

3. REÔMETRIA



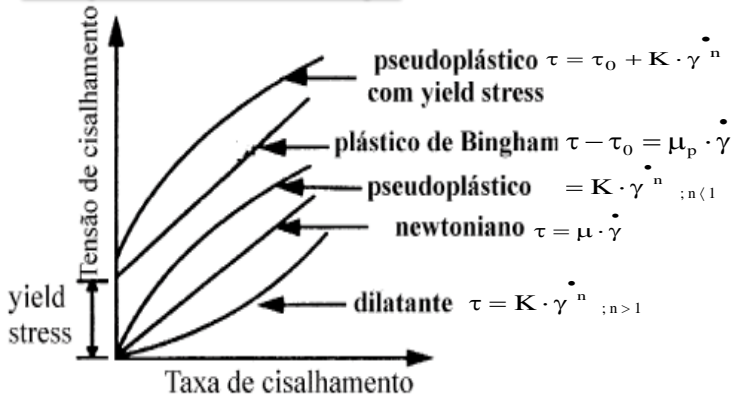
Peterhof – São Petersburgo - RU

REOMETRIA

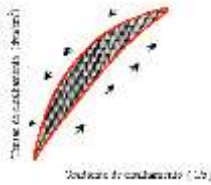
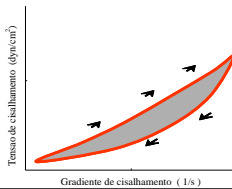
Conteúdo

- Definição
- Erros inerentes ao uso de viscosímetros pontuais
- Viscosímetros capilares
- Reômetros rotacionais
- Materiais Viscoelásticos
- Caracterização do comportamento viscoelástico
- Bibliografia

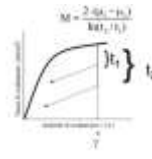
Independentes do tempo



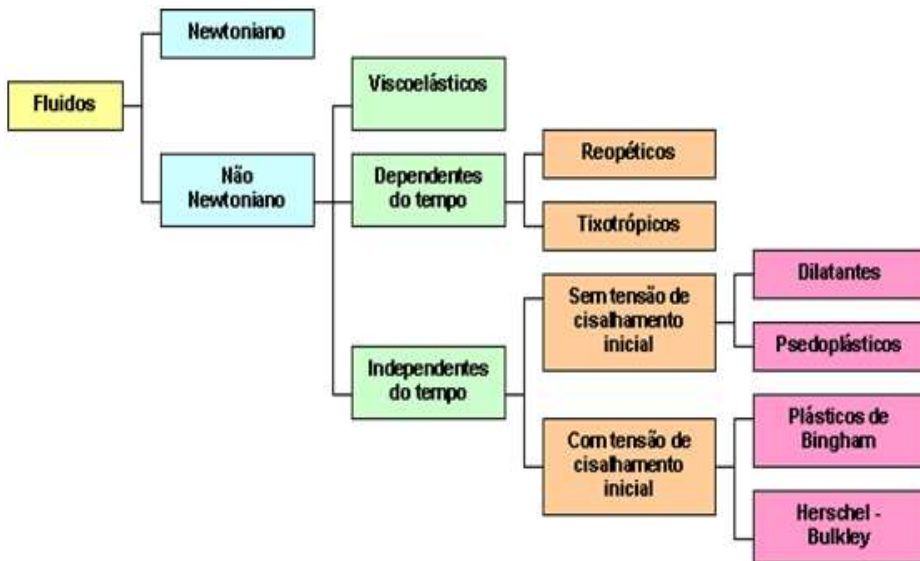
Dependentes do tempo



A, B (def. crescente) e **M** (Def. Constante)



Classificação dos fluidos segundo seu comportamento reológico



REOMETRIA: Medida de parâmetros reológicos.

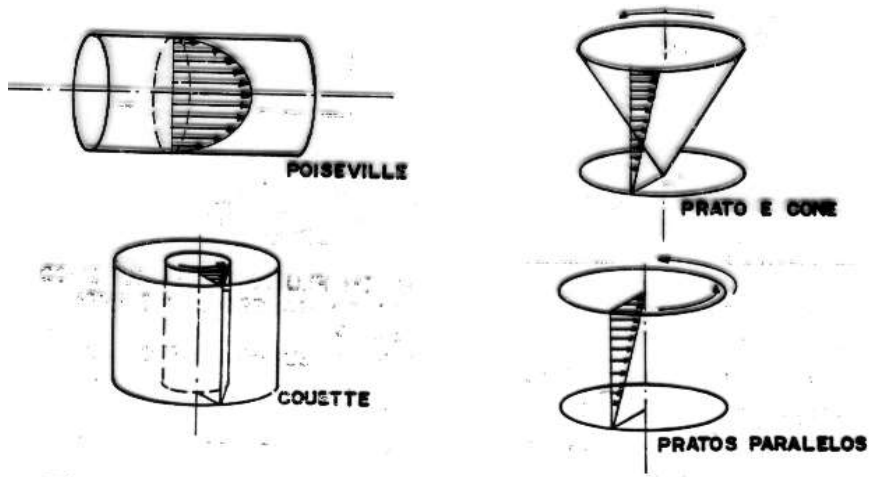


Figura - Escoamentos com cisalhamento numa única direção.

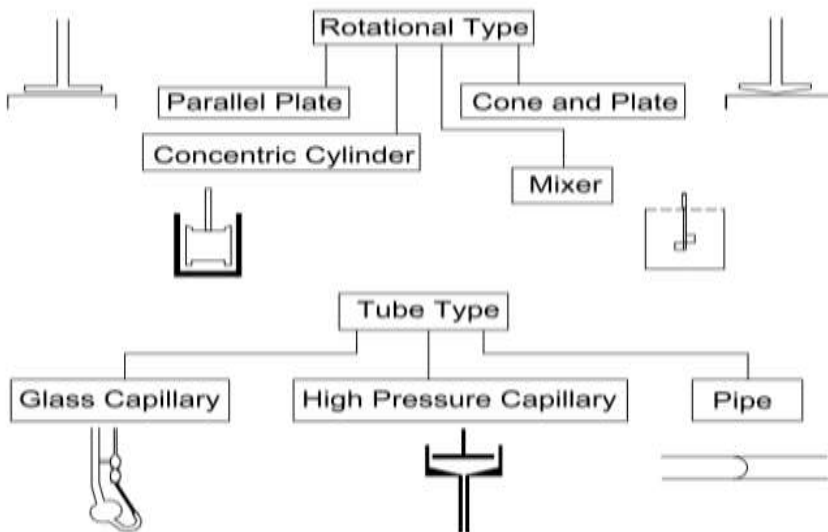
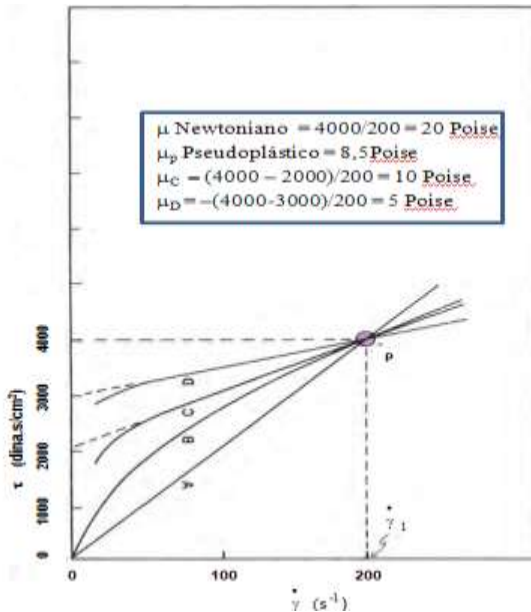


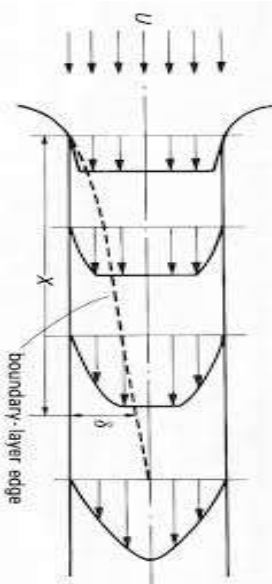
Figure 1.1. Common rheological instruments divided into two major categories: rotational and tube type.

ERROS INERENTES DE EQUIPAMENTOS PONTUAIS



APLICAÇÃO DOS CONCEITOS:

Escoamentos em um tubo capilar – Eq. Hagen-Poiseuille



- Devido a ação da pressão ocorre a formação de um perfil de velocidades:

- Na parede: $r = R \Rightarrow v = 0$

- No Centro do tubo capilar: $r = 0 \Rightarrow v = v_{\max}$

- Forças atuantes em elemento volume líquido:

a) Força pressão (produz movimento fluido), F_p .

$$F_p = \pi \cdot r^2 \cdot (P_1 - P_2)$$

b) Força fricção, F_k (Newtoniano).

$$F_k = -\mu \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{dv}{dr}, \quad \frac{dv}{dr} < 0$$

Escoamentos em um tubo capilar – Eq. Hagen-Poiseuille

-Para escoamento em regime estacionário $\Rightarrow F_p = F_k$:

$$\pi \cdot r^2 \cdot (P_1 - P_2) = -\mu \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{dv}{dr}$$

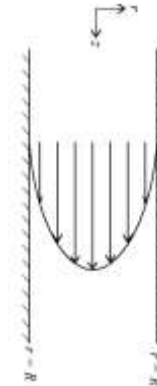
$$\Rightarrow dv = -\frac{1 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (P_1 - P_2)}{2 \cdot \mu \cdot \pi \cdot r \cdot L} \cdot dr$$

V: Perfil parabólico

$$\int_v^0 dv = -\frac{1 \cdot (P_1 - P_2)}{2 \cdot \mu \cdot L} \cdot \int_r^R r \cdot dr$$

- Integrando de **r até R** – **v até 0**

$$v(r) = \frac{1}{4 \cdot \mu} \cdot \frac{(P_1 - P_2)}{L} \cdot (R^2 - r^2) = -\frac{\Delta P \cdot R^2}{4 \cdot \mu \cdot L} \cdot \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right)$$



Escoamentos em um tubo capilar – Eq. Hagen-Poiseuille

-Calculo da vazão de fluido através do capilar

$$dQ = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot v(r)$$

$$dQ = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot \frac{1}{4 \cdot \mu} \cdot \frac{(P_1 - P_2)}{L} \cdot (R^2 - r^2)$$

- Integrando de **r = 0 até R**

$$Q = \int_0^R dQ = \int_0^R \frac{\pi}{2 \cdot \mu} \cdot \frac{(P_1 - P_2)}{L} \cdot (R^2 \cdot r - r^3) \cdot dr$$

$$Q = \frac{\pi}{8 \cdot \mu} \cdot \frac{(P_1 - P_2)}{L} \cdot R^4$$

Lei de Hagen-Poiseuille

Calculo viscosidade – Equação Hagen-Poiseuille

$$\mu_{ap} = \frac{\pi}{8 \cdot Q} \cdot \frac{(P_1 - P_2)}{L} \cdot R^4 = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{(P_1 - P_2) \cdot t}{L \cdot V} \cdot R^4$$

Para a tensão de cisalhamento, chega-se a (Em geral L/D > 100):

$$\tau(r) = \frac{F}{A} = -\frac{\Delta P \cdot \pi \cdot R^2}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot L} = -\frac{\Delta P \cdot R}{2 \cdot L}$$

Que leva a seguinte expressão para a taxa de deformação:

$$\dot{\gamma}_{ap} = \frac{4}{\pi \cdot R^3} \cdot \frac{V}{t} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot R^3}$$

Fluidos não newtonianos - (Rabinowitsch-Mooney equation)

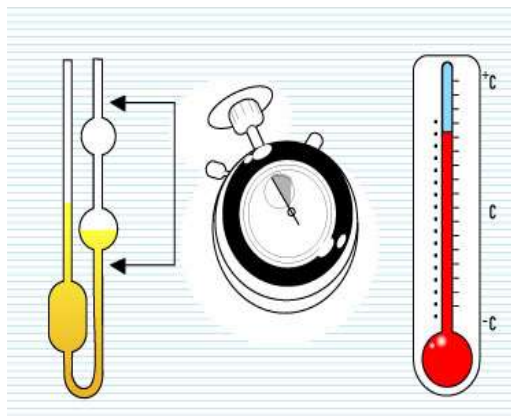
$$\tau = \frac{R \cdot \Delta P}{2 \cdot L} \iff \dot{\gamma} = \left[3/4 + 1/4 \cdot \frac{d(\ln(y))}{d(\ln(\tau))} \right] \cdot y \iff \dot{\gamma} = \left[\frac{3 \cdot n' + 1}{4 \cdot n'} \right] \cdot y$$

$$y = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot R^3} \iff n' = \frac{d(\ln(\tau))}{d(\ln(y))}$$

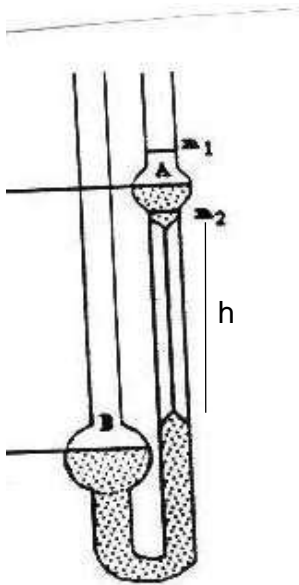
Viscosímetros Capilares



Viscosímetro de Ostwald



Viscosímetro Canon-Fenske



Cálculo dos resultados:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot L \cdot \mu}$$

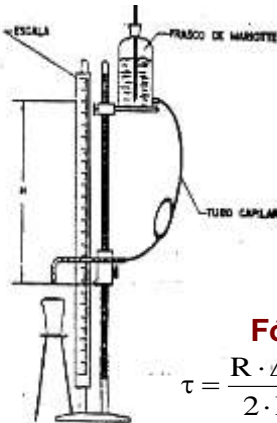
$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h$$

$$\mu = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \rho_1 \cdot g \cdot h \cdot t_1}{8 \cdot L \cdot V} = C \cdot t_1 \cdot \rho_1$$

$$C = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot g \cdot h}{8 \cdot L \cdot V}$$

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

Utilizar um fluido de referencia, exemplo agua



VISCOSIMETRO CAPILAR

$$\mu = \frac{\left(\frac{R \cdot \Delta P}{2 \cdot L} \right)}{\left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot R^3} \right)} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

= tensão de cisalhamento/taxa de deformação

Fórmula geral para fluidos independentes do tempo:

$$\tau = \frac{R \cdot \Delta P}{2 \cdot L}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot R^3}$$

A viscosidade aparente e definida como um determinado par $\tau/\dot{\gamma}$ no reograma

$$\dot{\gamma} = \left[3/4 + 1/4 \cdot \frac{d(\ln(\dot{\gamma}))}{d(\ln(\tau))} \right] \cdot \tau$$



Viscosímetro Copo-Ford

Viscosímetro copo-Ford – Em geral para fluidos Newtonianos (tintas, vernizes, lacas, etc), segundo norma ASTM D 1200-94.

Para fluidos não Newtonianos – Norma ASTM D 2196.

O recipiente é preenchido com o fluido a ser testado, e o tempo de esvaziamento é determinado. Existem 5 aberturas padrões (1, 2, 3, 4, e 5). A medida é realizada a $25 \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ($77 \pm 0,4 \text{ }^\circ\text{F}$).

<https://www.youtube.com/watch?v=-gyLyd-OH-4>

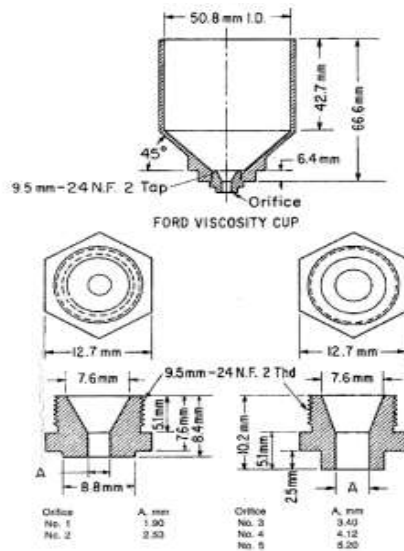


Figure 2.25. Ford viscosity cup viscometer (Reproduced from ASTM D1200-94 with permission of American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA, USA).

Table 2-16. Standard oils for calibration of Ford viscosity cups.

Cup Number	Approximate Cup Viscosity Range, cSt	Standard Oil Designation for Calibration	Approximate Viscosity Designated at 25°C, cSt
1	10 – 35	S-10	20
2	25 – 120	S-20	35
3	49 – 220	S-60	120
4	70 – 370	S-60	120
5	200 – 1200	S-200	460

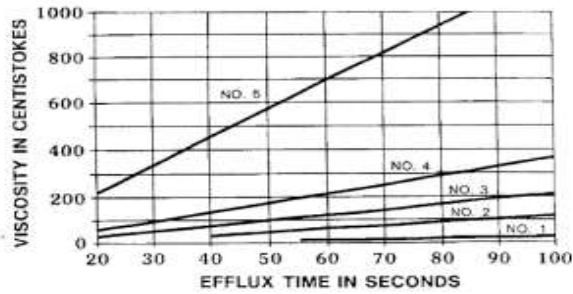


Figure 2.26. Selection of Ford viscosity cups (Reproduced from ASTM D1200-94 with permission of American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA, USA).

• VISCOSÍMETROS DE QUEDA DE ESFERAS:

A velocidade terminal de queda de uma esfera em um meio fluido pode ser estimada pela **Lei de Stokes**:



$$v_t = \frac{d_e^2 \cdot g \cdot (\rho_e - \rho_f)}{18 \cdot \mu}$$

$$v_t = \frac{L}{t}$$

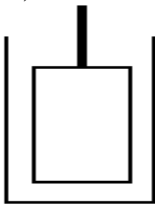
$$\mu = \frac{d_e^2 \cdot g \cdot (\rho_e - \rho_f) \cdot t}{18 \cdot L} = B \cdot (\rho_e - \rho_f) \cdot t$$

Ex. Viscosímetro de Hoesppler. Faixa: 0,5 a 200.000 P

Sensores

Cilindros

- líquidos de baixa viscosidade (grande superfície do rotor)
- sistemas com partículas (larga distância entre copo e rotor)



Placa-Cone

- líquidos de alta viscosidade
- sistemas sem partículas
- limpeza fácil
- altas taxas de cis.

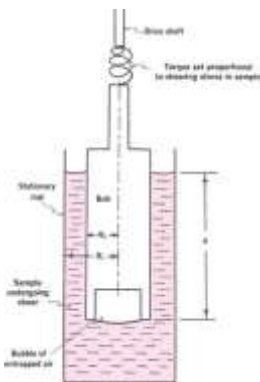


Placas Paralelas

- medidas dinâmicas (oscilação)
- materiais heterogêneos (partículas, fibras)



• REÔMETRO DE CILINDROS CONCÊNTRICOS OU DE CUBA E CILINDROS:



Para fluidos Newtonianos:

$$\Omega = \frac{1}{\mu} \frac{T}{4 \cdot \pi \cdot h} \left(\frac{1}{R_b^2} - \frac{1}{R_c^2} \right)$$

Ω : velocidade angular em radianos/segundos,
 T : Torque em dynas.cm.

$$\mu = K_v \cdot \frac{T}{\Omega}$$

Cilindro interior gira : SEARLE

Cuba gira : Modelo COUETTE

Fig.- Diagrama de um reômetro de cuba e cilindros.

• **Viscosímetro prato e cone:**

Nesse caso, uma amostra de material é colocada no prato, que por sua vez é posicionado sob o cone. O cone por sua vez gira a velocidades variadas e o torque produzido pode ser determinado em uma escala.

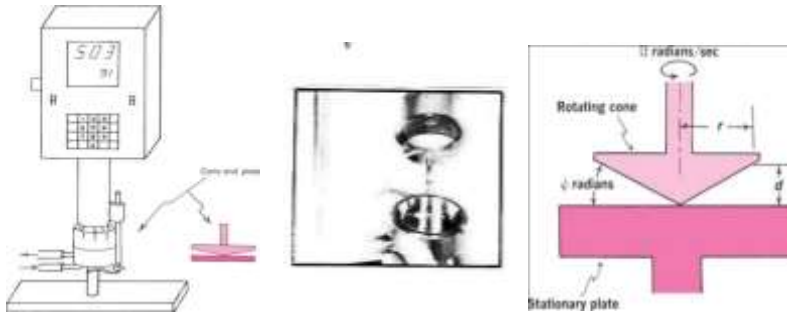


Fig. – Diagrama de um viscosímetro prato e cone.

Vantagens frente ao reômetro de cubas e cilindros:

- * Reduzida qte de material (0,1 a 0,5 ml por amostra), eqto que o reômetro de cubas e cilindros pode necessitar de 20 a 50 mL);
- * A taxa de cisalhamento é constante através da amostra

Para fluidos Newtonianos:

$$\mu = c \cdot \frac{T}{v}$$

Sendo c uma cte do equipto e v a velocidade do cone em r.p.m.

Para um material plástico de Binghan:

$$\mu = c \frac{T - T_f}{v}$$

e

$$\tau_0 = c_f \cdot T_f$$

• Reômetro de cilindros concêntricos ou de cuba e cilindros:



HAAKE RheoStress®

- Especificações
0.01 até 1200 rpm (CR);
0.2 μNm até 150 mNm
- Sensores
cilindros, placas paralelas ou
placa-cone, rotores
especiais
- Faixa de temperaturas
-100°C até 200°C (líquido)
- Aplicações especiais
câmara de alta pressão
(até 100
bar/200°C),
sistema altas temperaturas
(até 500°C),
sensor força normal

