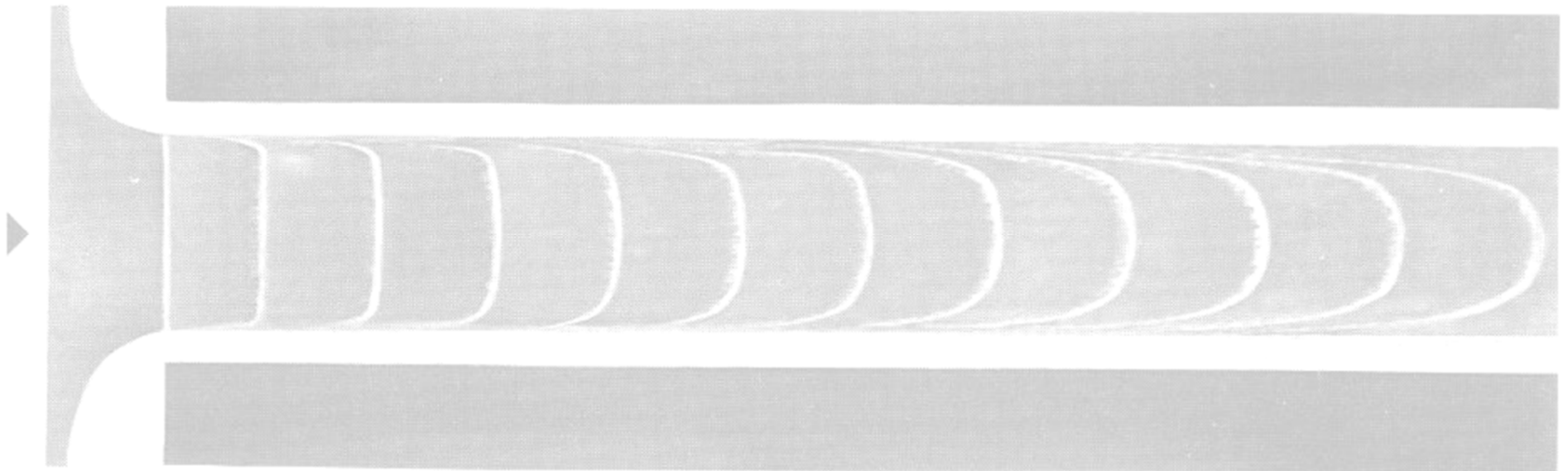




ZEM 5008 – Tópicos em Reologia

Profa. Dra. Cynthia Ditchfield
cditchfi@usp.br Tel. 35654197





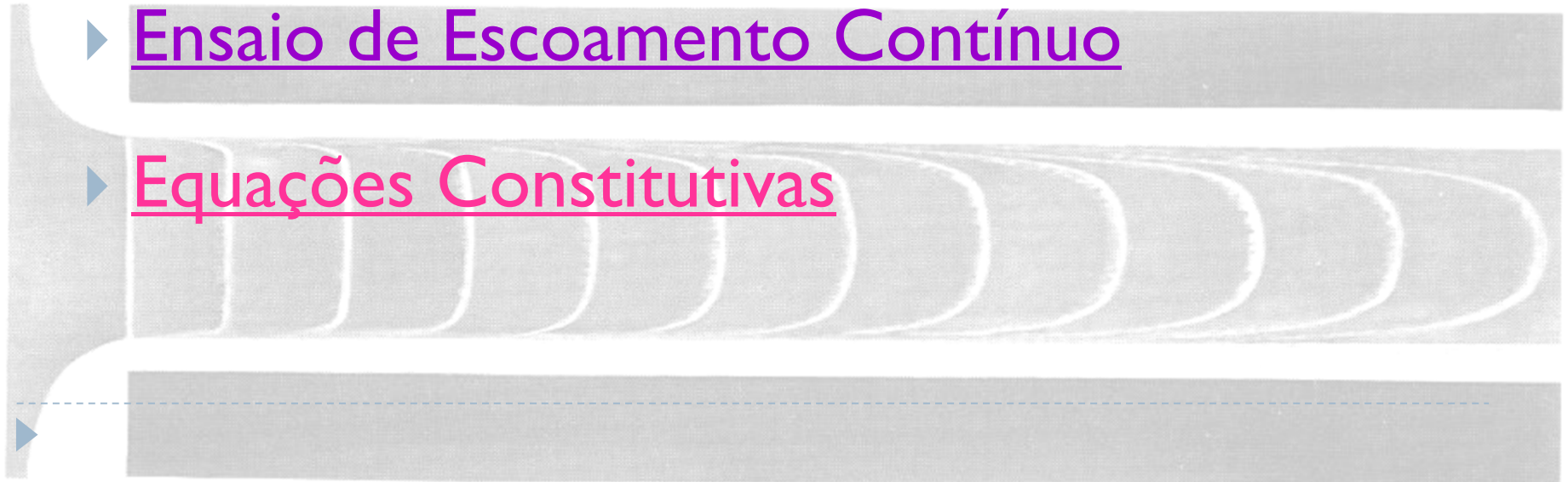
Tópicos da Aula

- ▶ Modelos Reológicos
- ▶ Reometria de Fluxo:

- ▶ Curvas de Fluxo

- ▶ Ensaio de Escoamento Contínuo

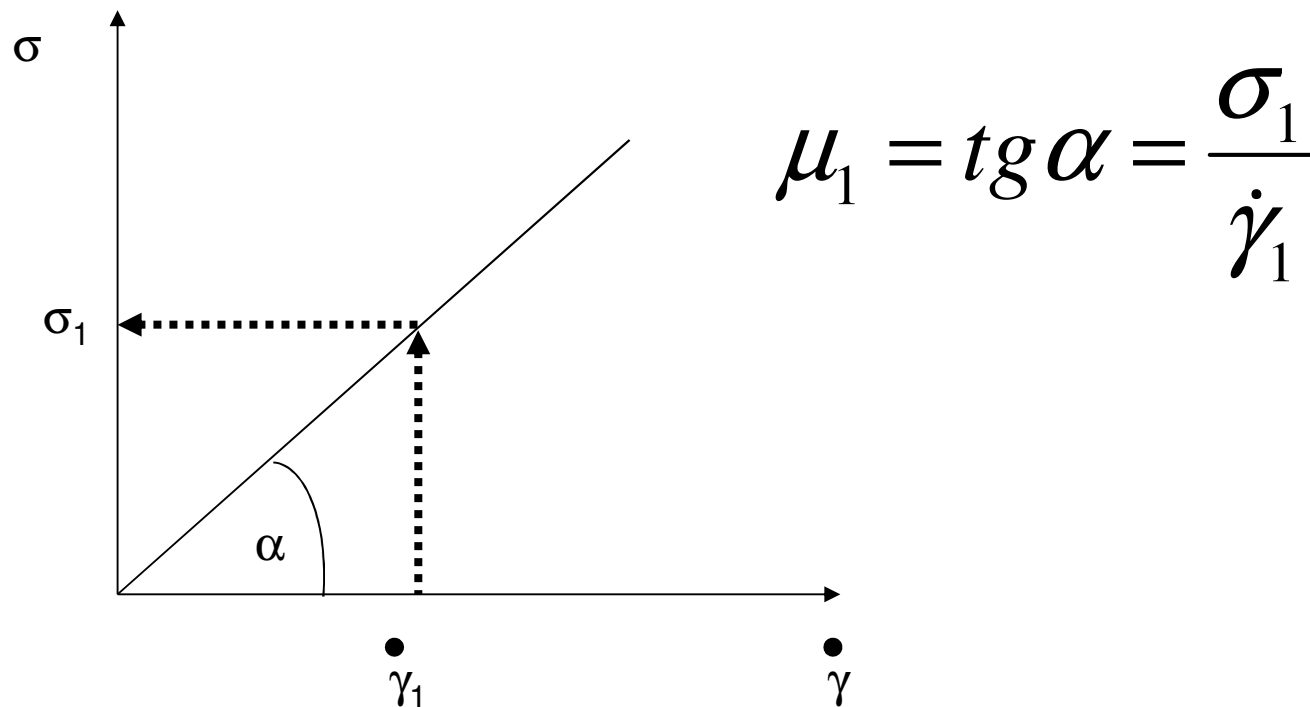
- ▶ Equações Constitutivas





Reograma ou Curva de Fluxo

- ▶ Relaciona a **tensão de cisalhamento** com a **taxa de deformação**

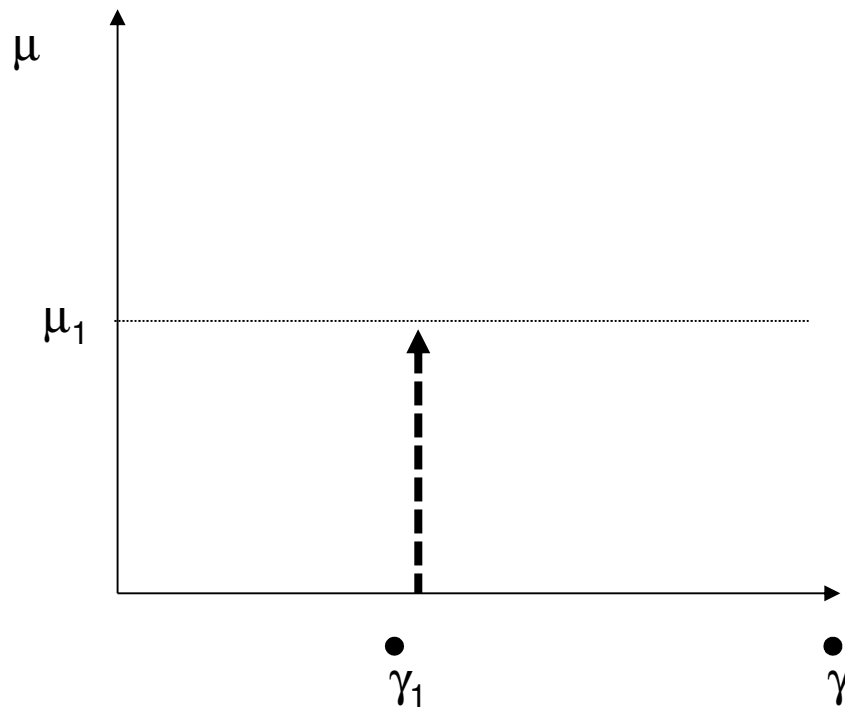


Curva de escoamento para fluido Newtoniano



Curva de Viscosidade

- ▶ Relaciona a **viscosidade** com a **taxa de deformação**



Curva de viscosidade para fluido Newtoniano



Propriedades Reológicas: Dependência de Temperatura e Pressão

A dependência da temperatura da viscosidade pode ser representada por uma equação do tipo Arrhenius:

Em que:

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

A = parâmetro de ajuste

E_a = energia de ativação para a viscosidade (J / kgmol K)

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

T = temperatura absoluta (K)

► Obs: Este modelo pode ser aplicado para fluidos não Newtonianos utilizando a viscosidade aparente numa determinada taxa de deformação ou para o índice de consistência (K).



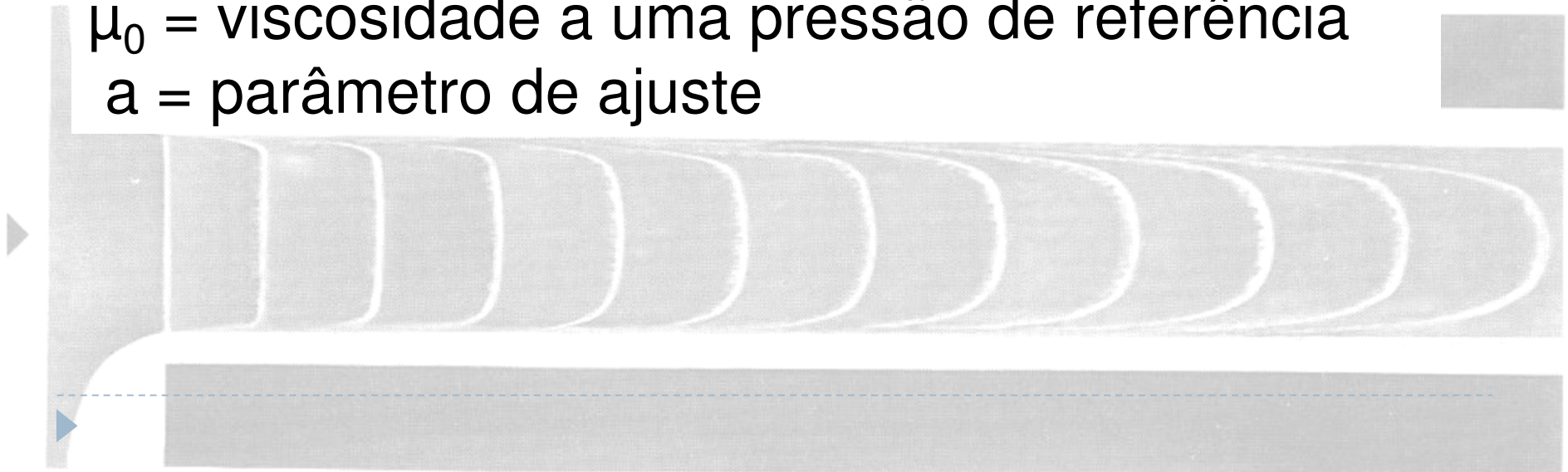
Em alguns processamentos, os fluidos são submetidos a altas pressões, como na extrusão, óleos lubrificantes, lamas em poços de petróleo, A viscosidade pode ser relacionada com a pressão:

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

Em que:

μ_0 = viscosidade a uma pressão de referência

a = parâmetro de ajuste





Fluidos Não Newtonianos

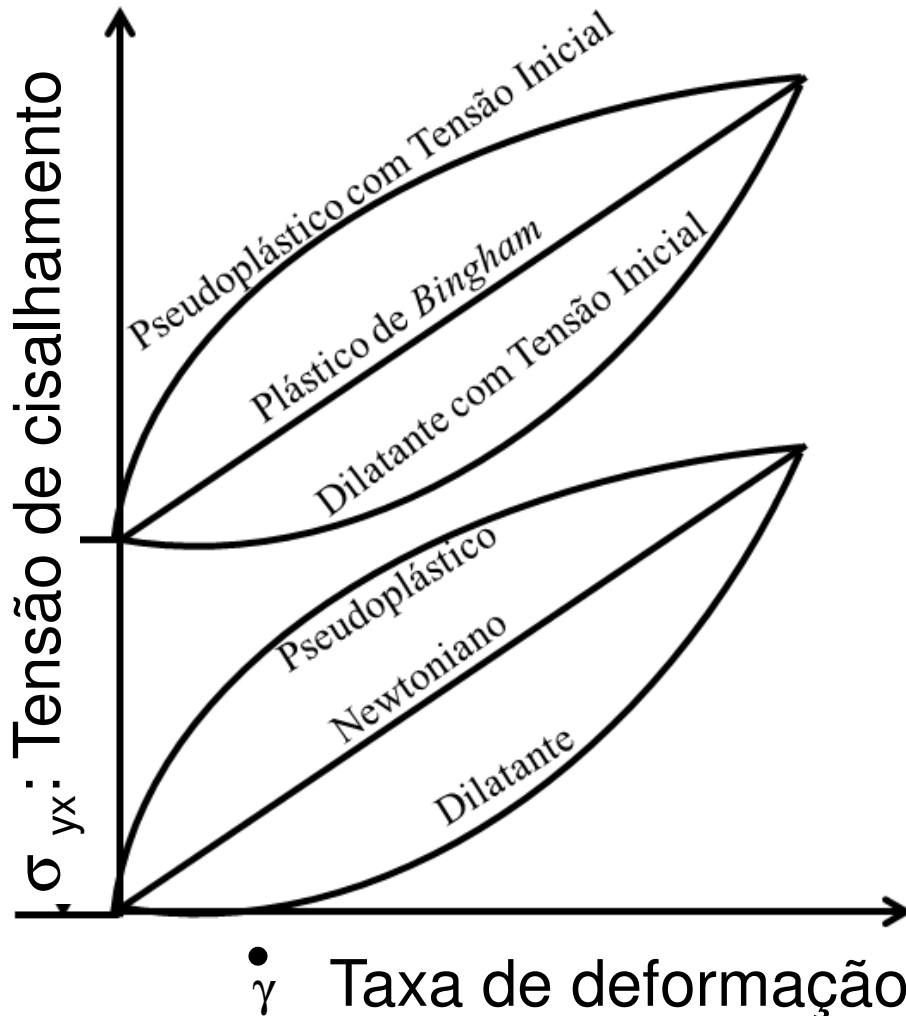
- ▶ Curva de escoamento (σ x $\dot{\gamma}$) não é linear ou não passa pela origem, a uma dada pressão e temperatura
- ▶ Modelos empíricos correlacionam a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.
- ▶ A viscosidade aparente é definida por analogia com os fluidos Newtonianos:

$$\mu_{ap} = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}}$$



Fluidos não-Newtonianos e independentes do tempo

Comportamento reológico dos principais tipos de fluidos

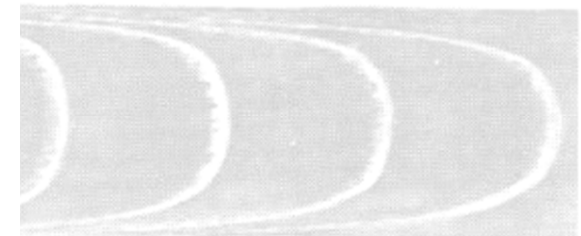


$$\sigma_{yx} = \mu (dv_x / dy)$$

Equação mais geral

$$\sigma = \sigma_0 + k \dot{\gamma}^n$$

Modelo constitutivo





Fluidos não-Newtonianos e Dependentes do Tempo

Estes fluidos podem ser classificados em duas categorias:

Fluidos tixotrópicos (afinantes - *thinning*):

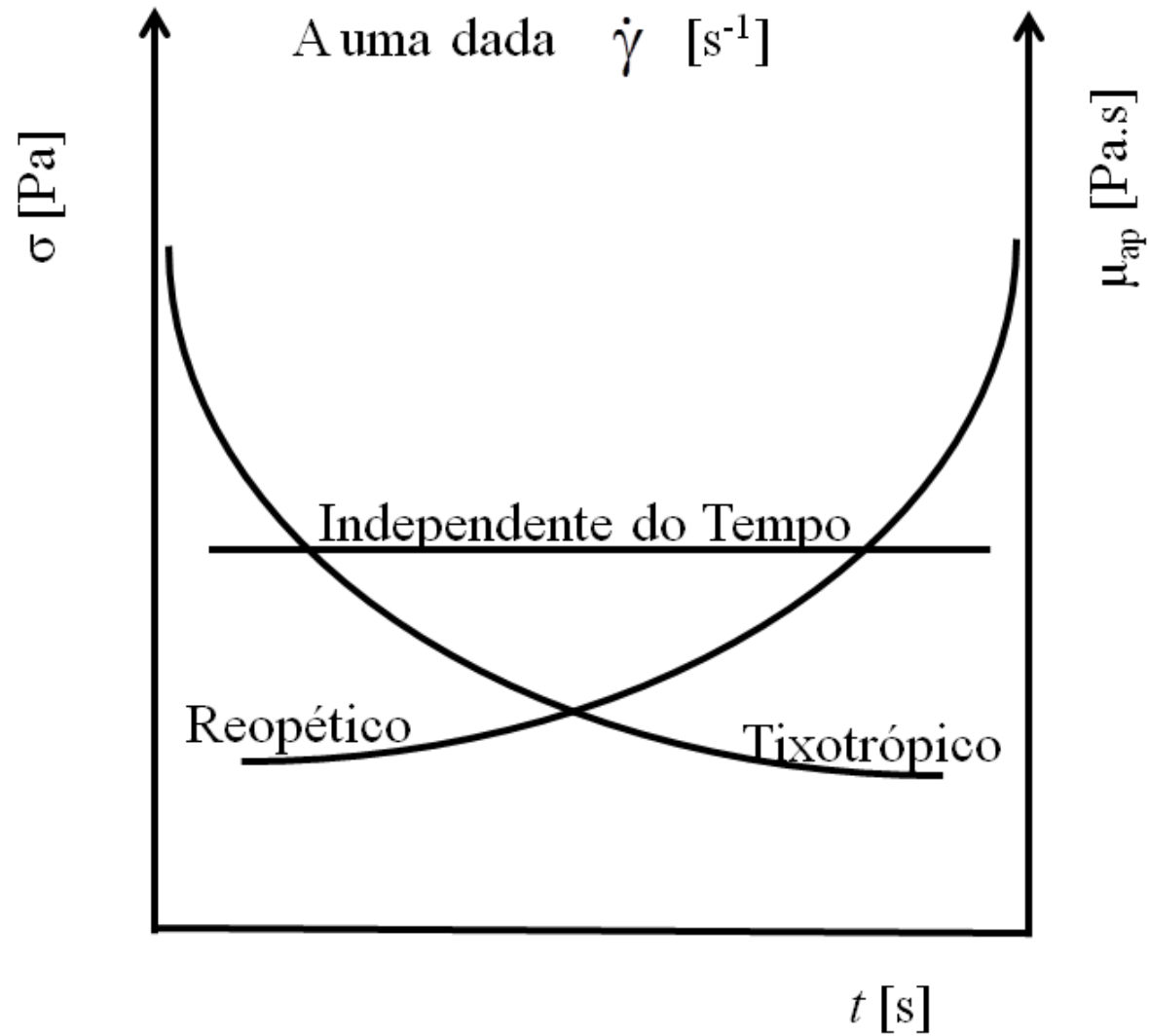
Alimentos que possuem uma estrutura que é quebrada em função do tempo e da taxa de deformação.

Fluidos reopéticos (espessantes - *thickening*):

Inclui poucos materiais que são capazes de desenvolver ou rearranjar uma estrutura enquanto são submetidos a uma tensão de cisalhamento constante.



Dependência do Tempo



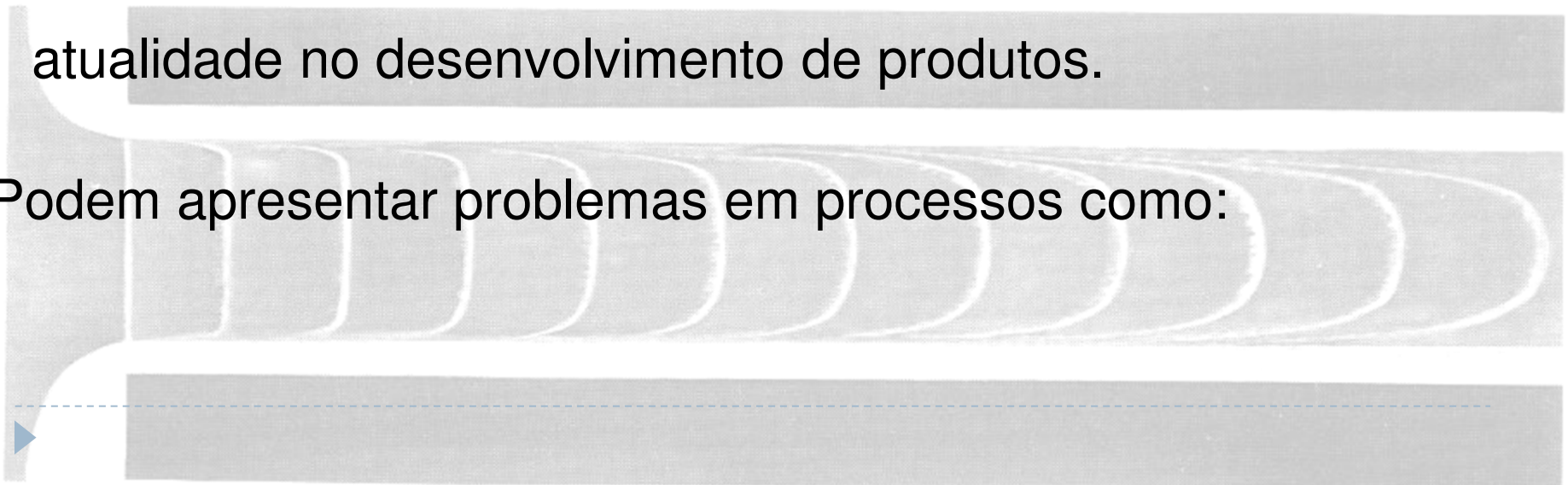


Fluidos Viscoelásticos

Muitos fluidos mostram comportamento de sólido (elasticidade) e de líquido (plasticidade).

A determinação do comportamento viscoelástico exige equipamentos mais custosos e é objeto de muita pesquisa na atualidade no desenvolvimento de produtos.

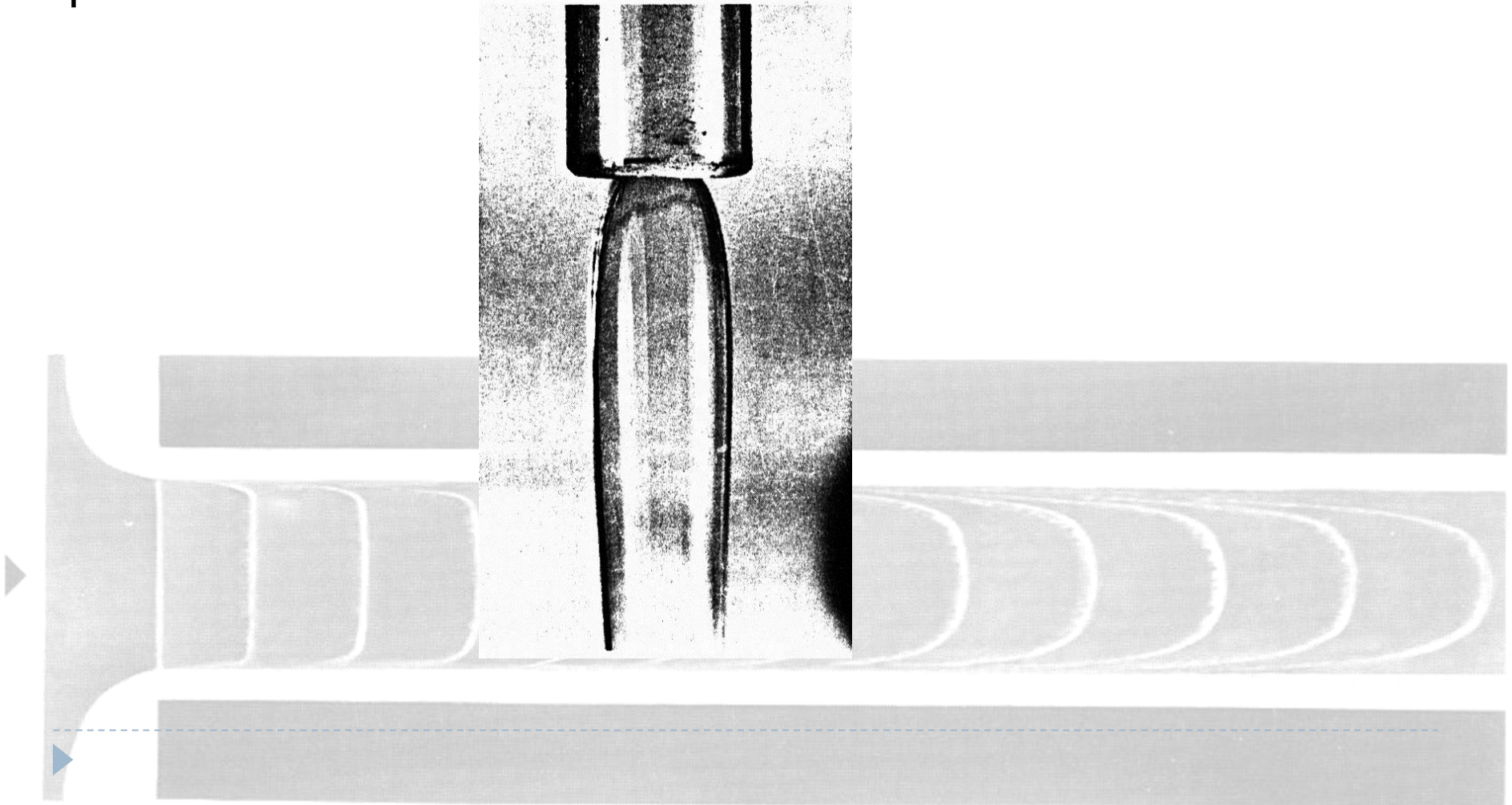
Podem apresentar problemas em processos como:





Fluidos Viscoelásticos

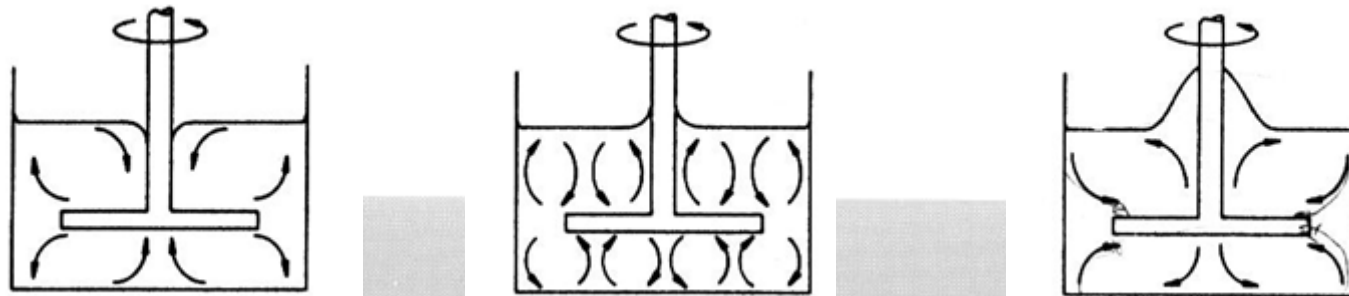
-**Inchamento do fluido:** isso pode ser um grande problema em extrusão e em enchedeiras





Fluidos Viscoelásticos

-**Escoamento de Weissenberg**: aparece na agitação de fluidos altamente viscoelásticos como é o caso de massa de pão e biscoito. A altas taxas de deformação, as tensões normais superam as tangenciais, invertendo o fluxo.



IMPORTANTE:

Os comportamentos podem ser simultâneos



Fluidos Pseudoplásticos:

- ▶ A viscosidade aparente decresce com o aumento da taxa de deformação
- ▶ A maior parte dos alimentos **não-Newtonianos** apresentam este comportamento
- ▶ Aumento da taxa de deformação, por exemplo, modifica a estrutura das moléculas de cadeias longas, alinhando-as paralelamente às linhas de corrente diminuindo a resistência ao escoamento



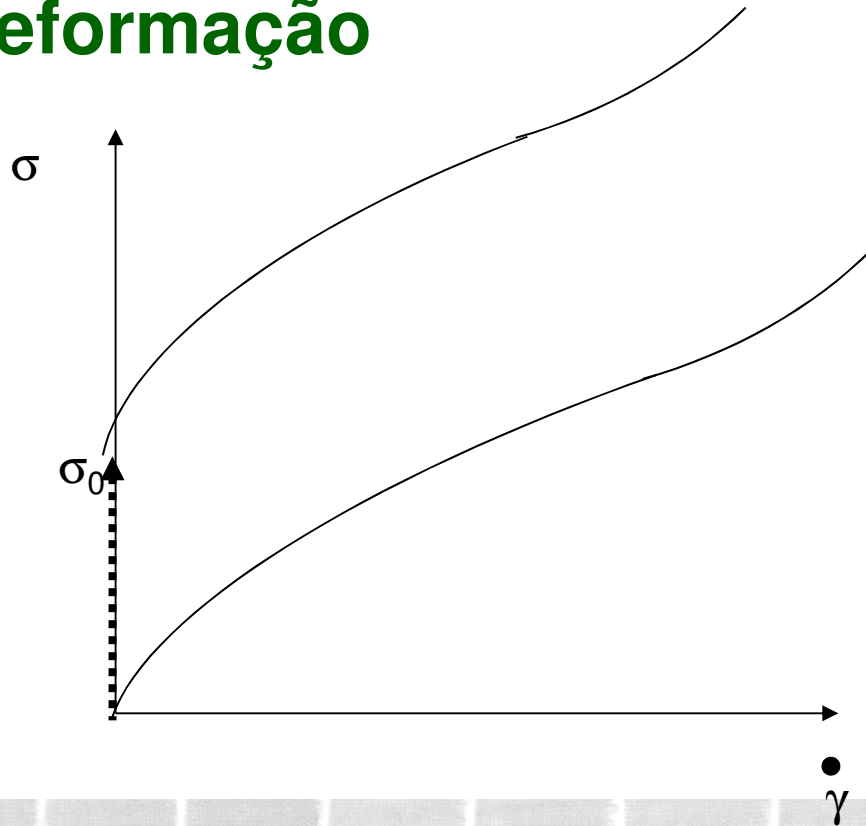
Fluidos Pseudoplásticos:

- ▶ Em altas taxas de deformação, o fluido apresenta um comportamento próximo ao Newtoniano
- ▶ *Shear-thinning*
- ▶ Exemplos: polpas e sucos concentrados de frutas, caldos de fermentação, melaço de cana, soluções de pectina, polímeros fundidos, etc.



Reograma ou Curva de Fluxo

- ▶ Relaciona a **tensão de cisalhamento** com a **taxa de deformação**

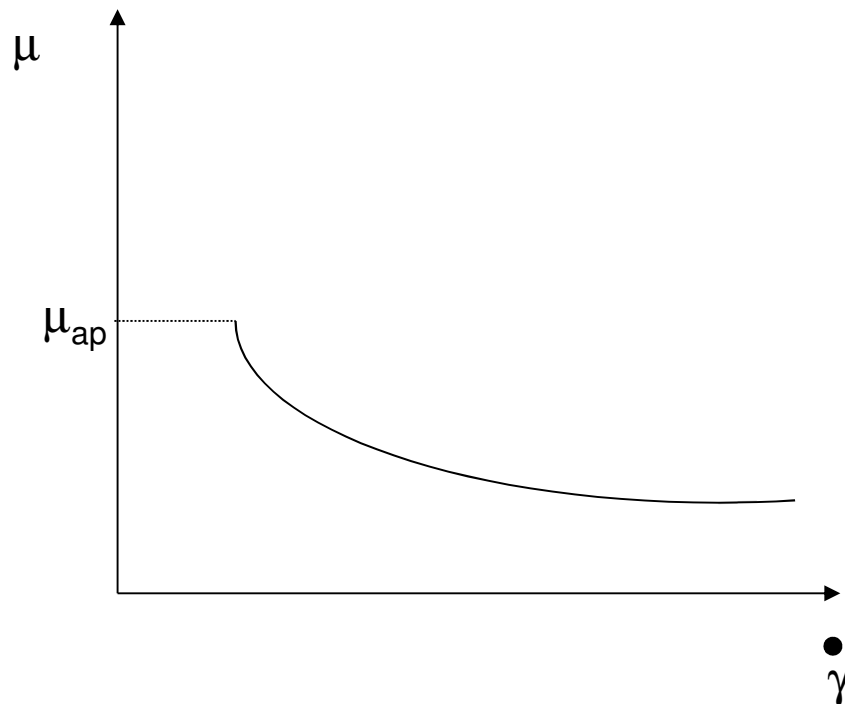


Curva de escoamento para fluido Pseudoplástico



Curva de Viscosidade

- ▶ Relaciona a **viscosidade** com a **taxa de deformação**

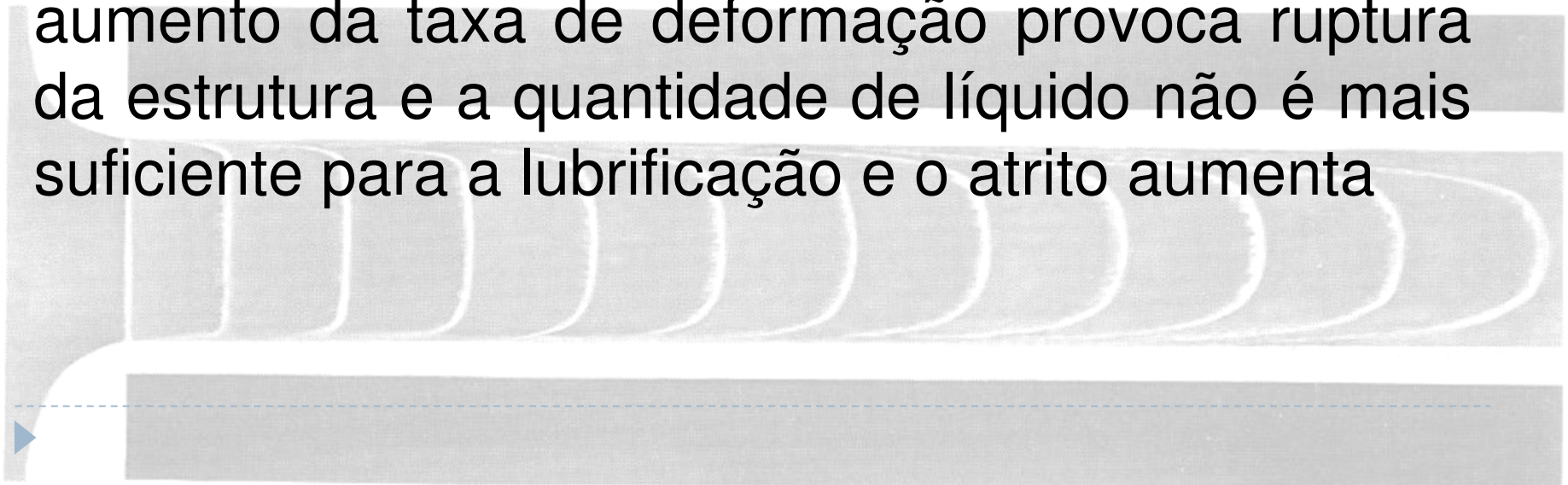


▶ Curva de viscosidade para fluido Pseudoplástico



Fluidos Dilatantes:

- ▶ A viscosidade aparente cresce com o aumento da taxa de deformação
- ▶ Comportamento raro
- ▶ Suposição: o fluido é constituído de partículas densamente empacotadas, com pequenos espaços intersticiais cheios de líquidos, e o aumento da taxa de deformação provoca ruptura da estrutura e a quantidade de líquido não é mais suficiente para a lubrificação e o atrito aumenta



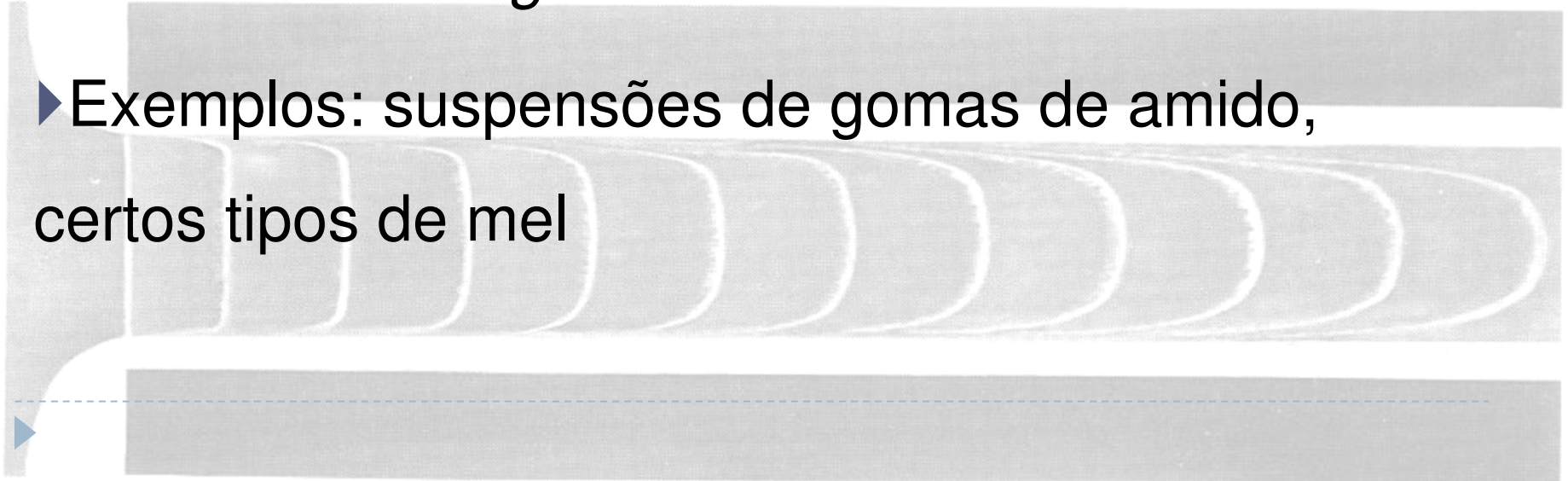


Fluidos Dilatantes:

▶ À medida que as tensões aumentam, as partículas passam a interagir entre si, aumentando a viscosidade do sistema.

▶ *Shear-thickening*

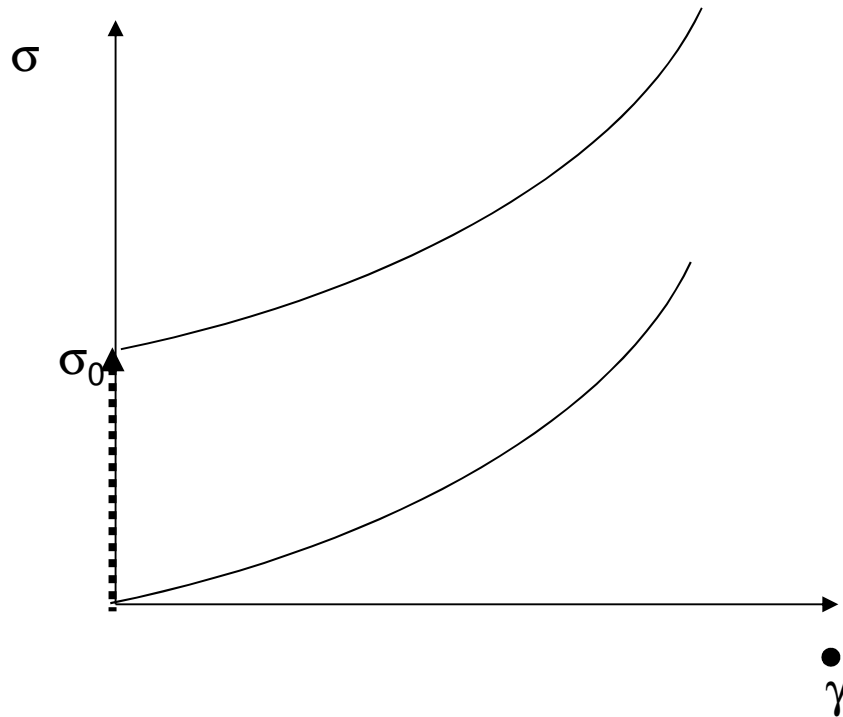
▶ Exemplos: suspensões de gomas de amido, certos tipos de mel





Reograma ou Curva de Fluxo

- ▶ Relaciona a **tensão de cisalhamento** com a **taxa de deformação**

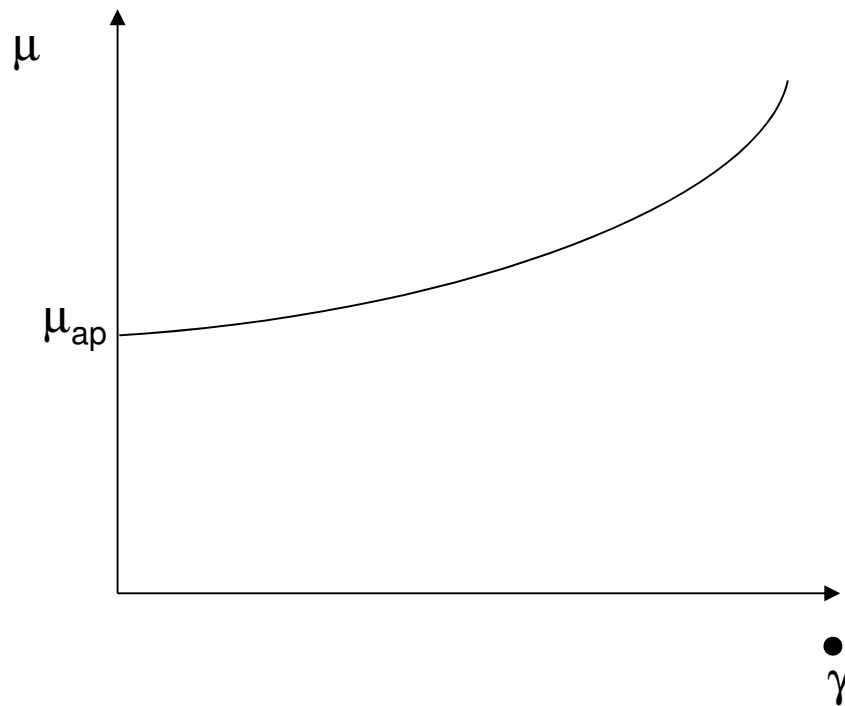


Curva de escoamento para fluido Dilatante



Curva de Viscosidade

- ▶ Relaciona a **viscosidade** com a **taxa de deformação**



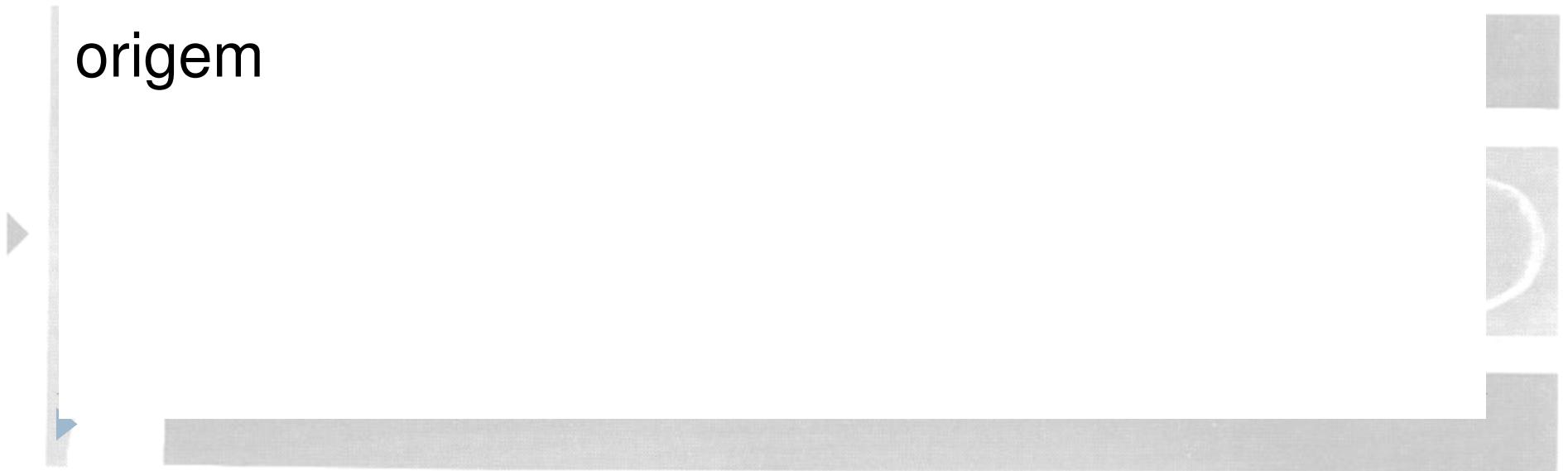
Curva de viscosidade para fluido Dilatante



Plásticos de Bingham:

- ▶ Apresentam uma tensão inicial que precisa ser vencida para que haja escoamento
- ▶ A relação linear entre a σ e $\dot{\gamma}$ não passa pela

origem





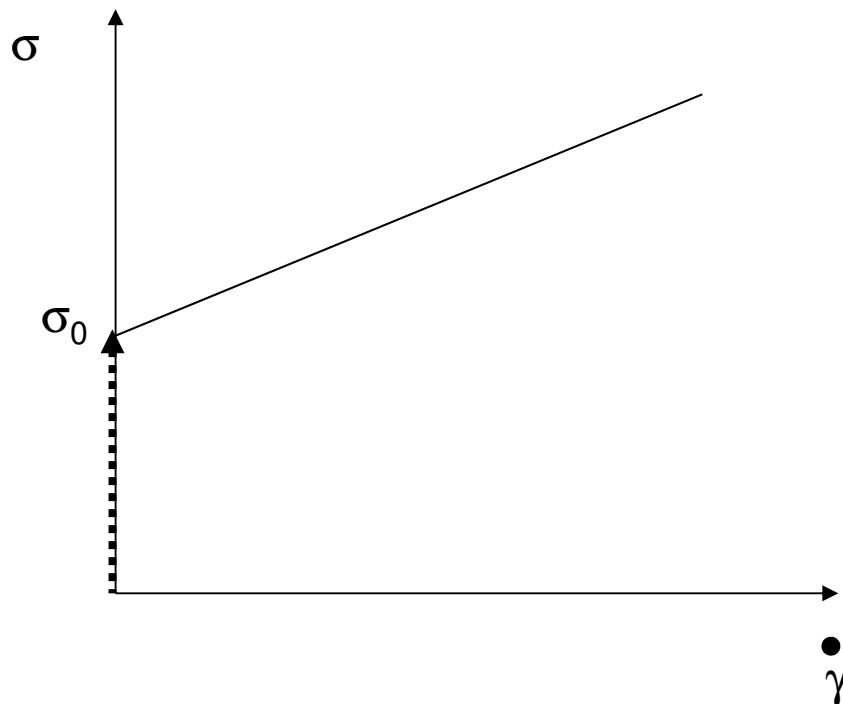
Plásticos de Bingham:

- ▶ O fluido em repouso possui uma estrutura tridimensional para suportar tensões, uma vez atingida a tensão de ruptura desta estrutura ocorre a sua quebra e o fluido tem comportamento próximo ao Newtoniano
- ▶ Exemplos: soluções concentradas de polímeros ou dispersões concentradas de proteínas, alguns purês de frutas, pasta cozida de mandioca, etc.



Reograma ou Curva de Fluxo

- ▶ Relaciona a **tensão de cisalhamento** com a **taxa de deformação**

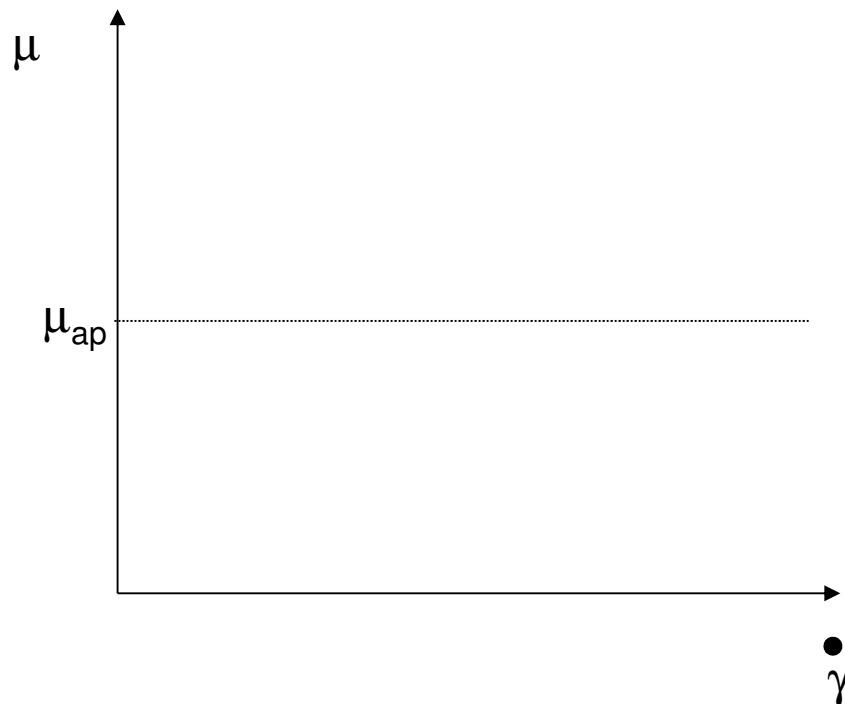


Curva de escoamento para fluido com comportamento de Plástico de Bingham



Curva de Viscosidade

- ▶ Relaciona a **viscosidade** com a **taxa de deformação**



Curva de viscosidade para fluido com comportamento Plástico de Bingham



Modelos Constitutivos Empíricos

Lei de Potência ou Ostwald-de-Waele:

Descreve o comportamento de fluidos Pseudoplásticos ou Dilatantes

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

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

n = índice de comportamento do escoamento

Se $n > 1$ Fluido dilatante

Se $n < 1$ Fluido pseudoplástico

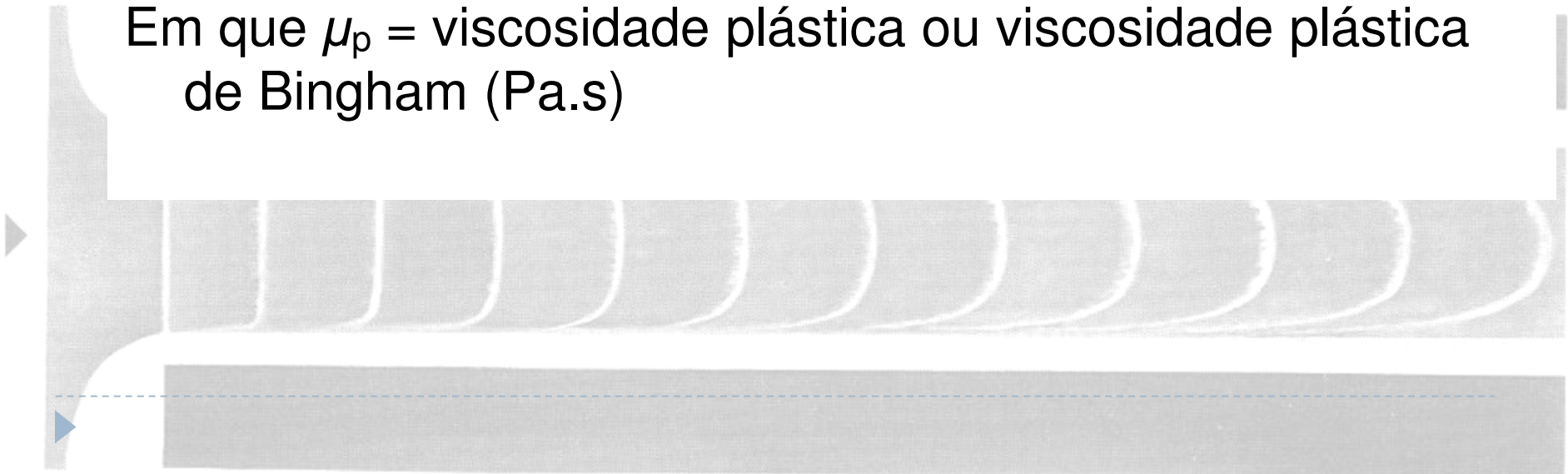


Modelos Empíricos

Plástico de Bingham:

$$\sigma = \sigma_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad \text{para } \sigma > \sigma_0$$

Em que μ_p = viscosidade plástica ou viscosidade plástica de Bingham (Pa.s)





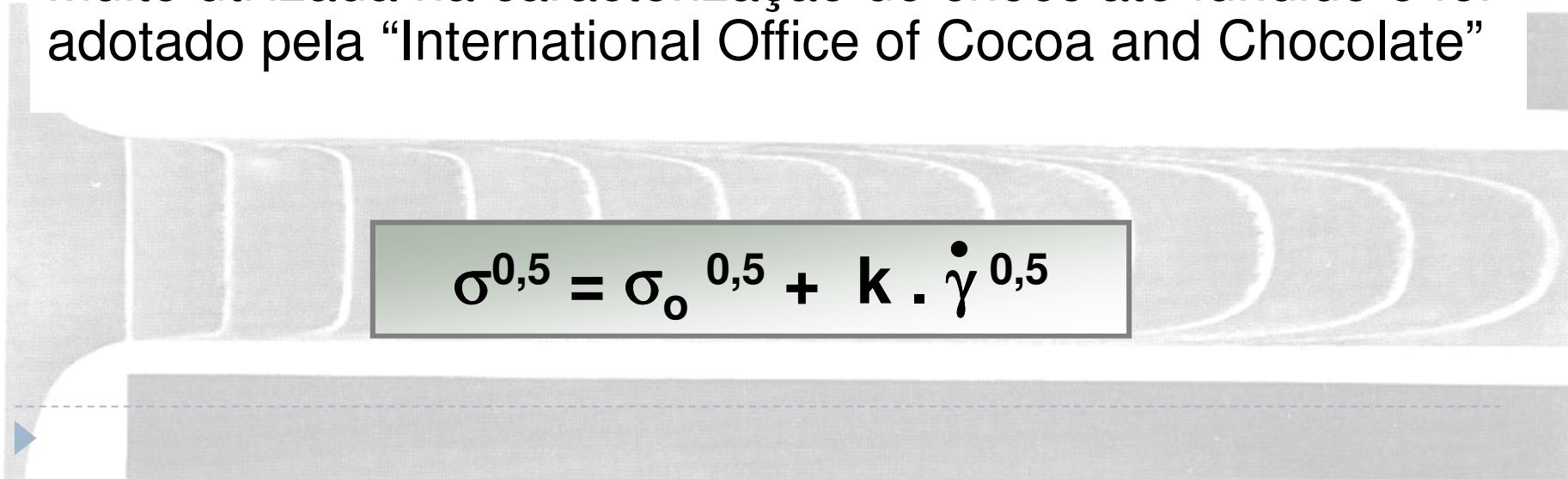
Modelo de Herschel-Bulkley:

- Lei da potência com tensão de cisalhamento inicial
- Modelo mais geral

$$\sigma = \sigma_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n$$

Equação de Casson:

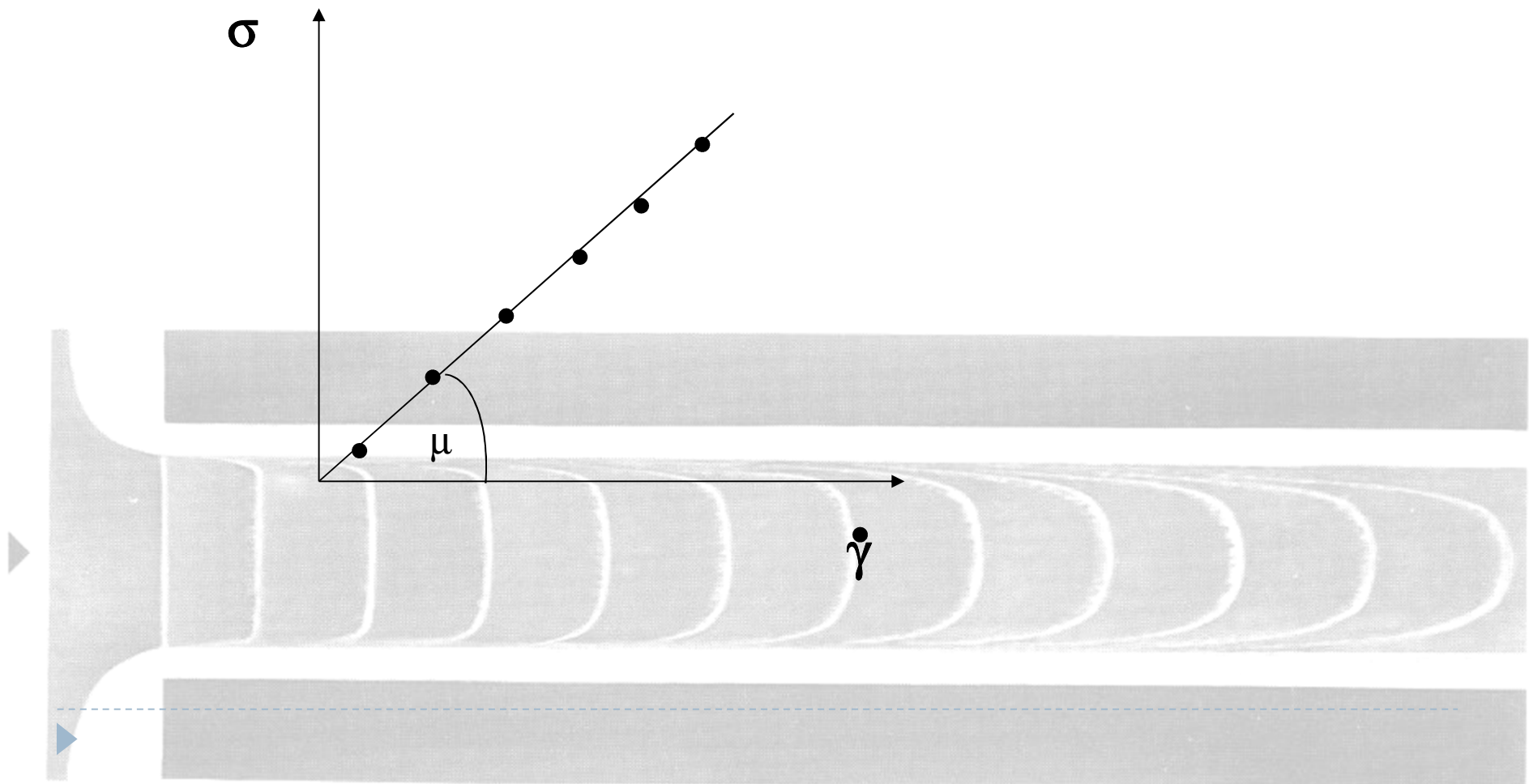
Muito utilizada na caracterização de chocolate fundido e foi adotado pela “International Office of Cocoa and Chocolate”


$$\sigma^{0,5} = \sigma_0^{0,5} + k \cdot \dot{\gamma}^{0,5}$$



Ajuste de Dados

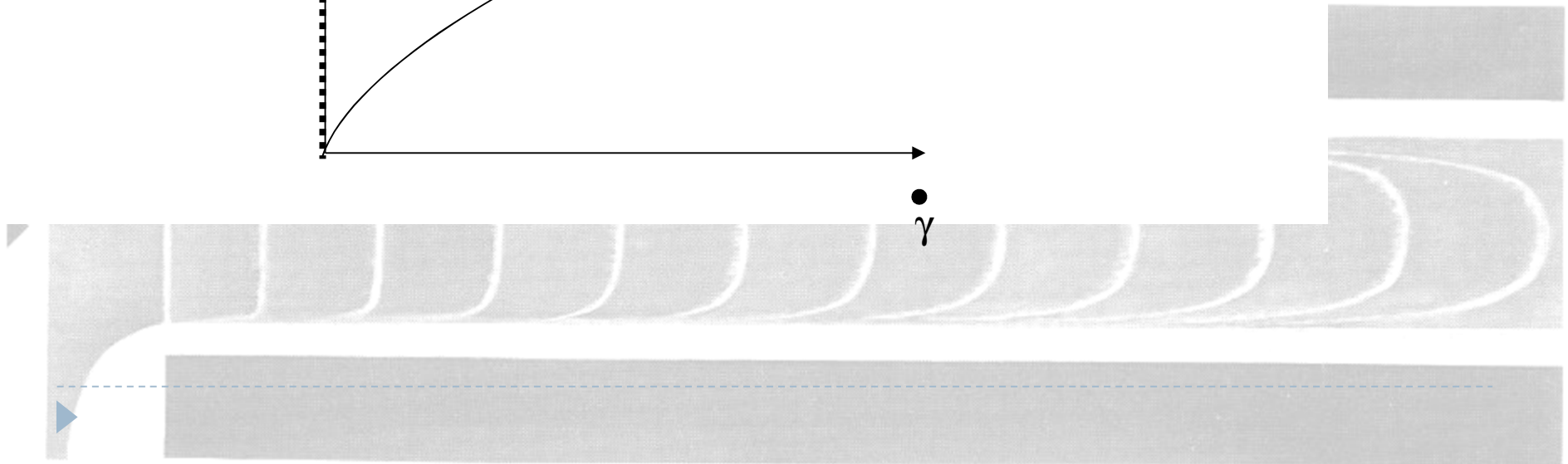
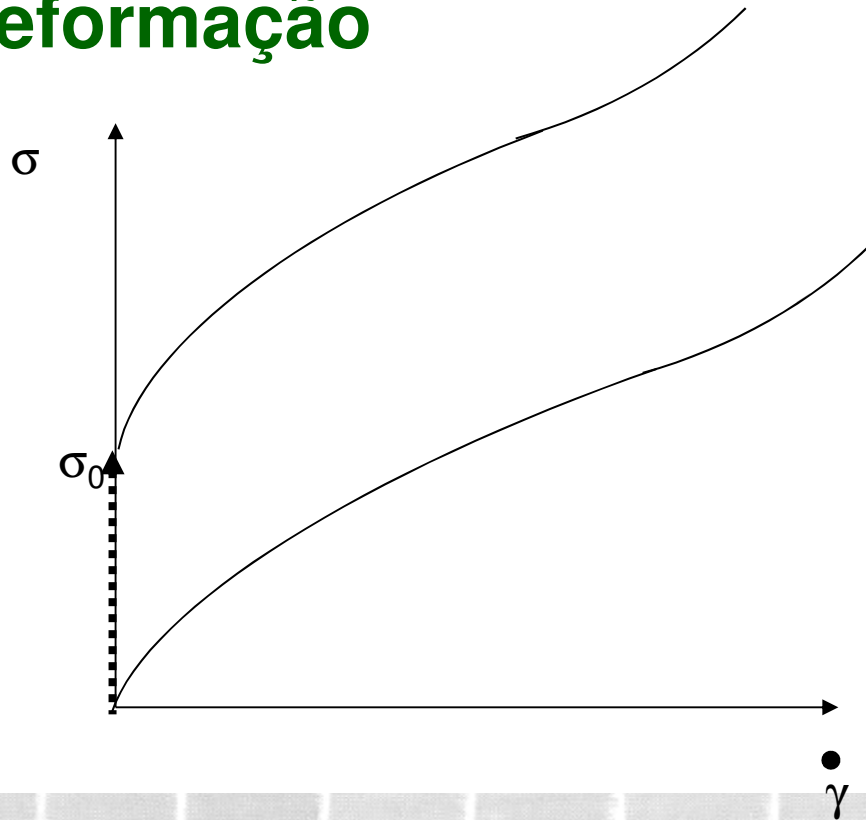
- Curva de Fluxo/Escoamento ou Reograma:





Reograma ou Curva de Fluxo

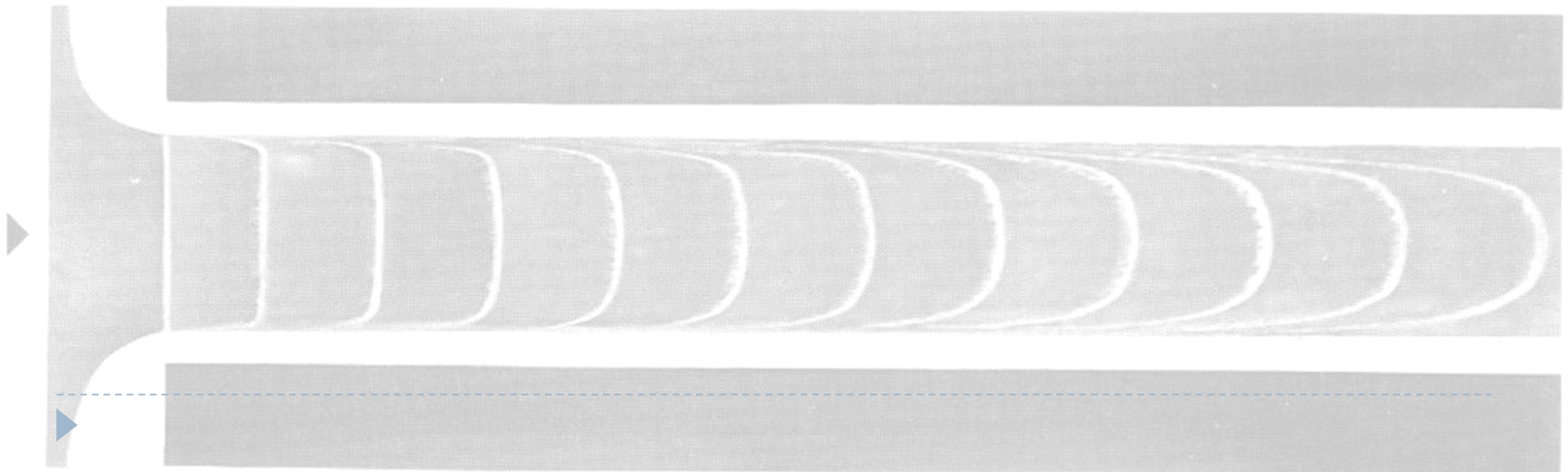
- ▶ Relaciona a **tensão de cisalhamento** com a **taxa de deformação**





Curvas de Fluxo

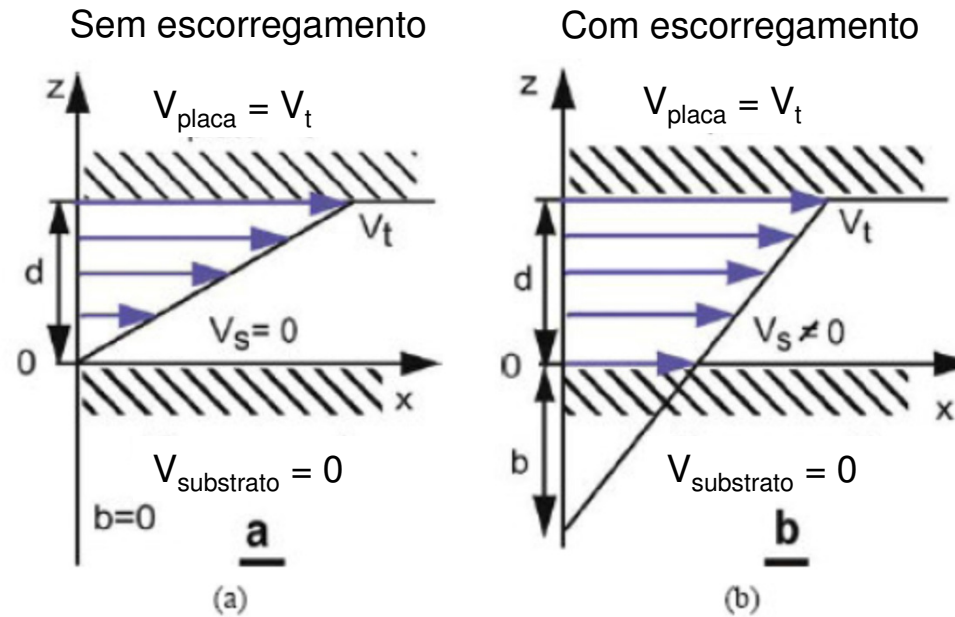
- Medir a viscosidade em regime permanente
 - Determinar o tempo característico de resposta do material





Curvas de Fluxo

- Escorregamento na parede
 - Dados não podem depender do “gap” adotado



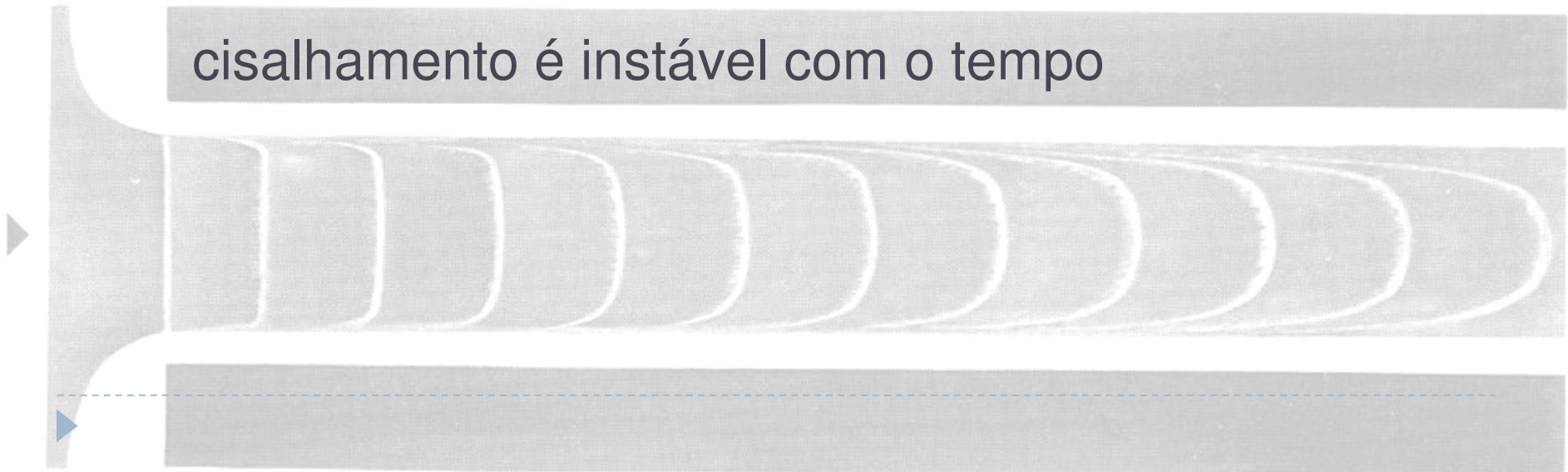


Curvas de Fluxo

- Instabilidades no escoamento

- Características viscoelásticas
- “shear banding”

- Para uma taxa de deformação constante a tensão de cisalhamento é instável com o tempo

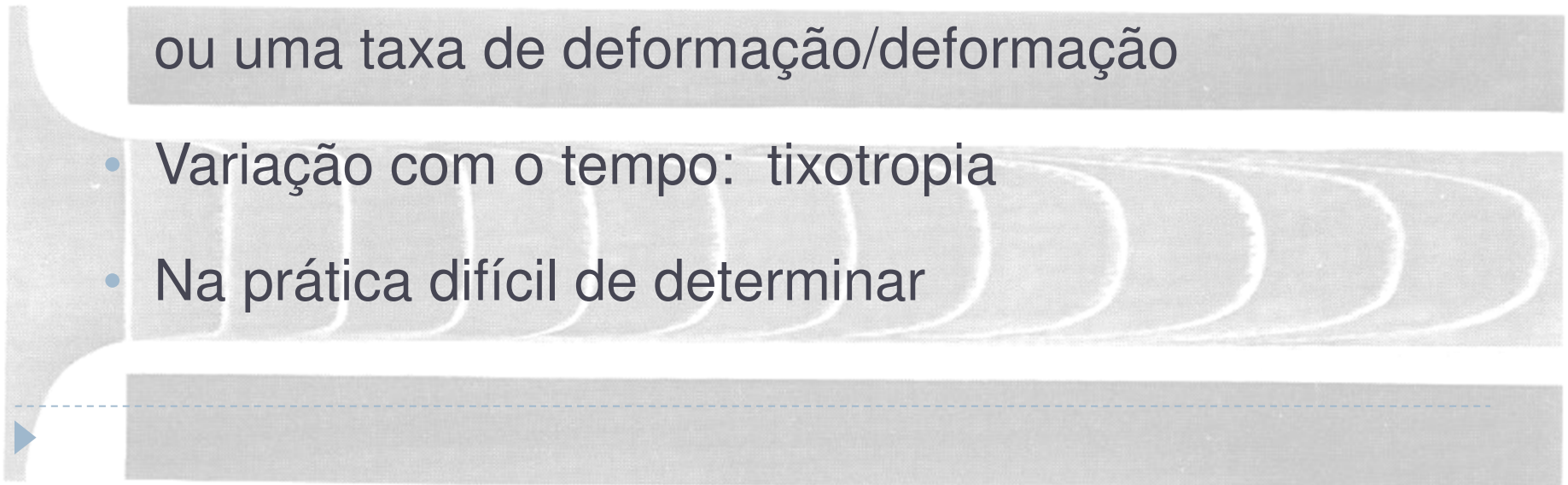




Curvas de Fluxo

- Tensão inicial de escoamento (“yield stress”)
 - Curva de escoamento depende do tempo que o material tem para responder
 - Resultados diferentes quando se aplica uma tensão ou uma taxa de deformação/deformação

- Variação com o tempo: tixotropia
- Na prática difícil de determinar





Curvas de Fluxo

- Tensão inicial de escoamento (“yield stress”)

EMERGING AREA

www.rsc.org/softmatter | Soft Matter

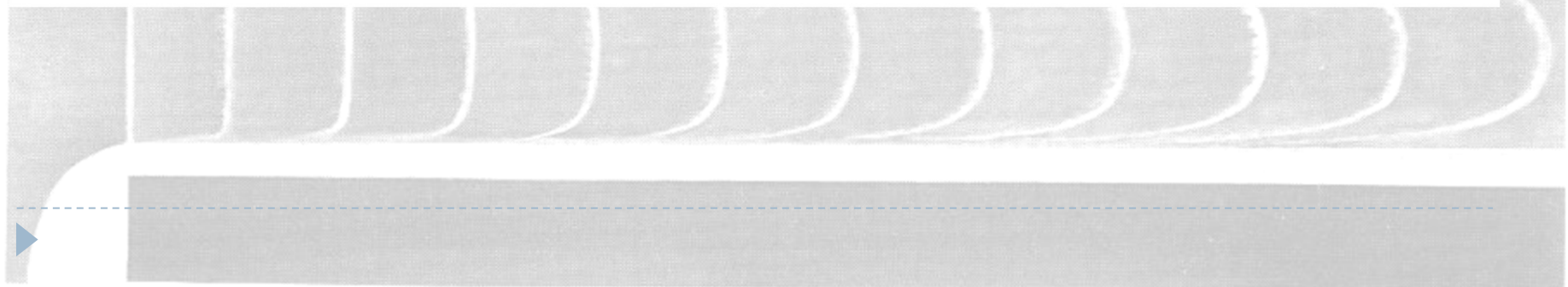
Yield stress and thixotropy: on the difficulty of measuring yield stresses in practice

Peder C. F. Møller,^a Jan Mewis^b and Daniel Bonn^{*ac}

Received 15th December 2005, Accepted 27th January 2006

First published as an Advance Article on the web 17th February 2006

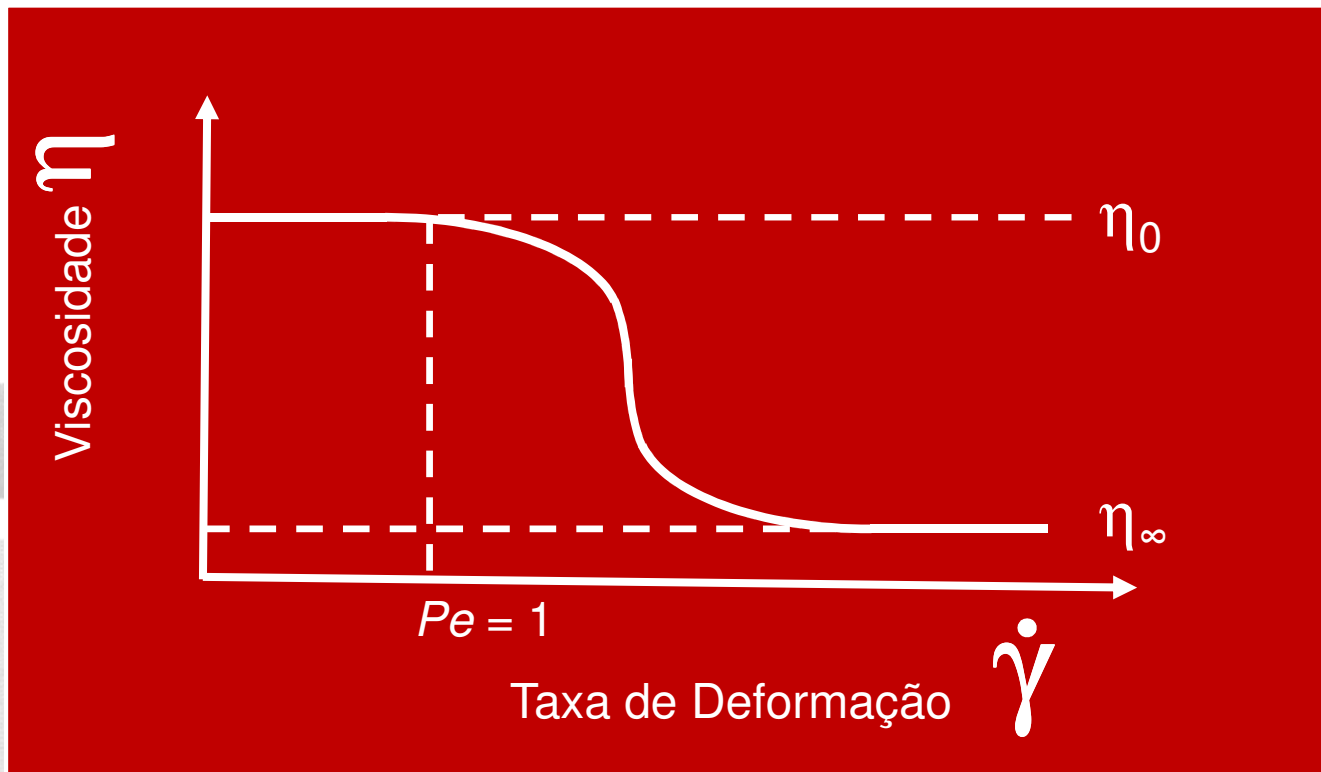
DOI: 10.1039/b517840a





Equações Constitutivas

- Modelo de Cross 4 parâmetros
$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^\alpha}$$





Equações Constitutivas

- Modelo de Cross 4 parâmetros $\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{(1 + (\lambda \dot{\gamma})^{\alpha})}$
- Número de *Peclet* (Pe)

$$Pe = \frac{\lambda}{1} = \lambda \dot{\gamma}$$

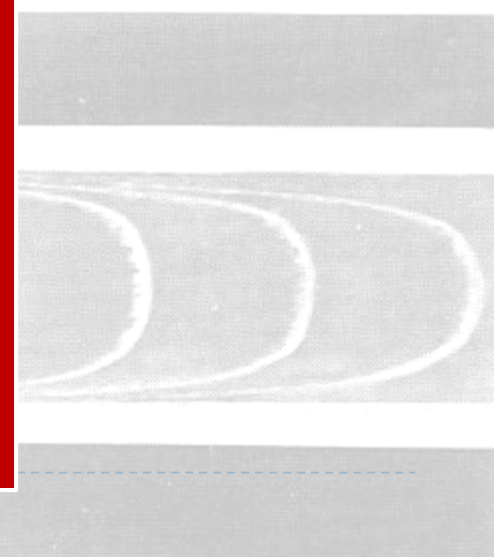
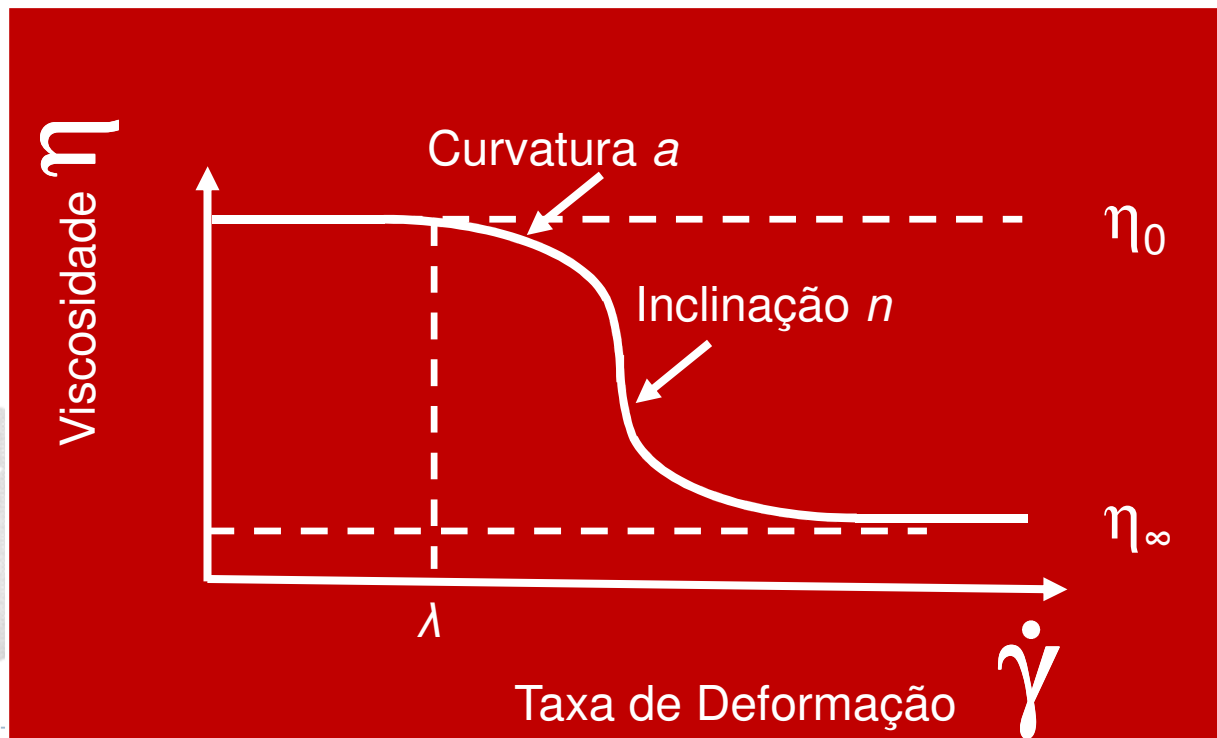
- Primeiro *plateau* Newtoniano – Forças Brownianas
- Escoamento fica mais rápido que as forças Brownianas – decréscimo da viscosidade (α)
- Segundo *plateau* Newtoniano – Forças Hidrodinâmicas



Equações Constitutivas

- Modelo de Carreau-Yasuda 5 parâmetros

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{\left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^a\right]^{\frac{n-1}{a}}}$$





Equações Constitutivas

- Modelo de Carreau-Yasuda 5 parâmetros

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{\left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^a\right]^{\frac{n-1}{a}}}$$

- Primeiro *plateau* Newtoniano
- Constante de tempo do fluido (λ)
- Segundo *plateau* Newtoniano
- Inclinação da região de “lei da potência” (n)
- Curvatura da região de transição do primeiro *plateau* Newtoniano para a região da lei da potência (a) – tempos de relaxação



Obrigada!

