



Fluidos Conceitos fundamentais

PROF^o. PRISCILA ALVES

PRISCILA@DEMAR.EEL.USP.BR

Reologia e Reometria

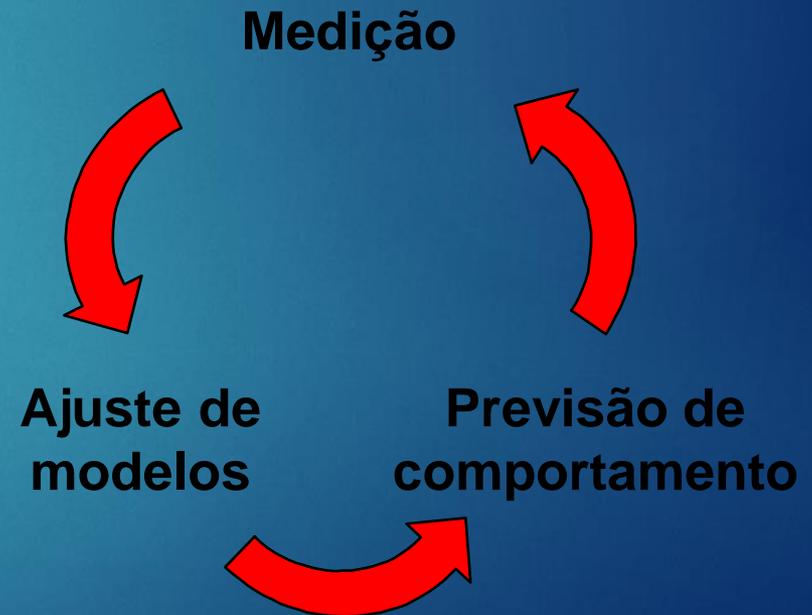
Reologia e Reometria

- ▶ A palavra reologia vem do grego *rheo* (fluxo) e *logos* (ciência), foi um termo sugerido por Bingham e Crawford utilizado em 1929.
- ▶ A **reologia** é a parte da física que investiga as **propriedades dos corpos que sofrem deformação**, ou seja, corpos que fluem.
- ▶ Métodos criados para medir as propriedades e para descrever o comportamento dos mesmos.

Aplicações da reologia

O comportamento dos fluidos e suas propriedades tem grande influência em:

- ▶ **Processamento/produção**
- ▶ **Estabilidade de produtos**
- ▶ **Aceitação pelo consumidor**



Sólidos: Geralmente estuda-se a deformação elástica do material.

5



Líquidos: Interessa conhecer os fenômenos físicos associados como a deformação plástica de alimentos líquidos.



Gases: Na indústria de alimentos se usam ar, CO_2 , nitrogênio, etc.

Importância da Reologia



- ▶ Contribuir para o conhecimento da estrutura molecular, no controle de qualidade e aceitação de um determinado produto.
- ▶ Atua em diferentes áreas do conhecimento, como: medicina; na indústria de alimentos e cosméticos; tintas e plásticos e até na construção civil como no desenvolvimento de concreto de alto desempenho.



O que são fluidos? Como podemos descrever seu comportamento e suas propriedades?

Características de um Fluido

- ▶ No estado líquido e gasoso a matéria é denominada **fluido**. Um fluido não pode resistir a uma força de deformação, portanto ele **escoa** sob a ação desta força.
- ▶ A deformação é originada por **forças de cisalhamento** que atuam tangencialmente em relação à superfície do mesmo.

- Considere o módulo de uma força atuando tangencialmente em um elemento retangular $ABDC$. Esta é uma força de cisalhamento e produz uma deformação elemento $A'B'DC$ (Figura 1)

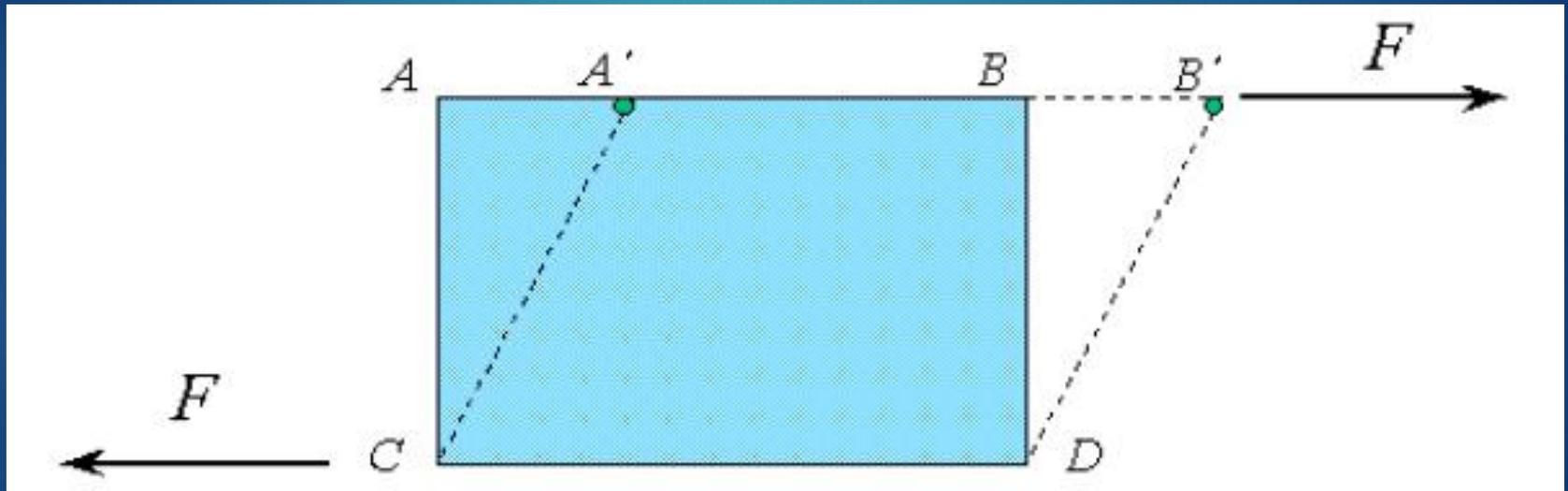


Figura 1

- 
- ▶ Podemos dizer assim que:

“Fluido é uma substância que se deforma continuamente (ou escoar), quando sujeita a uma força de cisalhamento”

- ▶ Assim, se o fluido permanece estático não existirão forças de cisalhamento atuando. Todas as forças devem ser perpendiculares ao plano que atuam.

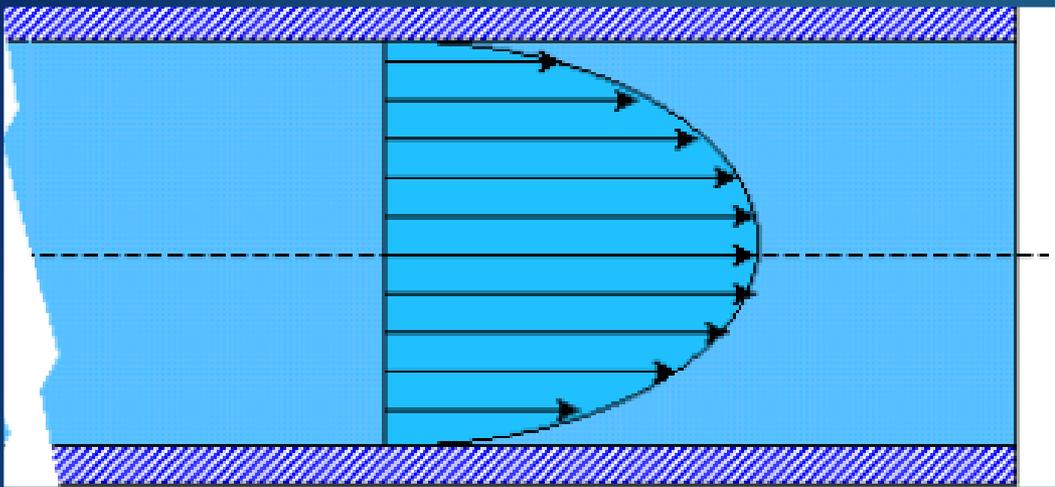


Figura 2: Escoamento Real

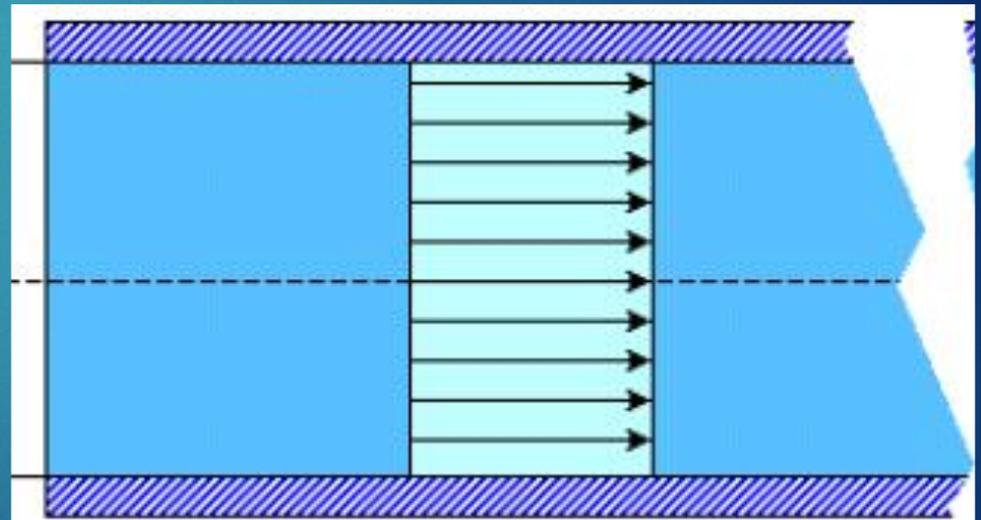


Figura 3: Escoamento Ideal

Lei da Viscosidade de Newton

► Considere um elemento em 3 – D (Figura 4) submetido a ação de uma força de cisalhamento.

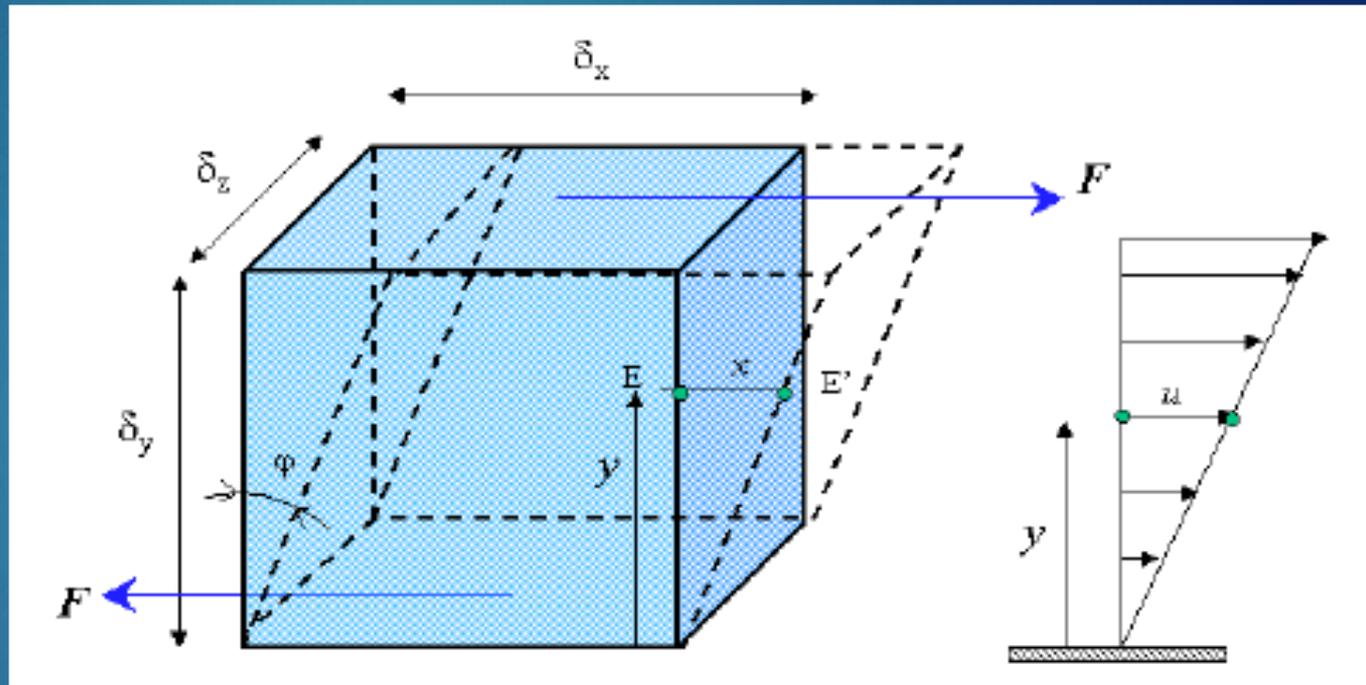


Figura 4

- 
- ▶ A tensão de cisalhamento τ em um ponto **E** do fluido é dada por:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

- ▶ A tensão originada é medida pelo tamanho do ângulo φ que é conhecido como ÂNGULO DE DEFORMAÇÃO.

$$\varphi = \frac{x}{y}$$

- 
- ▶ A Taxa de Deformação é a variação do ângulo de deformação em função do tempo $= \frac{\varphi}{t} = \frac{x}{y.t} = \frac{x}{t} \frac{1}{y}$ chamando u de *velocidade da partícula* em um ponto E.

- ▶ Resultados experimentais mostram que a tensão de cisalhamento é proporcional a taxa de deformação, e desta forma temos:

$$\tau = cte \frac{u}{y}$$

- 
- ▶ O termo $\frac{u}{y}$ mostra a variação da velocidade em relação ao eixo y , que também é conhecido como sendo o *gradiente da velocidade*, que pode ser escrito da forma diferencial $\frac{du}{dy}$.

- ▶ A constante de proporcionalidade é conhecida como VISCOSIDADE DINÂMICA μ , assim temos:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Taxa de formação

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

Fluidos Newtonianos e Não Newtonianos

- ▶ Fluido Newtoniano:
 - ▶ É um fluido que obedece a Lei de Newton onde o valor da viscosidade μ é constante.
- ▶ Fluido Não-Newtoniano:
 - ▶ Consiste em um fluido que possui uma viscosidade variável.

Propriedades dos Fluidos

- ▶ Algumas propriedades dos fluidos são:
- ▶ Massa específica, peso específico, densidade, viscosidade cinemática, viscosidade e dinâmica.

Massa específica, Peso específico e Densidade

A relação da quantidade de matéria de uma substância por unidade de volume pode ser expressa de três modos diferentes.

► **Massa Específica:**

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Unidade [S.I.] $[\rho] = \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

Dimensão: $[\rho] = ML^{-3}$

► **Peso Específico:**

É definido como a relação entre o módulo da **força peso por unidade de volume**. É obtida a partir da segunda lei de Newton.

$$P = m \cdot g \text{ sabemos que } \rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho \cdot V \text{ assim:}$$

$$P = \rho \cdot V \cdot g \Rightarrow \frac{P}{V} = \rho \cdot g$$

$$\gamma = \text{Peso Específico} = \frac{P}{V}$$

$$\gamma = \rho \cdot g$$



Unidade: $[\gamma] = \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s^2} = [\gamma] = \frac{kg}{s^2 m^2}$



Dimensão: $[\gamma] = ML^{-2}T^{-2}$

► **Densidade [d]**

- A densidade é definida como a relação entre a massa específica (ou peso específico) de uma substância e uma massa específica (ou peso específico) *padrão*.
- Para sólidos e líquidos a massa específica *padrão* corresponde à massa específica máxima da água na pressão atmosférica a uma temperatura de 4 °C.

$$d = \frac{\rho_{FLUIDO}}{\rho_{(ÁGUA A 4^{\circ}C)}} = \frac{\gamma_{FLUIDO}}{\gamma_{(ÁGUA A 4^{\circ}C)}}$$

Viscosidade

Consiste em uma propriedade do fluido, que surge devido à coesão e interação entre moléculas, oferecendo resistência à tensão de cisalhamento.

► **Viscosidade Dinâmica:**

- A viscosidade dinâmica, μ , é definida como a força de cisalhamento, por unidade de área, necessária para arrastar uma camada de fluido com velocidade unitária para outra camada afastada a uma distância unitária.

$$\mu = \tau / \frac{du}{dy}$$

► Unidade: $\mu = \frac{\text{Força}}{\text{Área}} / \frac{\text{Velocidade}}{\text{Distância}}$

$$\mu = \frac{kg}{m \cdot s}$$

► Dimensão: $[\mu] = MT^{-1}L^{-1}$



▶ **Viscosidade Cinemática:**

- ▶ A viscosidade cinemática, ν é definida como a relação entre a viscosidade dinâmica e a massa específica.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

- ▶ Unidade: $\nu = \frac{m^2}{s}$

- ▶ Dimensão: $[\nu] = M^0 L^2 T^{-1}$



Taxas de deformação típicas de processos



Aplicação	Taxa (s⁻¹)
▶ Sedimentação	0.0000001
▶ Separação de fase	0.000001
▶ Escorrimento	0.01
▶ Mastigação	100.00
▶ Bombeamento	1000.00
▶ Pintura	1 000.00

Viscosidade dinâmica a 20 °C

Substância	Viscosidade em Pa.s
ar	0.00001
acetona	0.0003
água	0.001
leite	0.01
azeite de oliva	0.1
óleo de mamona	1,0
mel líquido	10
polímero fundido	1.000
asfalto	100.000

Outras unidades

Viscosidade dinâmica [Pa.s]

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

$$1 \text{ Pas} = 1000 \text{ mPas}$$

$$1 \text{ mPas} = 1 \text{ cP (centi Poise)}$$

$$\tau = \text{tensão de cisalhamento [Pa]}$$

$$\dot{\gamma} = \text{taxa de cisalhamento [s}^{-1}\text{]}$$

Viscosidade cinemática [mm² /s] $\nu = \mu / \rho$

$$1 \text{ mm}^2/\text{s} = 1 \text{ cSt (centi Stokes)}$$

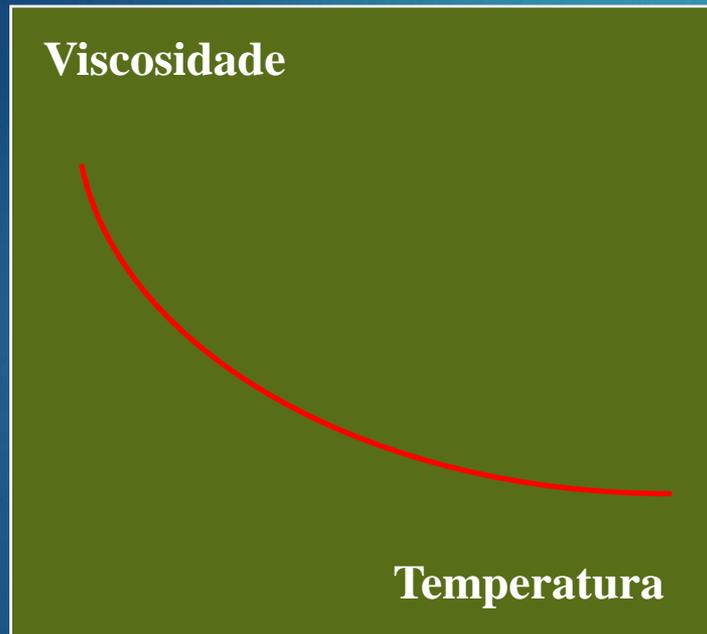
$$\rho = \text{densidade [g / cm}^3\text{]}$$

Fatores que influenciam a viscosidade

- ▶ Temperatura
- ▶ Pressão
- ▶ Taxa de cisalhamento
- ▶ Tempo
- ▶ Composição

Viscosidade = f (temperatura, pressão)

Viscosidade = f (T)

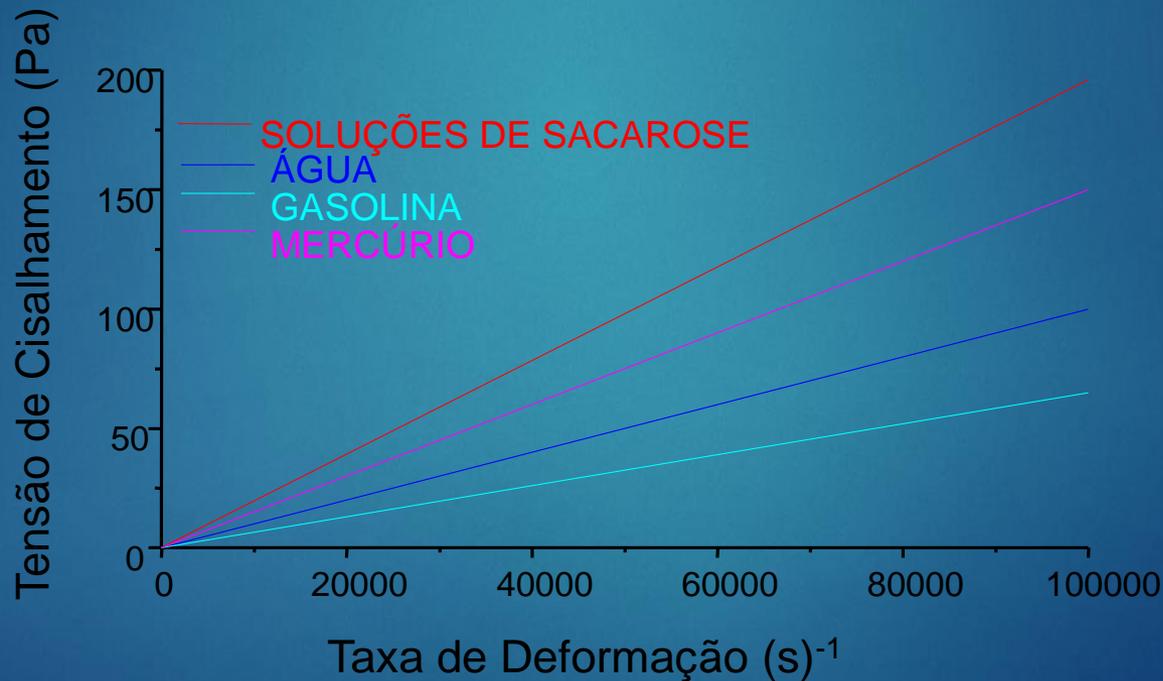


Viscosidade = f (p)



Fluido Newtonianos

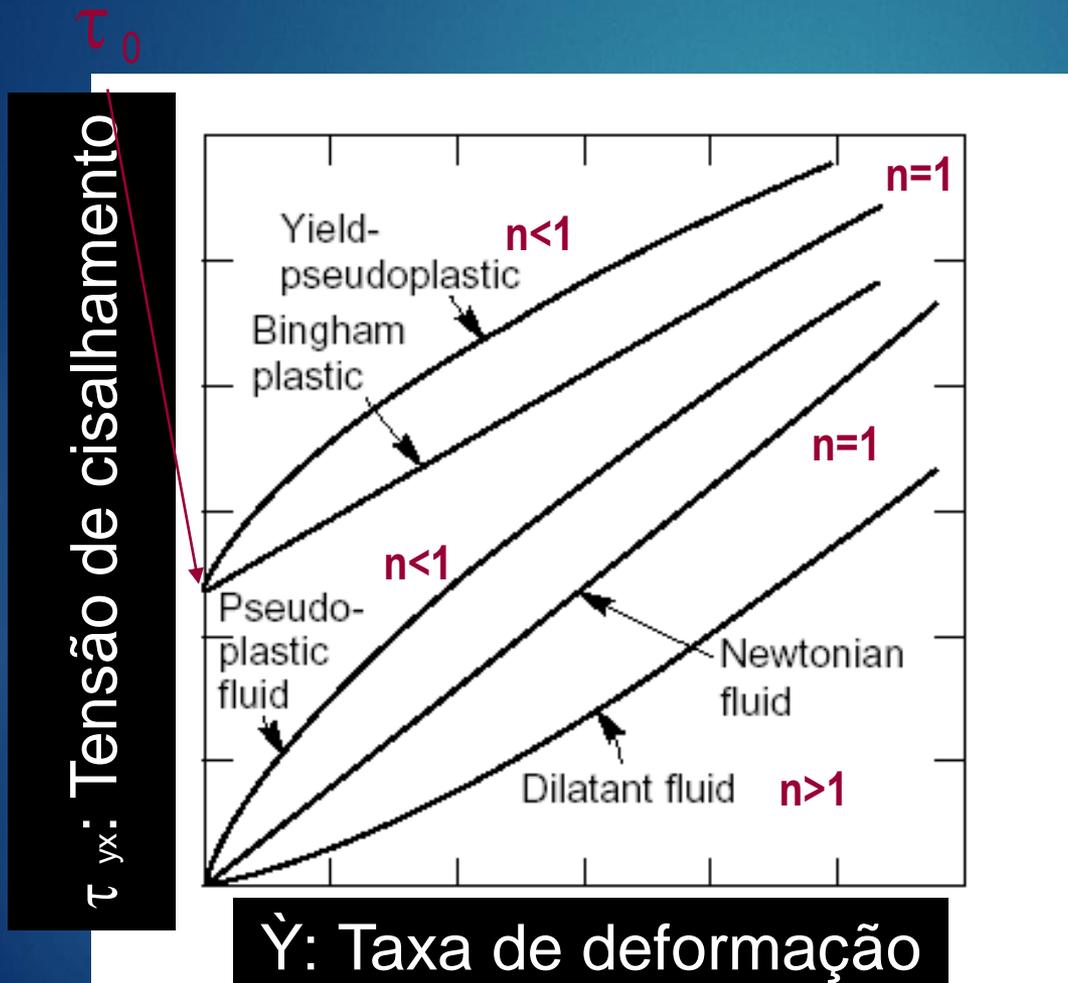
- Comportam-se de acordo com a equação $\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$



Fluidos Não-Newtonianos

- ▶ A viscosidade varia de acordo com a taxa de deformação (ou tensão de cisalhamento), temperatura e composição.
- ▶ Exemplos:
 - ▶ Suspensões de sólidos, polímeros e dispersões.
- ▶ Podem ser dependentes ou independentes do tempo.

Fluidos independentes do tempo



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

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

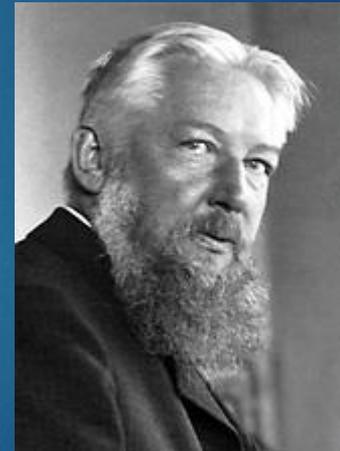
O modelo mais comum é aquele descrito pela **lei da potência** ou equação de Ostwald de Waele:

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

K = índice de consistência ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$)

n = índice de comportamento do fluido

Eles podem ser classificados em **pseudoplásticos** e **dilatantes** de acordo com o valor de n .



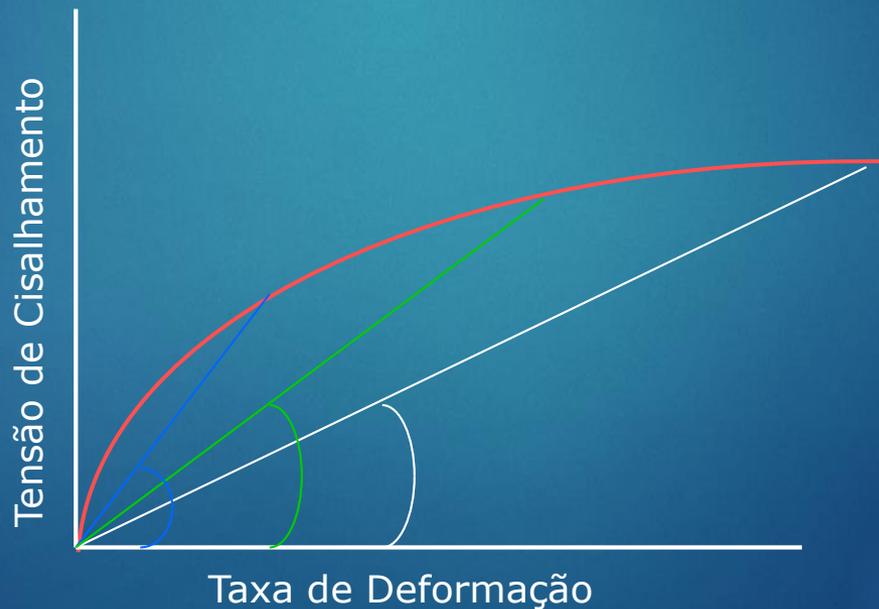
Análise Dimensional de k

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad \text{ou seja} \quad k = \frac{\tau}{\dot{\gamma}^n} \quad \text{portanto}$$

$$k [=] \frac{\frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{\left(\frac{1}{\text{s}}\right)^n} [=] \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{s}^n [=] \text{Pas}^n$$

Fluido Pseudoplástico

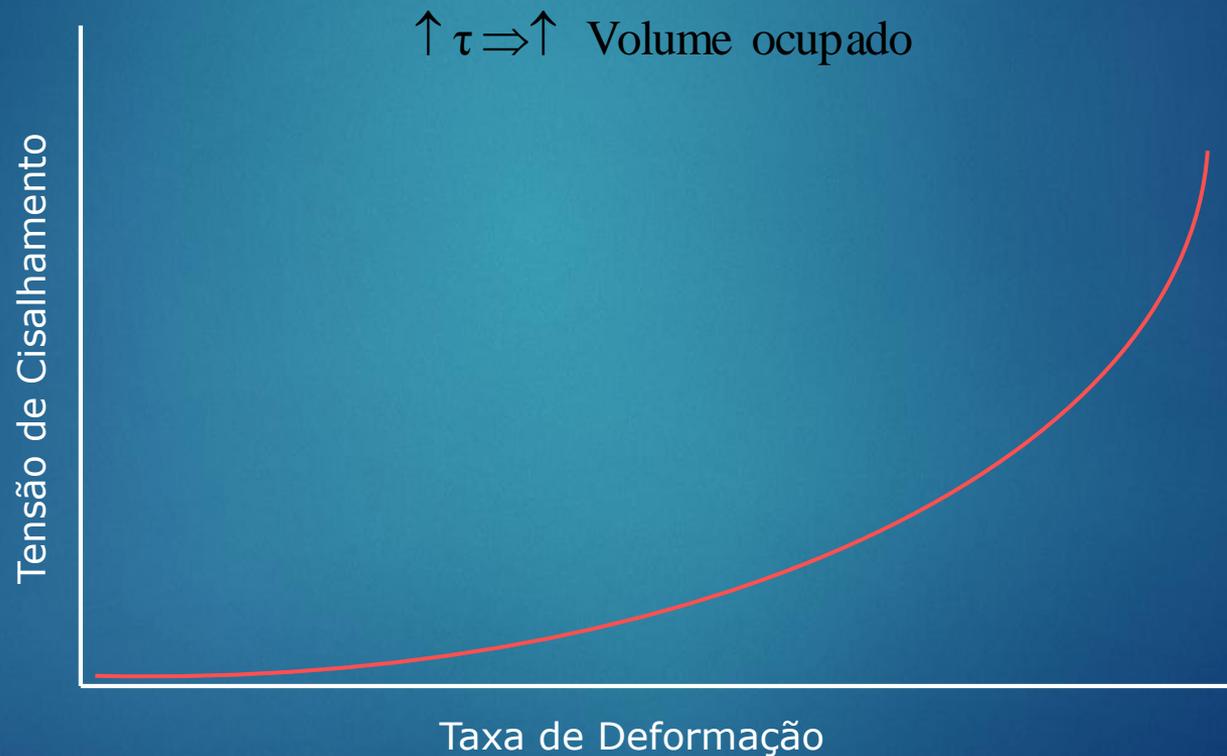
- É um fluido cuja viscosidade **decrece** com o **aumento de taxa de cisalhamento**.
- Exemplos incluem cosméticos (cremes, pomadas); condimentos (ketchup, molhos); fluidos biológicos (sangue); e materiais industriais (colas, tintas, vernizes)



Fluidos Dilatantes



- São fluidos que quando submetidos a uma grande força de cisalhamento aumentam de volume.
- O exemplo mais conhecido é o da mistura de água (2 partes) com maizena (de 3 a 4 partes



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

Plásticos de Bingham:

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

$$\tau = \tau_0 + \mu_0 \dot{\gamma}^n$$

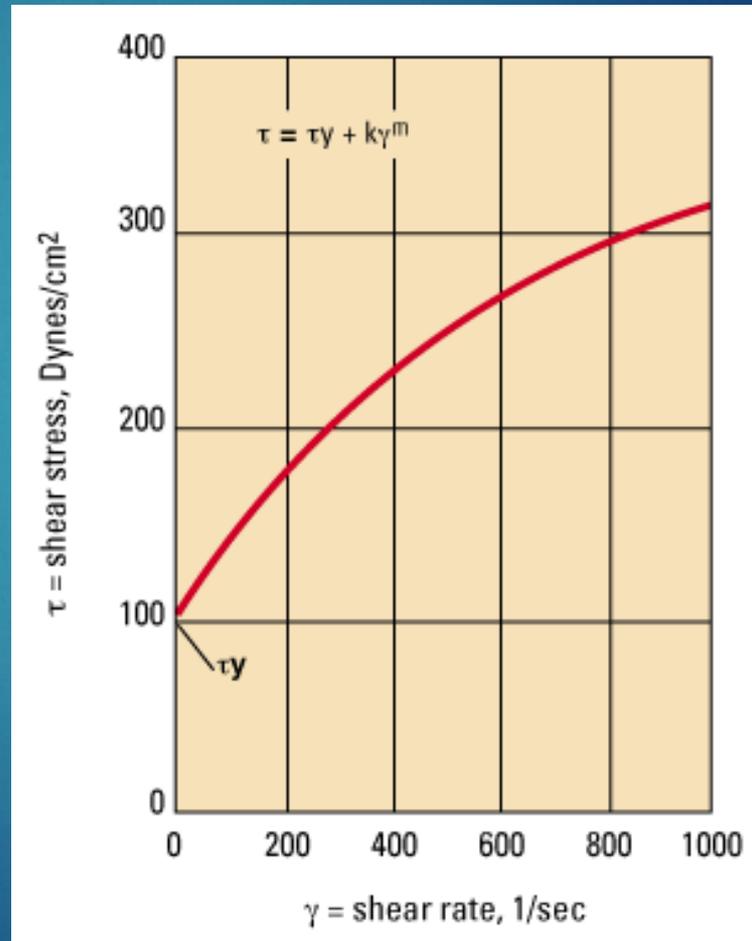
Para $\tau > \tau_0$

Onde μ_0 = viscosidade plástica (Pa.s)

Fluidos Herschel-Bulkley:

Para $n < 1$

$$\tau = \tau_0 + \mu_0 \dot{\gamma}^n$$



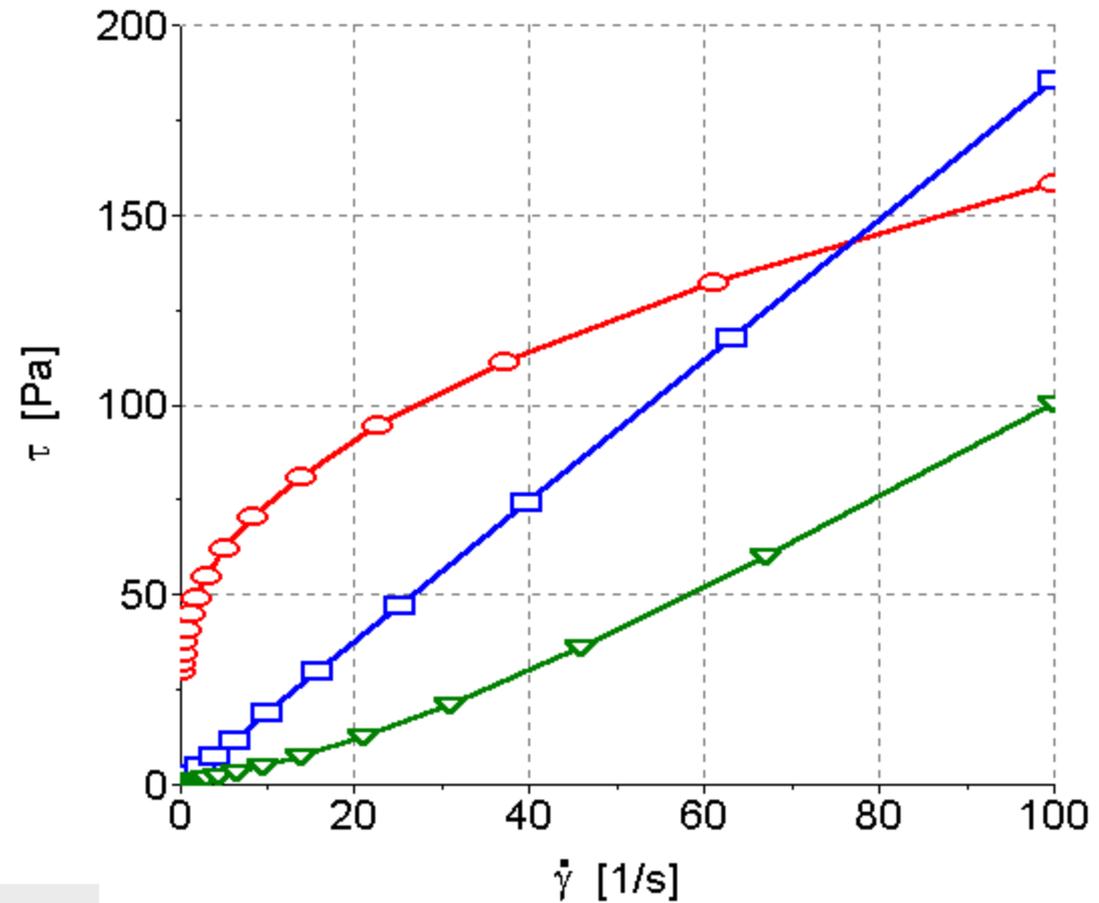
Comportamento do Fluido

Curvas de fluxo
de fluidos

□ Newtonianos

○ Pseudoplásticos

▽ Dilatantes



Fluidos não-newtonianos dependentes do tempo

Fluidos tixotrópicos (afinantes):

Certos pseudoplásticos quando submetidos a uma taxa de cisalhamento constante tem sua aparente viscosidade diminuída ao longo do tempo em que tensão de cisalhamento é aplicada.

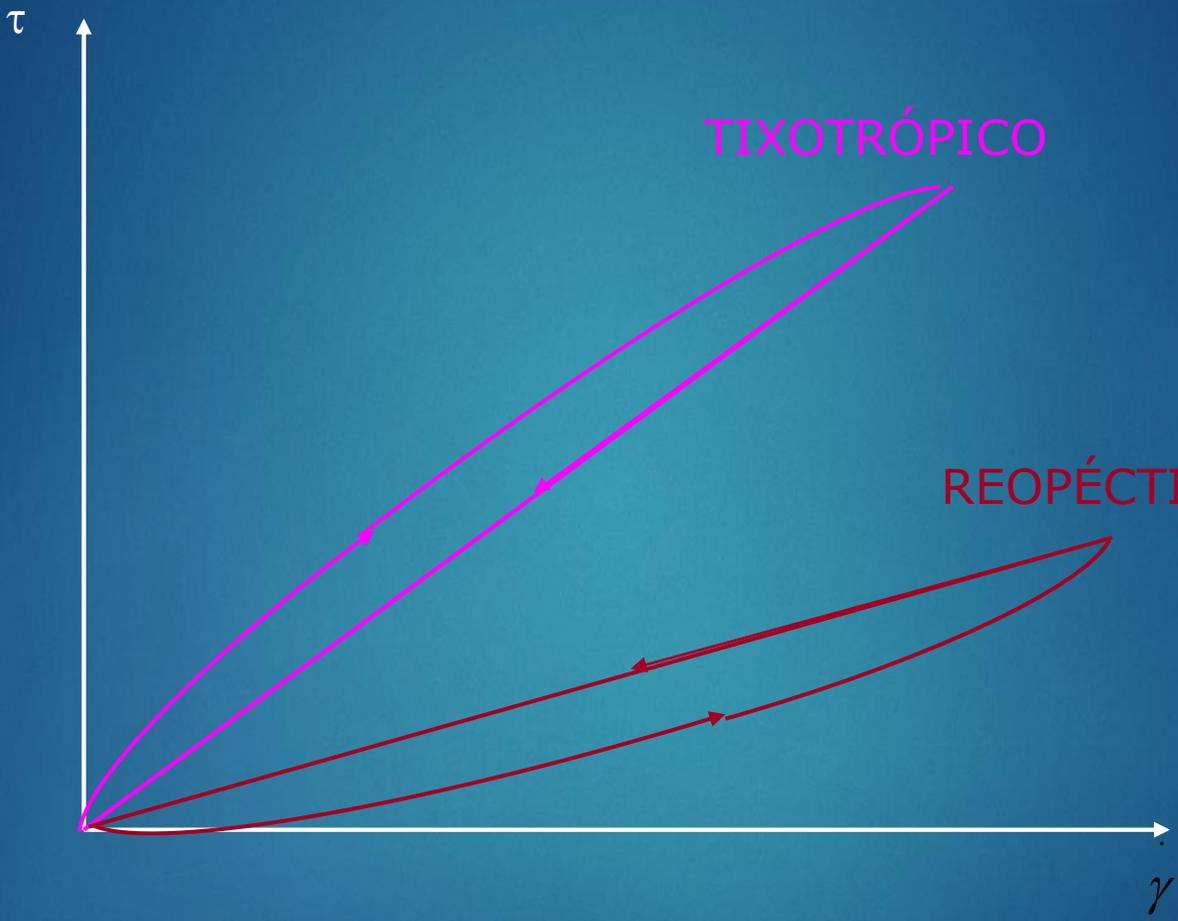
Assim, quando a taxa de cisalhamento sofre um incremento, a viscosidade do material diminui sistematicamente com o tempo até atingir um valor de equilíbrio.

Exemplo: lama proveniente da atividade vulcânica, vidros, etc.

Fluidos reopécticos (espessantes):

Quando um fluido ao se submetido a uma taxa de cisalhamento constante tem a sua viscosidade aumenta progressivamente com o tempo até atingir um valor de equilíbrio.

Exemplos: gesso, certas pastas e tintas.



TIXOTRÓPICO

REOPÉCTICO



Assim...



Próxima aula

- ▶ Hidrostática
 - ▶ Pressão
 - ▶ Teorema de Pascal, Arquimedes e Stevin.
 - ▶ Barômetro: Equação manométrica.
 - ▶ Empuxo.
 - ▶ Equilíbrio dos corpos
 - ▶ Exemplos