

REOLOGIA

A Reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento de corpos sólidos ou fluídos (gases ou líquidos).

Importância:

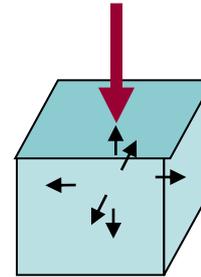
Dimensionamento de bombas e tubulações, agitadores, trocadores de calor, homogeneizadores, etc.

No controle de qualidade do produto (intermediário e final) e na verificação do prazo de validade (p.ex. alimentos, cosméticos).

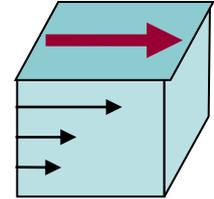
Conceitos fundamentais

Seja um elemento de volume de um fluido, na forma de um cubo e uma força externa aplicada.

Tensão normal



Tensão de cisalhamento

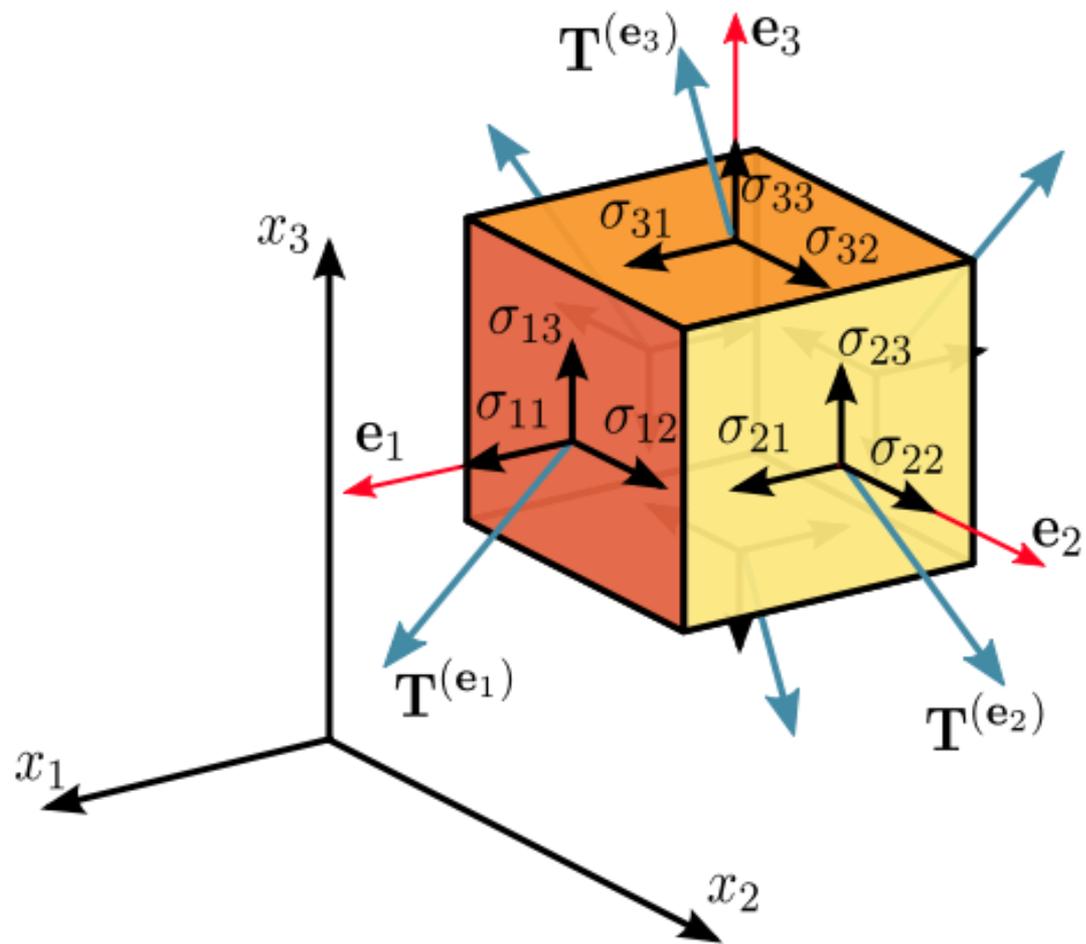


Desenvolver-se-á uma força interna, agindo a partir dessa área, que é denominada tensão (σ_{yx}).

Existem dois tipos básicos de tensão que podem ser exercidas sobre qualquer material nesse volume.

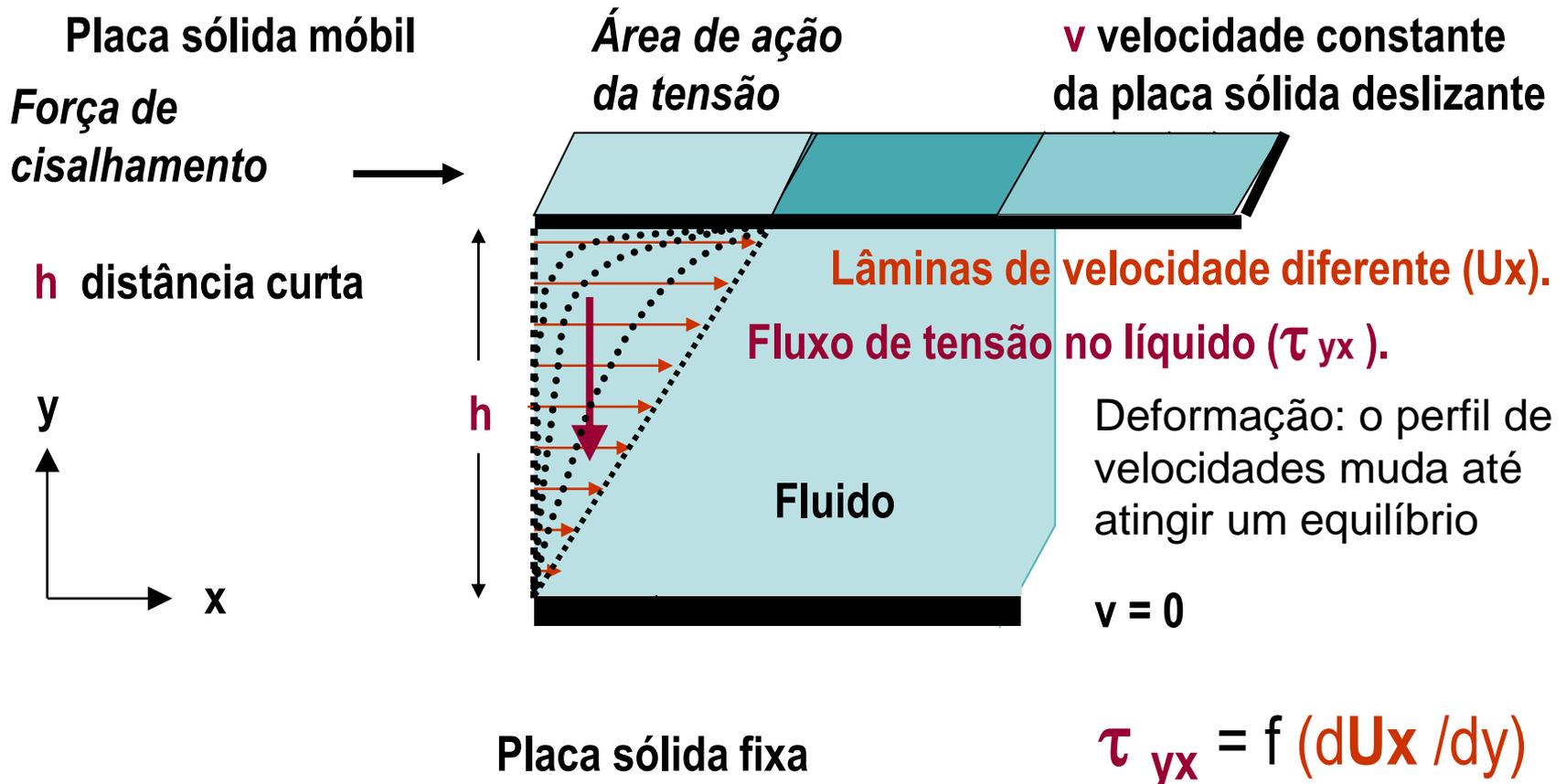
Tensões normais: agem perpendicularmente à face do cubo.

Tensões de cisalhamento: agem tangencialmente à face do cubo.



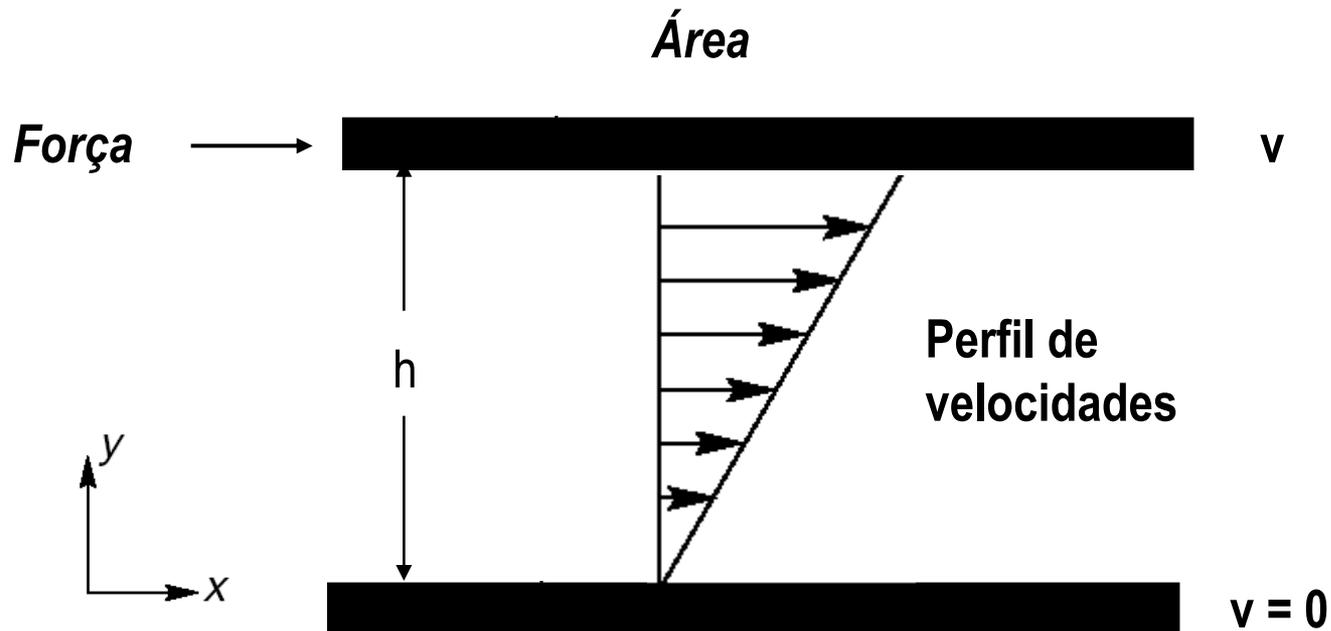
Os conceitos de **tensão de cisalhamento (força aplicada)** e **taxa de deformação (gradiente de velocidade)** são usados para descrever a deformação e o escoamento do fluido.

O **gradiente de velocidade** entre as camadas laminares gera um fluxo de força mecânica (**tensão de cisalhamento**).

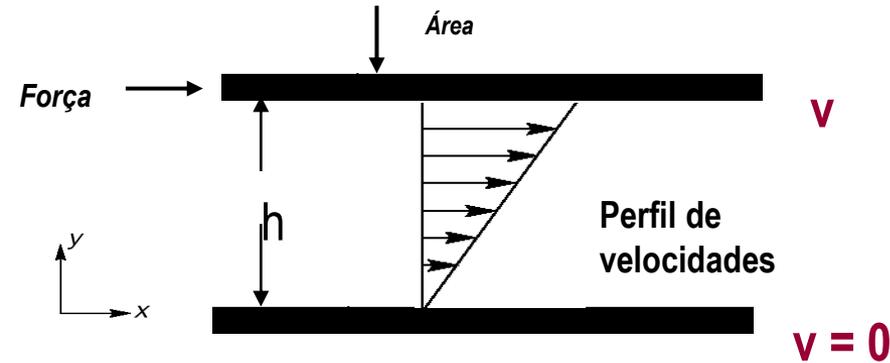


Medição reológica baseada no cisalhamento

No caso de líquidos, a maior parte das medidas reológicas são feitas com base na aplicação de tensões de cisalhamento. A figura mostra o que ocorre quando uma tensão de cisalhamento simples (τ) é aplicada a um líquido:



A figura mostra um líquido viscoso ideal mantido entre duas placas paralelas sendo que a placa superior se move a uma velocidade v relativa à placa inferior.



A **tensão de cisalhamento**

$\tau_{yx} = F_t / A$ produz um gradiente de velocidade (dU_x/dy) no seio do fluido viscoso.

Existe uma proporcionalidade entre o gradiente de velocidade (dU_x/dy) e a tensão de cisalhamento ou força externa (τ_{yx}).

$$\tau_{yx} \propto (dU_x/dy) = \mu (dU_x/dy) = \mu \dot{\gamma}$$

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação

$$\mu = (F/A) / (L/T/L)$$

$$\mu = (\text{kg}/\text{ms}^2) / (1/\text{s}) = \text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$$

Lei de Newton

$$\tau_{yx} = \mu \cdot \dot{\gamma}$$

Modelo geral

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n$$

Taxas de deformação típicas de processos

Situação	Taxa de deformação (s ⁻¹)	Aplicação
Sedimentação de partículas em líquido	10 ⁻⁶ -10 ⁻³	Medicamentos, tintas, molhos de saladas
Nivelamento devido à tensão superficial	10 ⁻² -10 ⁻¹	Cobertura de bolo, tintas, tintas de impressora
Drenagem sob gravidade	10 ⁻¹ -10 ¹	Pequenos recipientes de alimentos, tintura e cobertura
Extrusão	10 ⁰ -10 ³	Pasta de dente, massas

Situação	Taxa de deformação (s ⁻¹)	Aplicação
----------	---------------------------------------	-----------

Derramar de uma garrafa	10 ¹ -10 ²	Alimentos, cosméticos, artigos de toalete
Cortar alimentos	10 ¹ -10 ²	Mastigar
Recobrimento por imersão	10 ¹ -10 ²	Tintas, confeitaria
Mistura e agitação	10 ¹ -10 ³	Processamento geral
Escoamento em tubos	10 ⁰ -10 ³	Processamento geral
Esfregar	10 ² -10 ⁴	Aplicação de cremes
Escovar	10 ³ -10 ⁴	Descascar, raspar

Situação	Taxa de deformação (s ⁻¹)	Aplicação
----------	---------------------------------------	-----------

Atomizar	10 ³ -10 ⁵	Secagem por atomização, pintura "spray"
Recobrimento a alta velocidade	10 ⁴ -10 ⁶	Papel
Lubrificação	10 ³ -10 ⁷	Engrenagens, motores

Classificação dos líquidos

Fluidos líquidos

Independentes do tempo

Newtonianos

Pseudo-plásticos

Bingham

Herschel-Bulkley

Dependentes do tempo

Tixotrópicos

Reopéticos

Outros

Viscoelásticos

Líquidos newtonianos

- A viscosidade é independente da taxa de deformação a que o fluido está submetido.
- Um fluido newtoniano mostra um único valor de viscosidade, a uma dada temperatura. Exemplos: óleos vegetais, água, soluções açucaradas.

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$$

Onde:

- τ = tensão de cisalhamento (Pa)
- μ = viscosidade newtoniana (Pa.s)
- $\dot{\gamma}$ = taxa de deformação (s^{-1})

Líquidos não-newtonianos

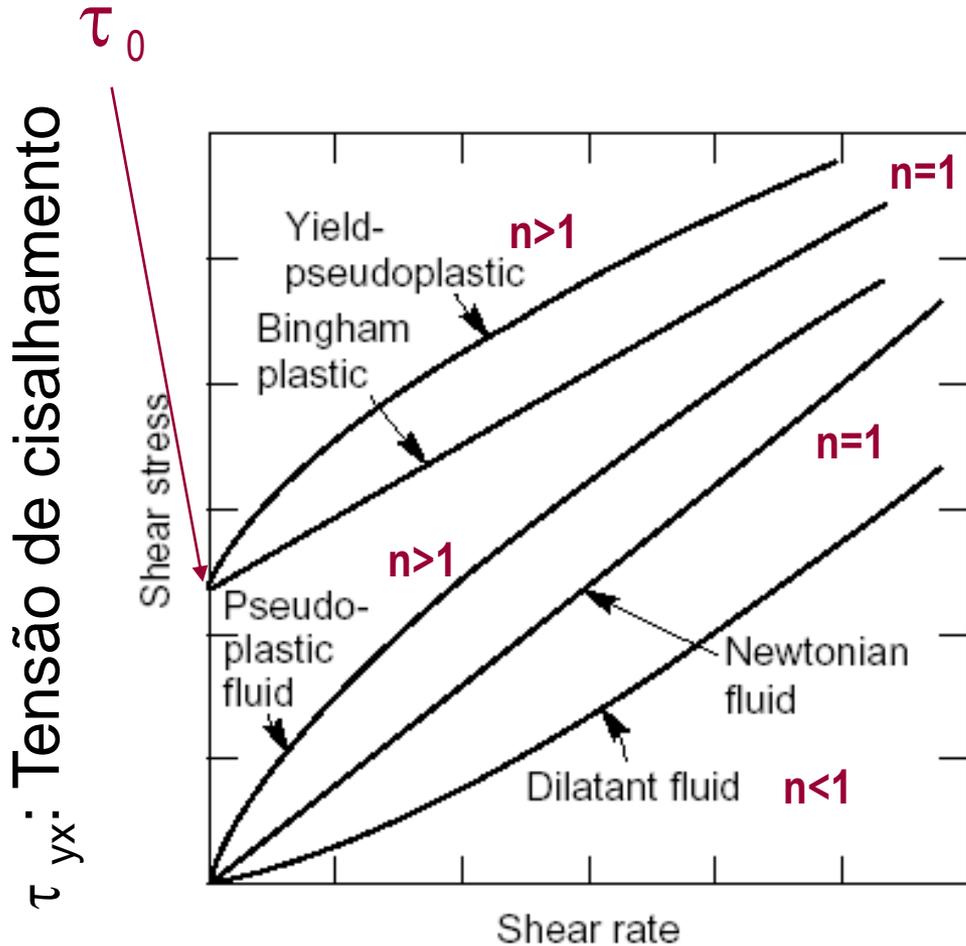
- Neste caso, a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação.
- Não se pode falar em termos de viscosidade, porque esta propriedade passaria a variar com a taxa de deformação.
- Usa-se o termo viscosidade aparente (μ_a).

$$\tau = \mu_a \cdot \dot{\gamma}$$

Os líquidos não-newtonianos se classificam de acordo a suas propriedades físicas, que podem:

1. *Ser independentes do tempo* de cisalhamento
2. *Ser dependentes do tempo* de cisalhamento
3. Exibir *características de sólido*

Independentes do tempo



$$\tau_{yx} = \mu (dUx / dy)$$

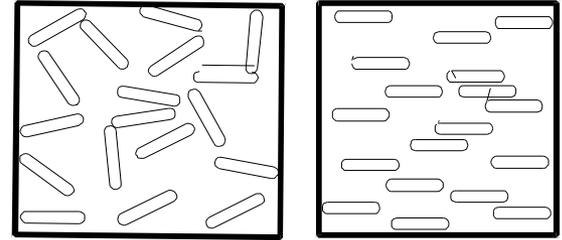
Equação mais geral

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n$$

$\dot{\gamma}$: Taxa de deformação

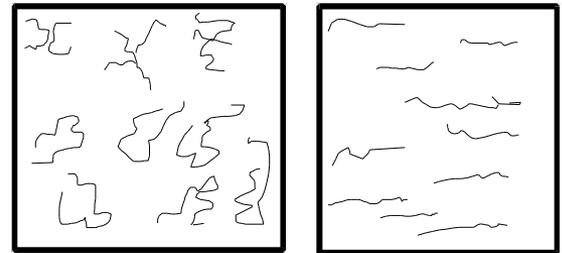
a. Orientação de partículas:

típico em polpas de frutas e vegetais.



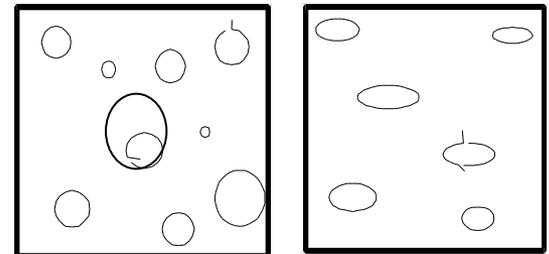
b. Estiramento:

soluções macromoleculares, com grande quantidade de espessantes: caldas, produtos com substituição de gordura.



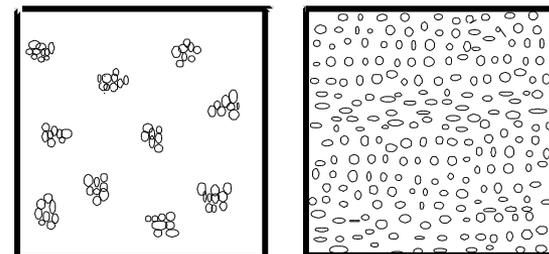
c. Deformação de gotas:

emulsões, onde existe uma fase dispersa em uma fase contínua: maionese, molho de saladas, chantilly, etc.



d. Destruição de agregados:

na homogeneização de produtos.



a) Fluidos que não necessitam de tensão de cisalhamento inicial (τ_0) para escoar:

O modelo mais comum aquele descrito pela lei da potência:

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$$

K = índice de consistência (Pa.sⁿ)

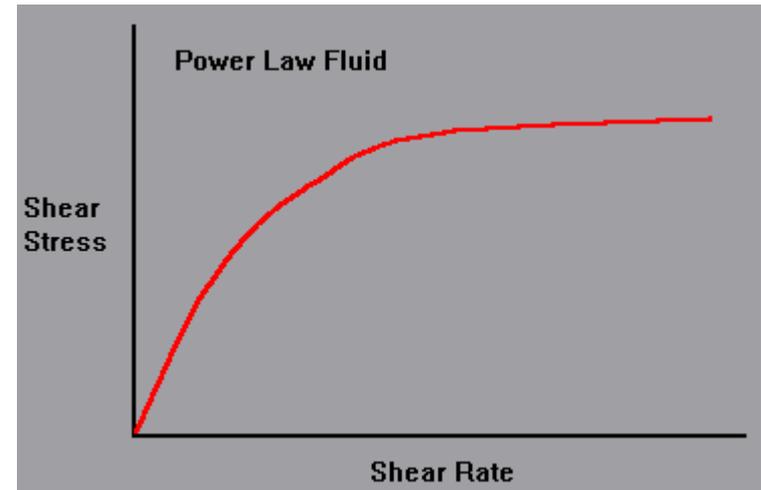
n = índice de comportamento do fluido

Podem ser classificados em pseudoplásticos e dilatantes de acordo com o valor de n .

Fluidos pseudoplásticos:

Nesse caso, o valor de n é maior que 1.

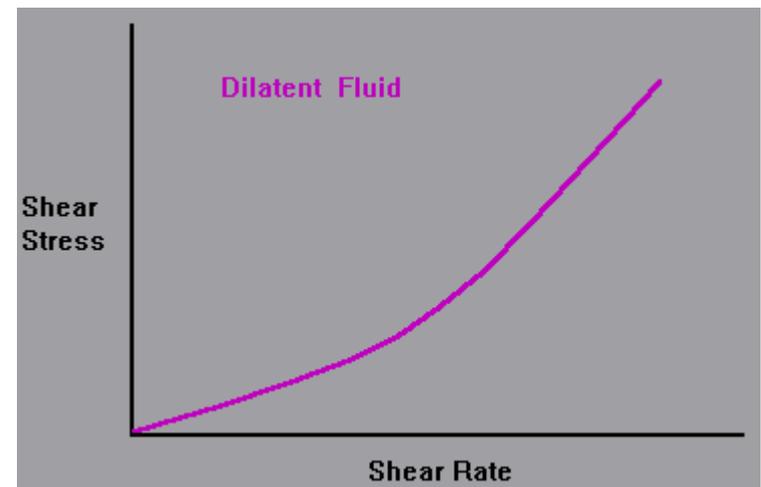
A viscosidade aparente decresce com a taxa de deformação. Ex: alguns produtos alimentícios, massas de cerâmica e de cimento



Fluidos dilatantes:

O valor de n é menor que 1.

A viscosidade aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento. Ex: soluções de açúcar e de amido



b) Fluidos que necessitam de uma tensão inicial (τ_0) para escoar:

Plásticos de Bingham:

É o mais simples desta categoria.

Mostram relação linear entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação, após vencer a tensão de cisalhamento inicial (τ_0).

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$$

Para $\tau > \tau_0$

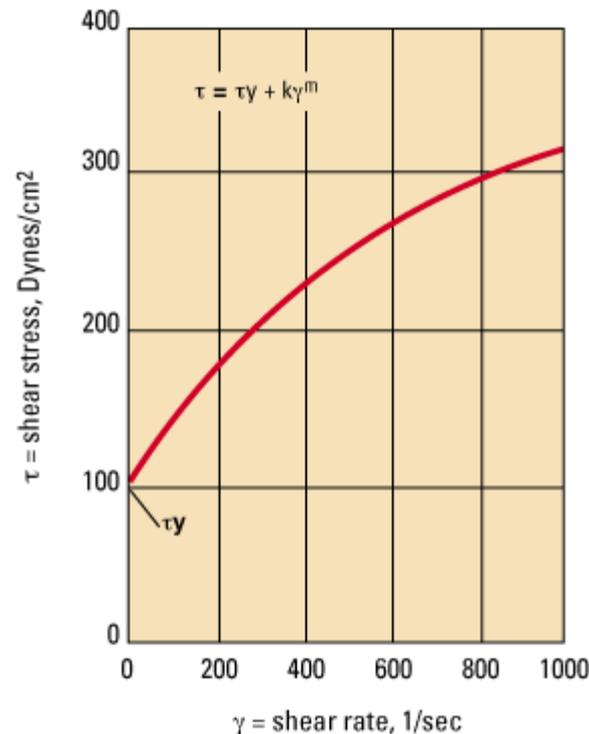
Onde μ_p = viscosidade plástica (Pa.s)

Ex: produtos alimentícios com alto teor de gordura (chocolate, margarina)

Fluidos Herschel-Bulkley:

Esses fluidos apresentam o comportamento do tipo lei da potência com tensão de cisalhamento inicial (yield power law)

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n$$



Exemplos:

- Cimento
- Lama de perfuração
- Lamas em geral
- Lodo
- Suspensões granulares
- Espumas aquosas
- Tintas
- Polpa de celulose
- Alimentos

Não-newtonianos dependentes do tempo

Estes fluidos podem ser classificados em duas categorias:

Fluidos tixotrópicos (afinantes):

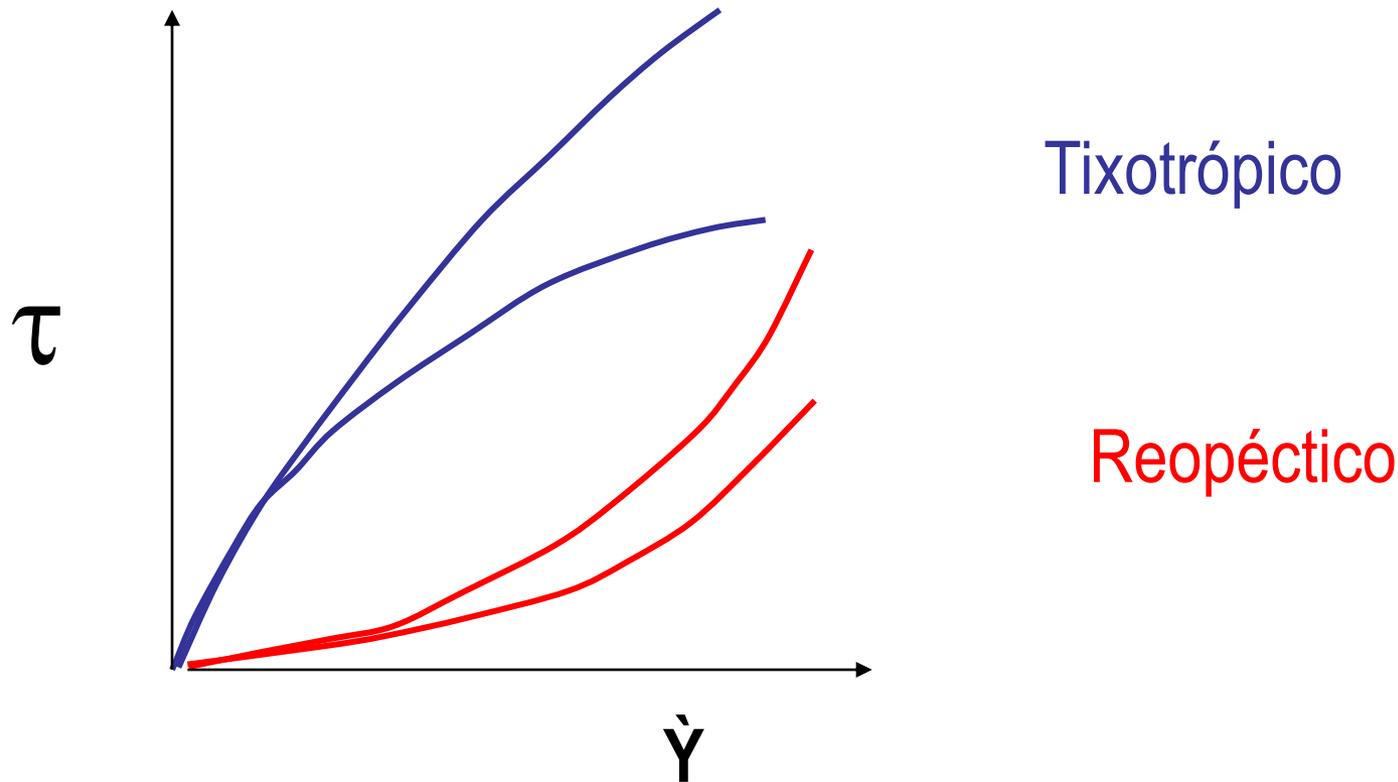
Possuem uma estrutura que é quebrada em função do tempo e da taxa de deformação. Ex: Ketchup, Visplex (fluido de perfuração à base de água).

Fluidos reopéticos (espessantes):

Inclui poucos materiais que são capazes de desenvolver ou rearranjar uma estrutura enquanto são submetidos a uma tensão de cisalhamento. Ex: gesso em pasta, tintas de impressoras (alguns tipos).

Estes fluídos possuem uma estrutura que muda em função do tempo. Este comportamento é descrito pelo modelo de Tiu-Borger:

$$\tau = \tau_0 - (\tau_0 - \tau_e) \exp(-kt)$$



Fluidos viscoelásticos

Muitos fluídos mostram comportamento de sólido (elasticidade) e de líquido (plasticidade). A determinação do comportamento viscoelástico exige equipamentos caros que se usam nos laboratórios de desenvolvimento de produtos.

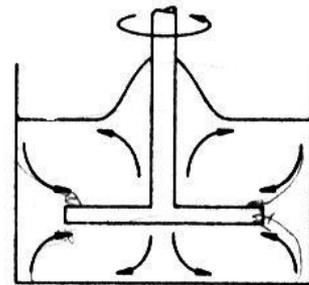
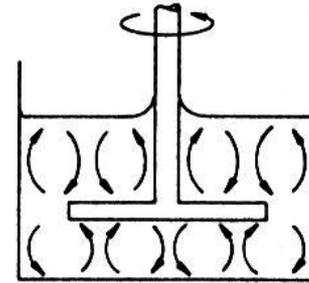
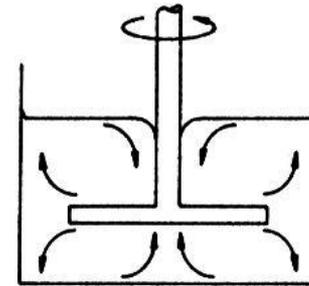
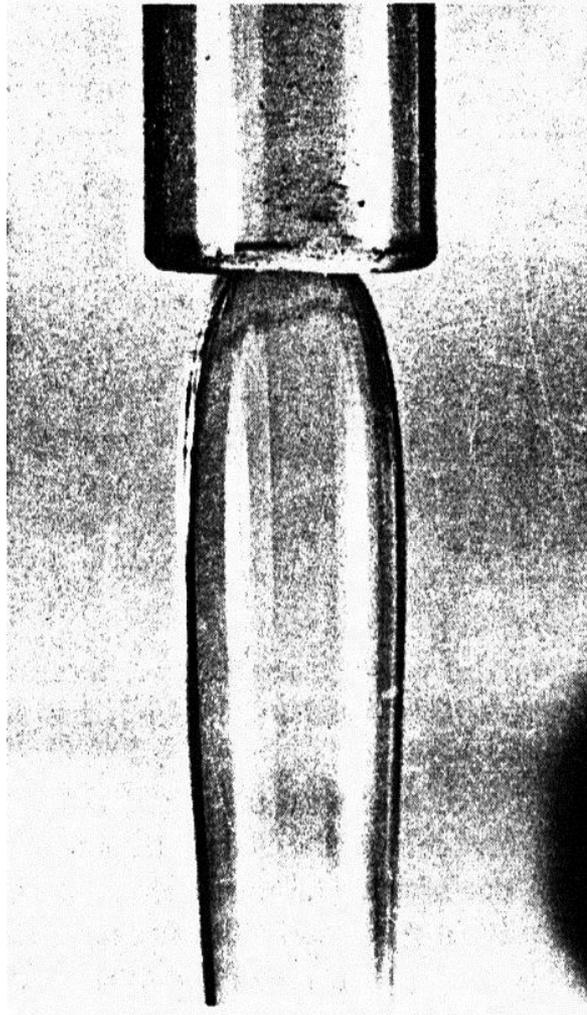
Os problemas que podem se apresentar são:

-Inchamento do fluido:

um grande problema em extrusão e em enchedeiras

-Escoamento de Weissenberg:

ocorre na agitação de fluidos altamente viscoelásticos como a massa de pão e biscoito. A altas taxas de deformação, as tensões normais superam as tangenciais, invertendo o fluxo.



Importante: Os dois tipos de fenômenos viscoelásticos podem ocorrer simultaneamente.

Propriedades reológicas: dependência de temperatura e pressão

A viscosidade depende da temperatura. Essa correlação é representada por uma equação do tipo Arrhenius:

$$\ln \mu = A - E_a/RT$$

Onde:

A = parâmetro de ajuste

E_a = energia de ativação para a viscosidade (J / kg.mol K)

R = constante universal dos gases (1,987 cal / g.mol K)

T = temperatura absoluta (K)

Em fluidos lei da potência, o valor de n é praticamente constante com a temperatura, portanto:

$$\ln K = k_0 - E_a/RT$$

Em alguns processos, o fluido é submetido a altas pressões, como é o caso da extrusão. Nesse caso, a viscosidade se relaciona com a pressão da seguinte maneira:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{aP}$$

Onde:

μ_0 = viscosidade a uma pressão de referência

a = parâmetro de ajuste

Critérios para determinar escoamento laminar

Em escoamento de fluidos newtonianos em tubos, o número de Reynolds crítico é 2100. A partir desse valor, o escoamento deixa de ser laminar e passa a ser turbulento.

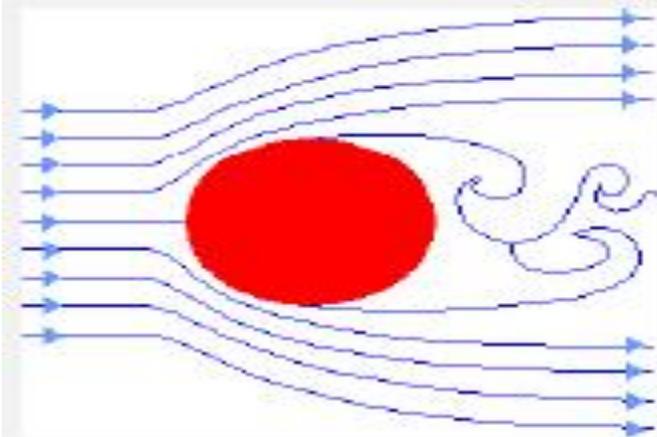
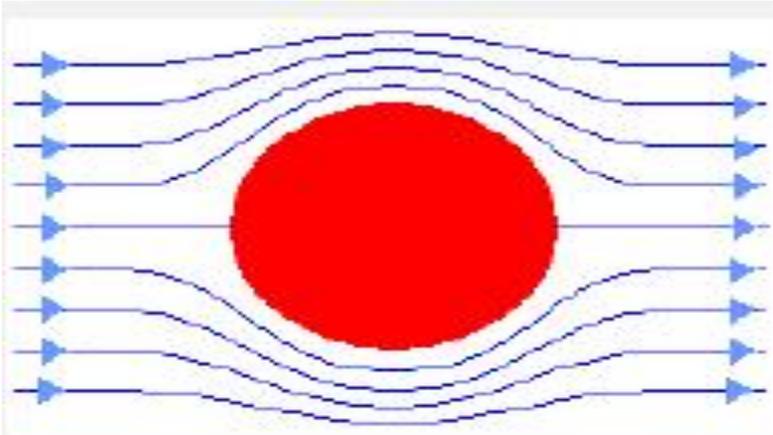
$$\text{Re} = \frac{Dv\rho}{\mu} < 2100 = \text{Re crítico}$$

Com fluidos lei da potência há regime laminar quando:

$$\text{Re}_{LP} = \left(\frac{\rho v^{2-n} D^n}{8^{n-1} k} \right) \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n < \frac{64^n (2+n)^{(2+n)/(1+n)}}{(1+3n)^2} = \text{Re}_{\text{crítico}}$$

Experimento de Reynolds

Linhas de corrente em torno de uma partícula



Viscosimetria e Reometria

Viscosímetros:

baseiam-se na medida da resistência ao escoamento em um tubo capilar ou pelo torque produzido pelo movimento de um elemento através do fluido. Existem 3 tipos principais: capilar, rotacional, escoamento de esfera.

Reômetros:

podem medir um grande intervalo de taxas de deformação e construir reogramas completos que incluem comportamento tixotrópico e ensaios dinâmicos para a determinação das propriedades viscoelásticas do material, além de poder programar varreduras de temperatura.

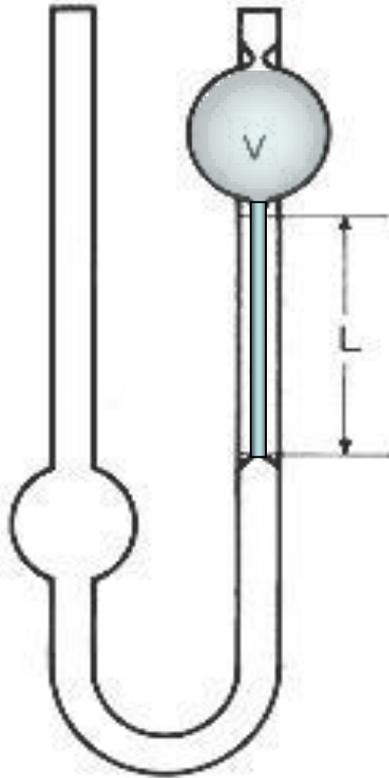
Viscosímetros de tubo:

Podem ser divididos em 3 tipos:

Capilar de vidro:

Também chamado de viscosímetro do tubo em U. Operam sob efeito da gravidade e são o melhor instrumento para medir a viscosidade de fluidos newtonianos. São feitos de vidro e podem ser encontrados em diferentes formatos, sendo os modelos mais populares: Cannon-Fenske, Ostwald e Ubbelohde.

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.



Viscosímetro de Cannon-Fenske

A figura mostra esquematicamente um viscosímetro de tubo capilar, do tipo Cannon-Fenske.

Princípio de operação:

O fluido a ser testado é colocado no reservatório superior (V) a partir do qual ele é descarregado através de um tubo capilar (L) como resultado da força motriz (gravidade). É medido o tempo de escoamento que normalmente está entre 5 e 10 minutos.

Equação de Poiseuille.

$$\mu = (\pi \Delta P R^4) / (8 L Q)$$

Onde:

P= pressão

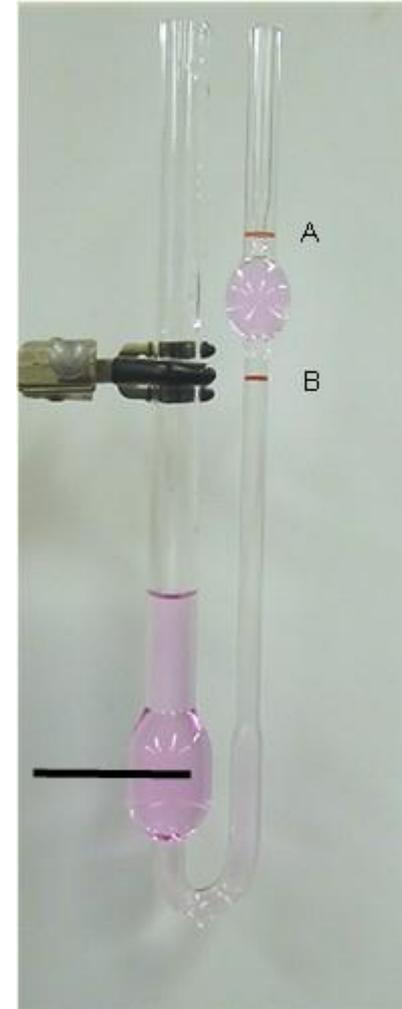
L= comprimento do capilar

Q = vazão = volume/tempo

R= raio do capilar

ρ = densidade do fluido

$$\mu = k_{\text{sistema}} * t$$

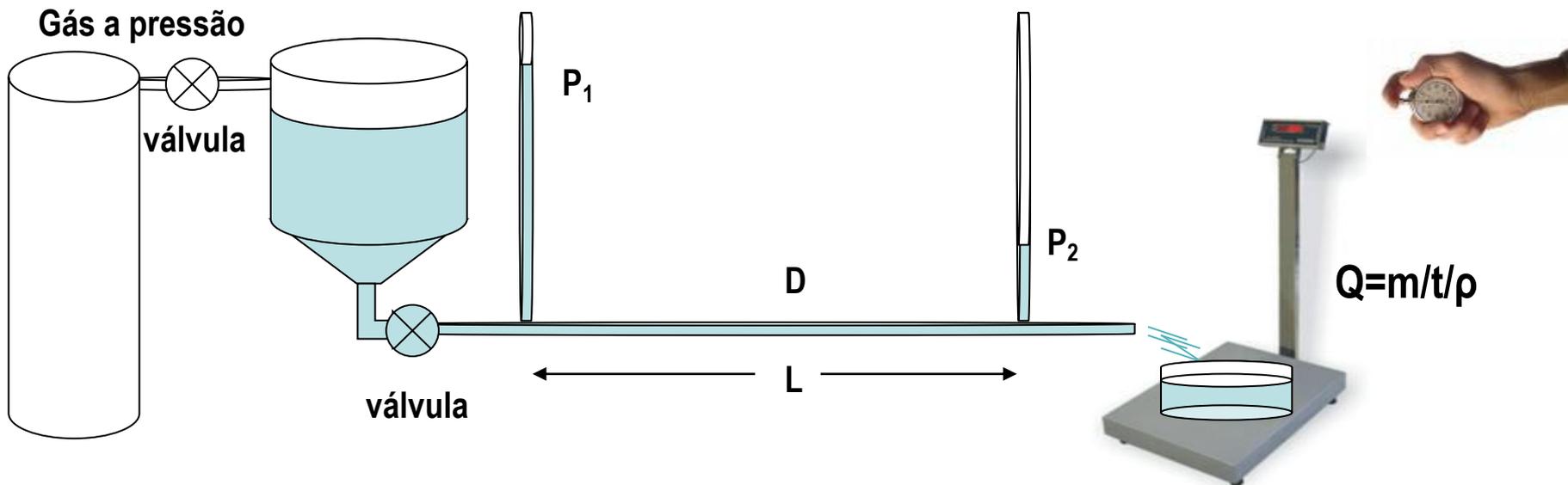


Capilar de alta pressão:

São construídos em vidro (sem o formato em "U") e são tipicamente operados à gás ou a pistão.

Viscosímetro de tubo:

Fáceis de construir. Usam tubos de diversos diâmetros. Como força motriz pode-se usar a gás pressurizado a altas pressões. Permitem medir os parâmetros reológicos de fluidos newtonianos e não-newtonianos a tensões de cisalhamento muito altas (da ordem de 10^6 Pa).



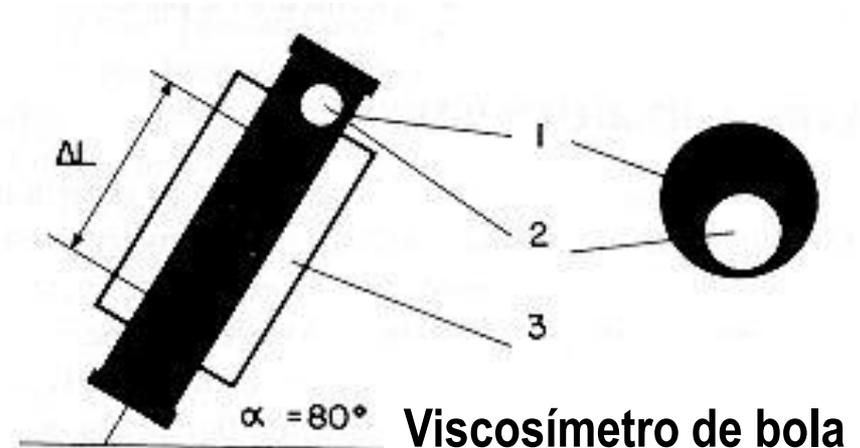
Viscosímetro de bola ou de Stokes:

Princípio de operação:

Consiste de um tubo vertical ou inclinado, no qual uma bola cai sob a força da gravidade. Essa bola alcança uma velocidade limite quando a aceleração devido à força da gravidade é exatamente compensada pelo atrito do fluido sobre a bola. Mede-se então o tempo de escoamento da bola entre dois pontos pré-determinados (ΔL).

Aplicações:

útil na medida de viscosidade de fluidos newtonianos transparentes.



Limitação:

Existem esferas de diferentes densidades (vidro de 2000 kg/m³ até aço inox de 8000 kg/m³).

O intervalo de medida de viscosidade vai de 20 cP até 85000 cP).

Equação:

$$\mu = K (\rho_1 - \rho_2) t$$

Onde:

K= constante de calibração

ρ_1 = densidade da esfera

ρ_2 = densidade do líquido

t = tempo de queda

Viscosímetros rotacionais:

Estes instrumentos podem determinar a viscosidade de fluidos newtonianos e não-newtonianos contidos entre dois cilindros coaxiais, duas placas paralelas ou geometria de cone-placa.

Cilindros concêntricos:

Princípio de operação: consiste basicamente de um par de cilindros coaxiais: um gira enquanto o outro permanece estático (sem movimento). O torque necessário para manter o rotor a uma determinada velocidade é uma medida da taxa de deformação.

Aplicações e limitações:

Medem viscosidades de fluidos newtonianos e não-newtonianos.

Equação:

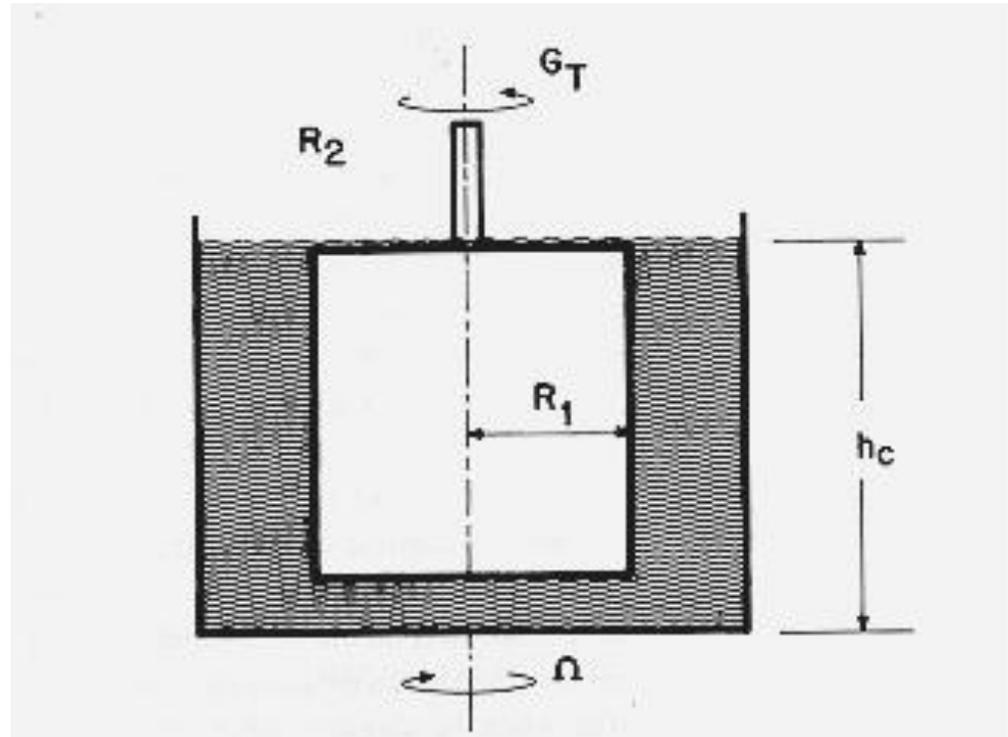
$$\tau = \frac{M}{2\pi h R_{cil}^2}$$

Onde:

M = torque necessário para manter a velocidade angular (N.m)

h = altura do cilindro (m)

R_{cil} = raio do cilindro (m)



Viscosímetro rotacional de cilindros concêntricos



No caso da taxa de deformação existem vários métodos de estimativa, mas o mais simples é o do sistema que assume taxa de deformação uniforme através do anulo entre os dois cilindros.

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\alpha - 1}$$

Onde:

Ω = velocidade angular (s^{-1})

$\alpha = R_{\text{ext}}/R_{\text{int}} =$ Raio do cilindro externo / Raio do cilindro interno

Viscosímetro de Brookfield:

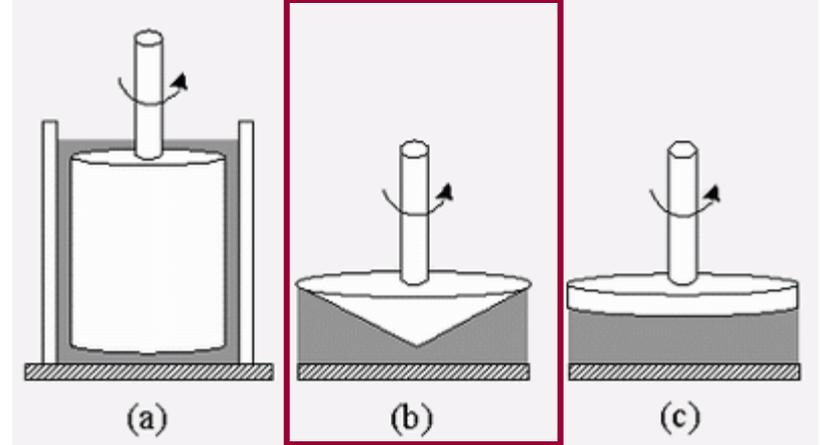
Os sensores mais comuns são discos planos acoplados ao instrumento por um eixo vertical.

Princípio de medida:

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.

Porém, estes sensores de disco podem ser úteis na obtenção de um índice relativo de consistência com o propósito de comparação de produtos ou em julgamento de controle de qualidade.

Cone rotativo e placa fixa:



Princípio de operação:

Tem o mesmo princípio de medida que os cilindros concêntricos, porém é mais preciso devido a que a distância entre as placas pode ser considerada igual a zero, sendo assim a taxa de deformação é constante no líquido que se encontra entre o cone e a placa. O ângulo do cone não pode ser superior a 4 graus.

Aplicações e limitações:

Ideal para medir comportamento reológico de fluidos não-newtonianos a altas taxas de deformação, porém pode causar aquecimento devido ao atrito. Os efeitos de borda são desprezíveis. É aplicável em fluidos dependentes do tempo.

Equações:

$$\tau = \frac{3M}{2\pi R^3}$$
$$\gamma = \frac{\Omega}{\tan \theta}$$

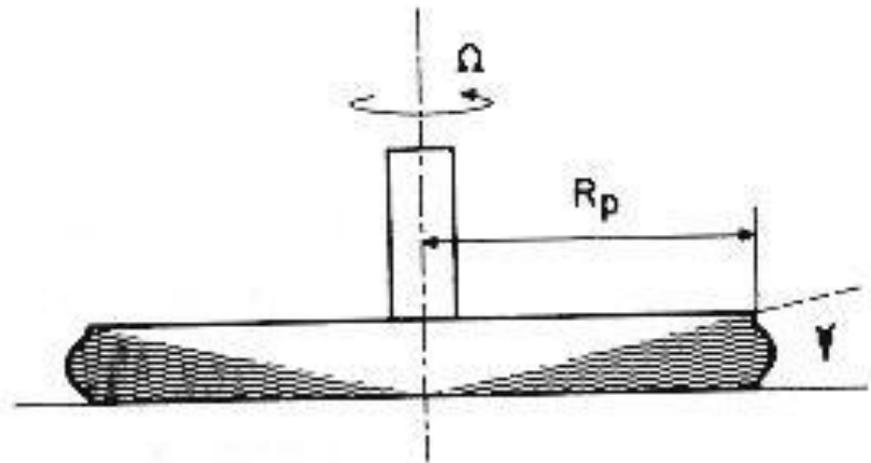
Onde:

M= torque necessário para manter a velocidade angular (N.m)

Ω = velocidade angular (s⁻¹)

R= raio do cone (m)

θ = ângulo do cone (-)



Viscosímetro rotacional de cone-placa



Modelo digital