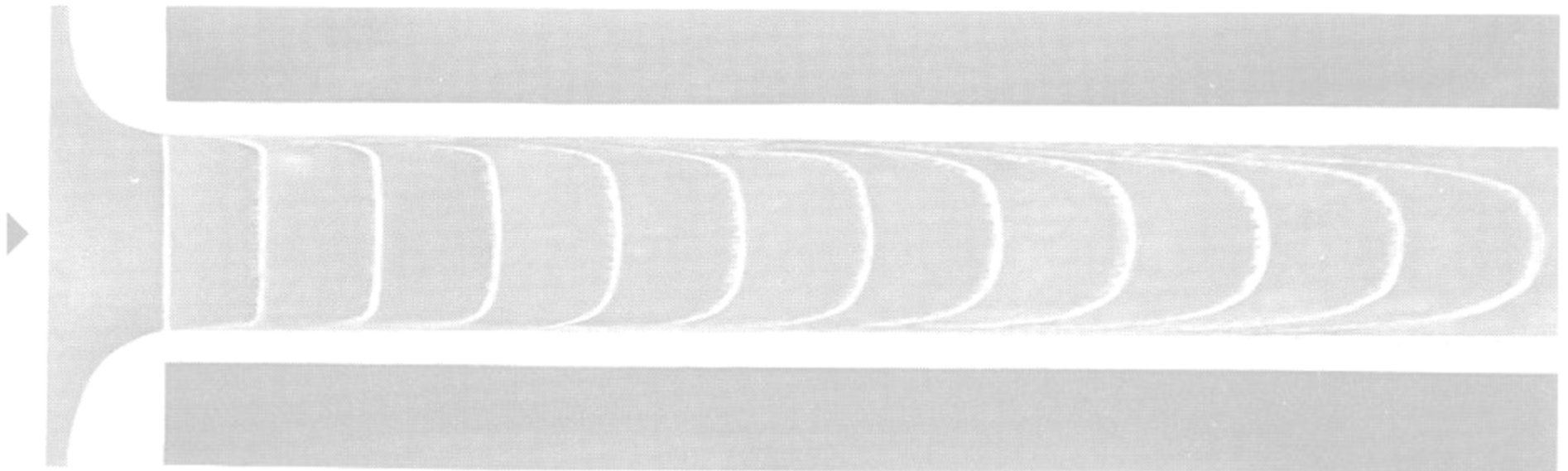




ZEM 5008 – Tópicos em Reologia

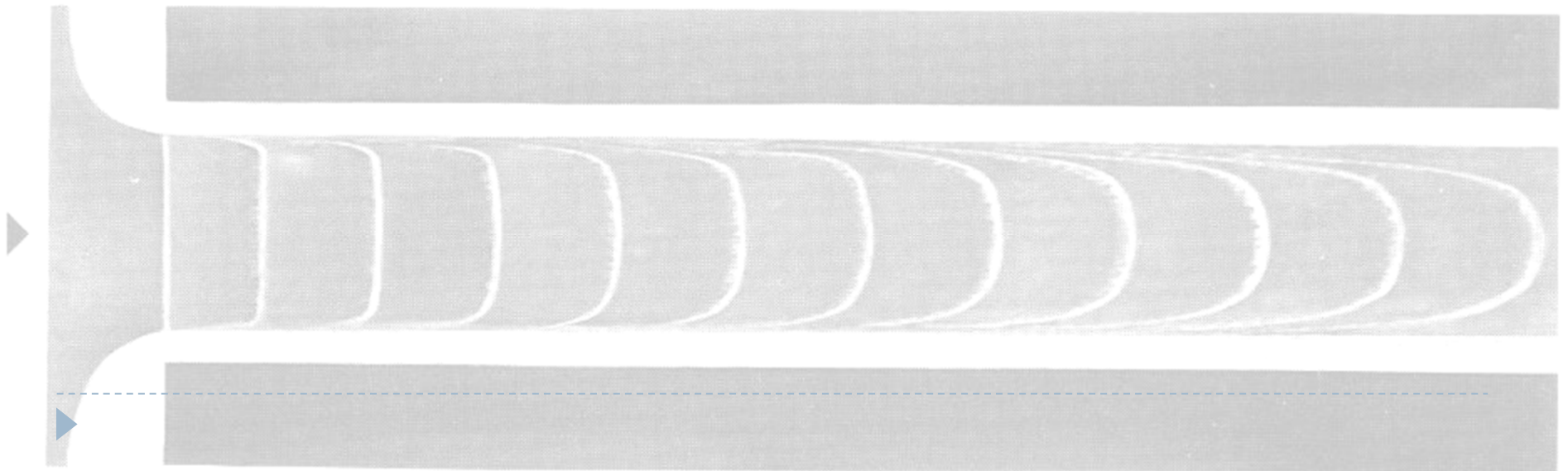
Profa. Dra. Cynthia Ditchfield
cditchfi@usp.br





Tópicos da Aula

- ▶ Tensão
- ▶ Deformação
- ▶ Taxa de Deformação





Reologia

▶ **Reologia** - Professor Bingham do Lafayette College

1929

▶ Do grego:

Rheo: escoamento ou Fluxo

Logos: Estudo

<http://www.youtube.com/watch?v=6RSSSwDx-2w>



O que estuda a Reologia?

- ▶ Ciência que estuda a **deformação** e o **escoamento** de corpos
- ▶ Os corpos podem ser **sólidos** ou **fluidos**

Sólidos: deformação elástica do material

Ex: queijo Parmesão, borracha

Líquidos: fenômenos físicos associados com o escoamento (deformação plástica)

Ex: suco de fruta concentrado, óleo lubrificante

Gases: Ex: na indústria se usam ar, CO_2 , CH_4 , nitrogênio, gases de refrigeração



Escoamento

▶ **Estudo cinético** – análise das forças que atuam sobre o sistema – variável cinética: tensão

$$\sigma = \frac{\text{Força}}{\text{Área}}$$

▶ **Estudo cinemático** – descrição do movimento no espaço físico e no tempo – variáveis cinemáticas: deformação, taxa de deformação

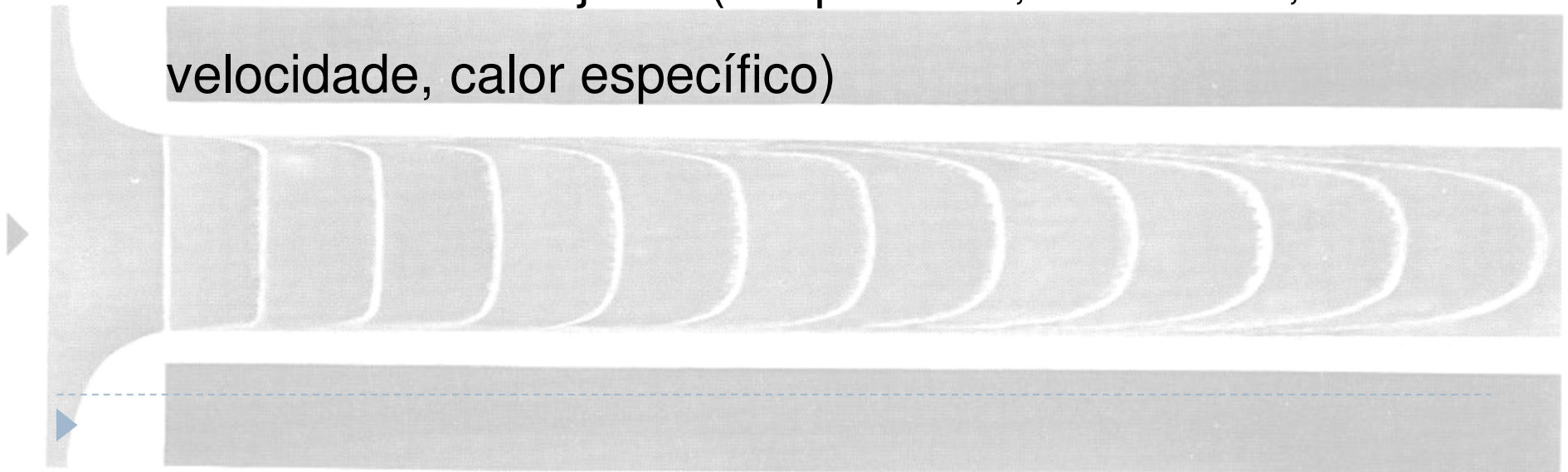
▶ Relação entre as variáveis cinéticas e cinemáticas



Contínuo

▶ Material

- ▶ Escalas de tamanho
- ▶ Escalas de tempo
- ▶ Conjunto de partículas
- ▶ Atributos do conjunto (temperatura, densidade, velocidade, calor específico)





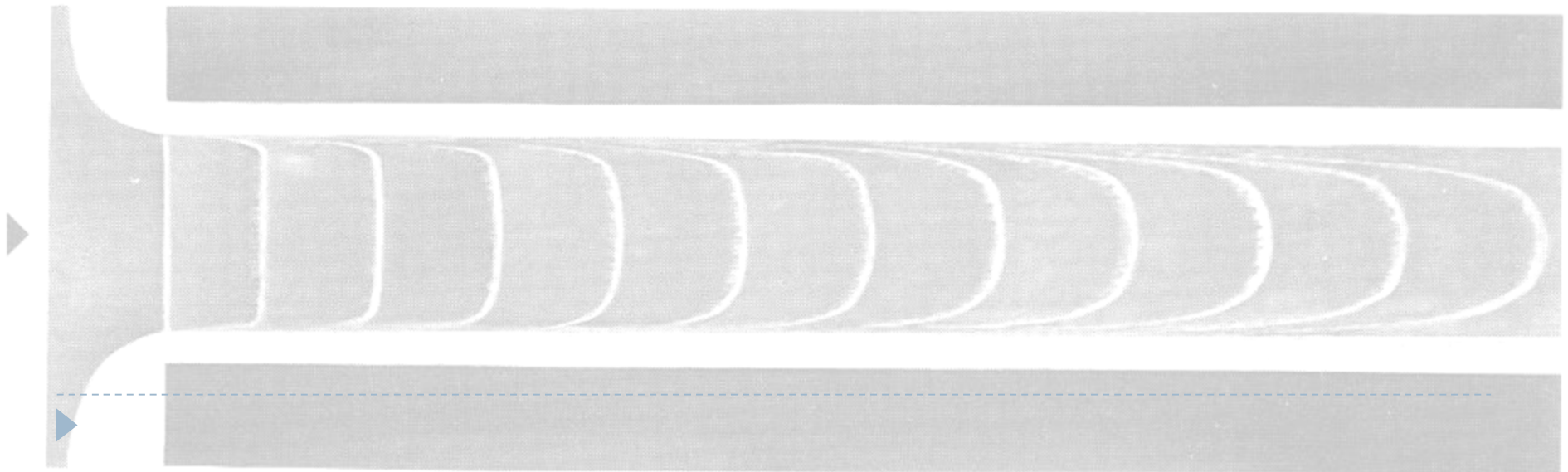
Tipos de Força

▶ Forças de contato

- ▶ Associadas a uma superfície

▶ Forças de corpo

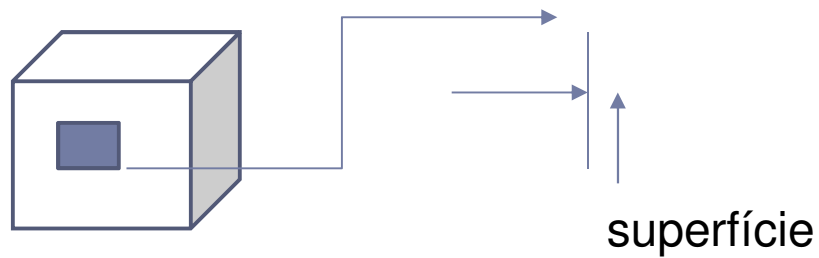
- ▶ Volumétricas (gravidade, campo elétrico/magnético)



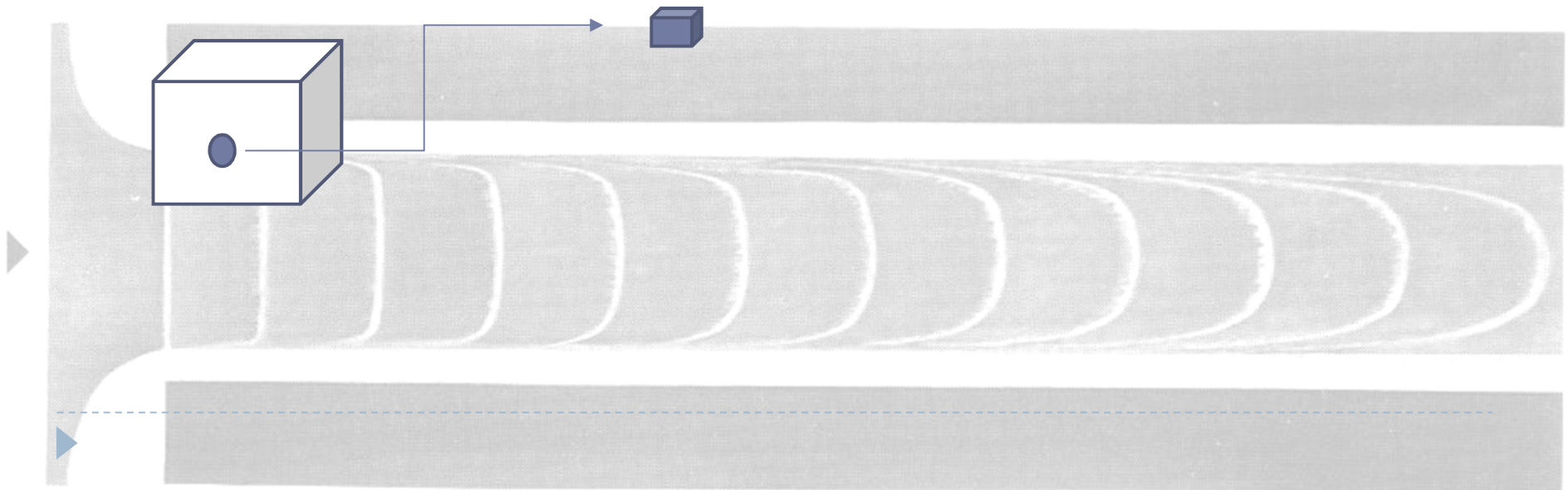


Tipos de Força

▶ Forças de contato



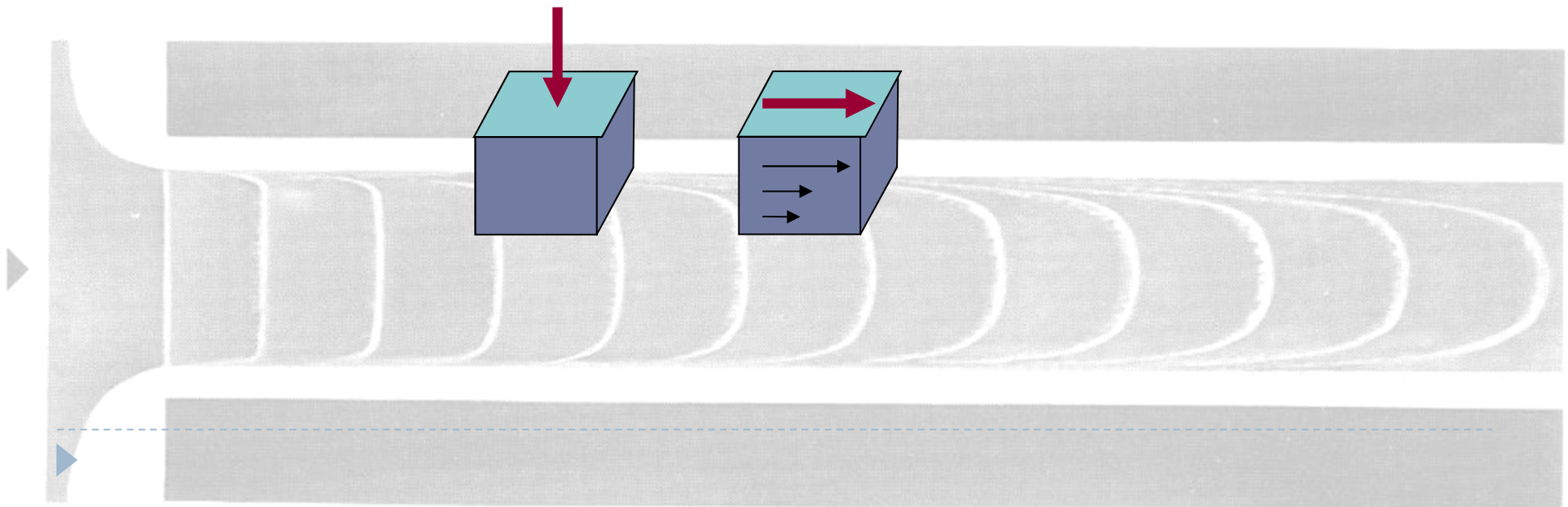
▶ Forças de corpo





Conceitos fundamentais

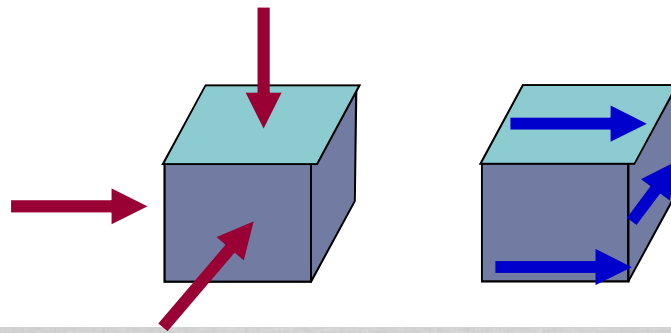
- ▶ Considere um elemento de volume de um fluido, com a forma de um cubo
- ▶ Resposta do material a uma força externa aplicada
- ▶ Se desenvolverá uma força interna agindo a partir dessa área que é denominada tensão (σ_{yx})





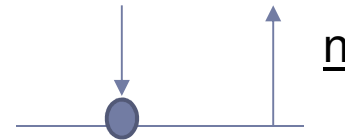
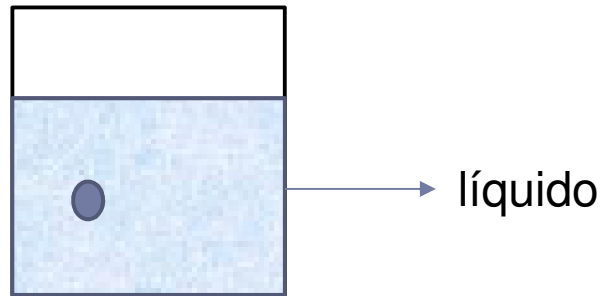
Conceitos fundamentais

- ▶ Existem dois tipos básicos de tensão que podem ser exercidas sobre qualquer material nesse volume.
- ▶ **Tensões normais (P):**
agem perpendicularmente à face do cubo
- ▶ **Tensões de cisalhamento (σ):**
agem tangencialmente às faces do cubo

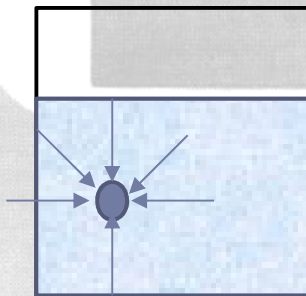




Pressão – Tensão Normal



Força de compressão $-p\underline{n}$



Pressão é a mesma em todas as direções

$$\begin{bmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix}$$



Tensão – Tensor

Em coordenadas esféricas:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{rr} & \sigma_{\theta r} & \sigma_{\phi r} \\ \sigma_{r\theta} & \sigma_{\theta\theta} & \sigma_{\phi\theta} \\ \sigma_{r\phi} & \sigma_{\theta\phi} & \sigma_{\phi\phi} \end{bmatrix}$$

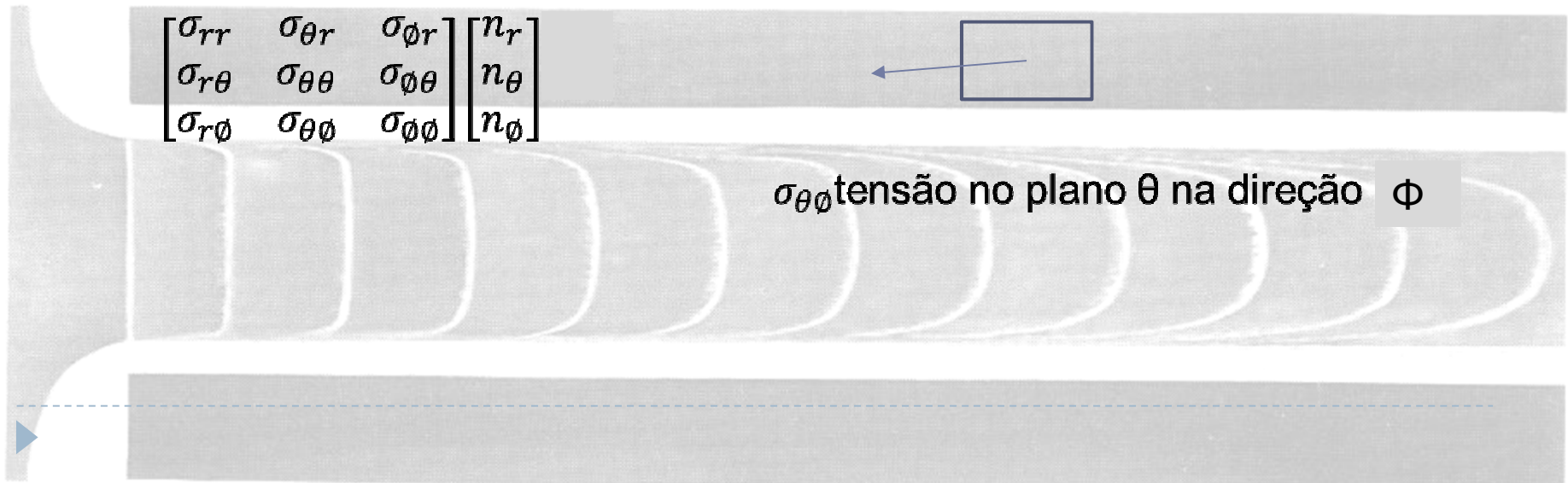
Tensão num determinado ponto:

σ_{ij} , $i = 1, 2, 3$ – direção normal à superfície

$j = 1, 2, 3$ – direção da força

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$





Componentes do Tensor de Tensão

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{matrix} \text{Isotrópica} \\ - \begin{bmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{bmatrix} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{Deviatórica} \\ \begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$\sigma_{11} = -p + \tau_{11}$$

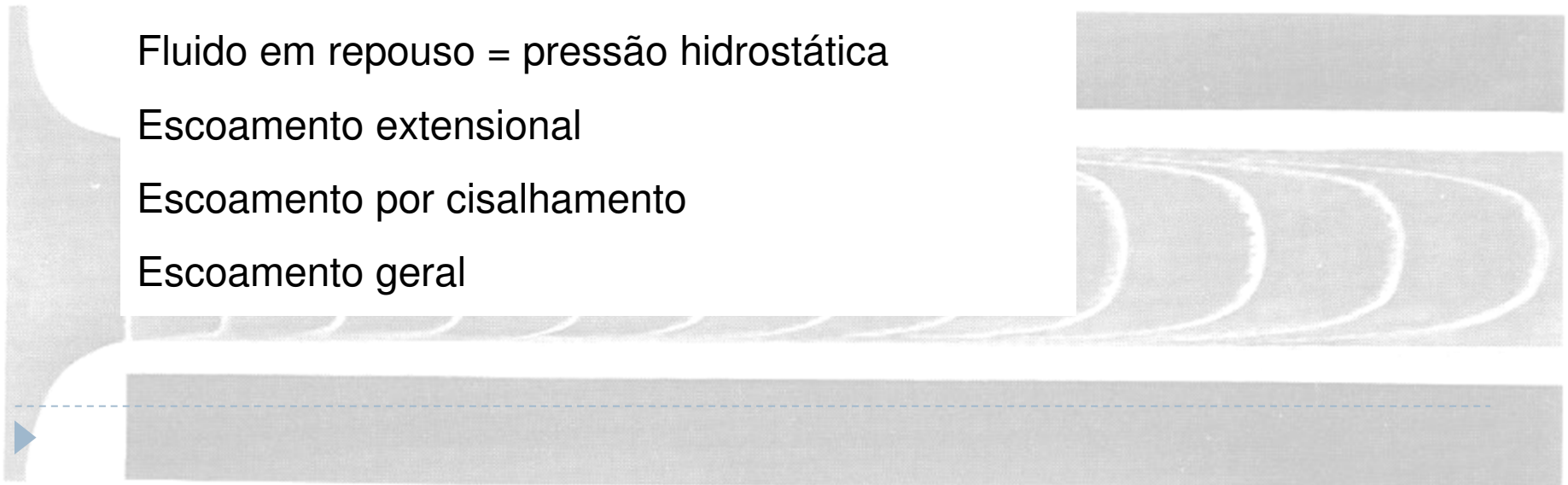
$$\sigma_{12} = \tau_{12}$$

Fluido em repouso = pressão hidrostática

Escoamento extensional

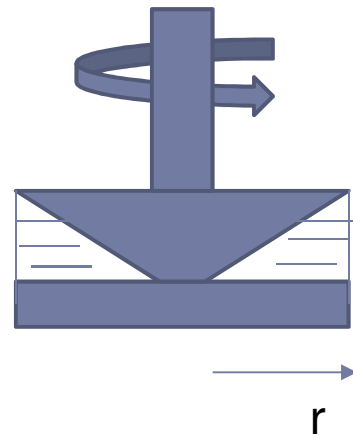
Escoamento por cisalhamento

Escoamento geral

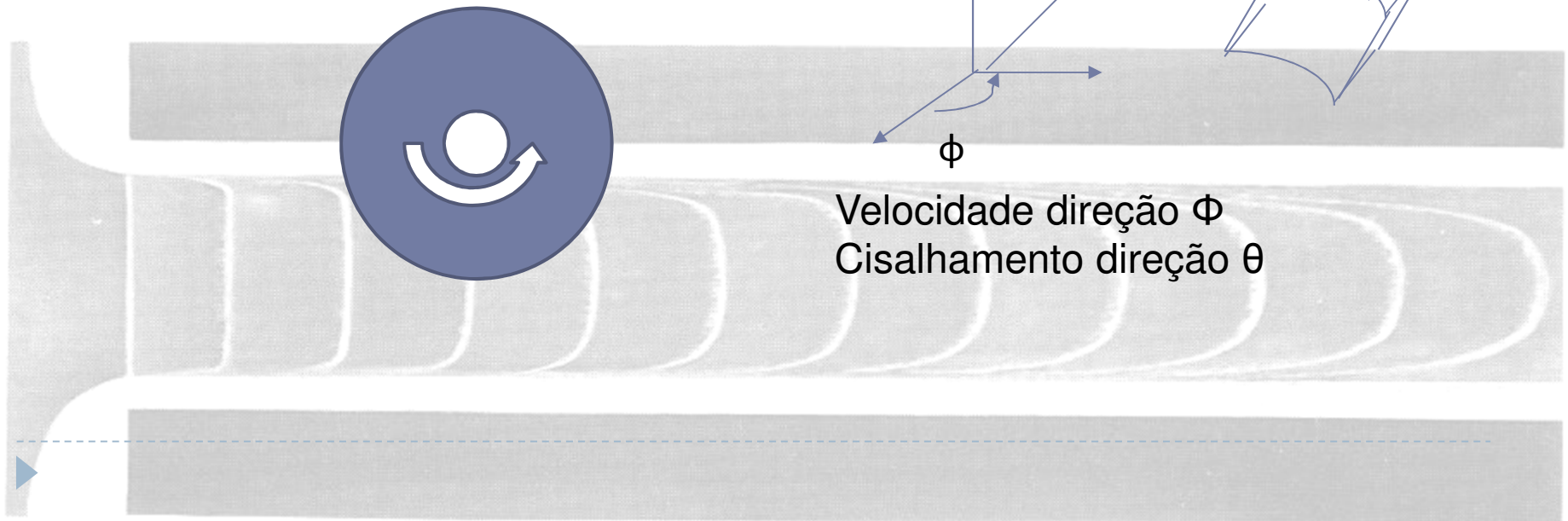




Viscosímetro de Cone e Placa



Deformação controlada
Sensores para medir a
tensão no material



Velocidade direção Φ
Cisalhamento direção θ



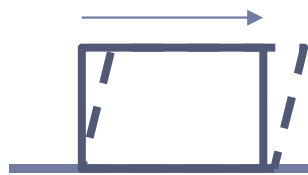
Deformação - sólidos



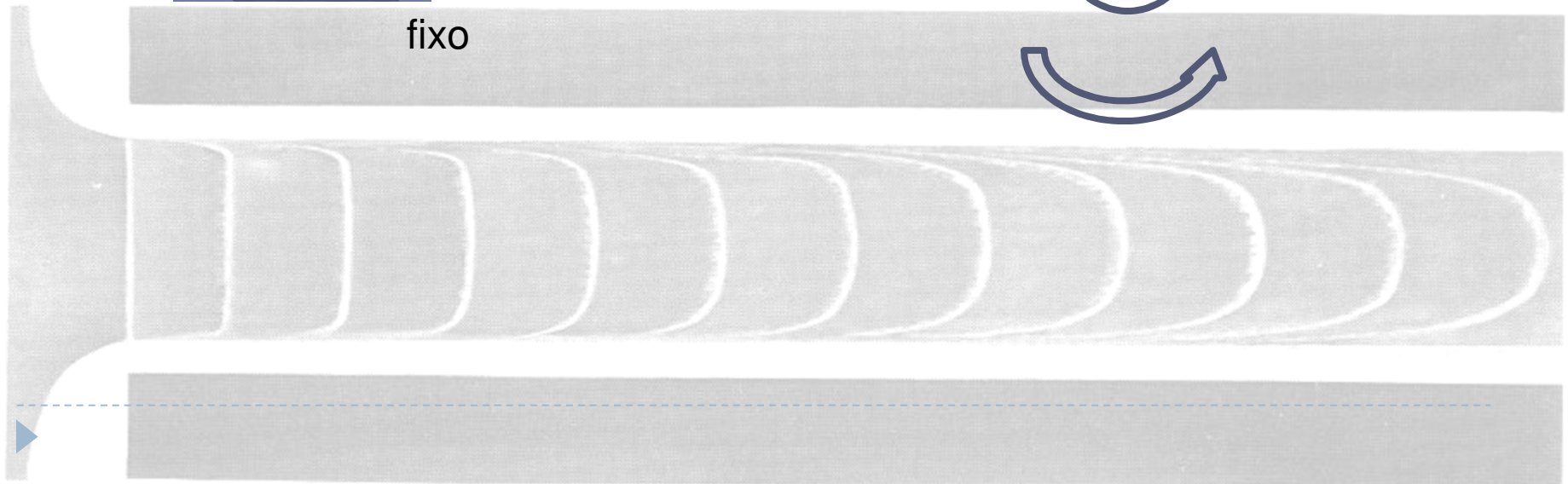
Tensão uniaxial



Torsão



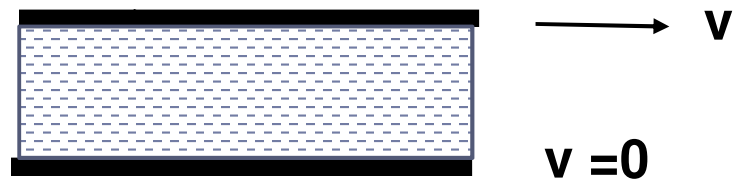
Cisalhamento



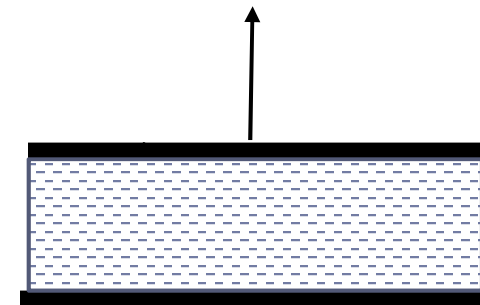


Deformação - fluidos

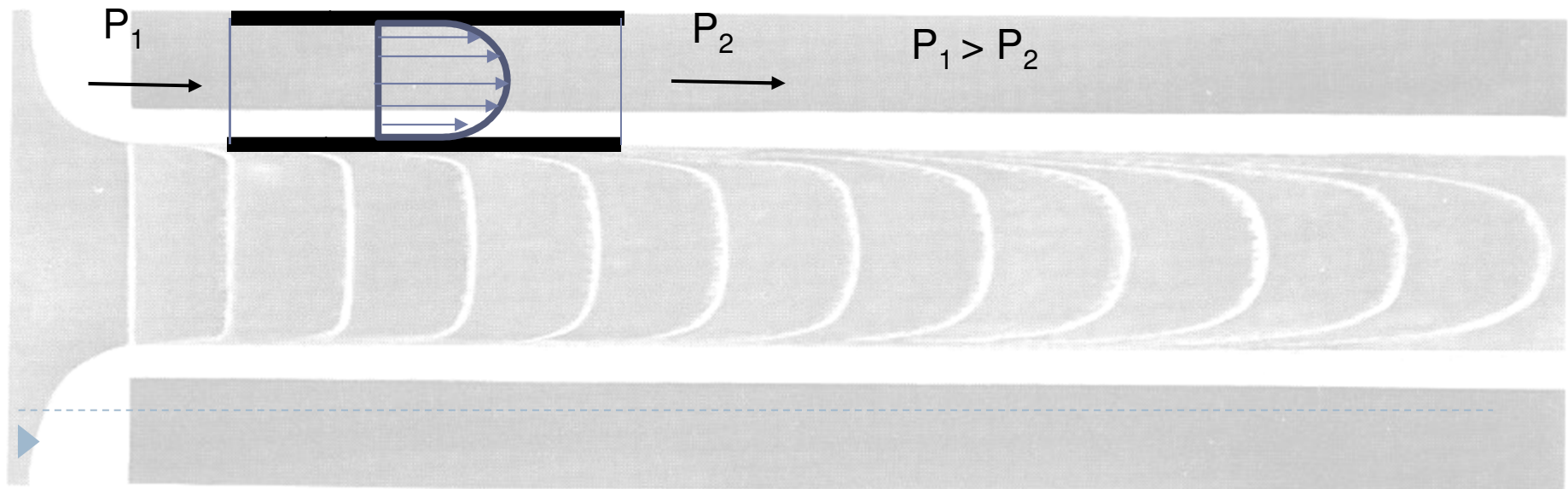
Couette – superfícies sólidas para fazer o fluido escoar



Extensão de fluidos



Poiseuille – gradiente de pressão



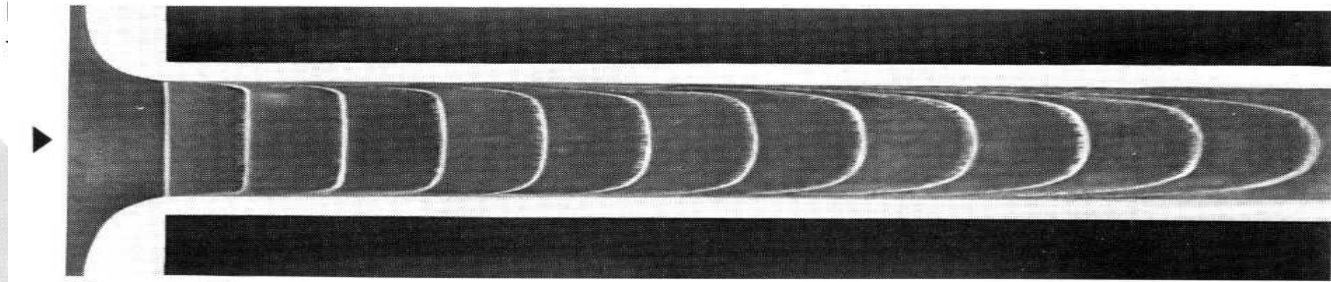
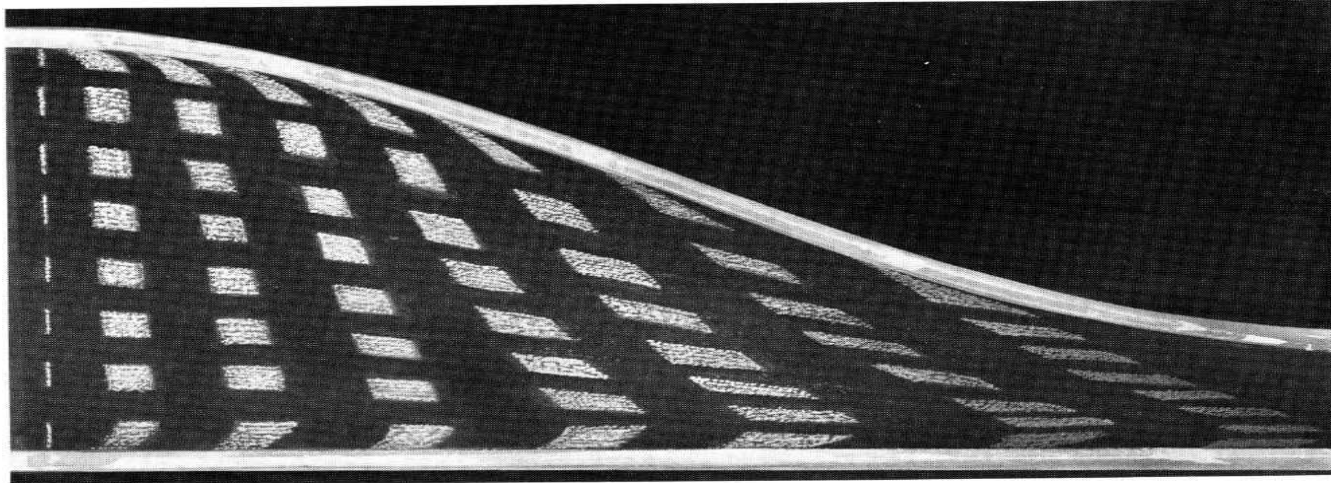


Fluidos

- ▶ Meios que se deformam continuamente quando sujeitos a uma tensão
- ▶ As camadas do fluido deslizam umas sobre as outras
- ▶ Existe atrito entre as camadas de fluido
- ▶ A razão entre a tensão aplicada e a taxa de deformação é a **viscosidade** do fluido



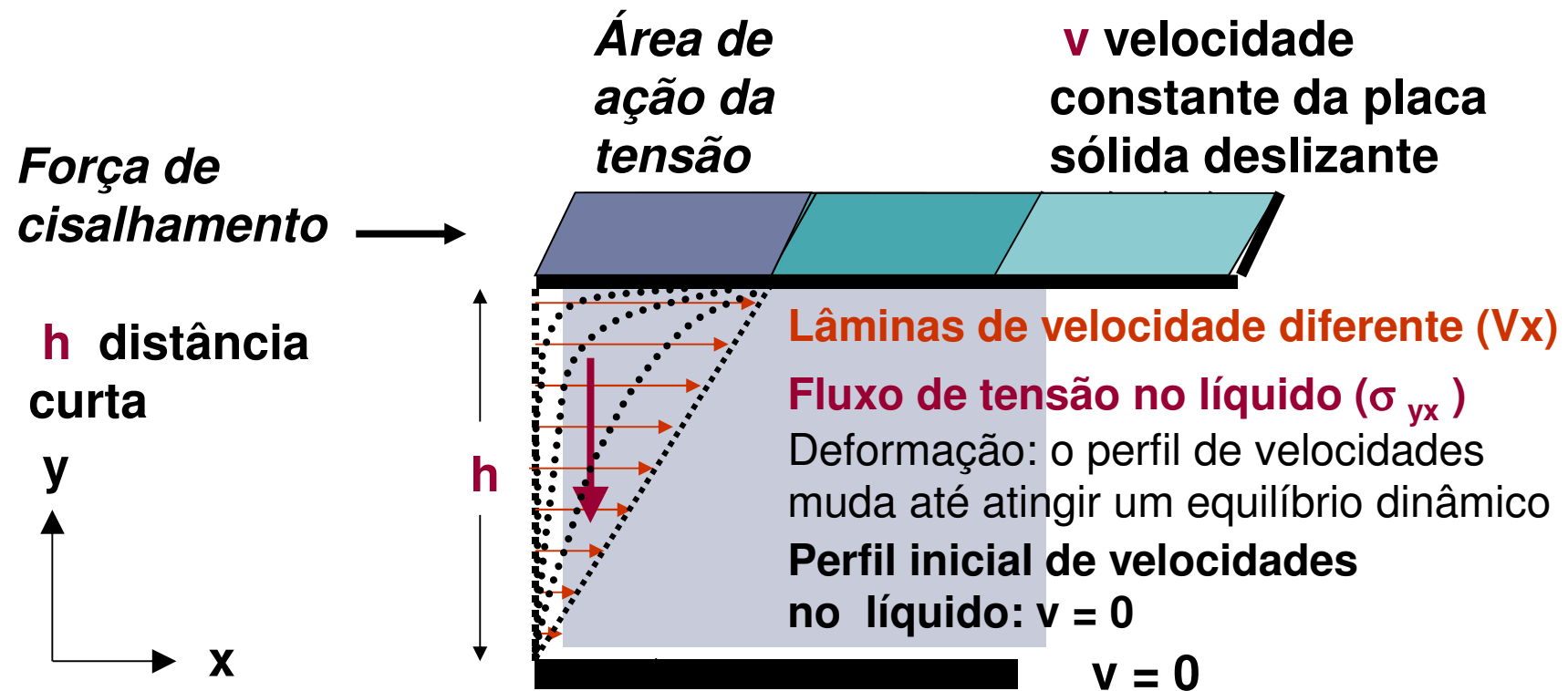
Fluidos



$$\mu = \frac{\left[\frac{F_t}{A} \right]}{\left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)}$$



Os conceitos de **tensão de cisalhamento** e **taxa de deformação** (gradiente de velocidade) se usam para descrever a deformação do fluido e seu escoamento.

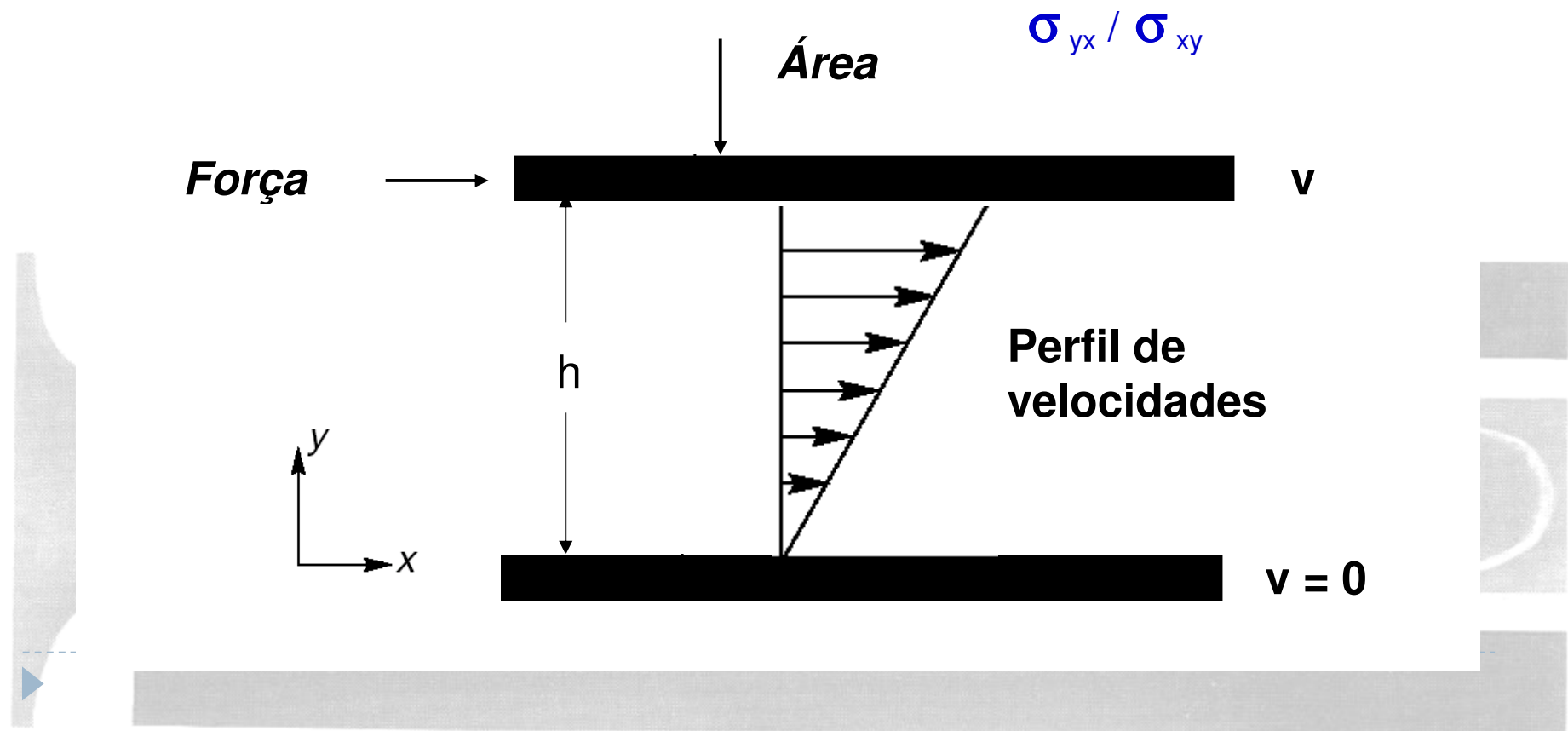


$$\sigma_{yx} = f \left(\frac{dV_x}{dy} \right)$$



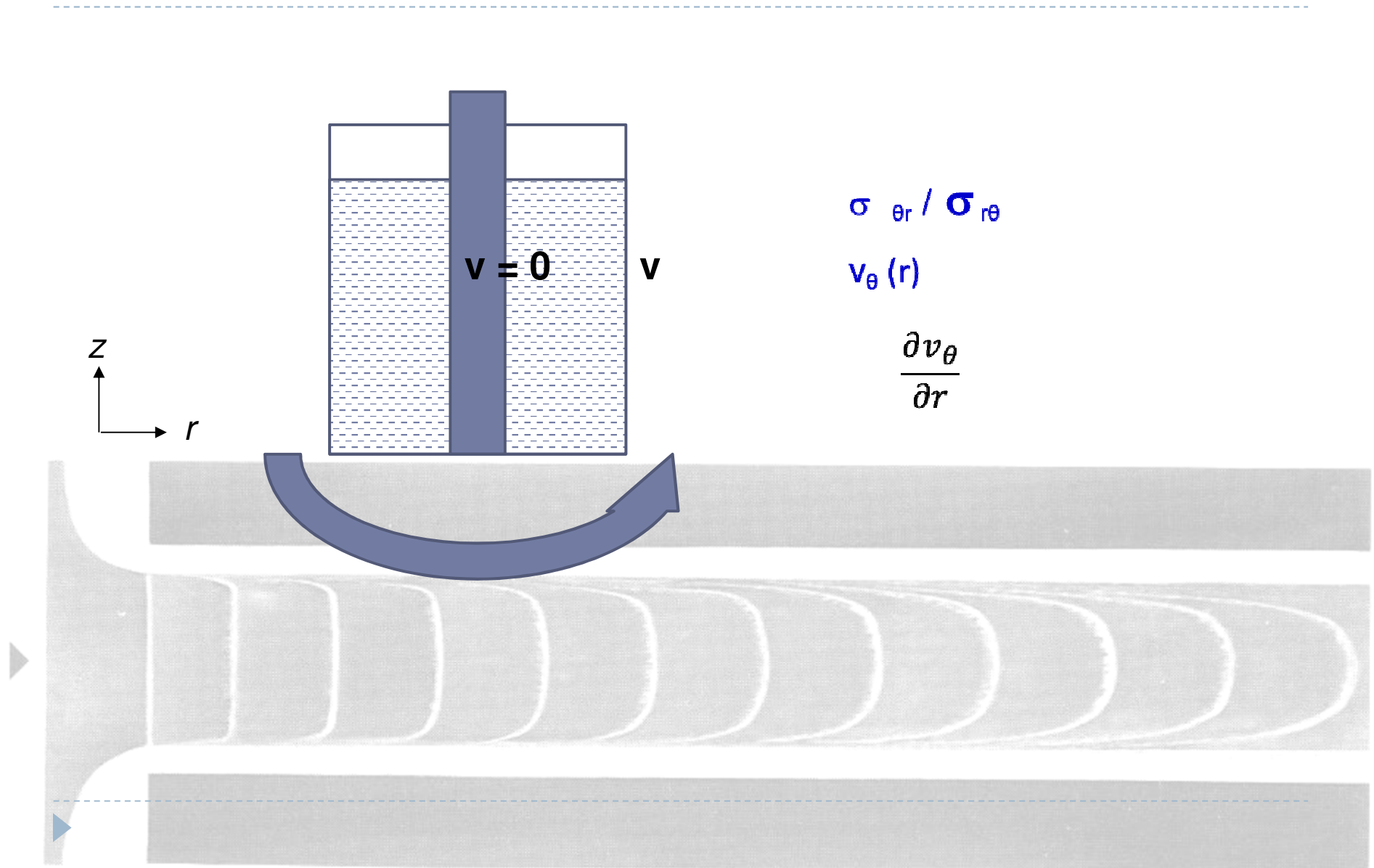
Cisalhamento Simples

- ▶ Líquidos: a maior parte das medidas reológicas pela aplicação de tensões de cisalhamento
- ▶ Aplicação de uma tensão de cisalhamento simples (σ) a um líquido:





Rotação



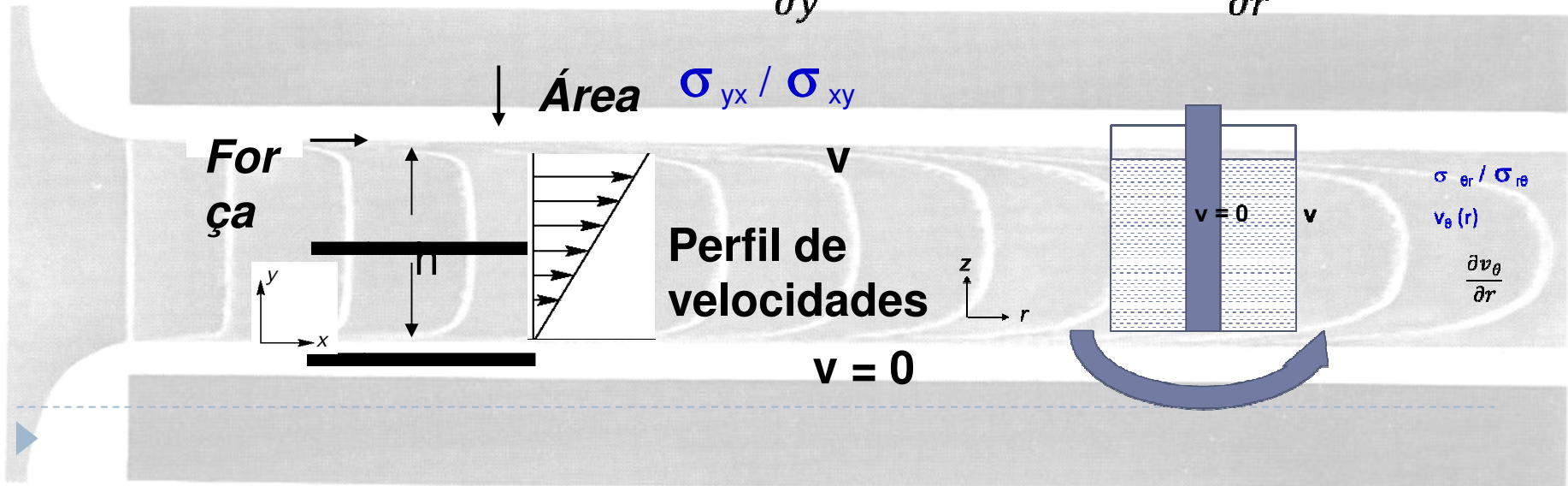


Comparação Cisalhamento/Rotação

	Cisalhamento	Rotação
Deslocamento das partículas	Direção x	Direção θ
Deslocamento relativo	Sem deslocamento relativo para mesmo y	Sem deslocamento relativo para mesmo r
Direção da velocidade	x	θ
Direção do cisalhamento	y	r

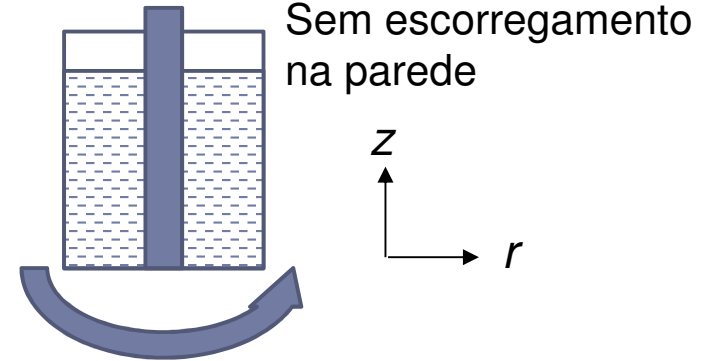
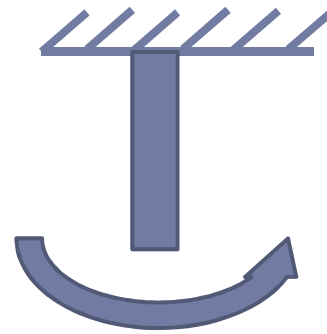
$$\frac{\partial v_x}{\partial y}$$

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial r}$$

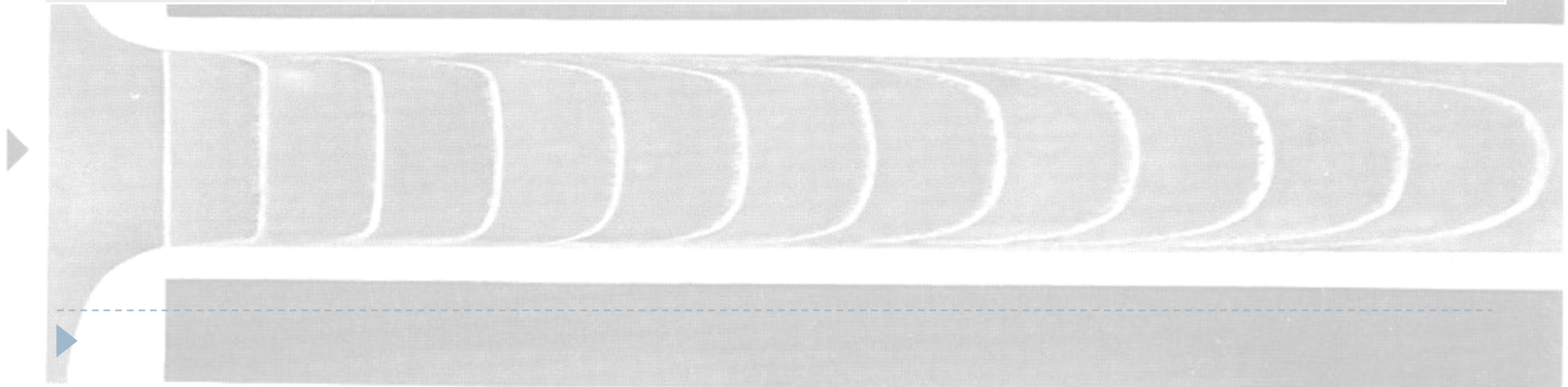




Rotação – Sólidos e Fluidos



	Sólido	Fluido
Torque constante	Rotaciona valor fixo e fica	Deforma continuamente – Estado estacionário – Taxa constante
Ângulo constante	Aplicar um torque constante – retorna estado inicial	Rotaciona depois o torque cai para zero – energia dissipada



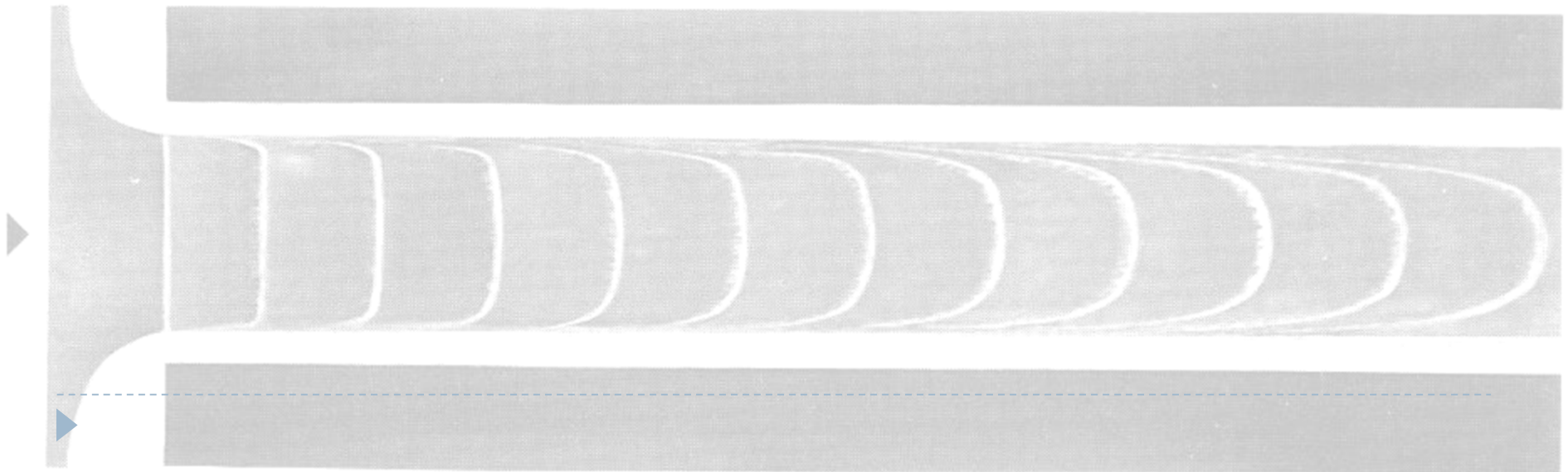


Deformação de Sólidos e Fluidos

Sólidos – não há relaxação – ideal elástico

Fluidos – relaxação é instantânea – ideal viscoso

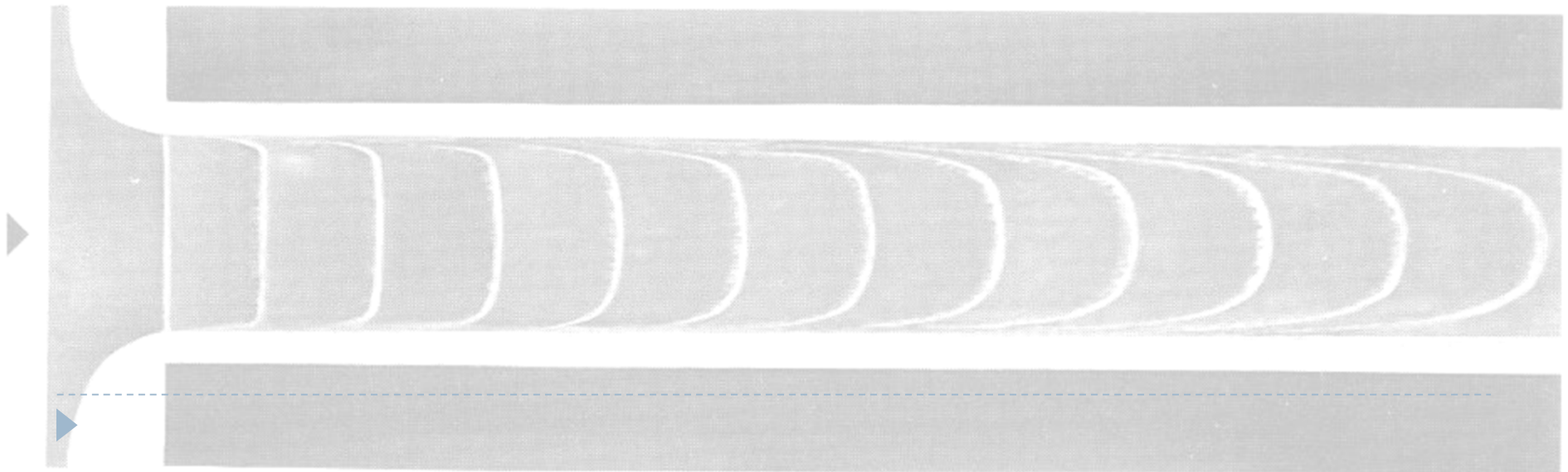
Fluidos/Sólidos complexos – relaxação no material – comportamento viscoelástico





Tensor do Gradiente de Velocidade

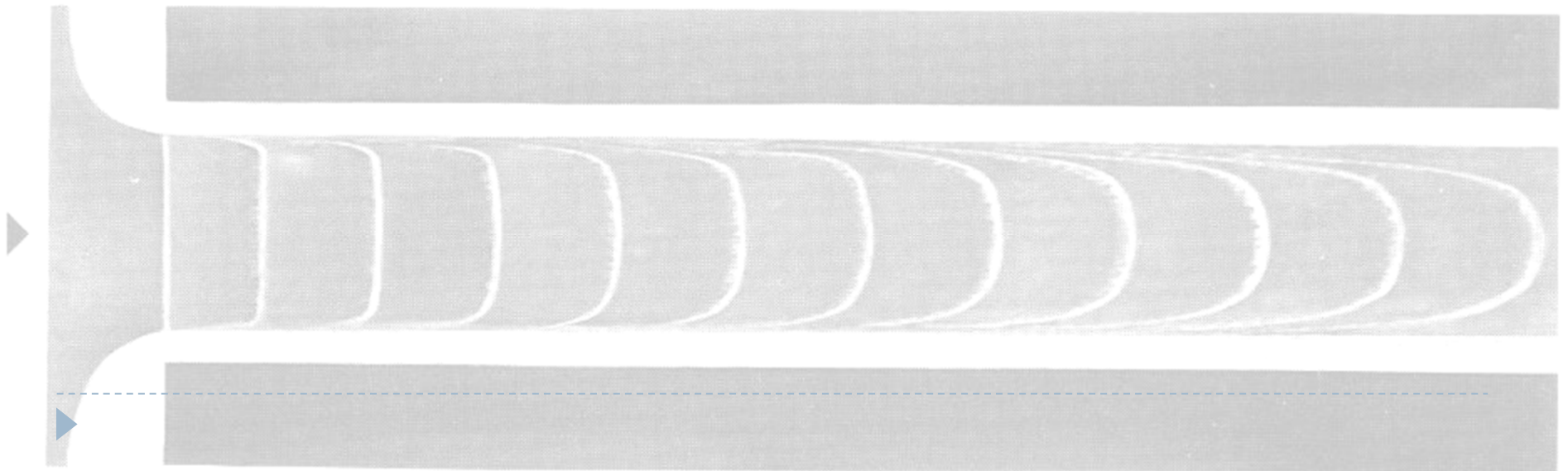
$$\text{grad } v = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_z}{\partial x} \\ \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial y} \\ \frac{\partial v_x}{\partial z} & \frac{\partial v_y}{\partial z} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix}$$





Tensor da Taxa de Deformação

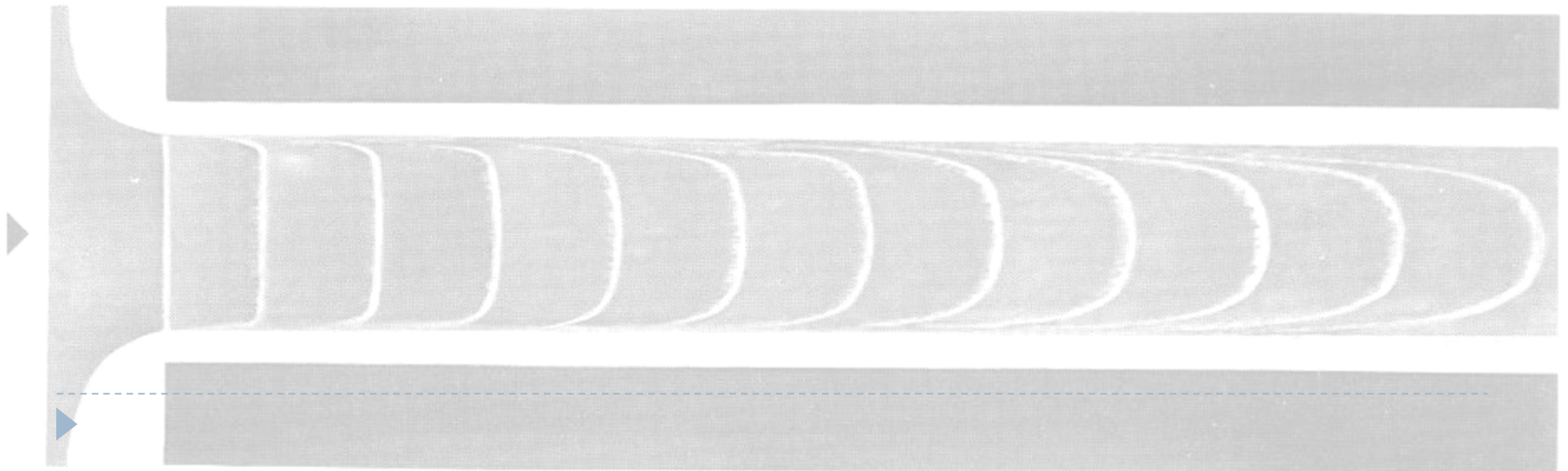
$$D = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} & 2 \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} & \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} & 2 \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix}$$





Tensor da Vorticidade

$$\Omega = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} & 0 & \frac{\partial v_y}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial y} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial z} & \frac{\partial v_y}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial y} & 0 \end{bmatrix}$$





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	<i>Snacks</i> , comida de cachorro, pasta de dente, massas



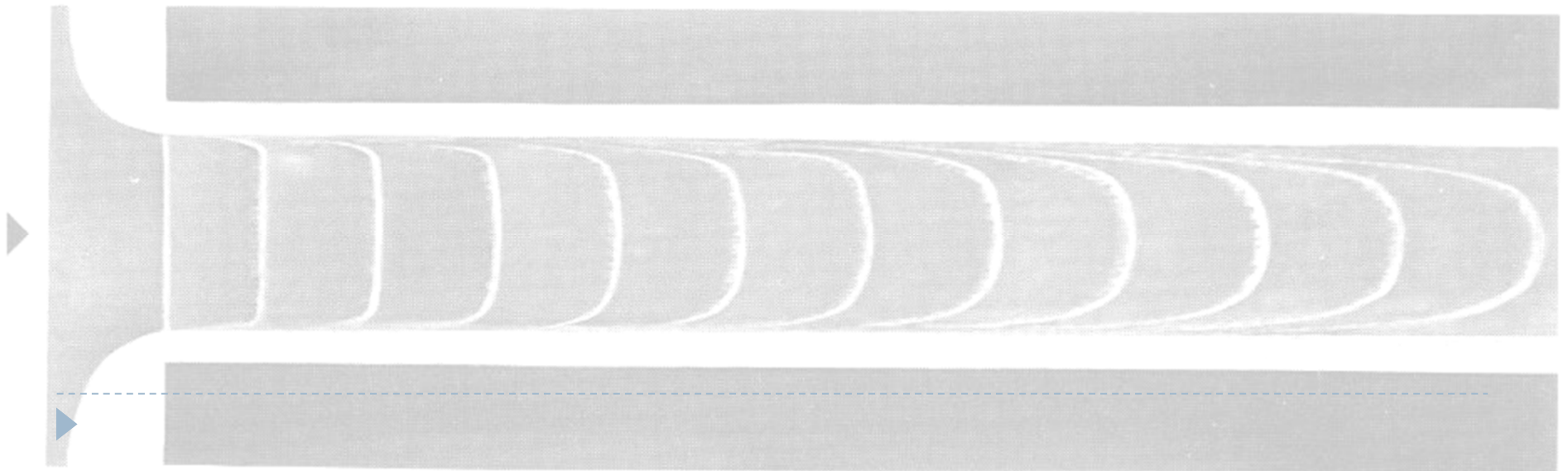
Taxas de deformação típicas de processos

Calandrar	10^1-10^2	Estiramento do glúten
Derramar de uma garrafa	10^1-10^2	Alimentos, cosméticos, artigos de toalete
Mastigar	10^1-10^2	Engolir alimentos
Recobrimento por imersão	10^1-10^2	Tintas, confeitaria
Mistura e agitação	10^1-10^3	Processamento geral
Escoamento em tubo	10^0-10^3	Processamento de alimentos
Esfregar	10^2-10^4	Aplicação de cremes
Escovar	$10^3 -10^4$	Descascar, raspar



Taxas de deformação típicas de processos

Atomizar	10^3-10^5	Secagem por atomização, pintura <i>spray</i>
Recobrimento a alta velocidade	10^4-10^6	Papel
Lubrificação	10^3-10^7	Engrenagens, motores





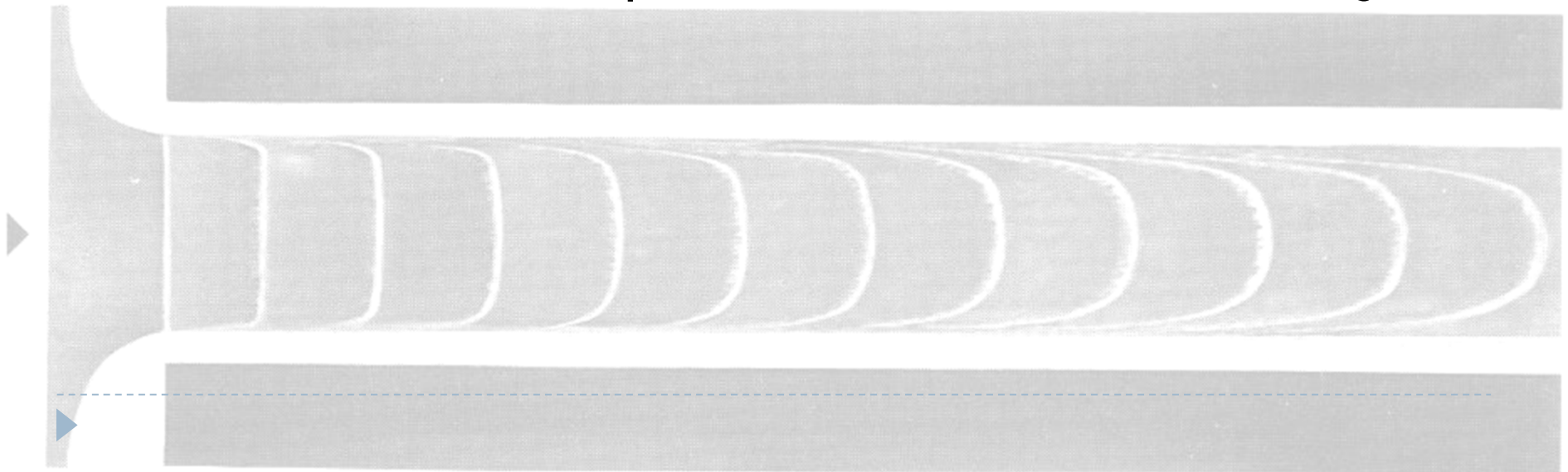
Classificação dos fluidos





Fluidos Newtonianos

- ▶ A tensão gerada no escoamento simples é apenas a tensão de cisalhamento, as tensões normais são nulas
- ▶ A viscosidade independe da taxa de deformação





Fluidos Newtonianos

- ▶ A viscosidade é constante, a uma dada temperatura e pressão, independentemente do tempo de aplicação do cisalhamento e a tensão no líquido zera assim que cessa a aplicação do cisalhamento. Se for aplicado novamente o cisalhamento, independentemente do período de tempo transcorrido a viscosidade apresenta o mesmo valor.



Fluidos Newtonianos

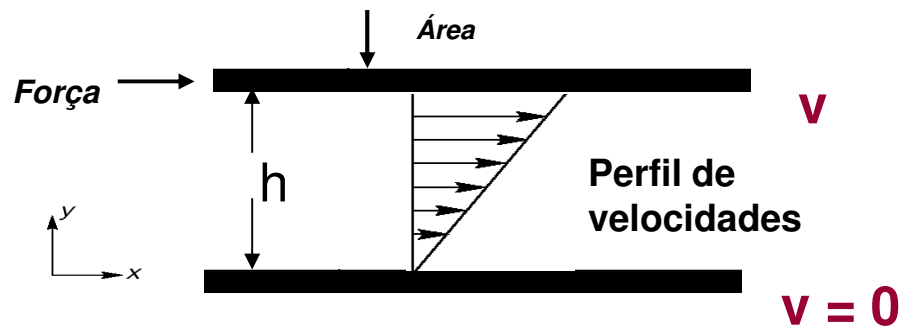
- ▶ A viscosidade medida para diferentes deformações segue uma relação de proporcionalidade
- ▶ Exemplos: óleos vegetais, água, soluções açucaradas, glicerina

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

Em que: σ = tensão de cisalhamento (Pa)
 μ = viscosidade Newtoniana (Pa.s)
 $\dot{\gamma}$ = taxa de deformação (s^{-1})



Líquido viscoso ideal mantido entre duas placas paralelas e a placa superior se move a uma velocidade v relativa à placa inferior



A **tensão de cisalhamento**

$\sigma_{yx} = F_t / A$ produz um **gradiente de velocidade (dv_x/dy)** no seio do fluido viscoso

O **gradiente de velocidade (dv_x/dy)** é proporcional à **tensão de cisalhamento** ou força externa (σ_{yx})



O **gradiente de velocidade** (dv_x / dy) é proporcional à **tensão de cisalhamento** ou força externa (σ_{yx})

$$\sigma_{yx} \propto (dv_x / dy) = \mu (dv_x / dy) = \mu \dot{\gamma}$$

$\dot{\gamma}$ = **taxa de deformação**

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

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

Lei de Newton

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



Fluidos não-Newtonianos

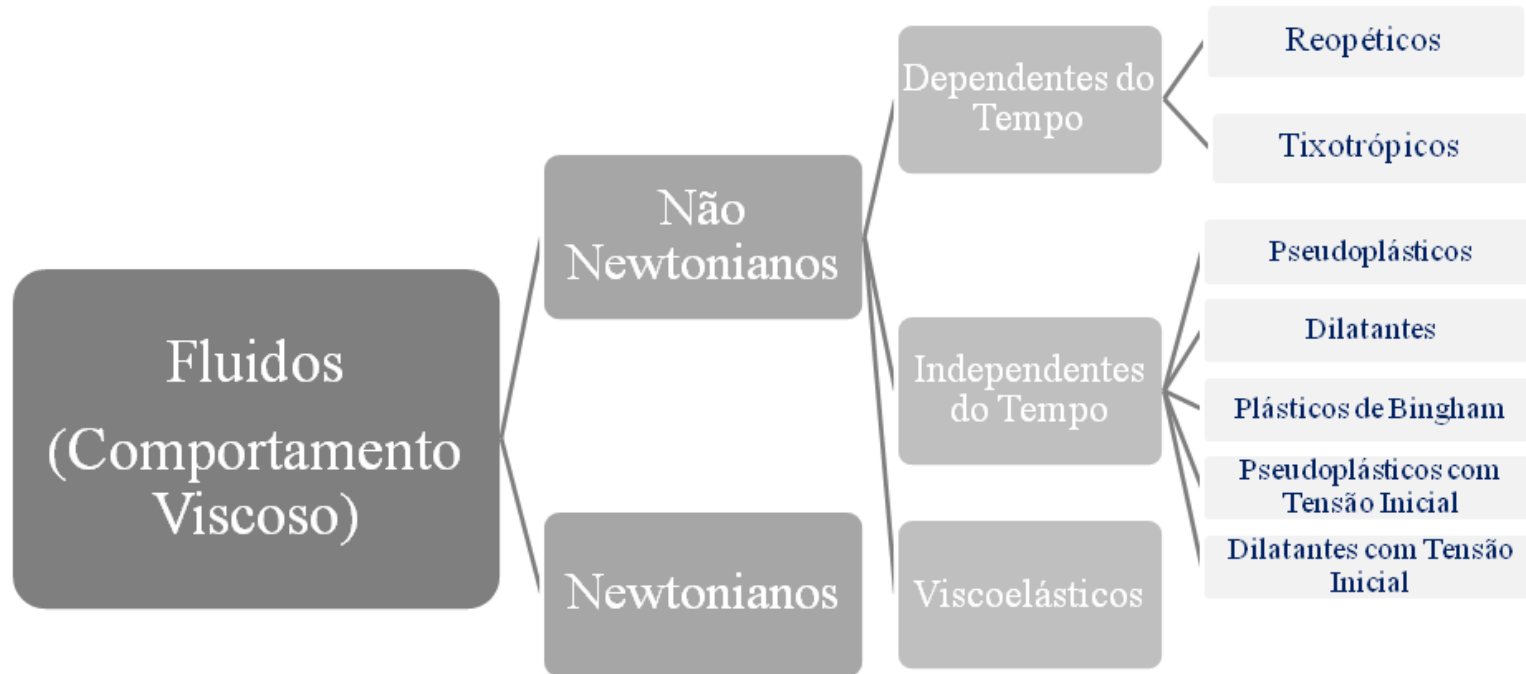
- ▶ Muitos fluidos de interesse industrial mostram uma relação mais complicada entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento
- ▶ A viscosidade varia com a taxa de deformação

Os fluidos **não-Newtonianos** se classificam em:

- ▶ Propriedades *independentes do tempo* de cisalhamento
- ▶ Propriedades *dependentes do tempo* de cisalhamento
- ▶ Características de sólido

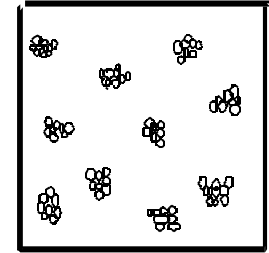
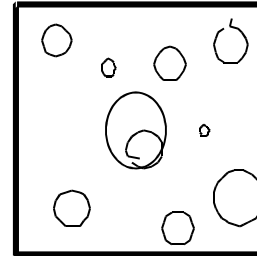
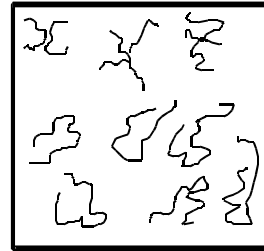
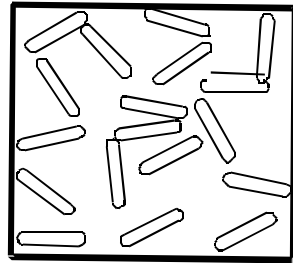


Classificação do Comportamento





Repouso



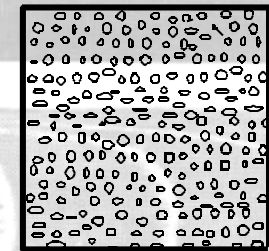
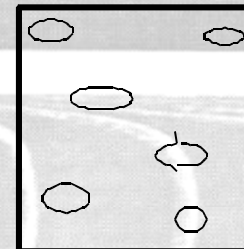
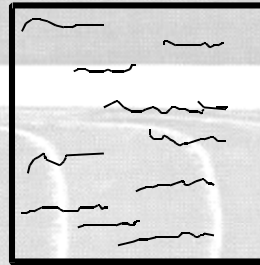
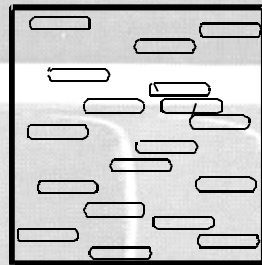
Orientação

Deformação

Estiramento

Destruição de agregados

Movimento

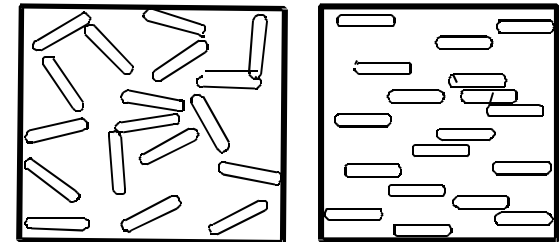




Fenômenos mostrados na figura anterior:

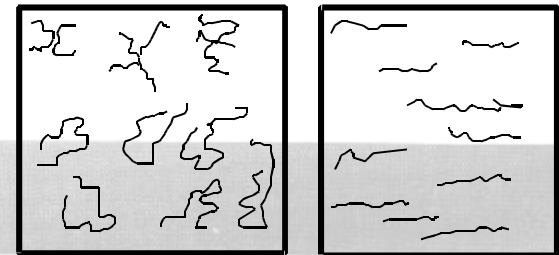
a. Orientação de partículas:

típico em polpas de frutas e vegetais.



b. Estiramento:

soluções macromoleculares, com grande quantidade de espessantes:



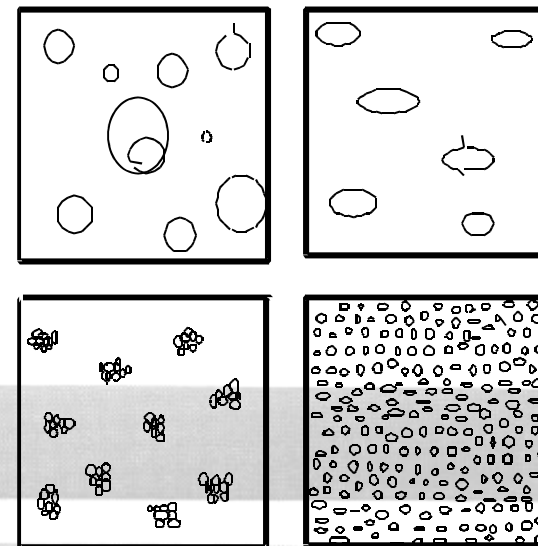
caldas, produtos com substituição de gordura.



Fenômenos mostrados na figura anterior:

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



Obrigada!

