

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS**



*Operações Unitárias I*

**Introdução a transferência de quantidade de movimento**

**Dinâmica dos Fluidos – FLUIDOS EM ESCOAMENTO**

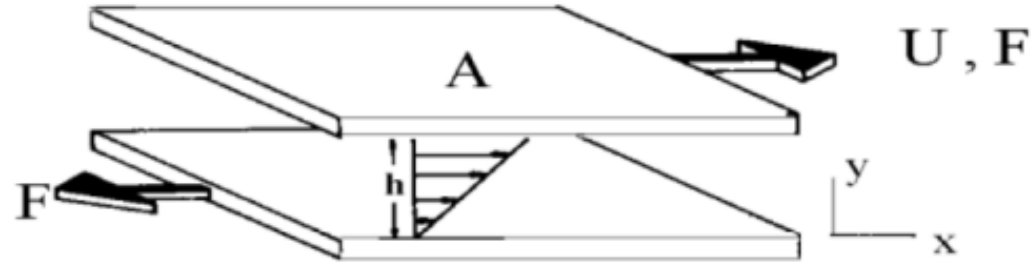
**AULA 18**

**Profa. Dra. Bianca Chierregato Maniglia**

[biancamaniglia@usp.br](mailto:biancamaniglia@usp.br)

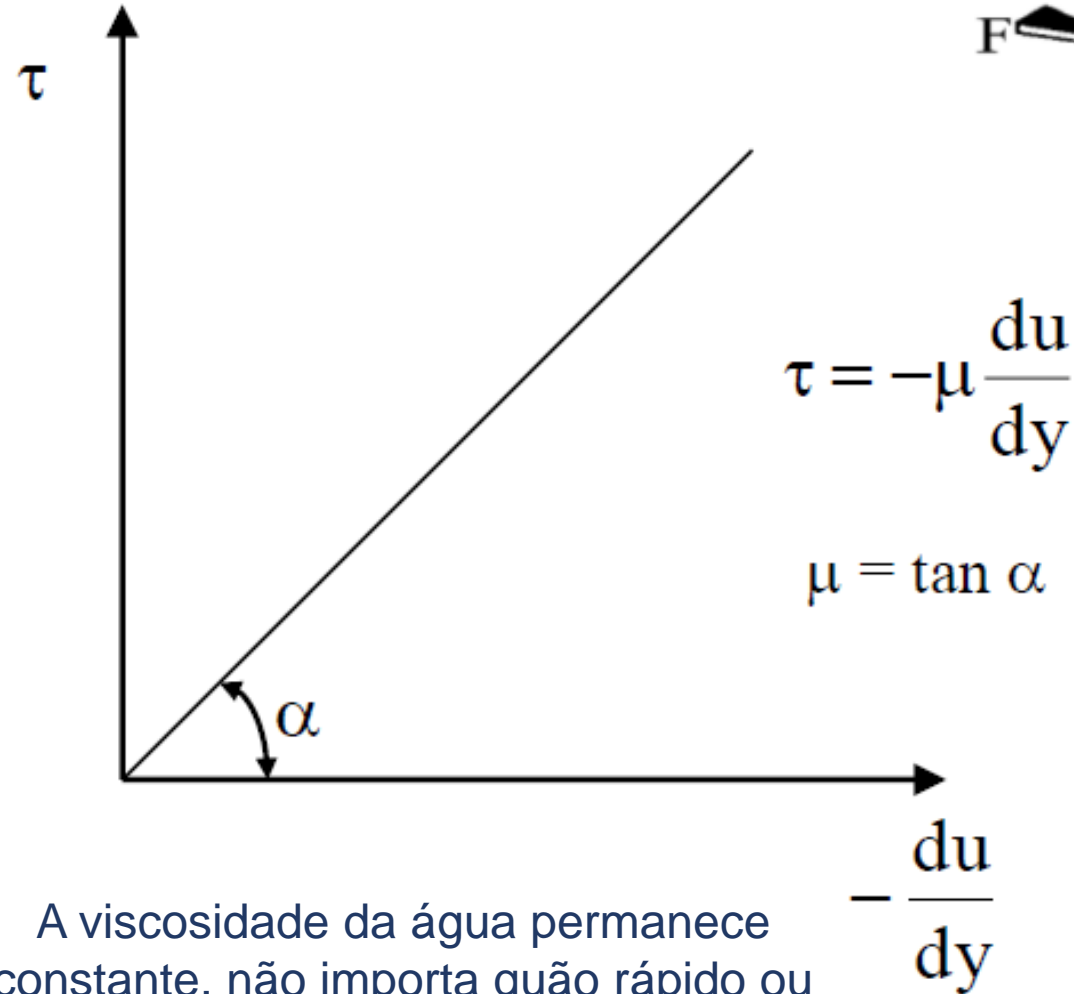
[biancamaniglia@iqsc.usp.br](mailto:biancamaniglia@iqsc.usp.br)

# Fluidos Newtonianos



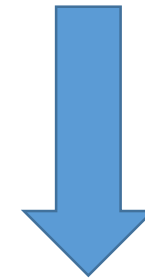
VISCOSIDADE

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



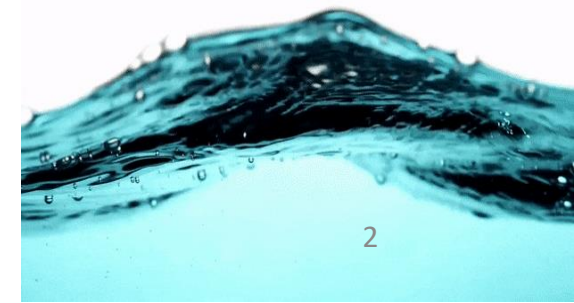
Lei de Newton

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} = \mu \dot{\gamma}$$



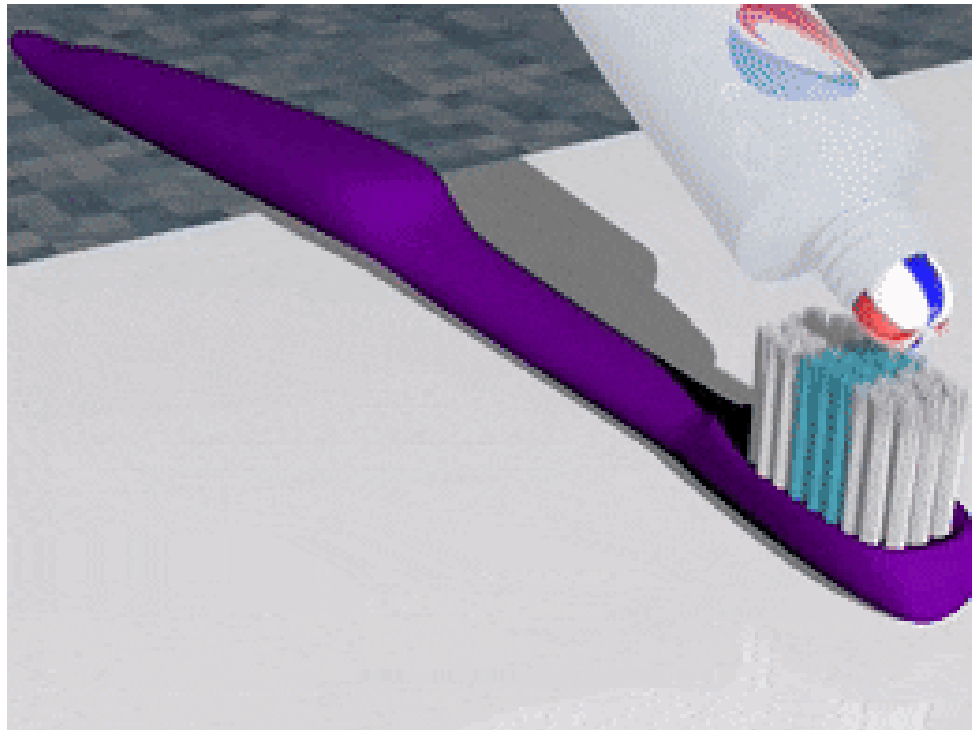
Fluidos newtonianos

A viscosidade da água permanece constante, não importa quão rápido ou devagar ela esteja fluindo, desde que a temperatura seja mantida constante.





## Fluidos Não-Newtonianos



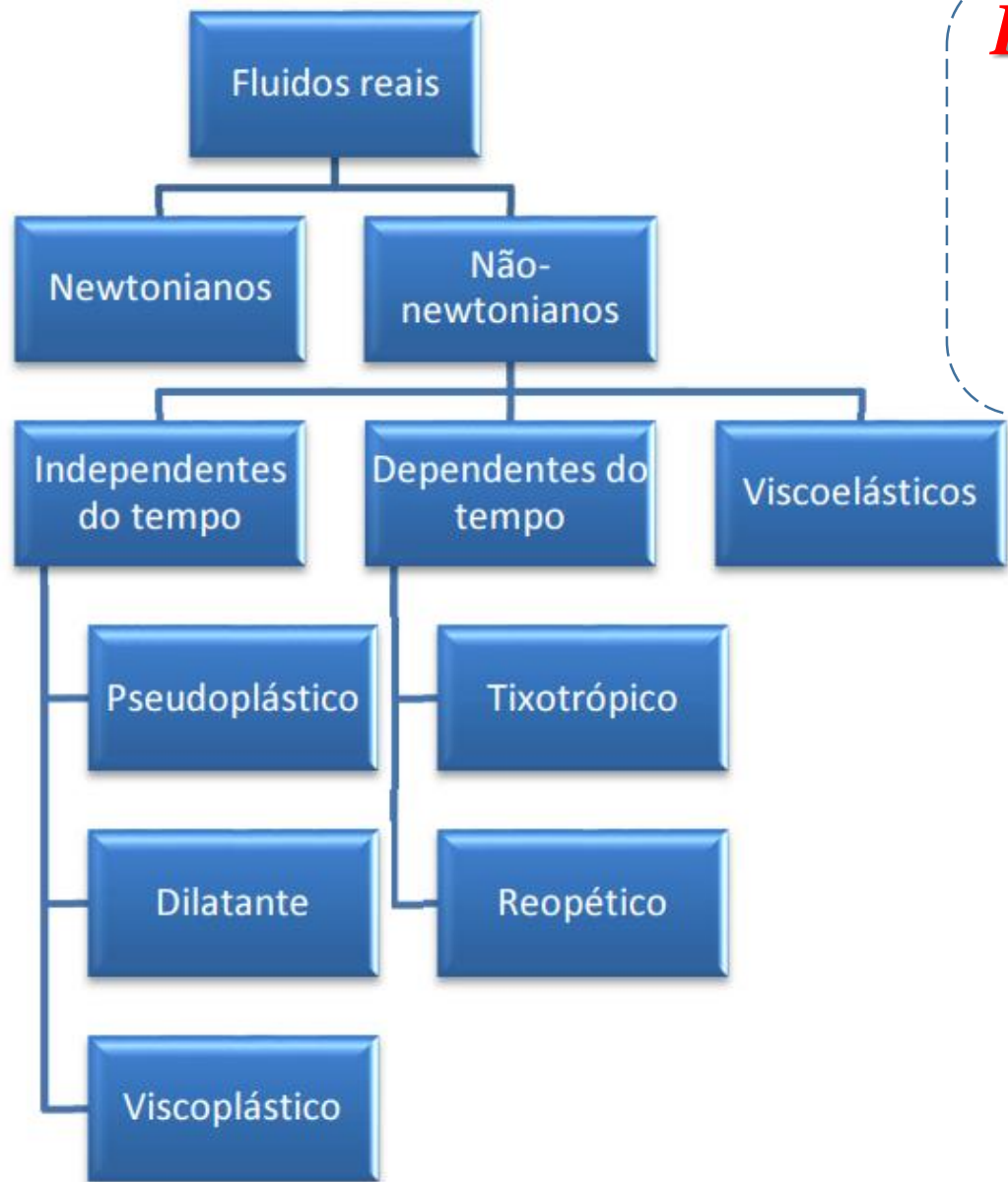


Figura 4 - Esquema da classificação dos fluidos reais  
(Adaptado de Mothé, 2007)

### *Fluidos Newtonianos*

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} = \mu \dot{\gamma}$$

**LINEAR**

### *Fluidos Não-newtonianos*

$$\tau = K \left( \frac{du}{dy} \right)^n$$

**NÃO LINEAR**

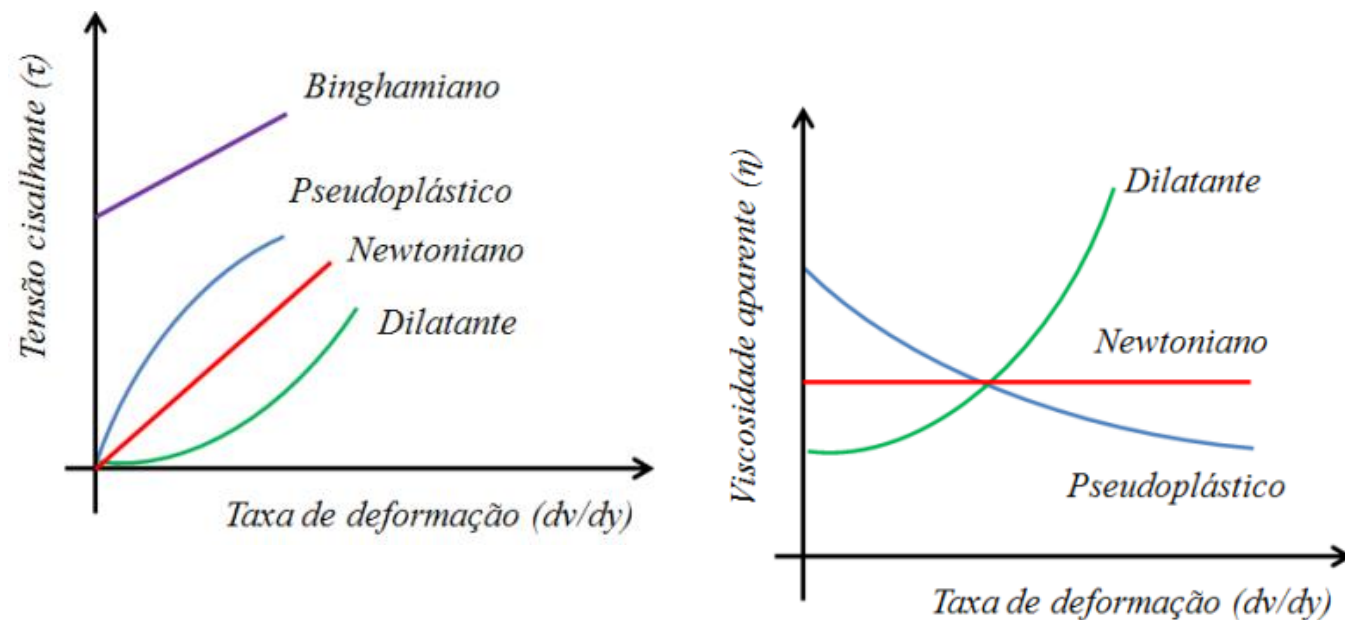


Figura. Comportamento reológico dos fluidos independentes do tempo  
(Adaptado de Fox & McDonald, 1998)

# Fluidos Não-newtonianos

Não dependentes do Tempo

$$\tau = K \left( \frac{du}{dy} \right)^n$$

**NÃO LINEAR**

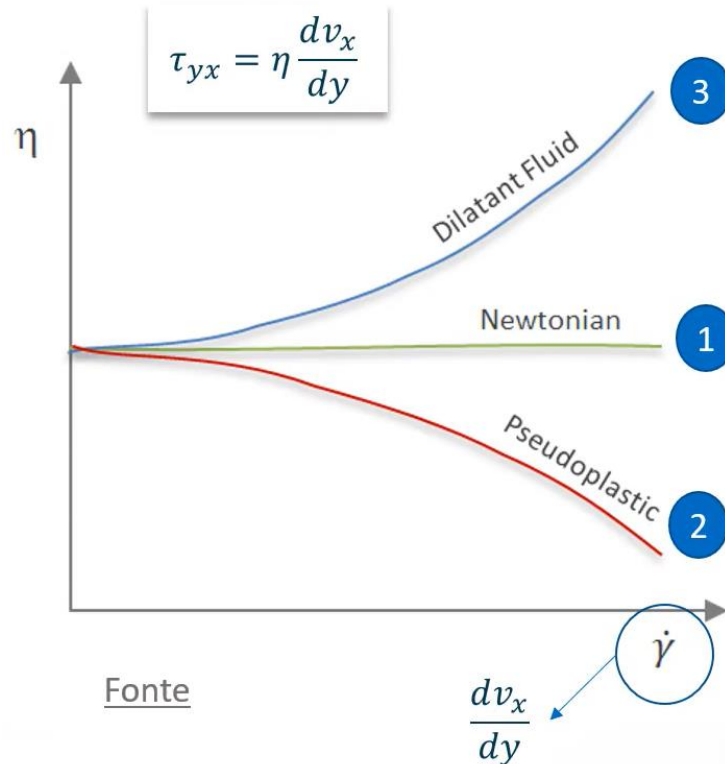
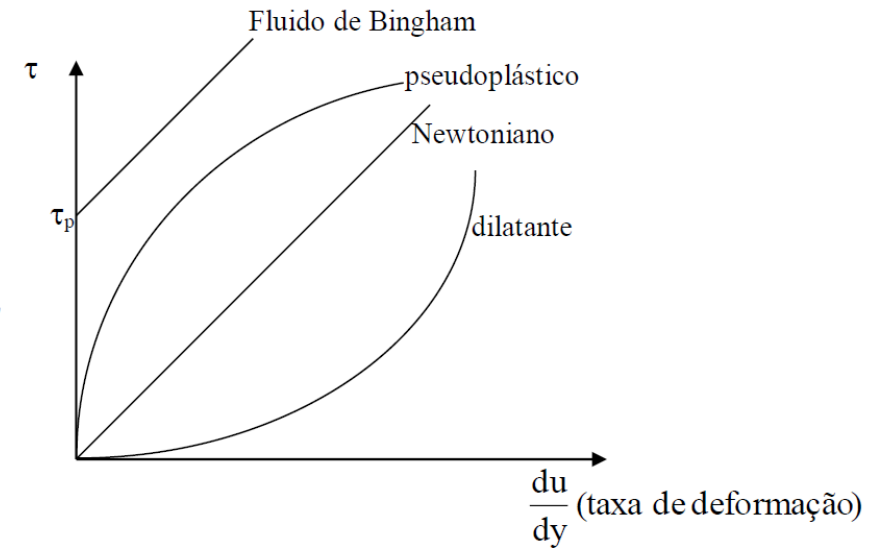
K = índice de consistência

n = índice de comportamento quando

n = 1 ⇒ fluido newtoniano e K = μ

0 < n < 1 ⇒ fluido pseudoplástico

n > 1 ⇒ fluido dilatante



3. Se aumentar a velocidade, percebe-se que a viscosidade aumenta, caracterizando um fluido dilatante.

1. Se a viscosidade é constante, indica um comportamento newtoniano.

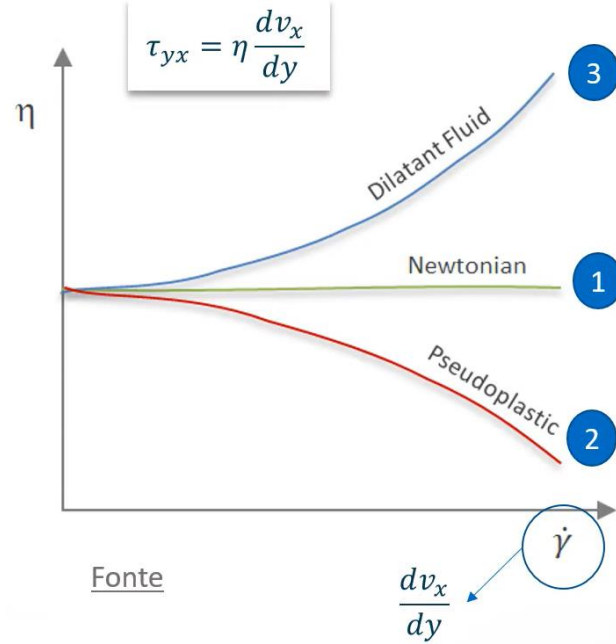
2. Se aumentar o fluxo, percebe-se que a viscosidade diminui, caracterizando um comportamento pseudoplástico.

Fluido Pseudoplástico



Fluido Dilatante





## Pseudoplástico

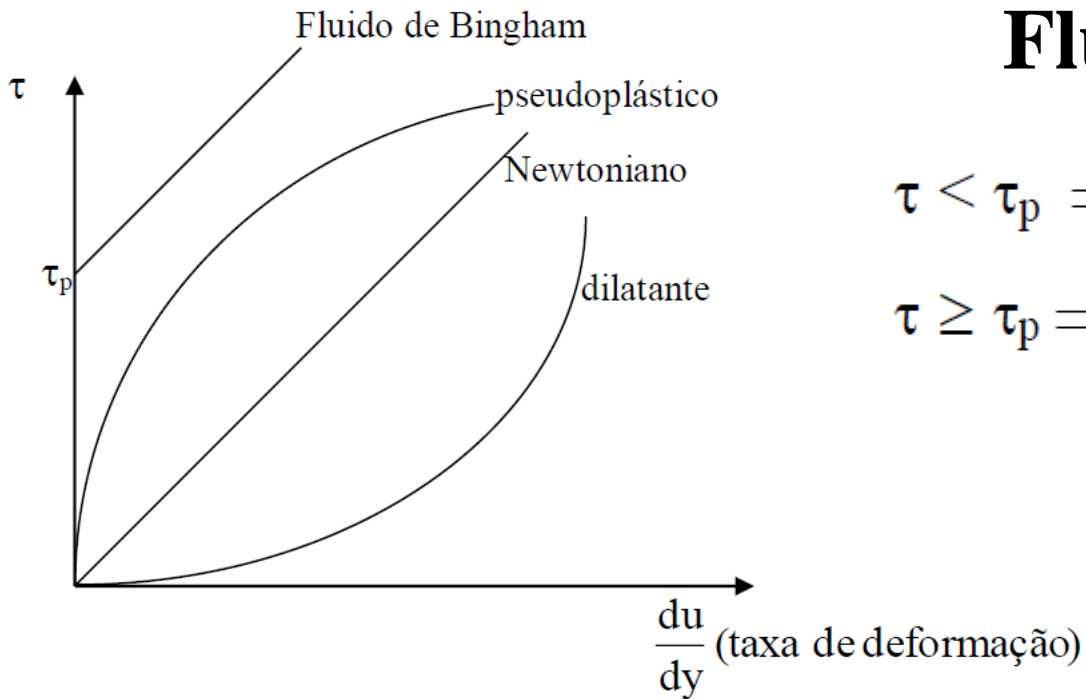
$$\tau = K \left( \frac{du}{dy} \right)^{n-1} \frac{du}{dy}, \quad 0 < n < 1$$

## Dilatante

$$\tau = K \left( \frac{du}{dy} \right)^{n-1} \frac{du}{dy}, \quad n > 1$$

Viscosidade  
Aparente

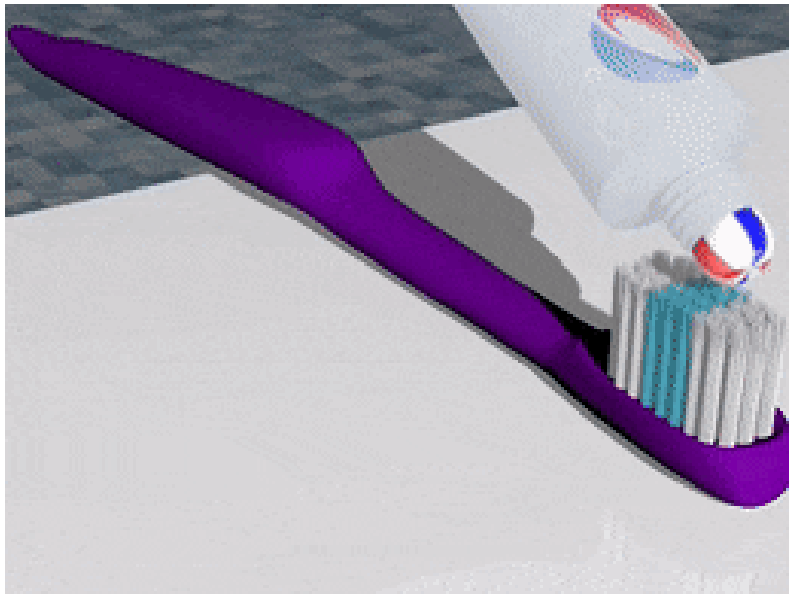
# Fluido de Bingham (viscoplásticos)



$\tau < \tau_p \Rightarrow$  comporta-se como um sólido

$\tau \geq \tau_p \Rightarrow$  comporta-se como Newtoniano

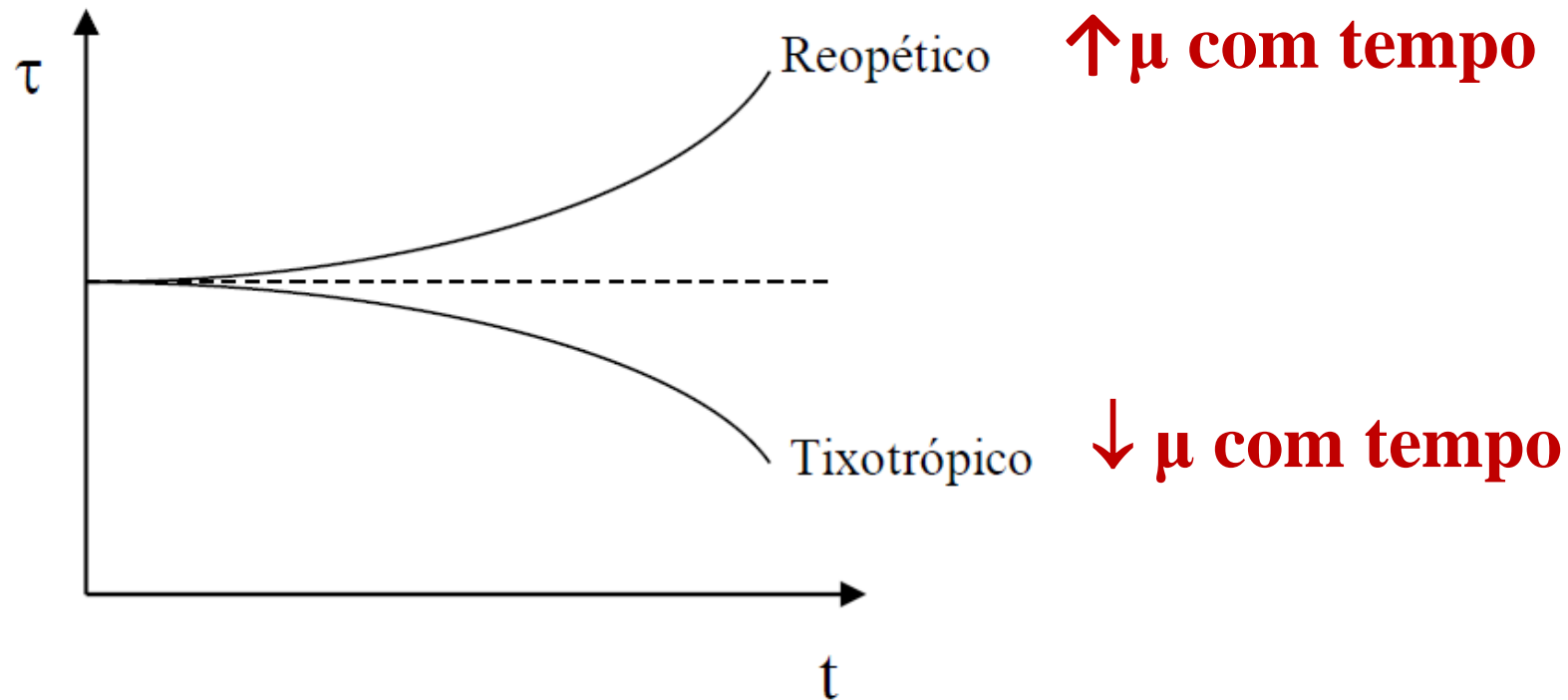
$$\tau = \tau_p + \mu_p \frac{du}{dy}$$



$\tau > \tau_p$

$\mu_p \Rightarrow$  constante análoga à viscosidade do fluido Newtoniano

# Fluidos não-Newtonianos Dependentes do Tempo



Massa de argila



Gel de acrilamida



# Viscoelásticos

- ✓ Características viscosas e elásticas ao sofrer deformação
- ✓ Dependente do tempo + Propriedades intrínsecas do material.

**Viscoelasticidade é  
um rearranjo molecular**



**REOMETRIA**

**REOLOGIA**

**ESTUDO DO ESCOAMENTO**

“resposta dos materiais quando submetido a forças externas”

**VISCOSIDADE**



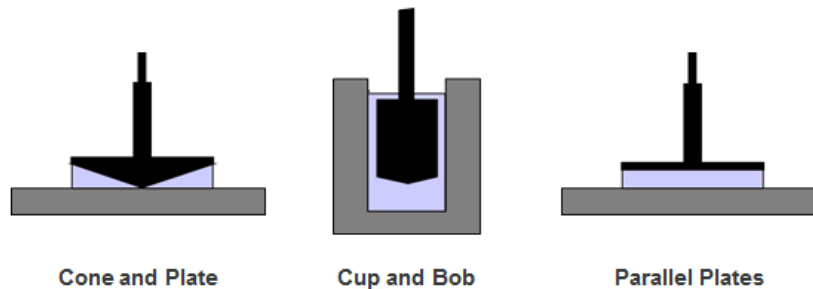
**Viscosímetros**

**X**

**Reômetro**

# Reômetro

- ✓ Instrumento que mede a história de tensão e deformação de um fluido
- ✓ Consegue classificar que tipo de lei o fluido segue. (newtoniano ou não newtoniano)



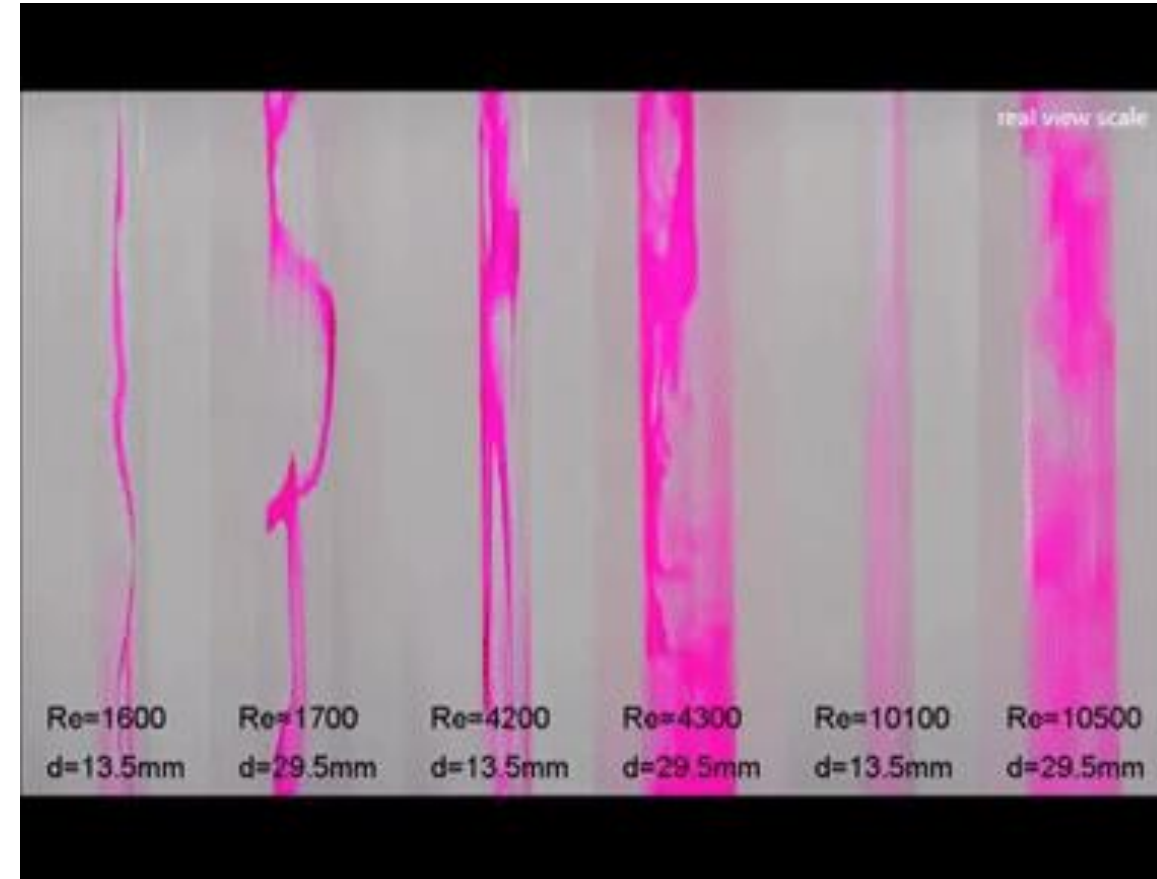
# Viscosímetro

- ✓ Quantifica a viscosidade



**FLUXO LAMINAR**

**TIPOS DE ESCOAMENTO**



**Número de Reynolds (R)**

**TURBULENTO => PROMOVE MAIOR MISTURA**

# Número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho v d_t}{\mu} \Rightarrow \frac{\text{forças inerciais}}{\text{forças viscosas}}$$

onde:  $\rho$  = densidade ( $\text{kg/m}^3$ ) do fluido

$v$  = velocidade ( $\text{m/s}$ ) de escoamento do fluido

$d_t$  = diâmetro interno do tubo ( $\text{m}$ )

$\mu$  = viscosidade dinâmica ( $\text{kg/m.s}$ )

$Re < 2100 \Rightarrow$  escoamento Laminar

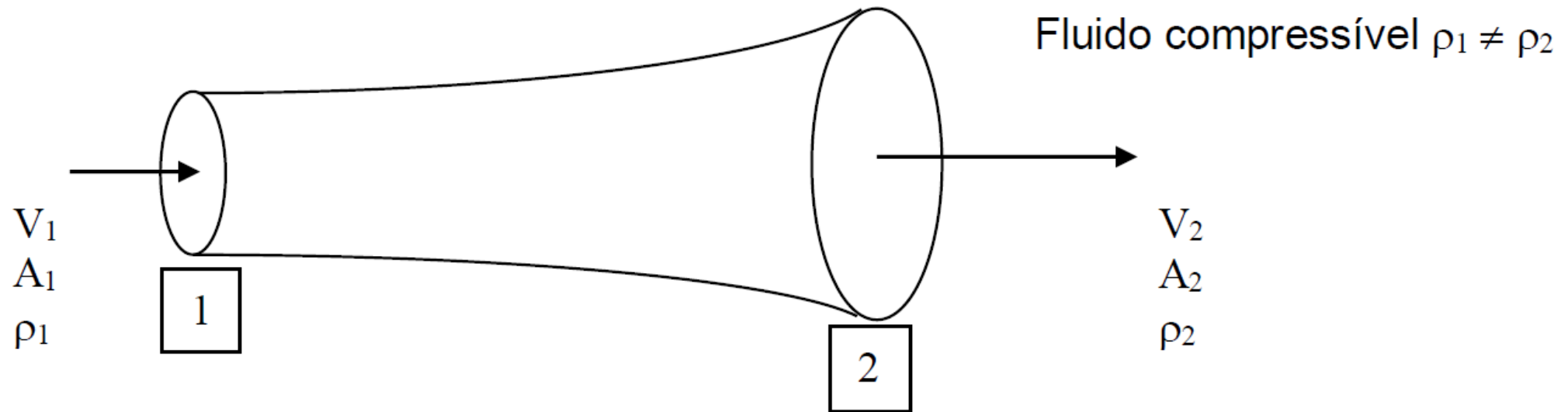
$Re > 2100 \Rightarrow$  escoamento Turbulento

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad \text{onde } \nu = \text{viscosidade cinemática} = \mu/\rho$$

# Equação do Balanço de Massa ou Equação da Continuidade

- ✓ Considere um fluxo estacionário e unidimensional.

*“A vazão mássica que entra no sistema é igual a de saída”*

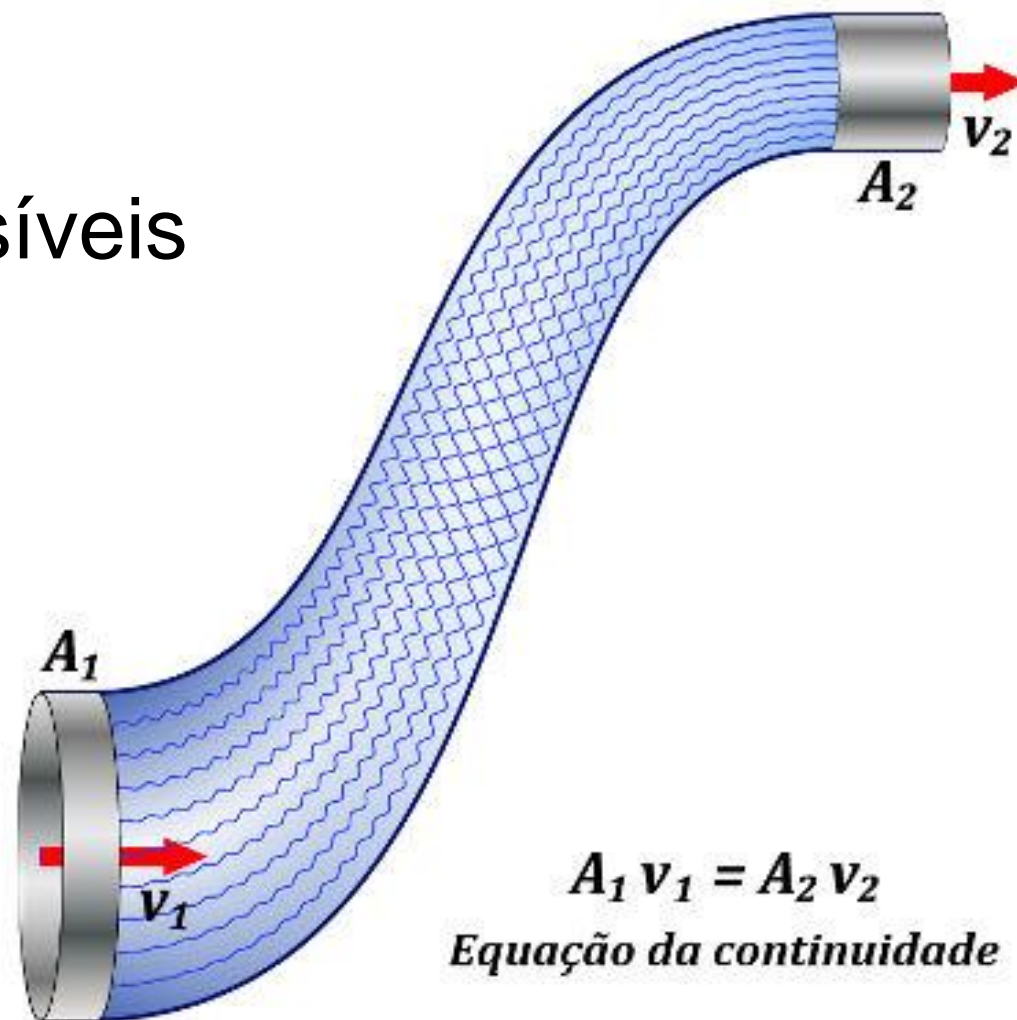


$$\therefore Q = \text{vazão} = Q_1 = Q_2$$

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 = \text{cte} = \text{Equação da Continuidade}$$

# Equação do Balanço de Massa ou Equação da Continuidade

Fluidos incompressíveis  
( $\rho_1 = \rho_2$ )



# Equação do Balanço de Energia Mecânica: Equação de Bernoulli

$$Q + W + \sum E_j = \sum E_j \quad E_j = U_j + E_{c,j} + E_{p,j} \quad \text{onde: } W_{\text{eixo}} \Rightarrow \text{rotor de uma bomba}$$

Correntes entrada
Correntes saída

$$W = W_{\text{eixo}} + W_{\text{fluxo}} \quad W_f = P_o V_o - P_s V_s$$

$V = \text{vazão}$

$$\sum E_{j(s)} - \sum E_{j(e)} = Q + W_e + W_f = Q + W_e + (PV)_{\text{entrada}} - (PV)_{\text{saída}}$$

$$\sum_s (U_j + E_{c,j} + E_{p,j} + P_j V_j) - \sum_e (U_j + E_{c,j} + E_{p,j} + P_j V_j) = Q + W_e$$

$$\therefore Q = 0 \text{ e } W_e = 0$$

- ✓ Sem bomba
- ✓ Sem perda de calor com a vizinhança

$$\therefore \Delta u = 0$$

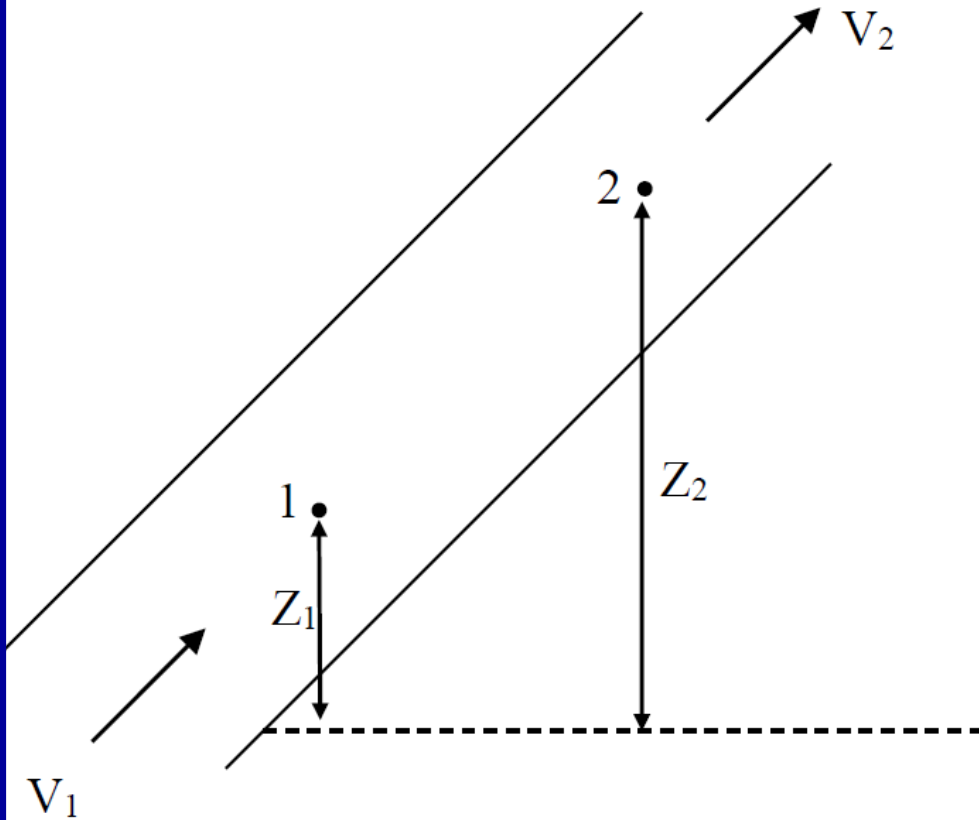
- ✓ Não há variação de temperatura

Equação de Bernoulli

$$\therefore \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta(PV) = 0$$



# Balço de Energia



- ✓ Fluido perfeito  
(fluido ideal => não sofre perdas por atrito)
- ✓ A soma das energias potenciais, de pressão e cinética ao longo da trajetória do escoamento é **CONSTANTE**

$$\therefore \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta(PV) = 0$$

$$\left( \frac{m \cdot v_2^2}{2} - \frac{m \cdot v_1^2}{2} \right) + (m \cdot g \cdot z_2 - m \cdot g \cdot z_1) + (P_2 \cdot V - P_1 \cdot V) = 0$$

$$\underbrace{\left(\frac{m.v_2^2}{2} - \frac{m.v_1^2}{2}\right)}_{\mathbf{m.g}} + \underbrace{(m.g.z_2 - m.g.z_1)}_{\mathbf{m.g}} + \underbrace{(P_2.V - P_1.V)}_{\mathbf{m.g}} = 0$$

$$\left(\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}\right) + (z_2 - z_1) + \frac{(P_2.V - P_1.V)}{m.g} = 0$$

$$\gamma = \frac{m.g}{V} = \rho.g \quad \text{Peso específico} \quad \rho_1 = \rho_2$$

$$\underbrace{\left(\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}\right)}_{\text{CINÉTICA}} + \underbrace{(z_2 - z_1)}_{\text{POTENCIAL}} + \underbrace{\left(\frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma}\right)}_{\text{PRESSÃO}} = 0$$

# Interpretação da Equação de Bernoulli

- ✓ Equação é válida para fluidos incompressíveis ( $\rho_1 = \rho_2$ )
- ✓ Ausência de fricção
- ✓ Se a velocidade diminui, ocorre que **z** e **P** ou ambos aumentaram.
- ✓ Se a velocidade aumenta, ocorre que **z** e **P** ou ambos diminuíram.
- ✓ Se  $\Delta z \Rightarrow$  a compensação tem lugar mediante uma  $\Delta P$  ou  $\Delta v$ .

# Equação de Bernoulli para **Fluidos Reais**

- ✓ Existem correntes que estão influenciadas pelas superfícies sólidas (tubulações).
- ✓ **Equação de Bernoulli** => corrigir a equação devido a existência do atrito do fluido entre ele mesmo e também entre ele e as superfícies sólidas.
- ✓ Incluir na equação o trabalho fornecido ao fluido mediante uma bomba.

## Equação de Bernoulli => Trabalho de Bomba

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + W_e = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$



$W_e =$  trabalho de eixo

# Equação de Bernoulli => correção devido ao atrito do fluido

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + W_e = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_f$$

*Diminuição da velocidade, da pressão ou da altura geométrica.*



**PERDA DE CARGA**

*Energia perdida  
pelo fluido/unidade de peso, entre 2 pontos*