

# ZEM 5008 Tópicos em Reologia

PPG Engenharia e Ciências dos Materiais

4º trimestre 2020

**Docentes: Dra. Cynthia Ditchfield**

**Dra. Izabel Cristina Freitas Moraes**

**Dr. Paulo José do Amaral Sobral**

## **Calendário de atividades:**

**14/10** - Introdução e importância da reologia. (Bel)

**21/10** - Estudo de tensão e deformação. (Cynthia)

**28/10** - Tipos de escoamento em materiais. Modelos reológicos (Cynthia)

**04/11** - Reometria (Bel)

**11/11** - Viscoelasticidade (Sobral)

**18/11** - Funções materiais. (Bel)

**25/11** - Discussão das aulas práticas que foram postadas em vídeo por webconferência (Bel)

**02/12** - Aplicações reológicas de diversos materiais (Bel, Cynthia, Sobral).

**09/12** - Seminários (Bel, Cynthia, Sobral).

**16/12** - Prova escrita (Bel).

# Referências

- Barnes, H. A., J. F. Hutton and K. Walters (1989). An introduction to rheology. Amsterdam, New York, Elsevier.
- Castro, A. F.; Covas, J.A., Diogo, A. C. Reologia e suas aplicações Industriais. Ciências e Técnica (Instituto Piaget), 2001.
- Collyer, A. A. and D. W. Clegg (1998). Rheological measurement. London, Chapman & Hall.
- Larson, R.G. The structure and rheology of complex fluids. Oxford University Press, 1999.
- Macosco, C. W. (1994). Rheology - principles, measurements and application. Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft.
- Mezger, T. (2006). The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers. Hannover, Vincentz Network
- Mewis, J., Wagner, N.J. Colloidal suspension rheology. Cambridge. University Press, 2012.
- Morrison, F. Understanding rheology. Oxford, 2001.
- Phan-Thien, N. (2002). Understanding viscoelasticity: basics of rheology. Berlin, Heidelberg, Springer.
- *Artigos técnicos*

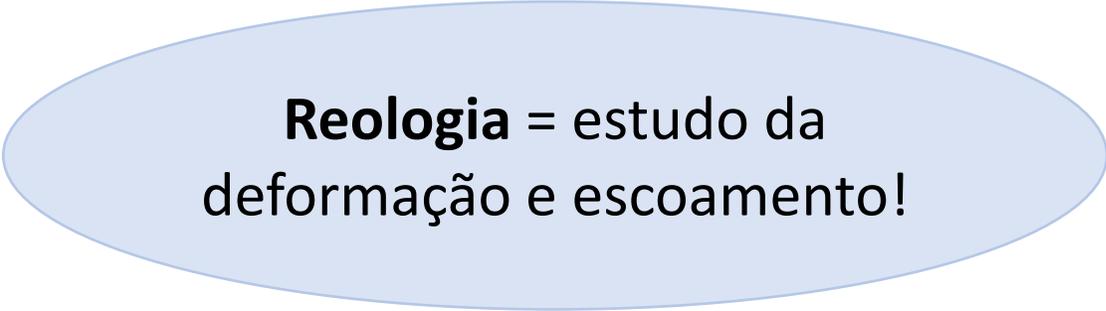
# Aula 1 - Reologia: Introdução e importância

**Docente: Dra. Izabel Cristina Freitas Moraes**

# Reologia

REO (ρει) do grego – ESCOAMENTO!

O que é reologia?



**Reologia** = estudo da  
deformação e escoamento!

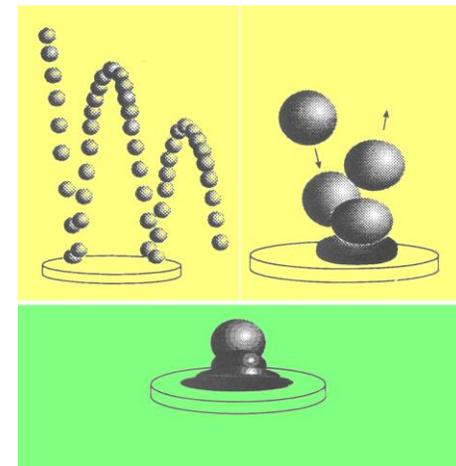
# O que é reologia

Para um leigo; reologia é:

- ❖ **maionese** não escoa mesmo sob tensão por longo tempo, **mel** sempre escoa;



- ❖ *Silly putty quica* (é elástico) mas também flui (é viscoso)



# O que é reologia

Para um leigo; reologia é:

- ❖ **Soluções de farinha e água diluída são fáceis de trabalhar mas a massa pode ser *temperamental***



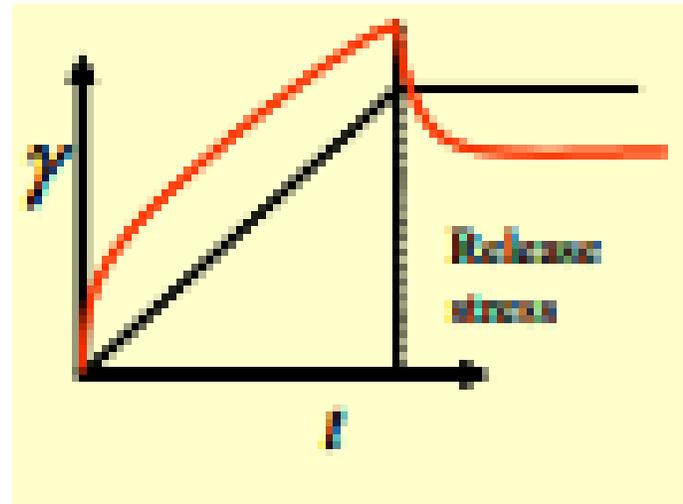
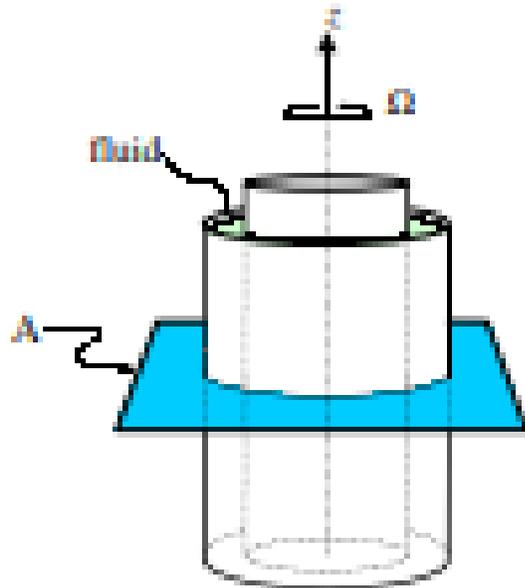
- ❖ **Amido e água pode apresentar um comportamento *estranho***



(<http://www.youtube.com/watch?v=f2XQ97XHjVw>).

# O que é reologia

Para o cientista, engenheiro ou técnico; reologia é:



- ✓ Tensão inicial de cisalhamento
- ✓ Efeitos viscoelásticos;
- ✓ Efeito de memória
- ✓ *Shear thickening e shear thinning*
- ✓ Módulo elástico;
- ✓ Módulo viscoso...

# O que é reologia

Para o cientista,



**Qual a principal diferença entre esses dois fluidos?**

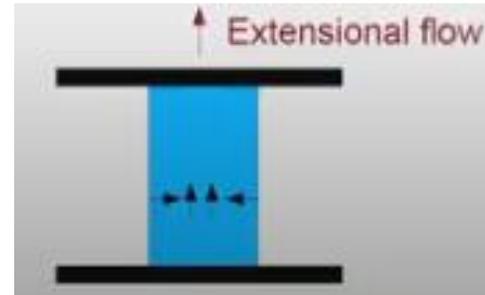
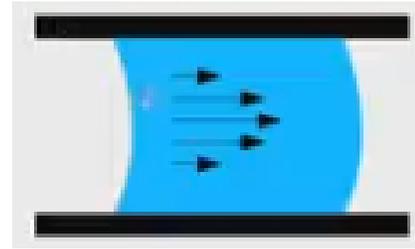
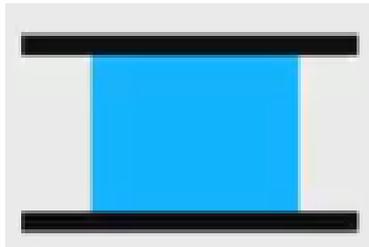
Para ambos os casos, a viscosidade dos dois materiais é muito elevada e semelhante.

# O que é reologia

Para ambos leigos e pessoas técnicas

*Reologia é o conjunto de problemas ou observações de como a **tensão** em um **material** ou a **força** aplicada ao material está relacionado à **deformação** (mudança de forma do material) e/ou taxa de deformação.*

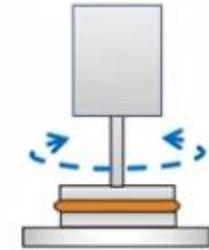
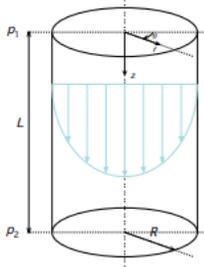
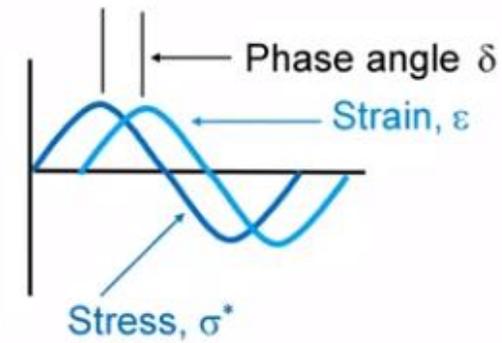
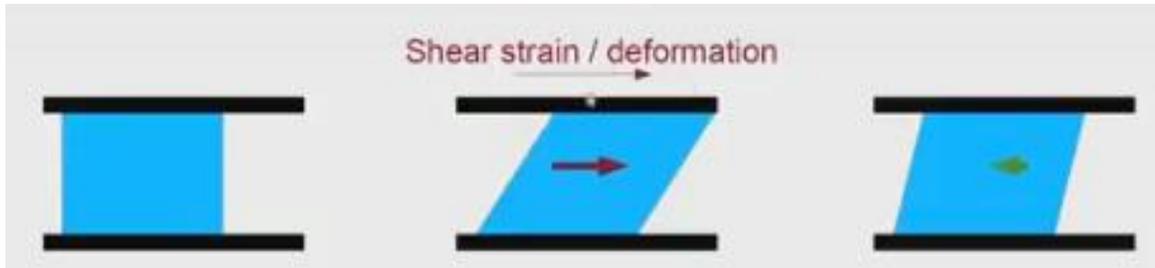
# Deformação vs taxa de deformação



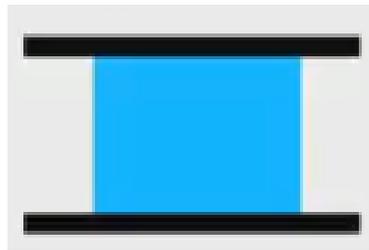
Rotational Shear



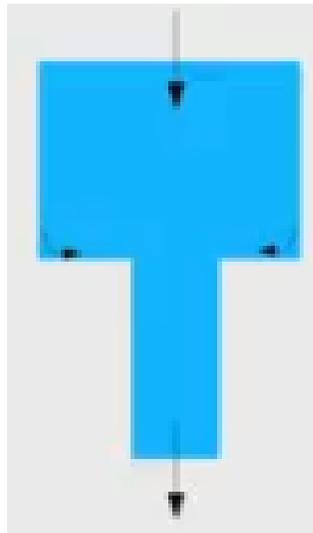
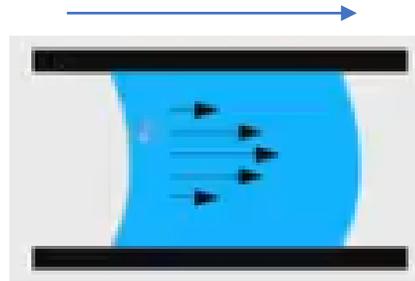
Recuperação elástica



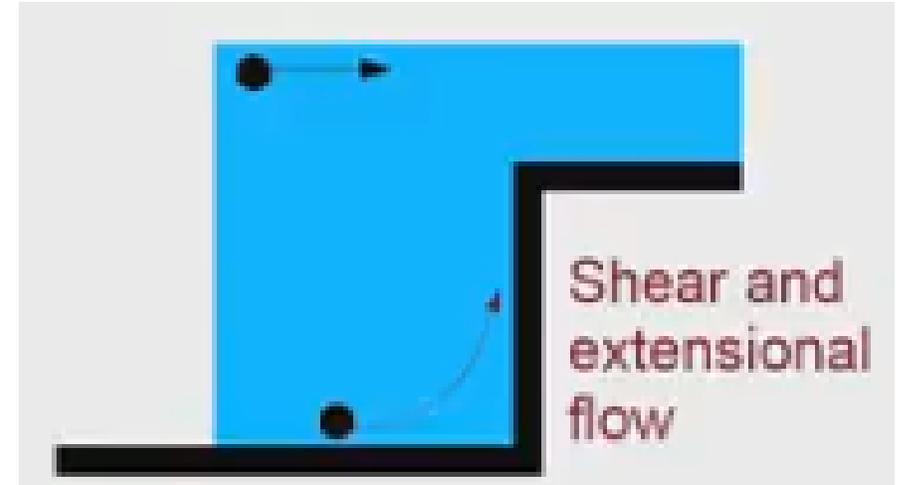
# Exemplos escoamento



Fluxo de cisalhamento

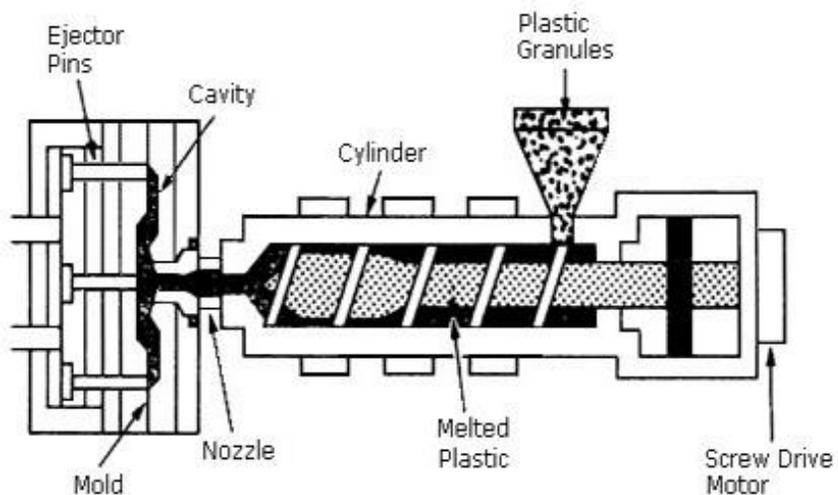


Escoamento na contração  
Linha de corrente



<https://nptel.ac.in/courses/103/106/103106131/>

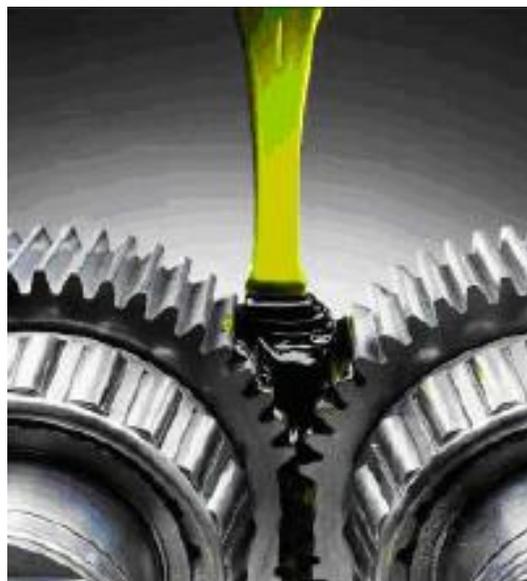
# A reologia influencia:



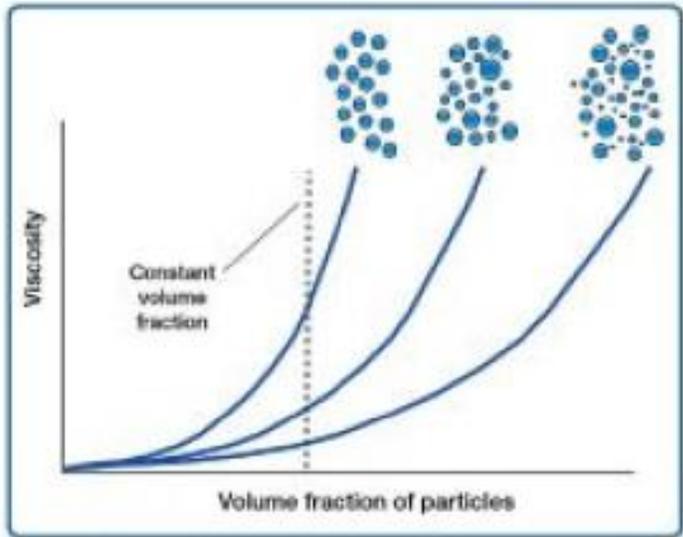
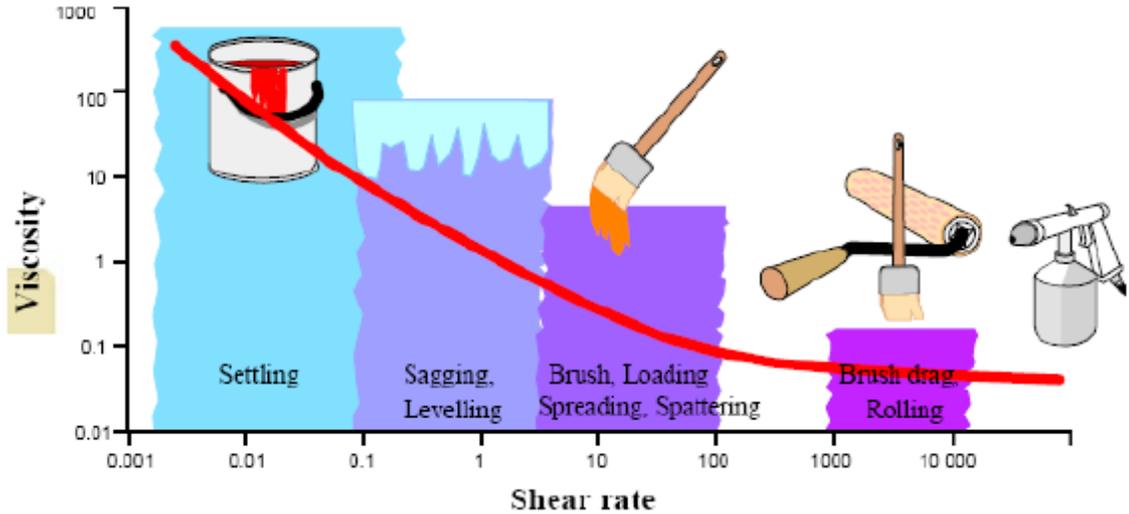
Matéria-prima  
Temperatura de injeção  
Pressão de injeção  
Velocidade de injeção

**MOLDAGEM POR INJEÇÃO**

**EXTRUSÃO** (plasticidade da massa, aditivos)



# A reologia influencia:



- % Solvente
- Aditivos
- Velocidade de secagem/cura
- Velocidade de aplicação

Paints

# A reologia influencia:

in the beginning



after 15min



Food



# Objetivos (Pessoal técnico)

**Entender** os tipos de fluxo e efeitos de deformação de sistemas

**Aplicar** o conhecimento de reologia **qualitativa** para diagnosticar, projetar ou para problemas de otimização



**Usar ou desenvolver**

ferramentas analíticas  
**quantitativas** que capturem corretamente os efeitos reológicos

**Como nós alcançamos esses objetivos???**

## Como?

Observando o **comportamento** de diferentes sistemas



**Entender** os tipos de fluxo e efeitos de deformação de sistemas

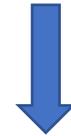
Aprendendo quais **modelos quantitativos** aplicar em que circunstâncias



**Aplicar** o conhecimento de reologia **qualitativa** para diagnosticar, projetar ou para problemas de otimização



Fazendo cálculos com **modelos** em situações apropriadas



**Usar ou desenvolver** ferramentas analíticas **quantitativas** que capturem corretamente os efeitos reológicos

# A física na reologia

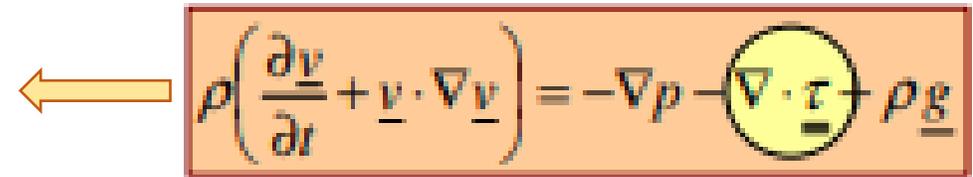
## 1. Leis de conservação

- ✓ Massa;
- ✓ *Momentum* ou quantidade de movimento
- ✓ Energia

## 2. Matemática

- ✓ Equações diferenciais;
- ✓ Vetores
- ✓ Tensores

3. Equações constitutivas → lei que relaciona **tensão** e **deformação** para um fluido específico


$$\rho \left( \frac{\partial \underline{v}}{\partial t} + \underline{v} \cdot \nabla \underline{v} \right) = -\nabla p - \nabla \cdot \underline{\tau} + \rho \underline{g}$$

# Fluidos

## Fluido Newtoniano

✓ (mecânica de fluido)

$$\tau_{21} = -\mu \frac{dv_1}{dx_1}$$

Parâmetro material

Deformação  
(ou taxa de deformação)

## Lei de Newton da viscosidade

- ✓ É uma lei empírica (medida ou observada)
- ✓ Pode ser derivada teoricamente para alguns sistemas

## Fluido Não Newtoniano

✓ (reologia)

## Precisa de uma nova lei ou novas leis

- ✓ Essas leis também serão empíricas ou derivadas teoricamente

# Fluidos

## Fluido Newtoniano

✓ (apenas fluxo de cisalhamento)

$$\tau_{21} = -\mu \frac{dv_1}{dx_1}$$

## Fluido Não Newtoniano

✓ (todos os fluxos)

Equação Constitutiva

Tensor taxa de deformação

$$\bar{\bar{\tau}} = -f(\bar{\bar{\dot{\gamma}}})$$

Tensor tensão

**Função não linear**  
(em tempo e posição)

# Introdução ao comportamento não Newtoniano 1964

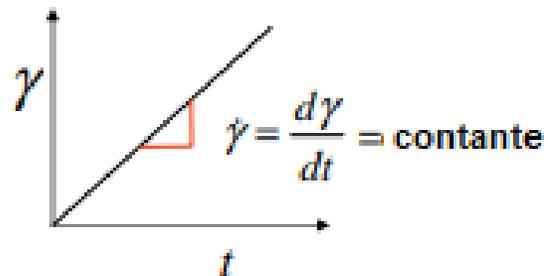
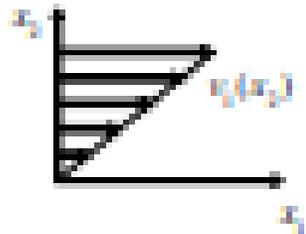
Tensor gradiente de velocidade  $\dot{\gamma}$

Tipo de fluido	Balanco de <i>momentum</i>	Relação tensão-deformação (equação constitutiva)
Invíscido (viscosidade zero, $\mu = 0$ )	Equação de Euler ( <b>Navier-Stokes</b> com viscosidade zero)	Tensão é isotrópica
<b>Newtoniano</b> (viscosidade constante, finita, $\mu$ )	<b>Navier-Stokes</b> (Equação de <i>momentum Cauchy</i> com equação constitutiva Newtoniana)	Tensão é uma função do gradiente de velocidade <b>instantâneo</b>
<b>Não Newtoniano</b> (viscosidade variável $\eta$ mais efeito de <b>memória</b> )	Equação de <i>momentum Cauchy</i> com equação constitutiva memória)	Tensão é uma função da <b>história</b> da do gradiente de velocidade

# Comportamento de Fluidos Newtoniano

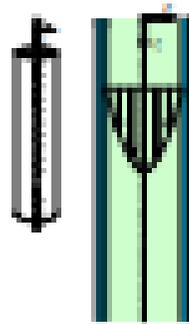
1. Resposta da deformação para a tensão de cisalhamento imposta

- ✓ Taxa de deformação é constante

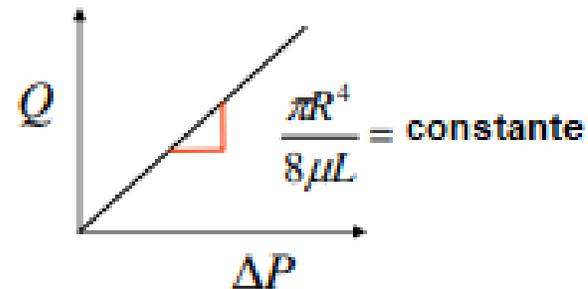


2. Fluxo acionado por pressão em um tubo (Fluxo de Poiseuille)

- ✓ Viscosidade é constante



$$Q = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 \mu L}$$



3. Tensor tensão em fluxo de cisalhamento

- ✓ Somente 2 componentes são diferentes de zero

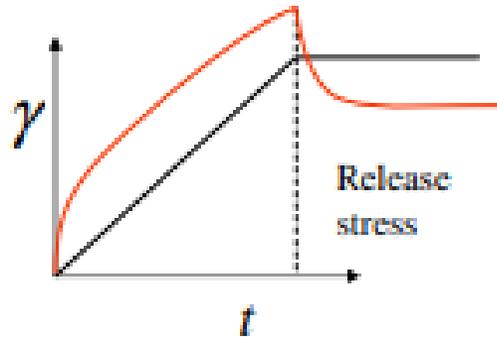


$$\underline{\underline{\tau}} = \begin{pmatrix} 0 & \tau_{12} & 0 \\ \tau_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}_{123}$$

# Comportamento de Fluidos Não-Newtoniano

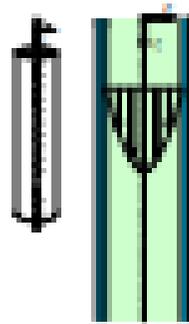
1. Resposta da deformação para a tensão de cisalhamento imposta

✓ Taxa de deformação é variável

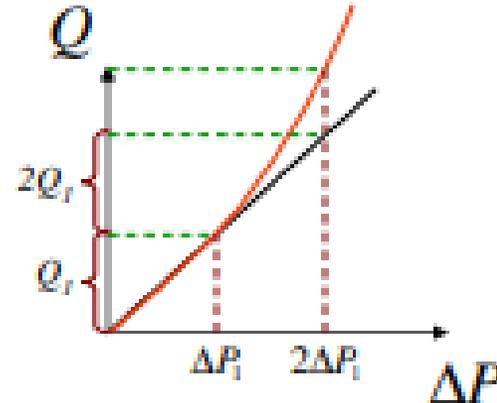


2. Fluxo acionado por pressão em um tubo (Fluxo de Poiseuille)

✓ Viscosidade é variável



$$Q = f(\Delta P)$$



3. Tensor tensão em fluxo de cisalhamento

✓ Todas as 9 componentes são diferentes de zero



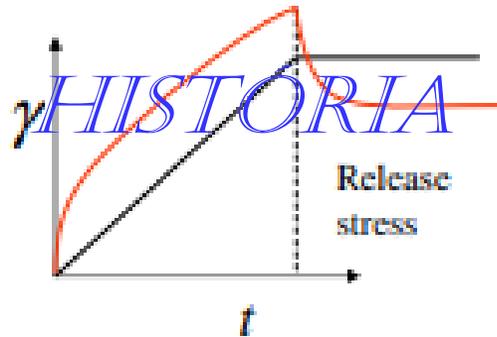
tensões Normal

$$\underline{\underline{\tau}} = \begin{pmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} \end{pmatrix}_{123}$$

# Comportamento de Fluidos Não-Newtoniano

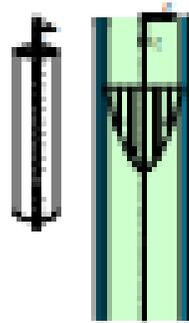
1. Resposta da deformação para a tensão de cisalhamento imposta

✓ Taxa de deformação é variável

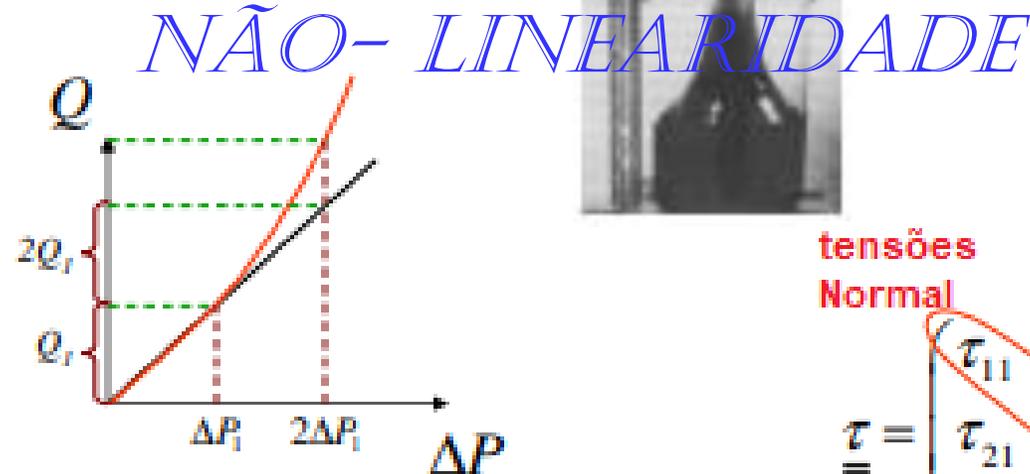


2. Fluxo acionado por pressão em um tubo (Fluxo de Poiseuille)

✓ Viscosidade é variável



$$Q = f(\Delta P)$$



3. Tensor tensão em fluxo de cisalhamento

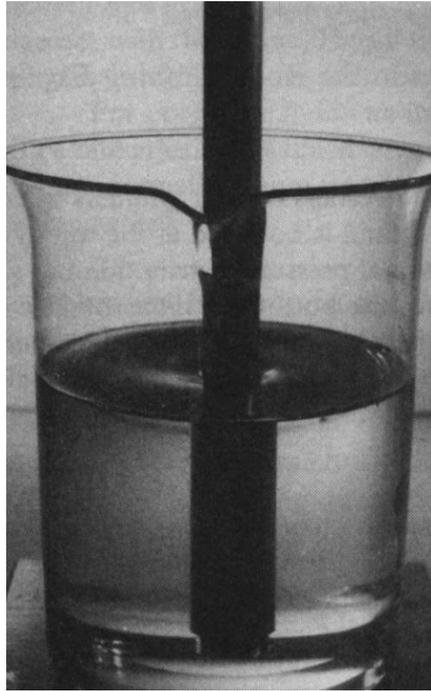
✓ Todas as 9 componentes são diferentes de zero

tensões Normal

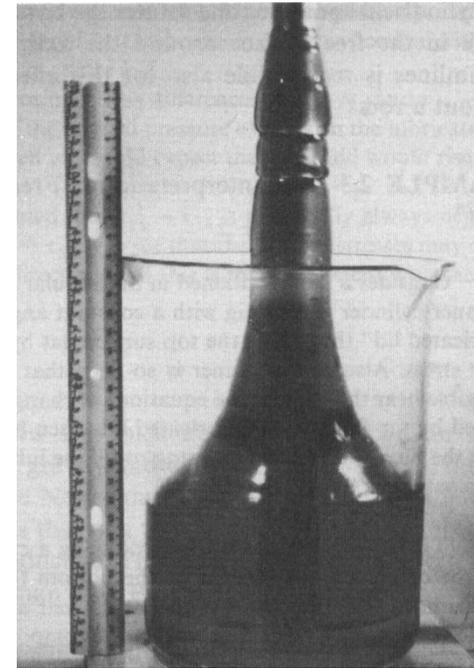
$$\underline{\underline{\tau}} = \begin{pmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} \end{pmatrix}_{123}$$

# Comportamento de Fluidos Newtoniano (simples) vs Não Newtoniano (complexos)

## Efeito Weissenberg



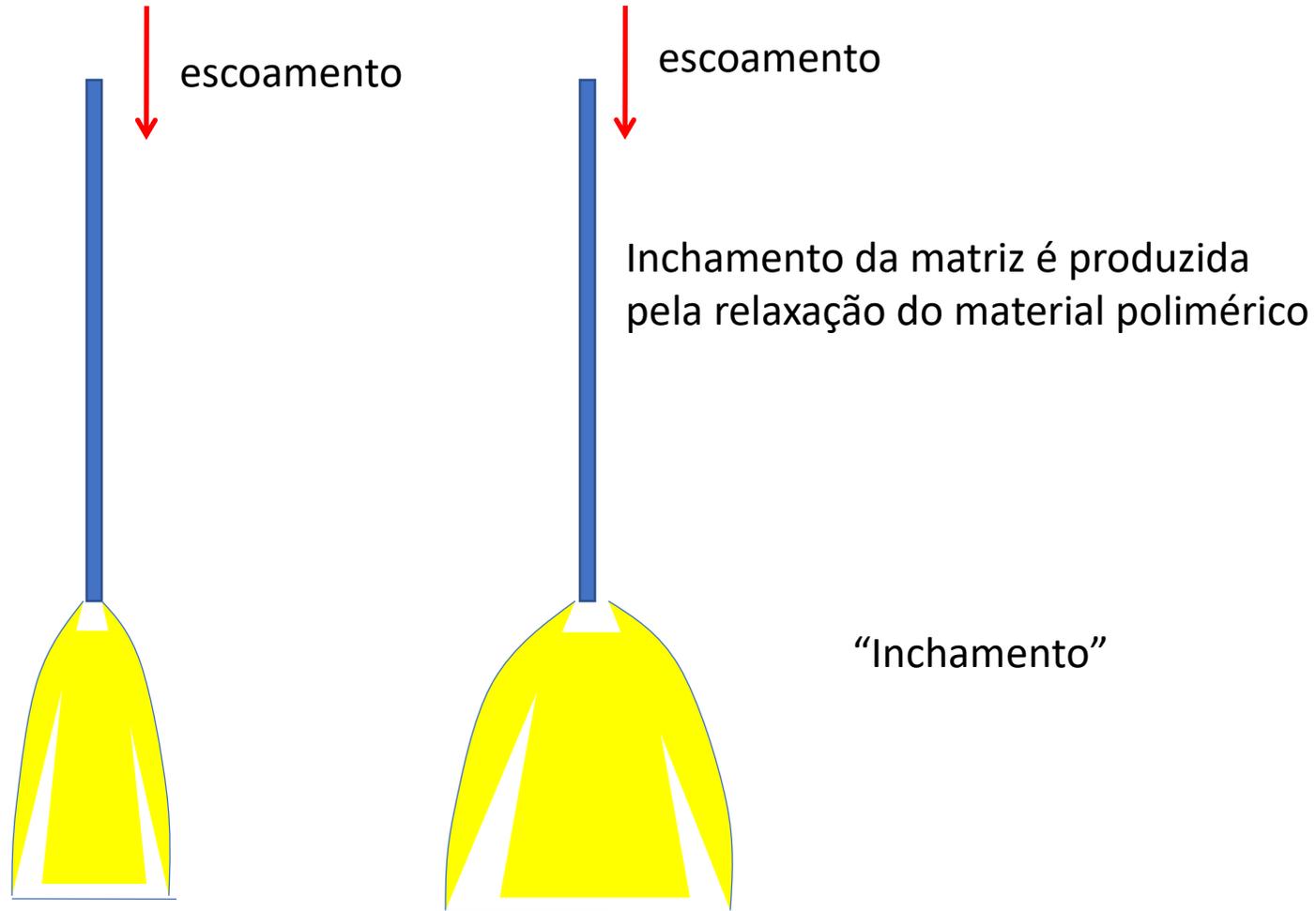
$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{pmatrix} 0 & \tau_{12} & 0 \\ \tau_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & 0 \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{pmatrix}$$

# Comportamento de Fluidos Newtoniano (simples) vs Não Newtoniano (complexos)

## Inchamento (Die Swell)



# Reologia

## Reologia “Simples”

Fluido Newtoniano

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

Sólido Hookeano

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{G}} \underline{\underline{\gamma}}$$

## Reologia “Complexa”

Líquido Não Newtoniano

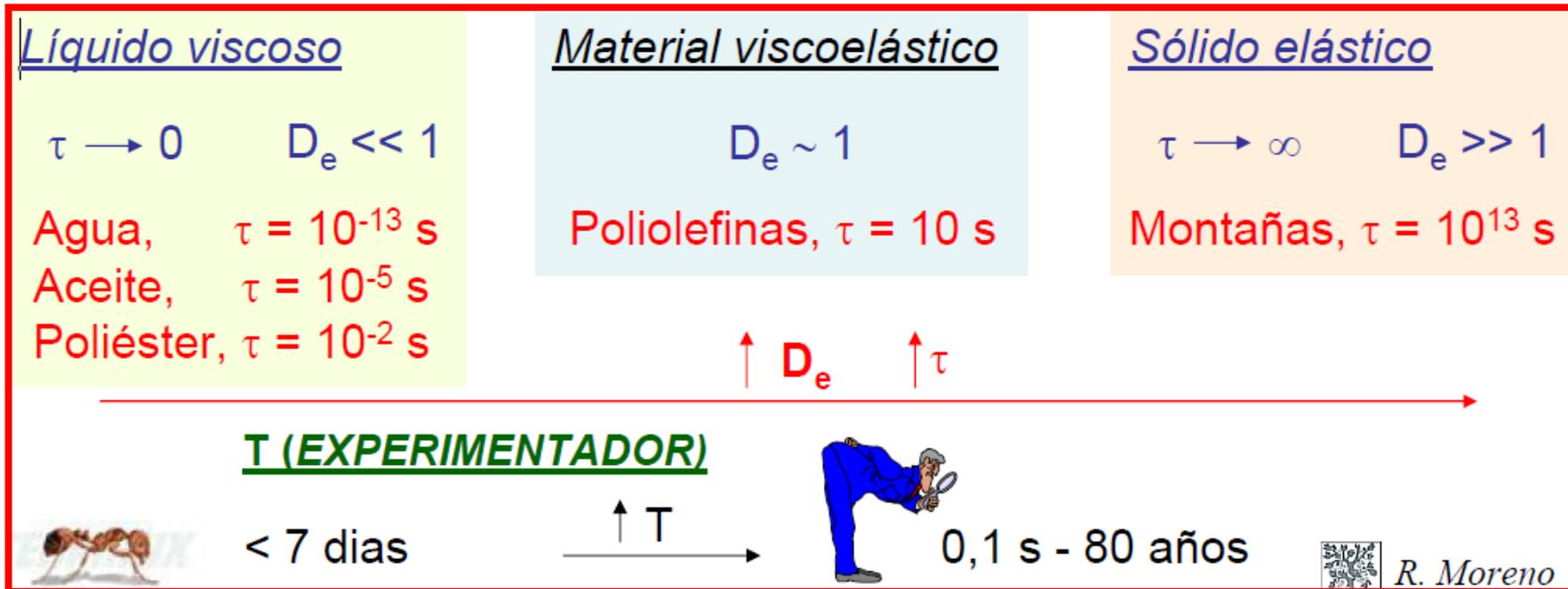
$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\eta}}(\underline{\underline{\dot{\gamma}}}) \underline{\underline{\dot{\gamma}}}$$

Material Viscoelástico

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{function}}(\underline{\underline{\gamma}}, \underline{\underline{\dot{\gamma}}}, \underline{\underline{time}})$$

# Reologia

$$De = \frac{t_R}{t_{\text{exp}}} \quad \text{Deborah number}$$



# FENÔMENOS REOLÓGICOS

Soluções com soluto de baixa  
massa molar (monômero)



Comportamento líquido

Sistemas com massa  
molar alta



Líquido viscoelástico

Sistemas com massa  
molar muito alta



Sólido viscoelástico

Material macroestrutural  
(suspensões coloidais)



Resposta é dependente da  
Estrutura, recuperação/quebra

## Exemplo: Eletrofiação

- ✓ Método de processamento para produzir fibras de diâmetro submícron
  - ✓ A solução polimérica é forçada a escoar através de um capilar na presença de um campo elétrico até atingir a placa coletora
- ✓ Aplicação: materiais fibrosos porosos
  - ✓ Biomateriais
  - ✓ Processos por membranas
  - ✓ Adsorvente (capacidade de remoção para ampla variedade de contaminantes)
- ✓ Estabilidade de jato

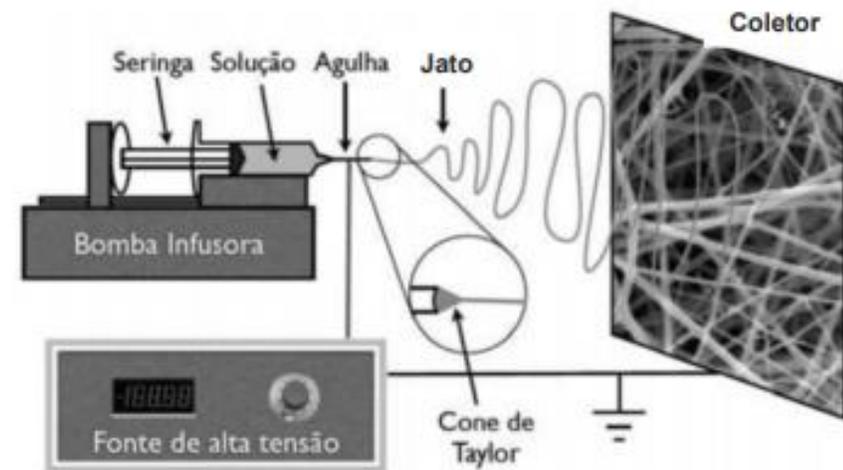
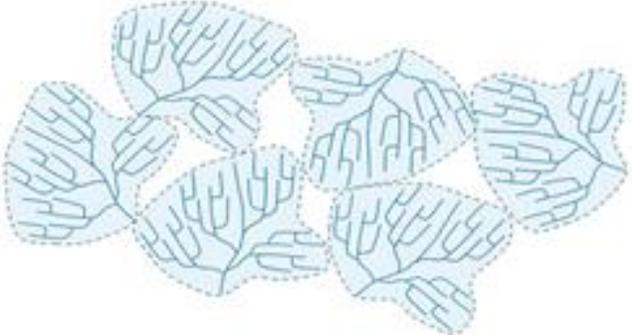


Figura 1 - Esquema do aparato de eletrofiação.

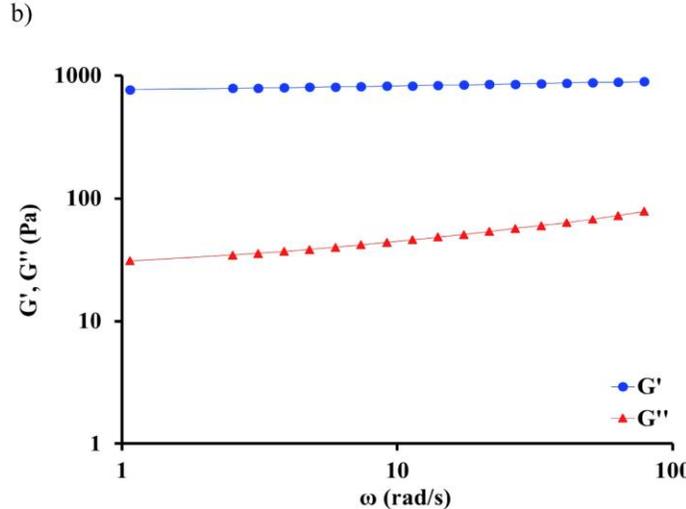
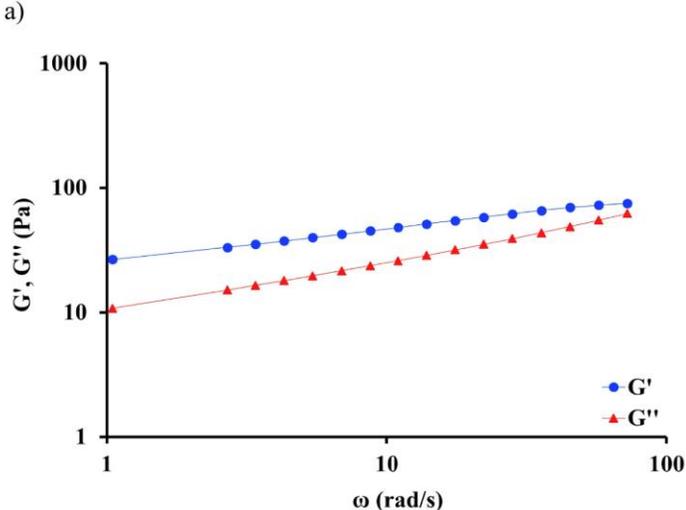
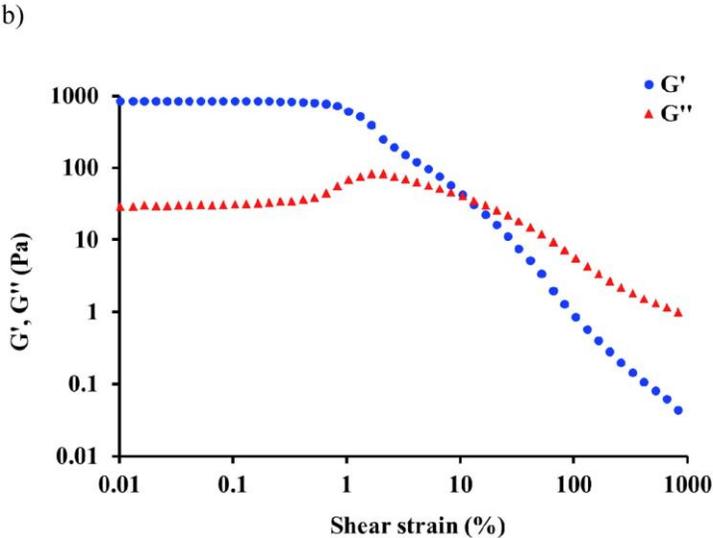
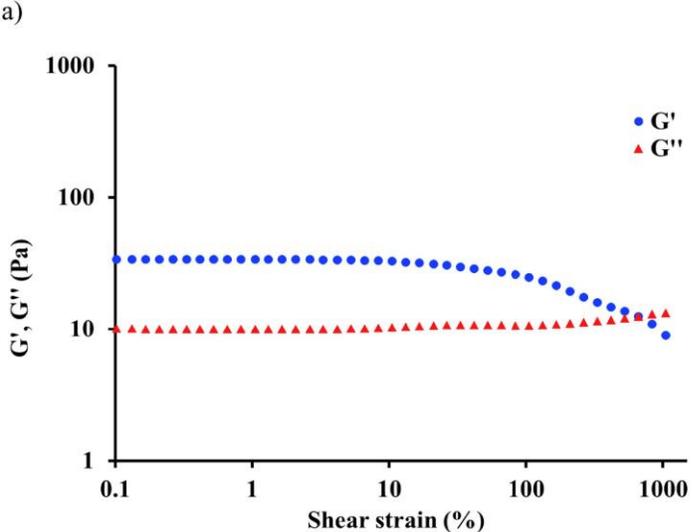
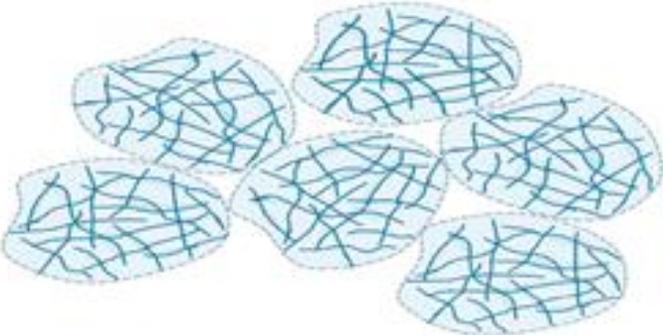
Fonte: Franco et al., 2009.

# Exemplo: Géis de amido

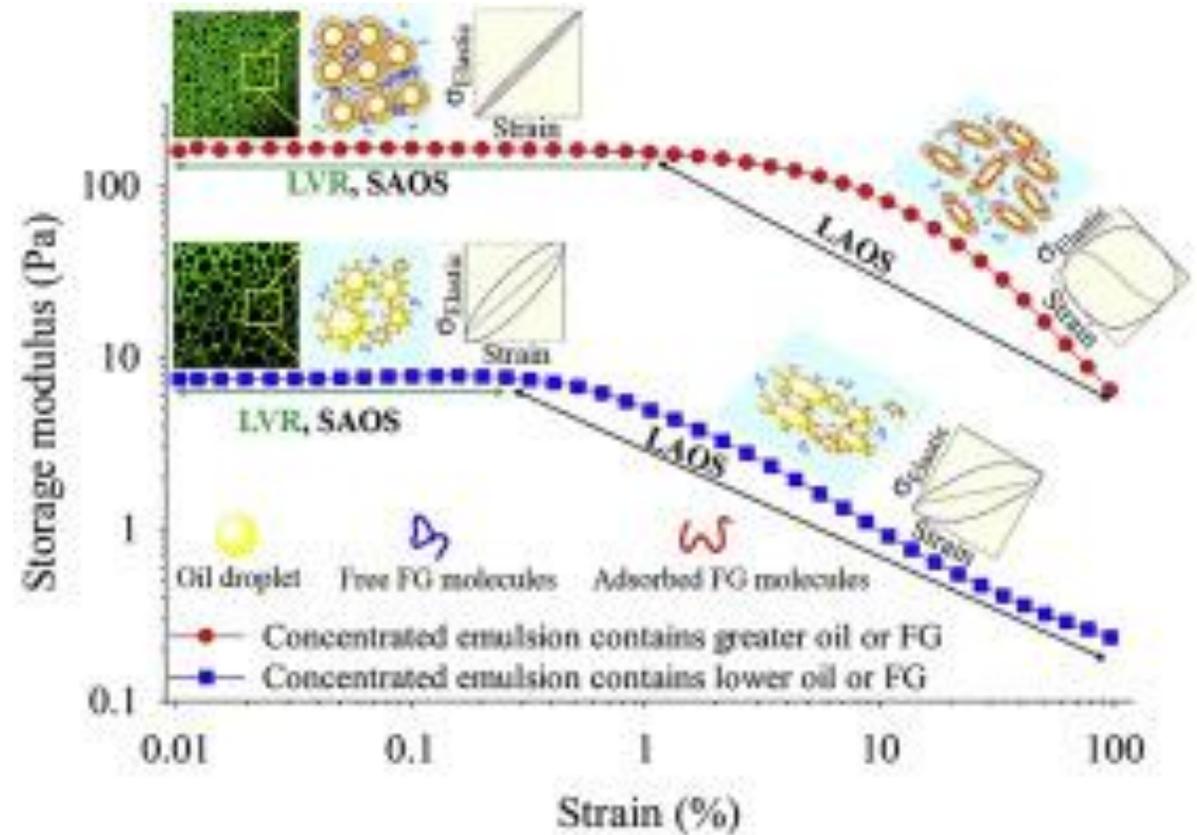
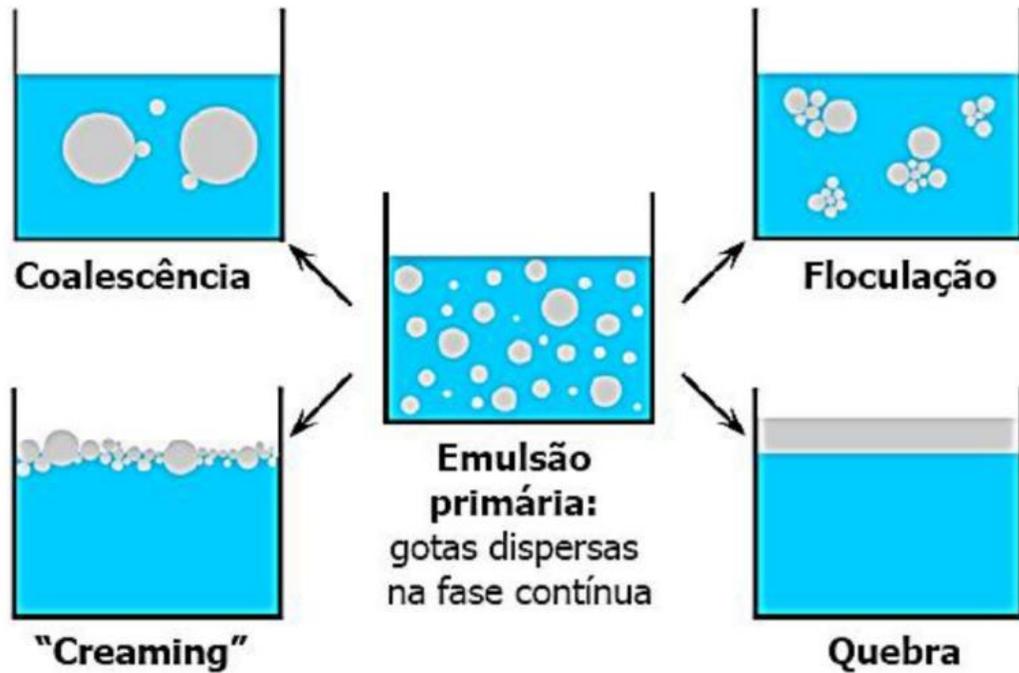
Native waxy rice starch



Debranched waxy rice starch



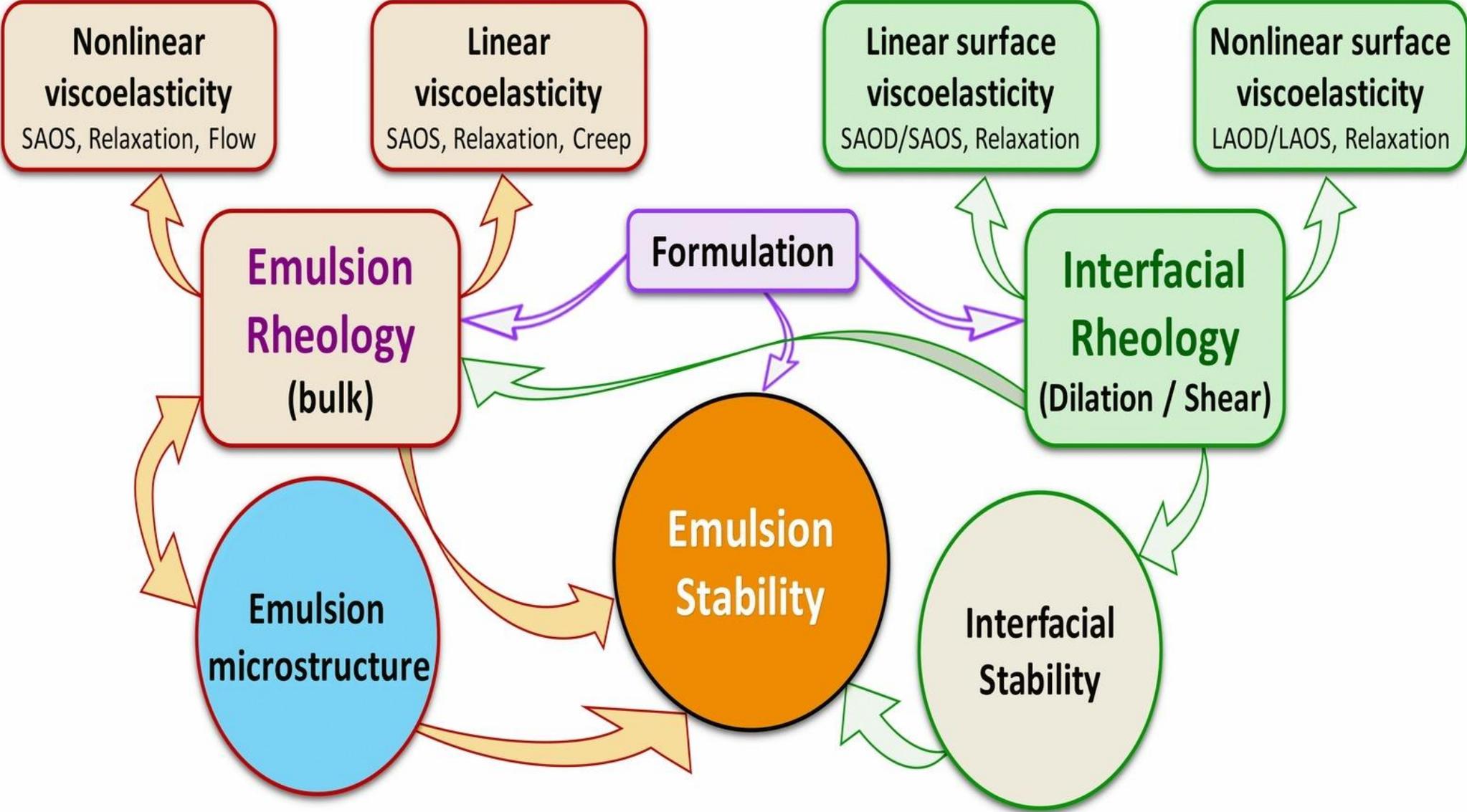
# Exemplo: Emulsão



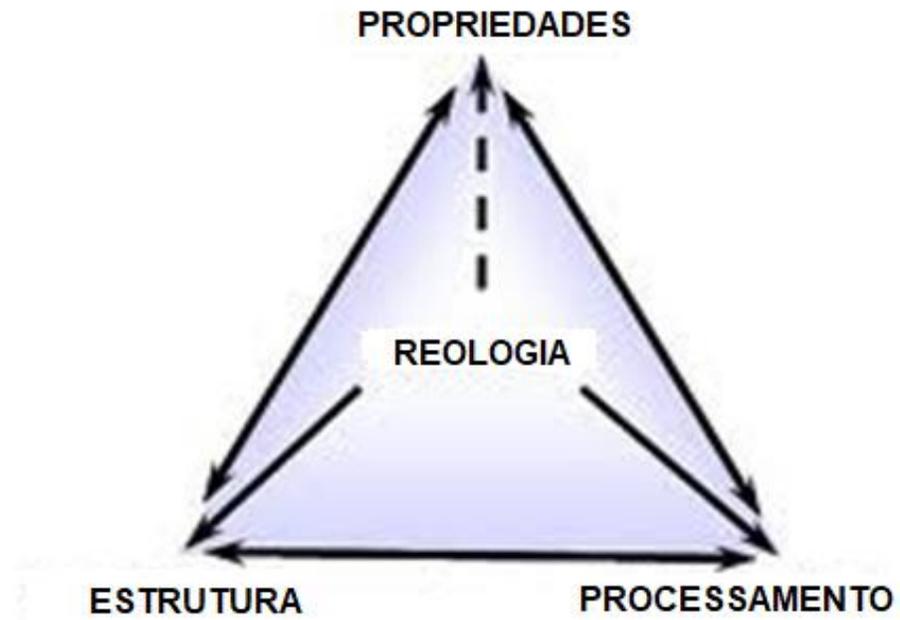
Polímeros vol.25 no.sp São Carlos Dec. 2015

<http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1669>

# Reologia e emulsões

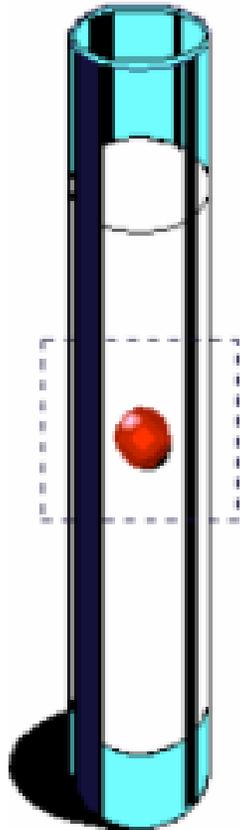


# Reologia



# Fenômenos de escoamento em materiais complexos e microestrutura

Situações aparentemente semelhantes, respostas diferentes



Queda de uma esfera  
Através de um fluido

Escoamento de um fluido  
através de um tubo



Fluido Newtoniano (FN)  
Fluido Não newtoniano (FNN)

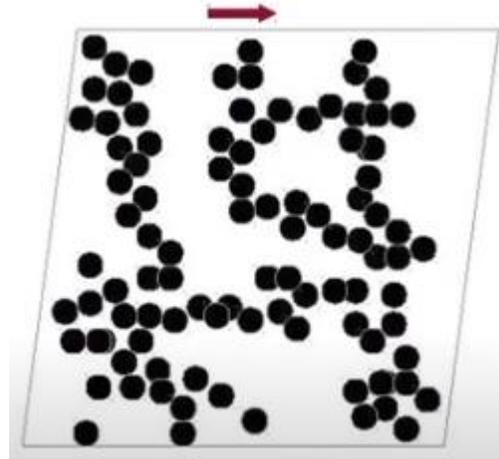
Velocidade terminal  
FN ~ FNN

Vazão (*flow rate*)  
FN < FNN

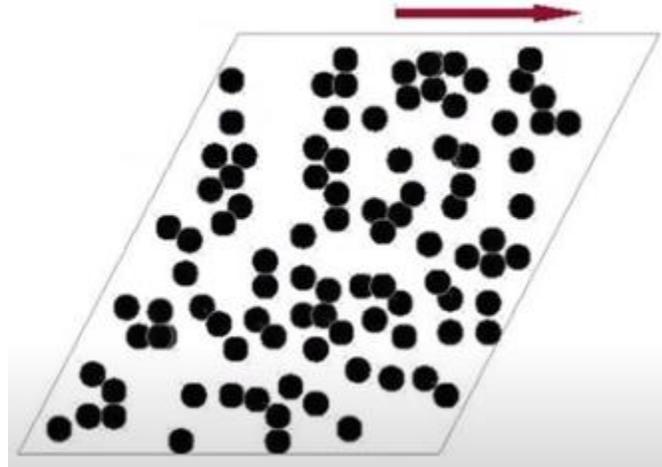
Lei de Stoles

como explicar??

## Dispersões coloidais em taxas de deformação baixas e altas

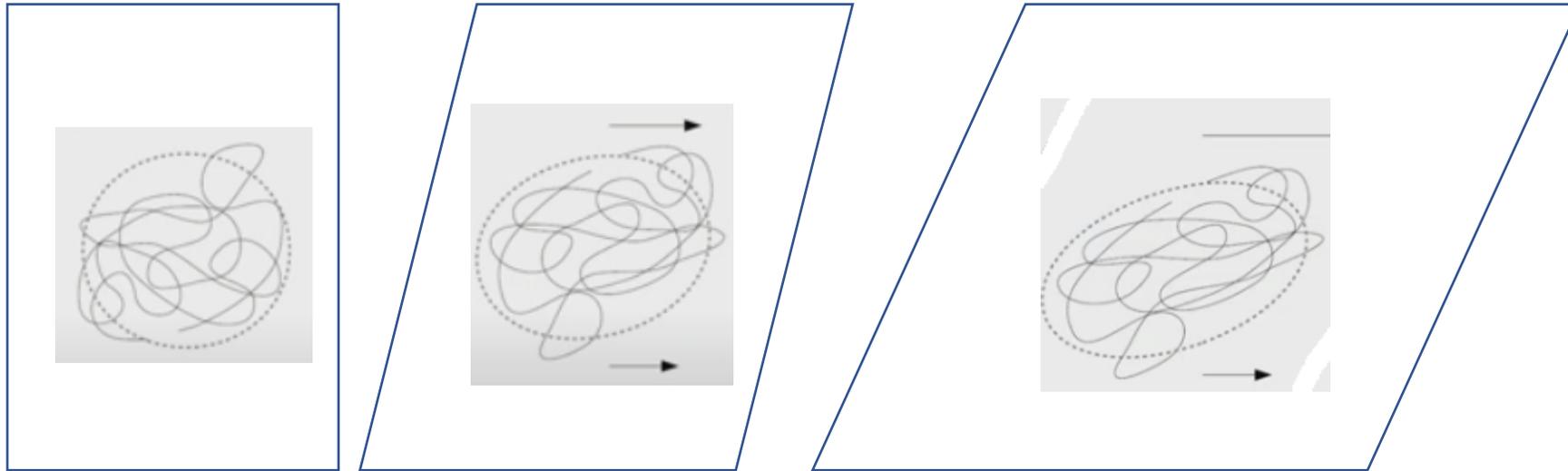


Taxa de deformação baixa  
Grandes "clusters" de partículas  
**Alta viscosidade**



Taxa de deformação alta  
Pequenos "clusters" de partículas  
**baixa viscosidade**

## Macromoléculas sob cisalhamento



Estiramento e orientação da macromolécula  
Campo de deformação ou taxa de deformação  
elasticidade

# Mecanismos/ interações

## ✓ Sistemas macromolecular

- ✓ Flexibilidade molecular: rotação/vibração
- Ligações na cadeia principal: estiramento, dobramento e torção;
- ✓ Interações moleculares: repulsão/ atração – volume excluído, van der Waals, polar, hidrofóbica, ligações de hidrogênio, eletrostática (intra e intermolecular)
- ✓ Entrelaçamentos
- ✓ Arquitetura molecular: linear ramificado, *crosslinked*
- ✓ Interações solvente: Browniano, atrito/arrasto, interações hidrodinâmicas

## ✓ Sistemas multifásicos

- ✓ Interações inter-partículas repulsão/ atração – volume excluído, van der Waals, polar, hidrofóbica, ligações de hidrogênio, eletrostática, estérica, depleção, lubrificação
- ✓ Interações solvente: Browniano, atrito/arrasto, interações hidrodinâmicas

# Classes de sistemas materiais - Seminários

- ✓ Soluções poliméricas
- ✓ Polímeros fundidos
- ✓ Dispersões particuladas e emulsões

Sistemas macromoleculares

Sistemas multifásicos

- ✓ Géis
  - ✓ Géis poliméricos *crosslinked*
    - ✓ *Crosslinking físico*
    - ✓ *Crosslinking químico*
  - ✓ *Particulados*
- ✓ Vítreos
  - ✓ Polímero
  - ✓ Particulado

- TA Tech Tips:



[www.youtube.com/tatechtips](http://www.youtube.com/tatechtips)

- Ta Quick Talks ANTERIORES:



<https://www.tainstruments.com/ta-quick-talks/>

<https://www.tainstruments.com/ta-quick-talks-introducao-a-reologia-conceitos-e-aplicacoes/>

**OBRIGADA**

**CUIDEM-SE!!!!**

