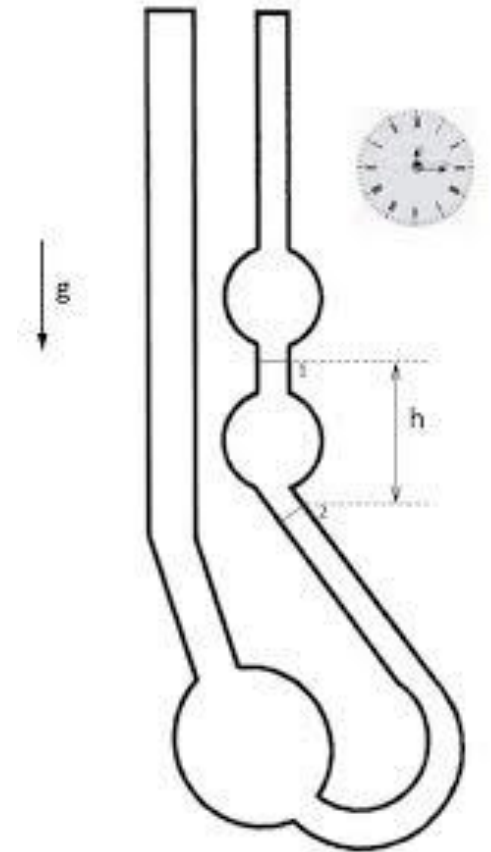
μ_2 é a viscosidade do líquido referência (ex. água)

ρ_1 é a densidade do líquido em teste

ρ_2 é a densidade do líquido referência (ex. água)

t_1 é o tempo de escoamento do líquido em teste

t_2 é o tempo de escoamento do líquido referência (ex. água)



Viscosímetro Copo Ford

■ O Copo Ford é um viscosímetro de fácil manuseio, no qual a viscosidade está relacionada com o tempo de esvaziamento de um copo de volume conhecido que tem um orifício calibrado na sua base.

■ O Copo Ford possui um conjunto de orifícios-padrão (giglê) feitos de bronze polido que dependem da faixa de viscosidade e tempo de escoamento;

■ Equação: Depende do tempo de esvaziamento e do orifício utilizado (giglê);

■ A viscosidade do fluido a ser analisado deverá estar na temperatura de $25,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$.





Copo Ford	Equação v (cSt) e t (s)
Copo Ford 1	$v = 0,49(t - 35)$
Copo Ford 2	$v = 1,44(t - 18)$
Copo Ford 3	$v = 2,31(t - 6,58)$
Copo Ford 4	$v = 3,85(t - 4,49)$
Copo Ford 5	$v = 12,1(t - 2,0)$

Copo Ford (número do orifício)	Faixa de viscosidade (centi stokes)	Tempo de efluxo (tempo de escoamento em segundos)
1 (Ø = 1,90 mm)	10 a 35	55 - 100
2 (Ø = 2,53 mm)	25 a 120	40 - 100
3 (Ø = 3,40 mm)	49 a 220	20 - 100
4 (Ø = 4,12 mm)	70 a 370	20 - 100
5 (Ø = 5,20 mm)	200 a 1200	20 - 100

Viscosímetro de Stokes

A viscosidade é obtida através de medições do tempo de queda livre de uma esfera através de um fluido estacionário.

g = aceleração da gravidade

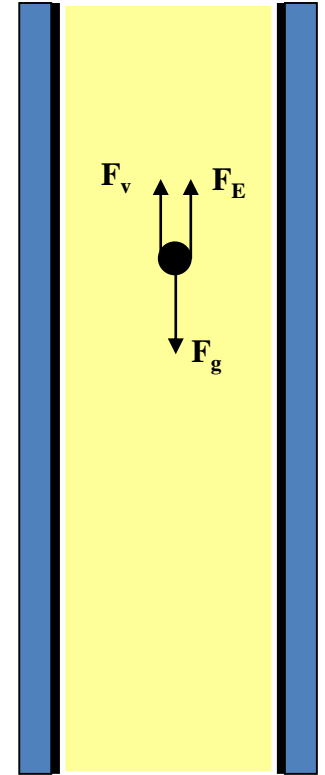
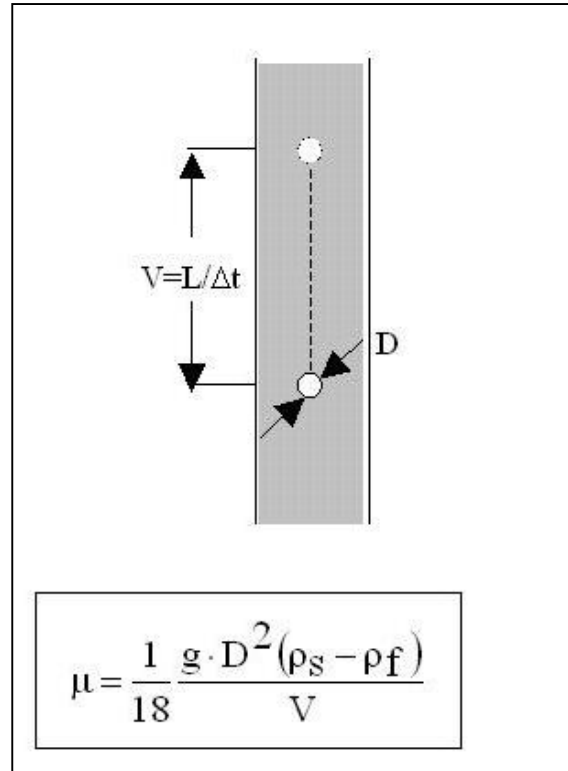
D = diâmetro da esfera

ρ_s = densidade da esfera

ρ_f = densidade do fluido

V = velocidade terminal de queda livre, isto é, a razão entre a distância L e o intervalo de tempo Δt .

* Esta relação aplica-se somente para esferas em queda livre em meio infinito, com Reynolds menores do que 1.



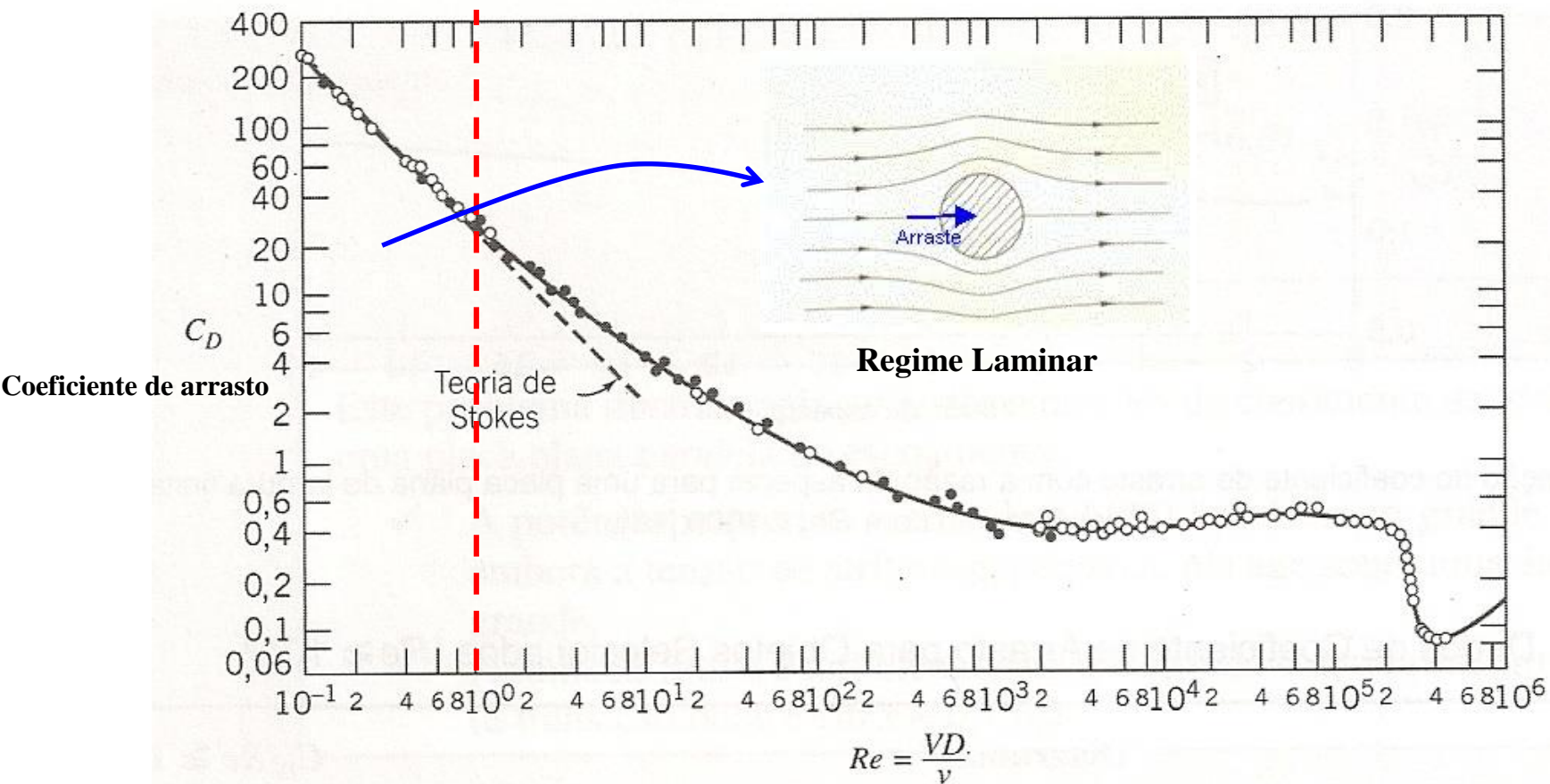
Lei de Stokes

Quando um corpo se movimenta no interior de um fluido existem também forças de atrito entre eles que tendem a reduzir a velocidade do corpo. Esta resistência depende da velocidade relativa entre o corpo e o fluido de forma que para velocidades relativas baixas (condição associada ao regime de resistência de viscosidade ou regime de Stokes) a resistência do fluido ou força de arrasto (F_D) é proporcional à viscosidade do fluido (μ) e à velocidade relativa (v):

$$F_D \propto \mu \cdot v$$

Stokes mostrou analiticamente que escoamentos com número de Reynolds muito baixos, a força de arrasto sobre uma esfera de raio r , movendo-se com uma velocidade v através de um fluido de viscosidade μ , é dada por:

$$F_D = 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot v \cdot r \quad (1)$$



Para número de Reynolds muito baixos, $Re \leq 1,0$, não há separação do escoamento para uma esfera; a esteira é laminar e o arrasto é predominantemente arrasto de atrito, conforme foi demonstrado por Stokes.

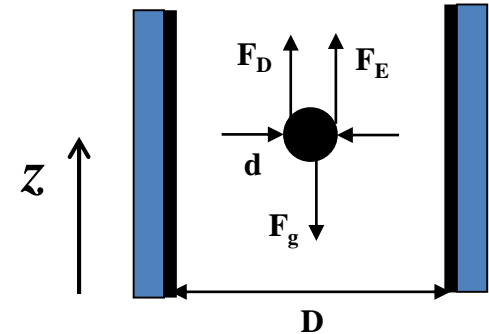
$$F_D = 6.\pi.\mu.v.r \quad (1)$$

Balanço de forças na esfera em movimento uniforme ($\vec{a} = 0$):

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$\sum \vec{F} = 0$$

$$\vec{F}_D + \vec{F}_E - \vec{F}_g = 0$$



Força Peso = Força Arrasto + Empuxo

Força Arrasto = Força Peso - Empuxo

$$F_D = F_g - F_E$$

$$6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot v_L \cdot r = V_{\text{esfera}} \cdot \rho_{\text{esfera}} \cdot g - \rho_{\text{fluido}} \cdot V_{\text{ES}} \cdot g$$

mas $V_{\text{esfera}} = V_{\text{ES}}$ (volume da esfera submersa)

$$6.\pi.\mu.V_L.r = \frac{4}{3}\pi.r^3.\rho_{\text{esfera}}.g - \frac{4}{3}\pi.r^3.\rho_{\text{fluido}}.g$$

$$6.\pi.\mu.V_L.r = \frac{4}{3}\pi.r^3.g(\rho_{\text{esfera}} - \rho_{\text{fluido}})$$

$$\mu = \frac{\frac{4}{3}\pi.r^3.g(\rho_{\text{esfera}} - \rho_{\text{fluido}})}{6.\pi.V_L.r} ; r = \frac{d}{2}$$

$$\mu = \frac{1}{18} \frac{(\rho_{\text{esfera}} - \rho_{\text{fluido}}).g.d^2}{V_L} \quad (1)$$

Foi assumido:

- **Velocidade pequena, regime laminar ($Re \leq 1$);**
- **Distância da parede infinita (efeito de parede);**
- **Distância do fundo infinita (efeito de borda);**
- **No interior do recipiente, a equação (1) deve ser corrigida, para dar conta da influência da parede do recipiente no movimento da esfera. Para um recipiente cilíndrico de diâmetro D , a velocidade limite média no meio infinito (V_C) é dado por:**

$$V_C = V_L \left(\underbrace{1 + X + X^2}_{FL} \right)$$

$$X = \frac{9}{4} \frac{d}{D} \quad ; \quad V_L = \frac{L}{t} \quad (\text{cm/s})$$

onde FL é conhecida como Fator de Ladenburg, válida para $d/D < 0,2$.

Procedimento Experimental

Passo 1: Determinar a densidade do detergente utilizando uma proveta graduada e uma balança digital;

Passo 2: Determinar a densidade das esferas a partir do diâmetro das três esferas utilizando um paquímetro e a massa de cada esfera com uma balança digital;

Passo 3: Determinar o diâmetro interno do tubo e com os valores dos diâmetros das esferas, determine o fator de Ladenburg quando $d/D < 0,2$;

Passo 4: Adicionar o detergente dentro do tubo do experimento de Stokes;

Passo 5: Ajustar o sensor mais baixo próximo do final do tubo e posicione os demais sensores distanciados 10 cm um do outro a partir do sensor mais baixo;

Passo 6: Faça o alinhamento dos sensores;

Passo 7: Um grupo de três alunos deverá adicionar as esferas de diferentes diâmetros e anotar o valor da velocidade de queda livre de cada uma;

Passo 8: Repete-se o experimento pelo menos quatro vezes para se obter uma média dos tempos obtidos;

Passo 9: Muda-se o grupo de alunos para a medição do tempo de queda livre para observar o erro cometido por cada grupo;

Passo 10: Após realizar as medidas dos tempos, os grupos deverão determinar a velocidade limite média de cada esfera;

Passo 11: Determinar a viscosidade do fluido utilizando a equação de Stokes.

Passo 12: Qual fluido o detergente se aproxima na literatura?

Procedimento Experimental

Determinação da densidade das esferas de aço:

Utilizar um paquímetro e uma balança

	Diâmetro (mm)	Massa (g)
Bolina Pequena	?	?
Bolinha Média	?	?
Bolinha Grande	?	?

Determinação da densidade do detergente:

Utilizar uma proveta graduada e um balança

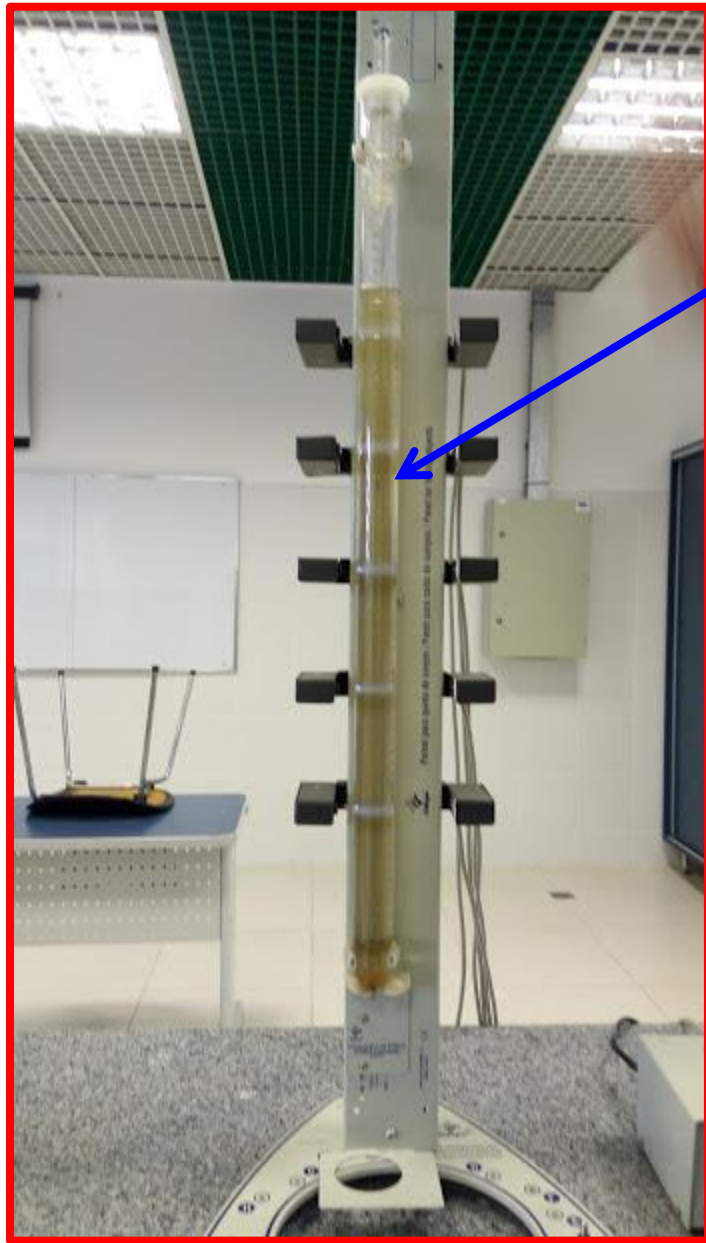


Arranjo Físico

Viscosímetro de Stokes

$$\mu = \frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_{\text{fluido}})g \cdot d^2}{V_L} \quad (\text{Poise})$$





Esfera

Esfera



Cálculos

Velocidade limite média ou velocidade de queda livre (V_L):

$$V_L = \frac{\Delta L}{\Delta t} \text{ (cm/s)}$$

Velocidade limite média no meio infinito (V_C) para $d/D < 0,2$:

$$V_C = V_L \left[1 + \frac{9d}{4D} + \frac{81}{16} \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]$$

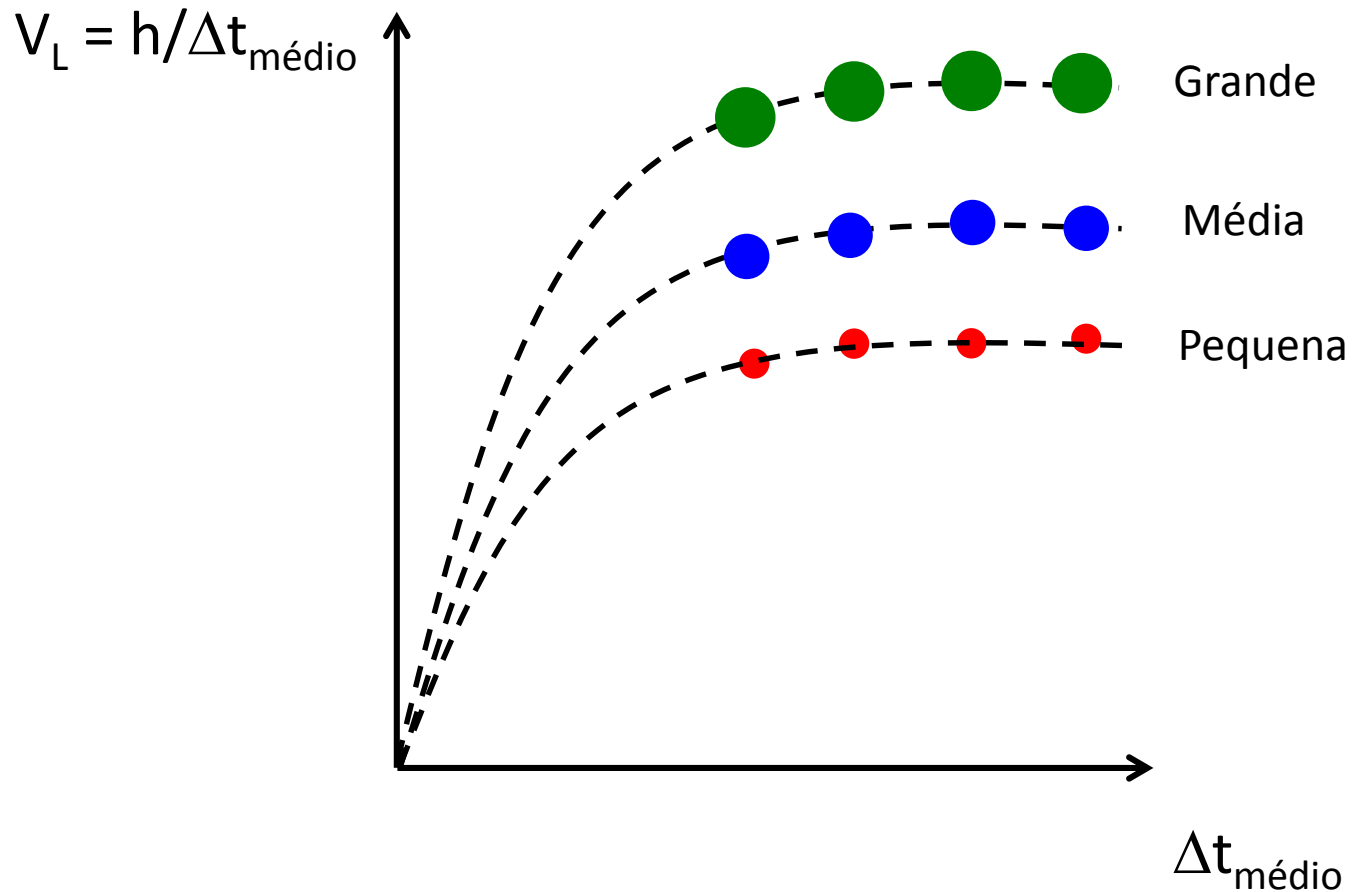
Cálculo do número de Reynolds:

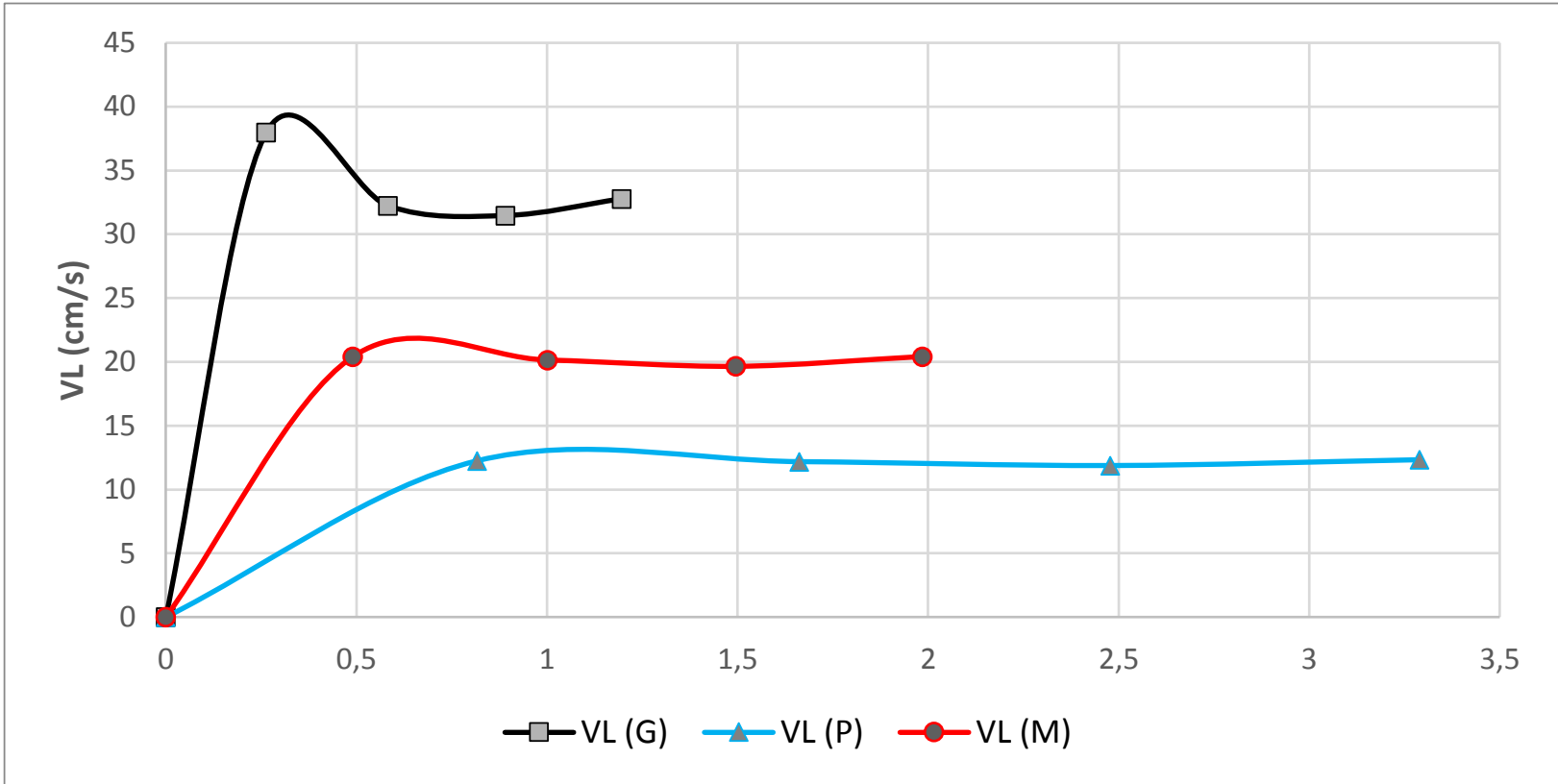
$$N_{Re} = \frac{\rho \cdot V_L \cdot d}{\mu}$$

Viscosidade do fluido:

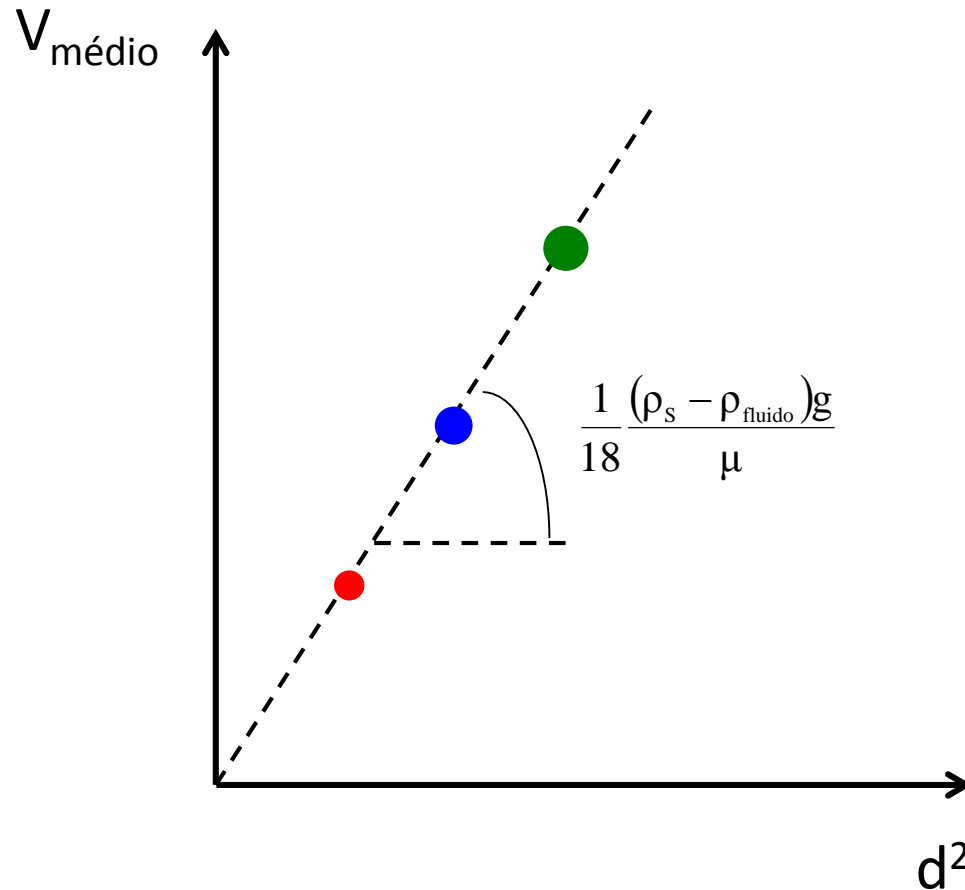
$$\mu = \frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_{\text{fluido}})g \cdot d^2}{V_L} \text{ (Poise)}$$

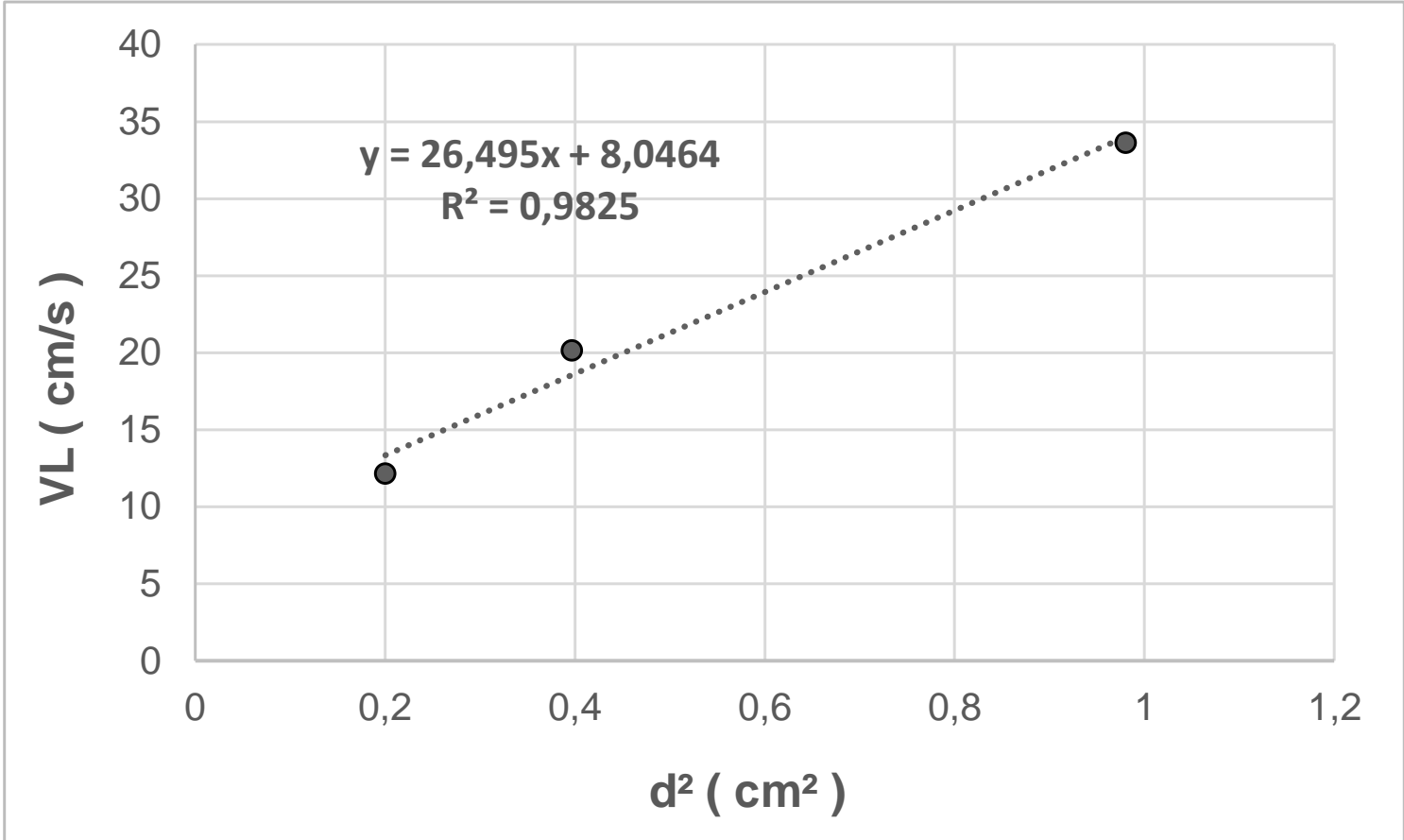
Construir os gráficos velocidade média (V_L) versus tempo de queda (Δt) para cada corpo de prova utilizado





Construir os gráficos velocidade média (V_L) versus diâmetro ao quadrado médio para o conjunto de esferas e determinar a viscosidade absoluta média.

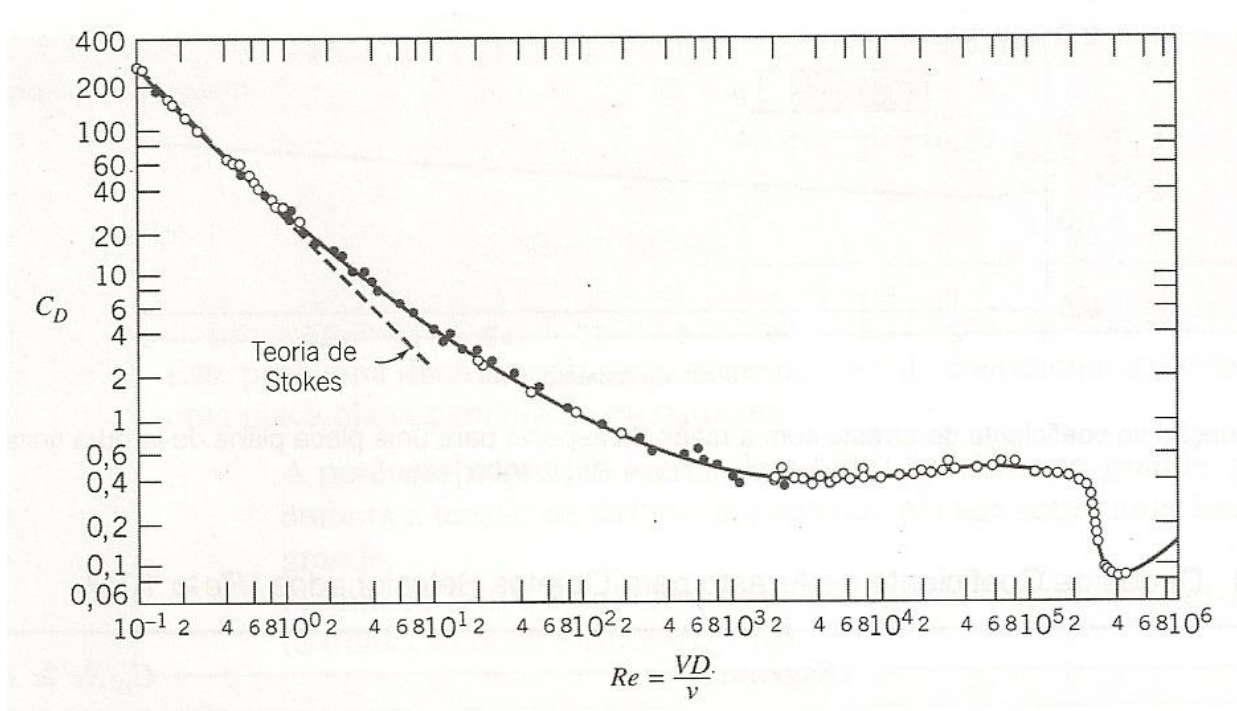




Com o valor do número de Reynolds para cada esfera, determinar o coeficiente de arrasto, C_D se o regime de escoamento for laminar;

$$N_{Re} = \frac{\rho_{\text{fluido}} \cdot V_L \cdot d_{\text{esfera}}}{\mu_{\text{fluido}}} \leq 1,0 \quad (\text{Lei de Stokes})$$

$$C_D = \frac{24}{R_e} \quad (\text{coeficiente de arrasto})$$



Com o valor da viscosidade absoluta média do detergente, encontre na figura em anexo, o fluido que mais se aproxima da viscosidade do detergente na mesma temperatura.

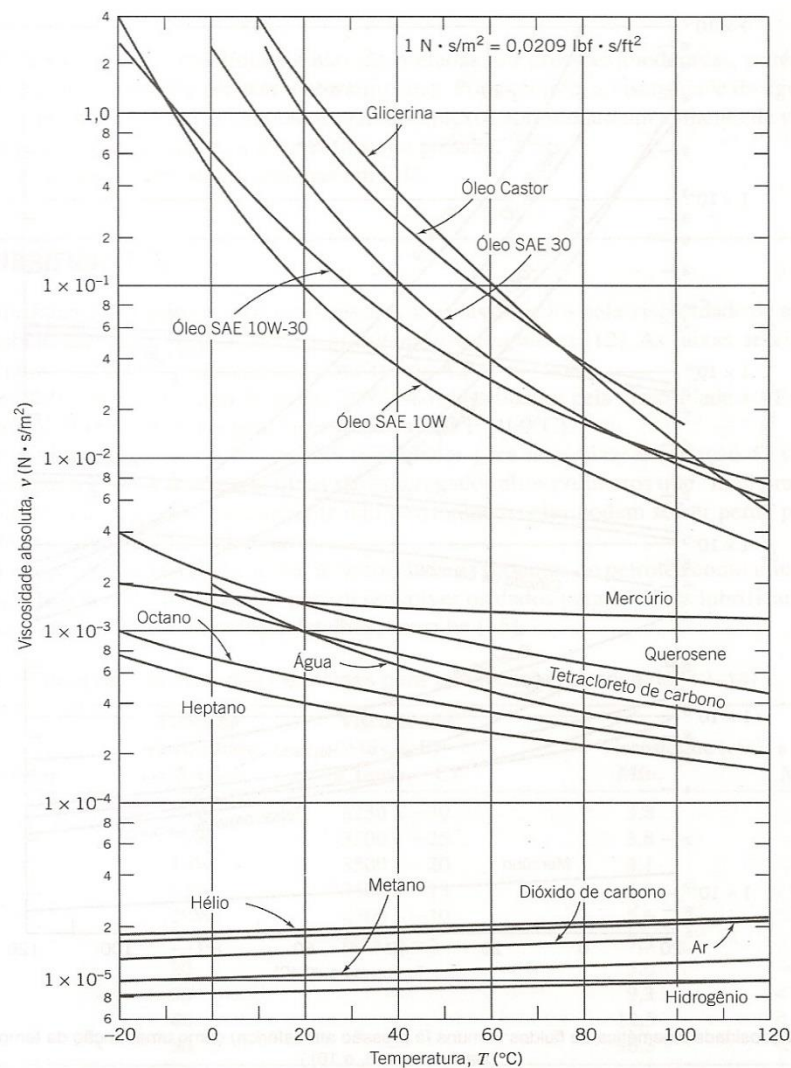


Fig. A.2 Viscosidade dinâmica (absoluta) de fluidos comuns como uma função da temperatura. (Dados de [1, 6, e 10].)