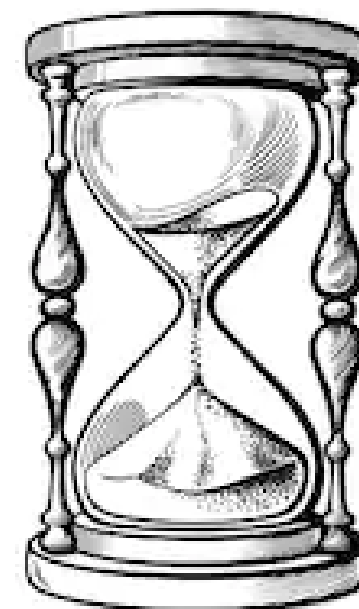




Universidade de São Paulo  
**Instituto de Química**

# Reologia Rotacional



Ícaro Francescato

[icaro.francescato.souza@usp.br](mailto:icaro.francescato.souza@usp.br)

Sala 411 - Bloco 4 Inferior



Laboratório de Espectroscopia Molecular

*Hans Stammreich*

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Motivação

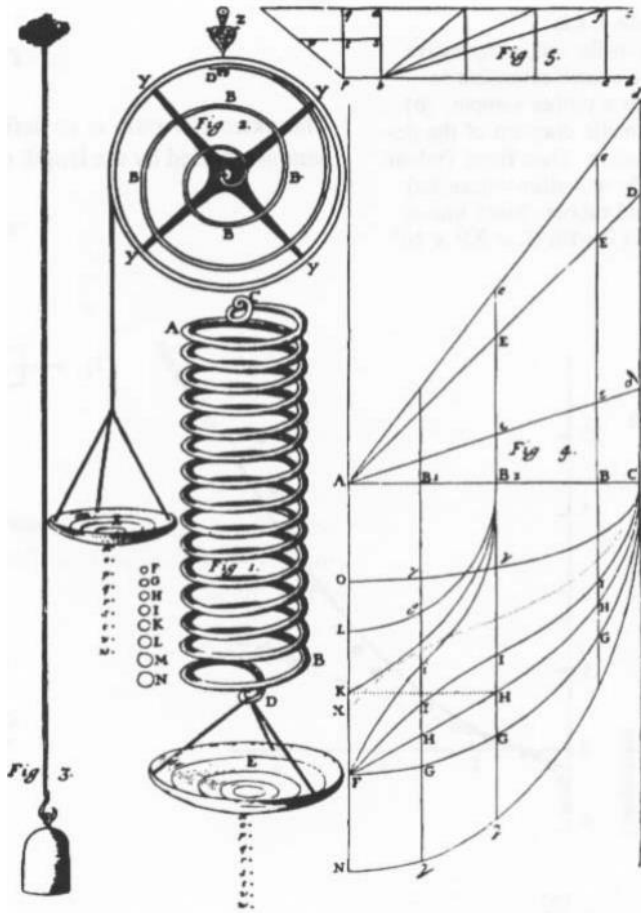
1. Você manipula uma tinta como qualquer outro **líquido**, mas como ela permanece em uma parede vertical sem escorrer?
2. Uma dispersão coloidal é um líquido, mas por que sua **viscosidade** muda com as condições de fluxo?
3. Argilas parecem **sólidos**, mas é possível moldá-las e também assumem a forma do recipiente que as contém, como um líquido.
4. Um iogurte parece muito viscoso, mas após agitação sua viscosidade diminui e aumenta gradativamente após repouso.
5. Um creme hidratante é um líquido ou um sólido? Deve ser líquido para espalhar na pele, mas não muito líquido, para que se mantenha no corpo.

## Lei de Hooke - Sólidos ideais

The power of any spring in the same proportion with the tension thereof.

Robert Hooke (1678)

$$\tau = G \cdot \gamma$$



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

Lei de Hooke - Mola

The power of any spring in the same proportion with the tension thereof.

**Robert Hooke (1678)**

$$\tau = G \cdot \gamma$$



**Ação de uma força constante em uma mola**

A mola apresenta imediatamente uma deformação correspondente enquanto a força é aplicada

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lei de Hooke - Mola

The power of any spring in the same proportion with the tension thereof.  
**Robert Hooke (1678)**

$$\tau = G \cdot \gamma$$



**Ação de uma força constante em uma mola**

A mola apresenta imediatamente uma deformação correspondente enquanto a força é aplicada



**Quando a força é "removida"**

Assim que a força é removida, a mola recua elasticamente, e isso significa imediatamente, retornando ao estado inicial. Não há deformação permanente.

Introdução

**Modelos  
Ideais**

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lei de Hooke - Mola

The power of any spring is in the same proportion with the tension thereof.  
**Robert Hooke (1678)**

$$\tau = G \cdot \gamma$$



**Ação de uma força constante em uma mola:**

A mola apresenta imediatamente uma deformação correspondente enquanto a força é aplicada



**Quando a força é "removida":**

Assim que a força é removida, a mola recua elasticamente, e isso significa imediatamente, retornando ao estado inicial. Não há deformação permanente.



**Após um ciclo de carga, um material idealmente elástico retorna completamente ao estado inicial.**

**A energia de deformação atuando em um corpo idealmente elástico durante um processo de cisalhamento será completamente armazenada dentro do material deformado.**

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

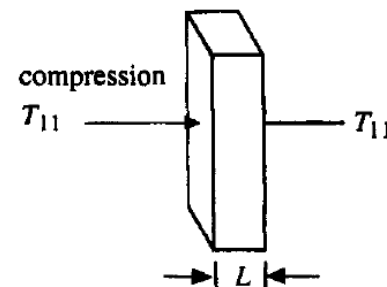
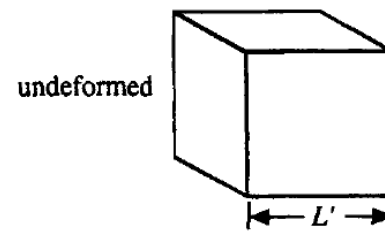
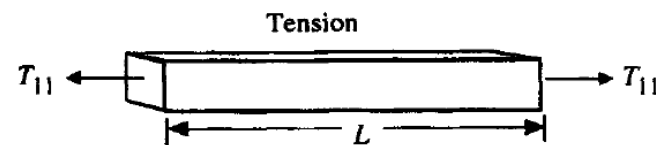
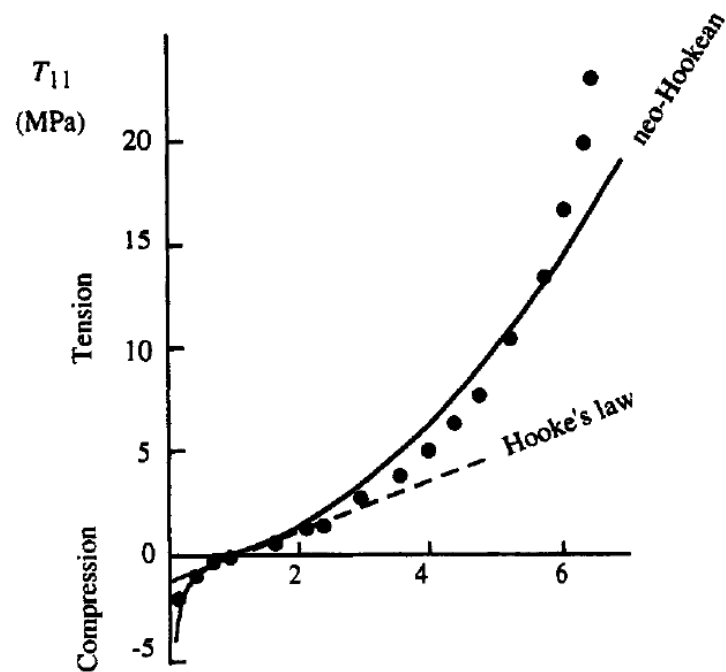
Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lei de Hooke

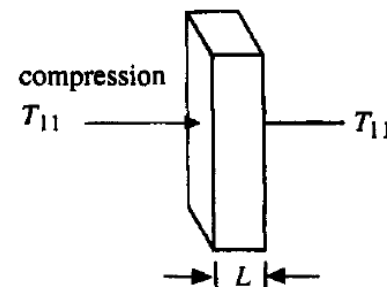
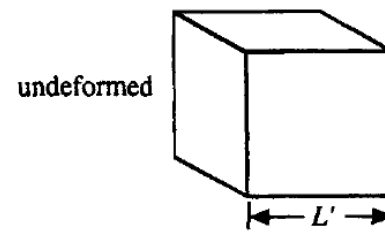
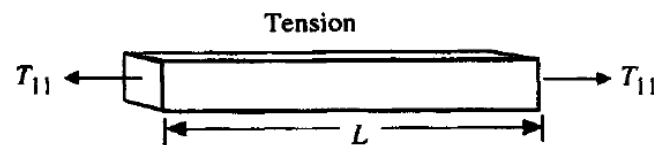
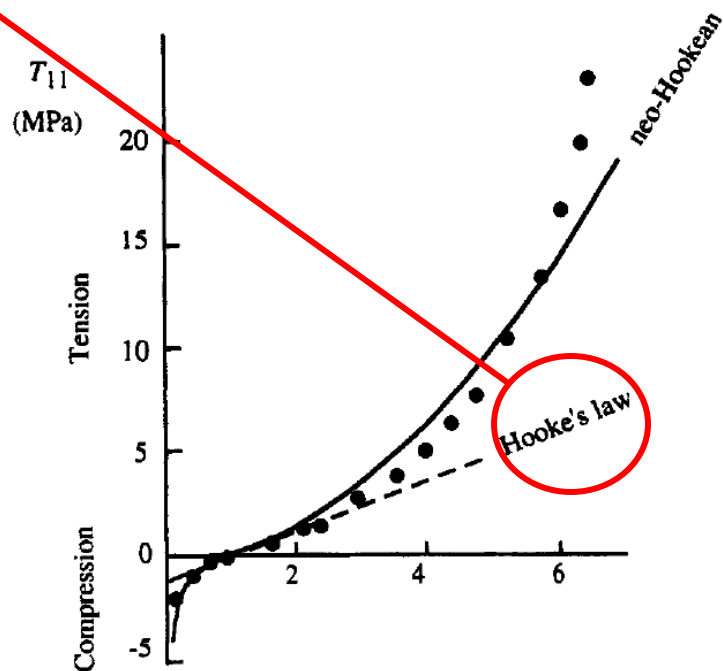
$$\tau = G \cdot \gamma$$



## Lei de Hooke

Os valores do módulo de cisalhamento de sólidos idealmente elásticos ou de Hooke são independentes do grau e duração da carga de cisalhamento aplicada.

$$\tau = G \cdot \gamma$$





Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

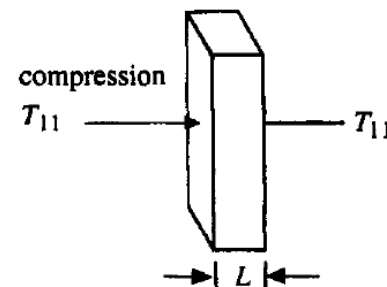
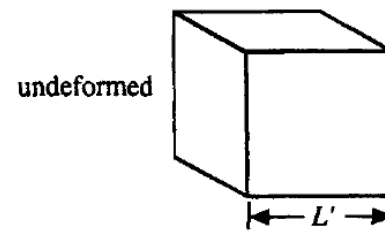
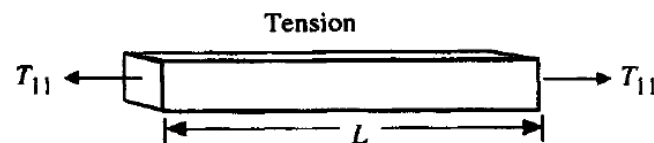
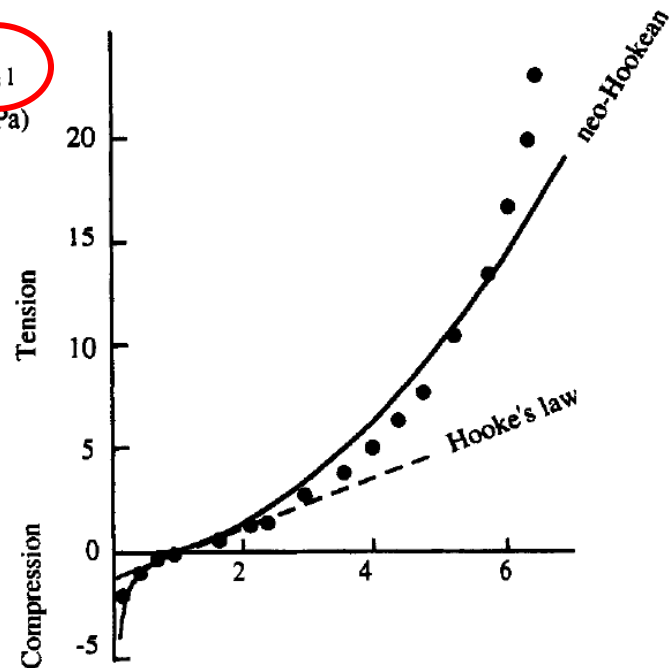
Géis e espumas

## Lei de Hooke

$$\tau = G \cdot \gamma$$

Tensão normal ou  
Tensor de tensão normal

$T_{11}$   
(MPa)



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lei de Newton - Líquidos ideais



The resistance which arises from the lack of slipperiness originating in a fluid, other things being equal, is proportional to the velocity by which the parts of the fluid are being separated from each other.

Isaac S. Newton (1687)

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

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

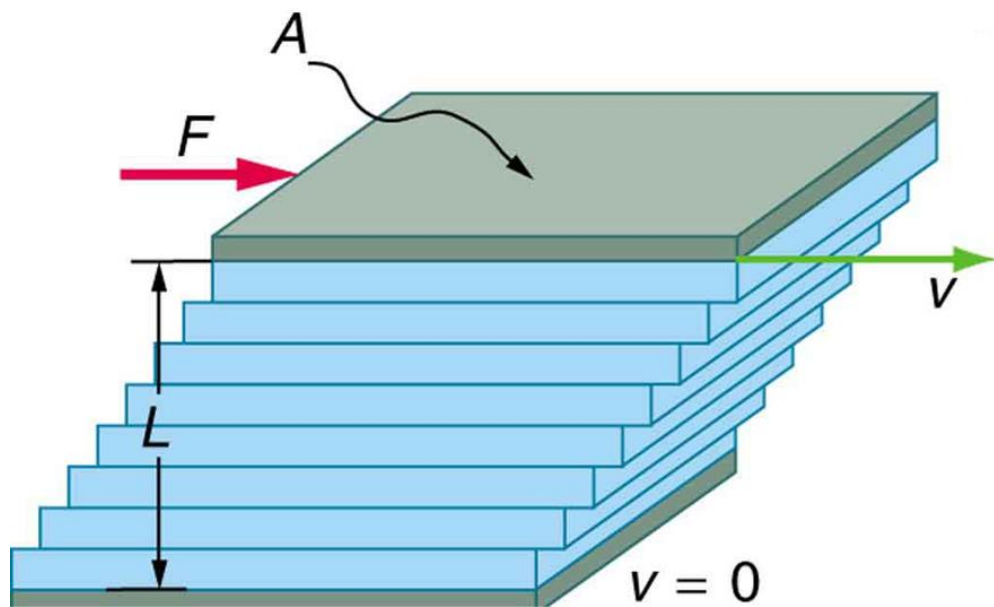
Viscoelasticidade

Géis e espumas

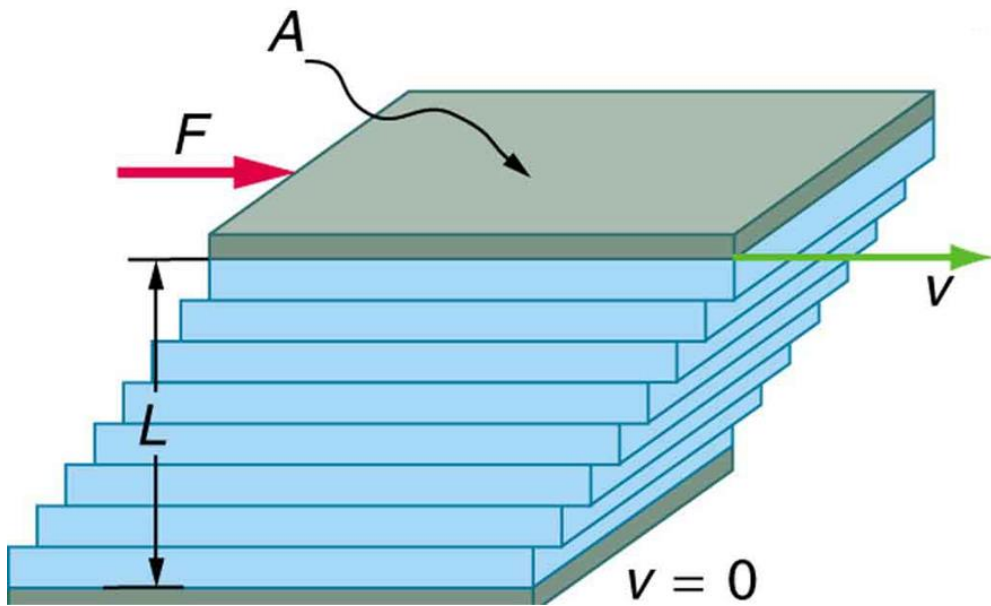
## Lei de Newton - Viscosidade

Vamos pensar sobre a força  $F$  que atua na placa superior:

Quanto maior a placa, maior a força necessária para move-la com velocidade  $v$ . Dessa forma:



## Lei de Newton - Viscosidade

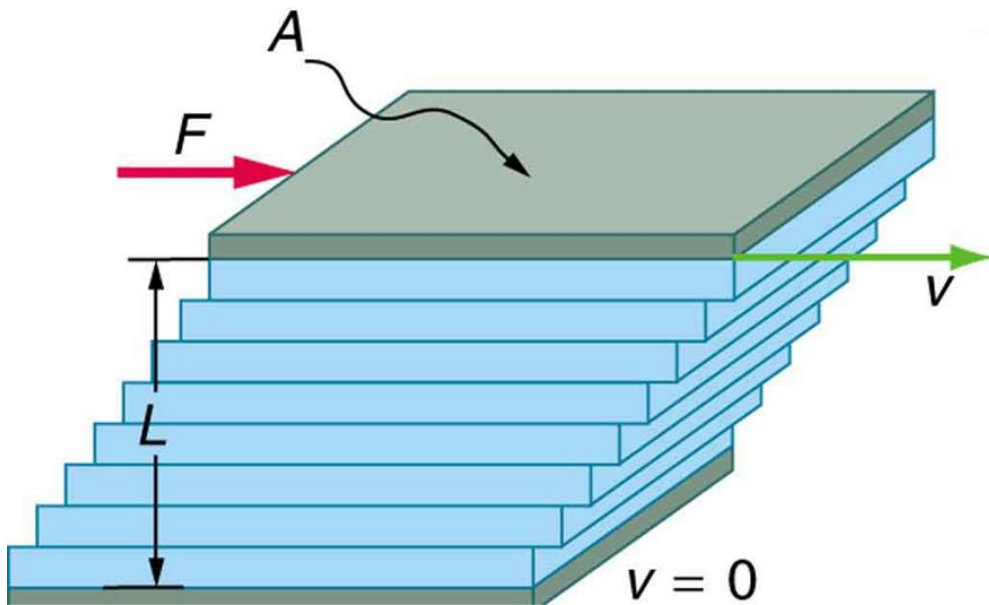


Vamos pensar sobre a força  $F$  que atua na placa superior:

Quanto maior a placa, maior a força necessária para move-la com velocidade  $v$ . Dessa forma:

$$F \propto A$$

## Lei de Newton - Viscosidade



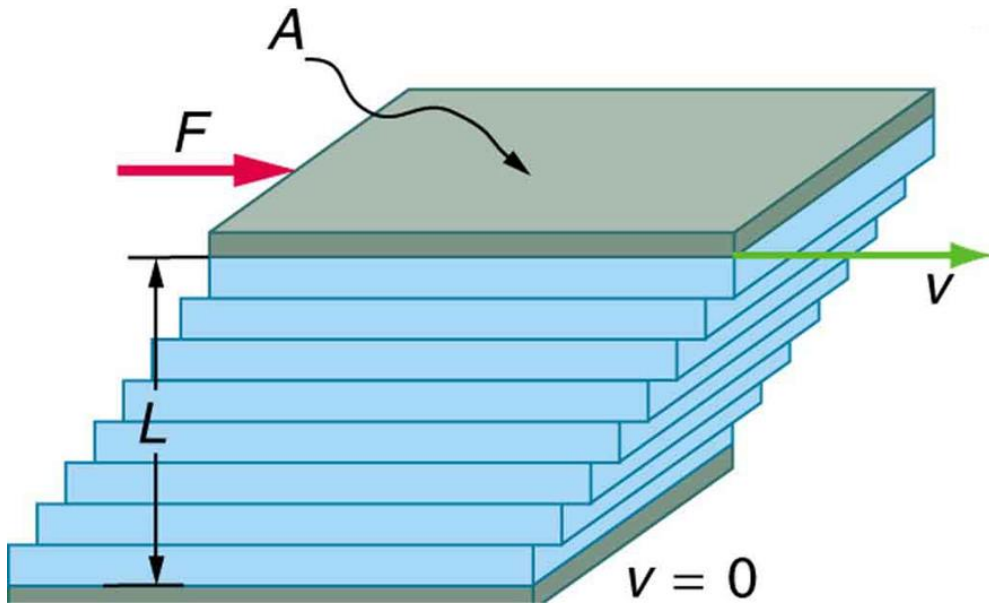
Vamos pensar sobre a força  $F$  que atua na placa superior:

Quanto maior a placa, maior a força necessária para move-la com velocidade  $v$ . Dessa forma:

$$F \propto A$$

Quanto maior a força aplicada, maior será a velocidade da placa. Mas como a placa inferior não se move, podemos dizer que quanto maior a força aplicada, maior será o **gradiente** de velocidade no fluido ao longo da distância  $L$ . Dessa forma:

## Lei de Newton - Viscosidade



Vamos pensar sobre a força  $F$  que atua na placa superior:

Quanto maior a placa, maior a força necessária para move-la com velocidade  $v$ . Dessa forma:

$$F \propto A$$

Quanto maior a força aplicada, maior será a velocidade da placa. Mas como a placa inferior não se move, podemos dizer que quanto maior a força aplicada, maior será o **gradiente** de velocidade no fluido ao longo da distância  $L$ . Dessa forma:

$$F \propto A \cdot (dv/dL)$$

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

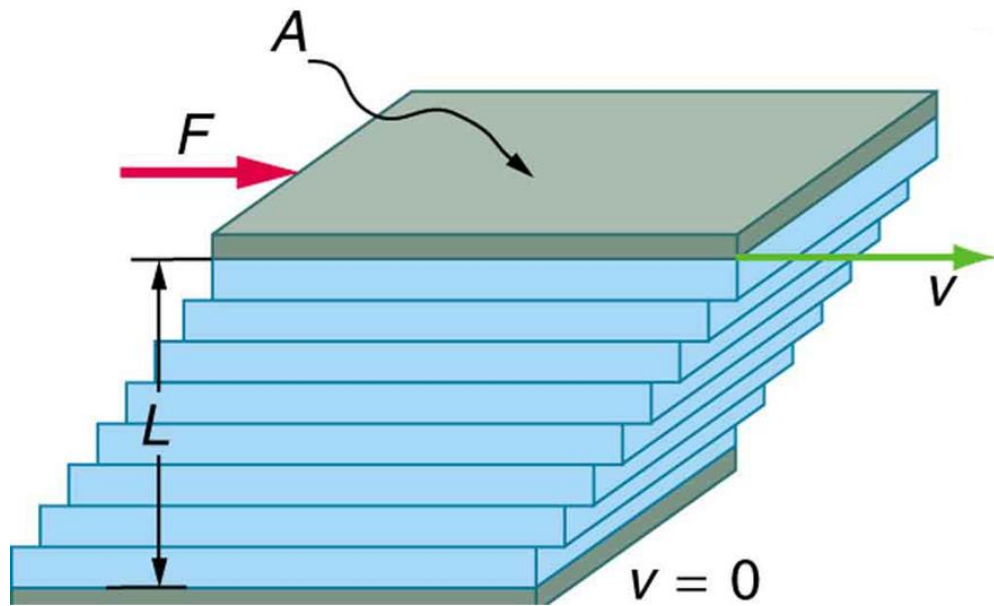
Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lei de Newton - Viscosidade

📌 Vamos pensar sobre a força  $F$  que atua na placa superior:

📌 Como a velocidade é a variação do deslocamento no tempo:



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

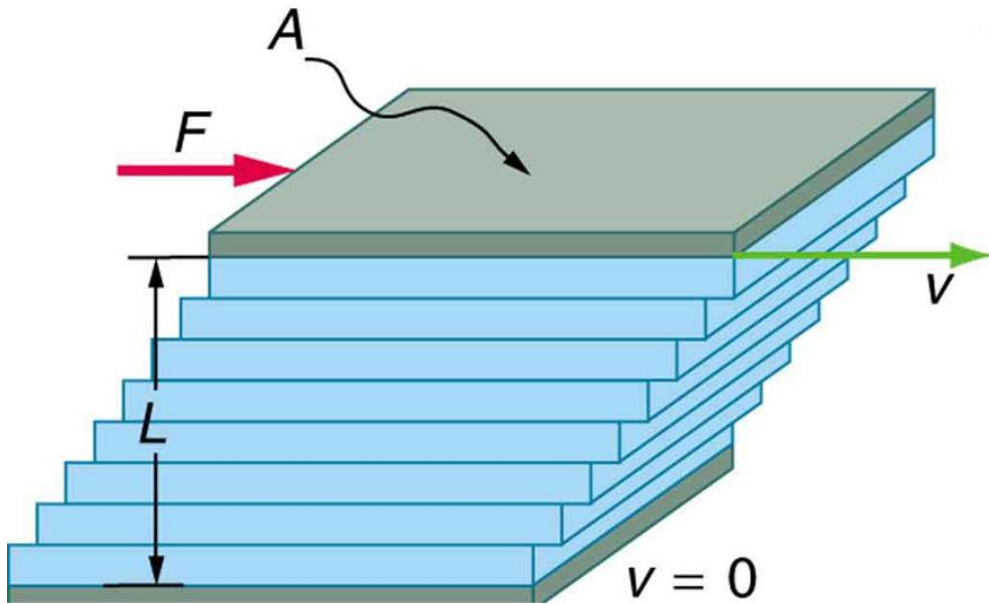
Géis e espumas

## Lei de Newton - Viscosidade

📌 Vamos pensar sobre a força  $F$  que atua na placa superior:

📌 Como a velocidade é a variação do deslocamento no tempo:

$$F \propto A \cdot d(dx/dt)/dL$$





Introdução

Modelos  
Ideais

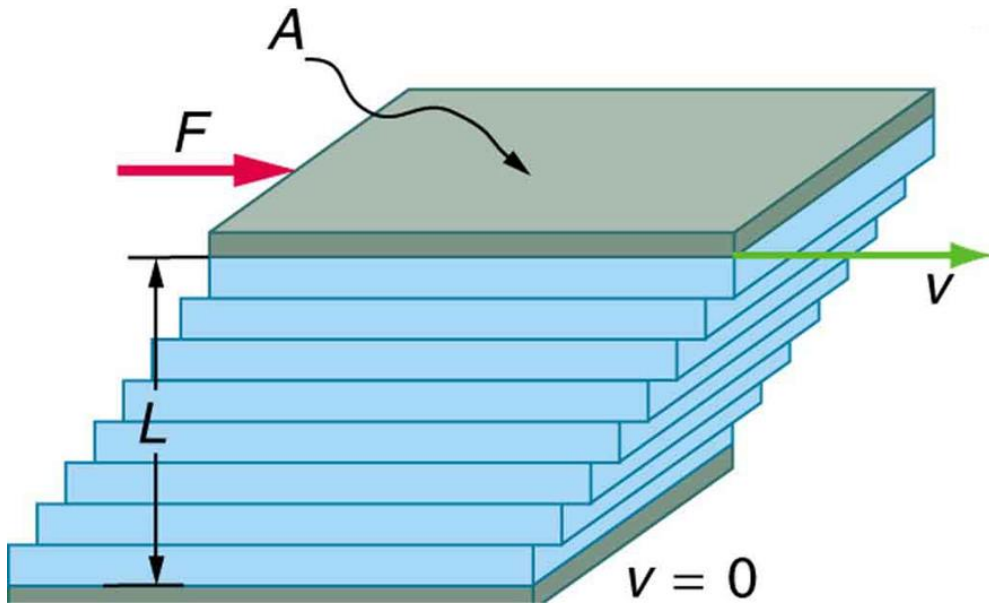
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lei de Newton - Viscosidade



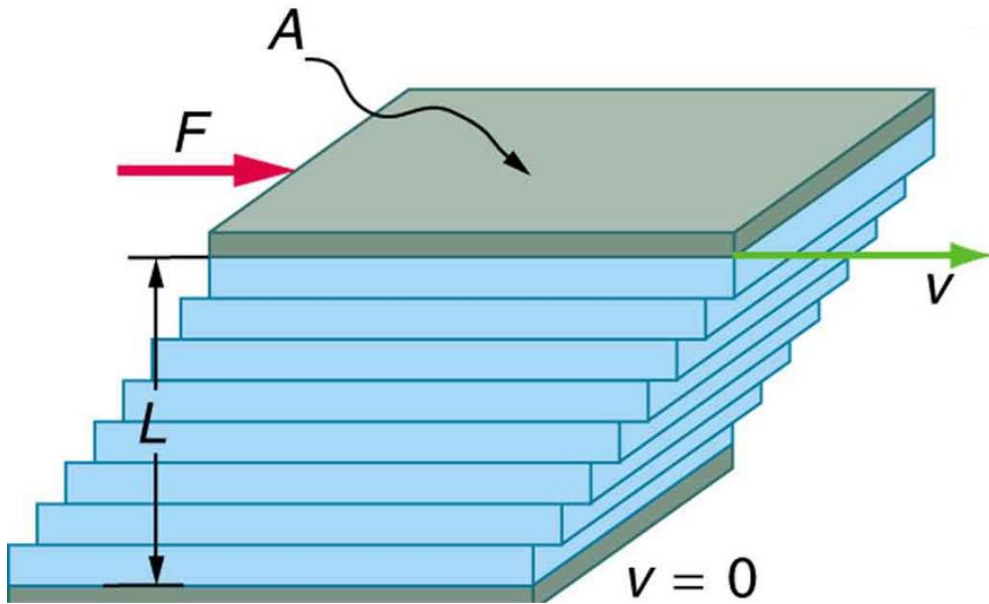
Vamos pensar sobre a força  $F$  que atua na placa superior:

Como a velocidade é a variação do deslocamento no tempo:

$$F \propto A \cdot d(dx/dt)/dL$$

Definimos  $dx/dL$  como a deformação  $\gamma$

## Lei de Newton - Viscosidade



Vamos pensar sobre a força  $F$  que atua na placa superior:

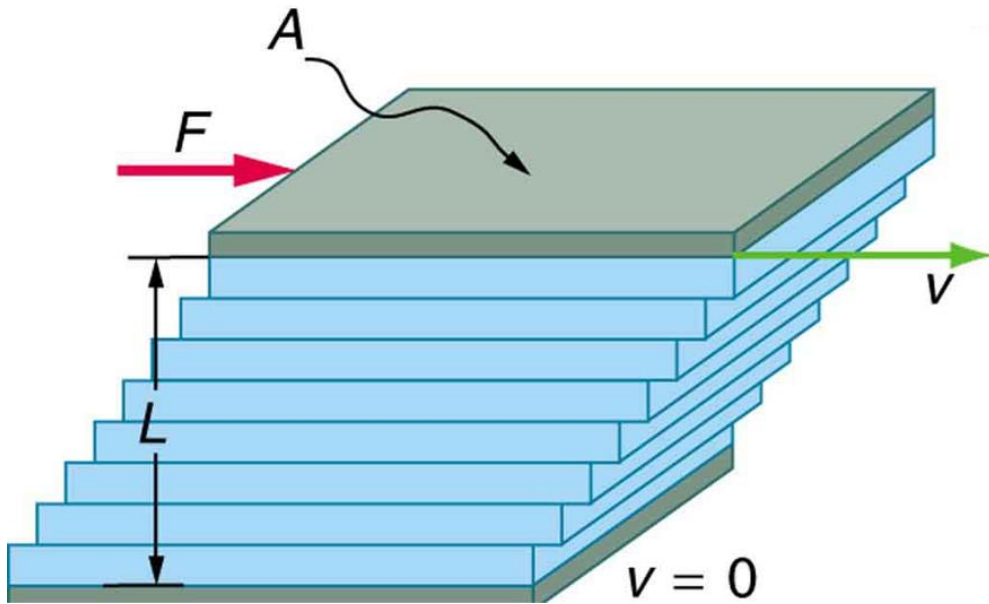
Como a velocidade é a variação do deslocamento no tempo:

$$F \propto A \cdot d(dx/dt)/dL$$

Definimos  $dx/dL$  como a deformação  $\gamma$

$$F \propto A \cdot d\gamma/dt$$

## Lei de Newton - Viscosidade



Vamos pensar sobre a força  $F$  que atua na placa superior:

Como a velocidade é a variação do deslocamento no tempo:

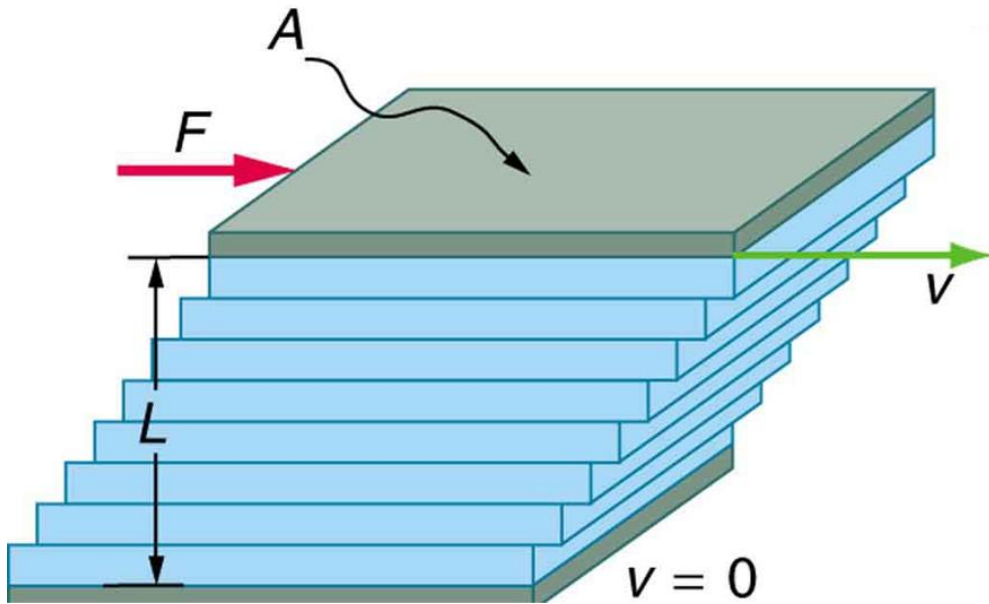
$$F \propto A \cdot d(dx/dt)/dL$$

Definimos  $dx/dL$  como a deformação  $\gamma$

$$F \propto A \cdot d\gamma/dt$$

Com isso escrevemos a lei de Newton acrescentando uma constante de proporcionalidade ( $\eta$ )

## Lei de Newton - Viscosidade



Vamos pensar sobre a força  $F$  que atua na placa superior:

Como a velocidade é a variação do deslocamento no tempo:

$$F \propto A \cdot d(dx/dt)/dL$$

Definimos  $dx/dL$  como a deformação  $\gamma$

$$F \propto A \cdot d\gamma/dt$$

Com isso escrevemos a lei de Newton acrescentando uma constante de proporcionalidade ( $\eta$ )

$$F = \eta \cdot A \cdot d\gamma/dt$$

Introdução

Modelos  
Ideais

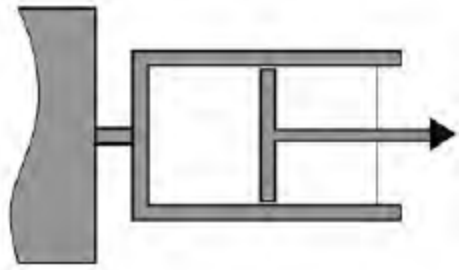
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lei de Newton - Líquido ideal



**Ação de uma força constante**

o pistão se move continuamente enquanto a força é aplicada, pressionando o fluido entre o pistão e a parede do cilindro.

Introdução

Modelos  
Ideais

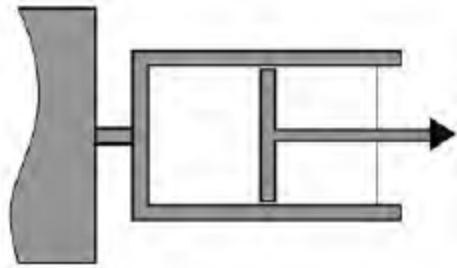
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lei de Newton - Líquido ideal



**Ação de uma força constante**

o pistão se move continuamente enquanto a força é aplicada, pressionando o fluido entre o pistão e a parede do cilindro.



**Quando a força é "removida"**

Assim que a força é removida o pistão para imediatamente de se mover e permanece naquela posição.

Introdução

**Modelos  
Ideais**

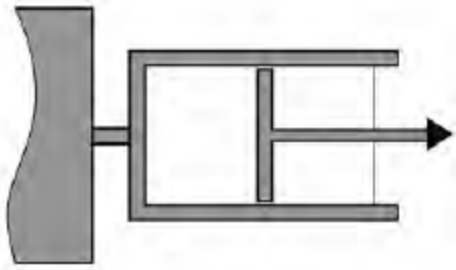
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lei de Newton - Líquido ideal



**Ação de uma força constante**

o pistão se move continuamente enquanto a força é aplicada, pressionando o fluido entre o pistão e a parede do cilindro.



**Quando a força é "removida"**

Assim que a força é removida o pistão para imediatamente de se mover e permanece naquela posição.



Após um ciclo de carga, um fluido idealmente viscoso permanece completamente deformado. Esses tipos de fluidos não mostram absolutamente nenhum sinal de elasticidade.

**A energia de deformação que age sobre um fluido causa movimento relativo entre as moléculas.**

**Durante um processo de fluxo, o a energia de deformação é consumida completamente pelo fluido e não está mais disponível para o fluido depois, ou seja, é perdida.**

Introdução

**Modelos  
Ideais**

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

**Sólido x Líquido**

**Na visão reológica**

Em condições de cisalhamento, sólidos ideais armazenam energia e líquidos ideais a dissipam.



Introdução

**Modelos  
Ideais**

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Sólido x Líquido

**Na visão reológica**

Em condições de cisalhamento, sólidos ideais armazenam energia e líquidos ideais a dissipam.

**De um ponto de vista termodinâmico**

Nas condições-padrão, um sólido possui menor entropia que seu respectivo líquido.

Introdução

**Modelos  
Ideais**

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Sólido x Líquido

### Na visão reológica

Em condições de cisalhamento, sólidos ideais armazenam energia e líquidos ideais a dissipam.

### De um ponto de vista termodinâmico

Nas condições-padrão, um sólido possui menor entropia que seu respectivo líquido.

### De um ponto de vista da mecânica estatística

Um sólido ideal é um conjunto de osciladores harmônicos idênticos (modelo de Einstein).

Um líquido possui um potencial de interação entre as moléculas que corresponde às suas interações intermoleculares.

Introdução

**Modelos  
Ideais**

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

Sólido x Líquido

Na visão reológica

Em condições de cisalhamento, sólidos ideais armazenam energia e líquidos ideais a dissipam.

Como medir propriedades reológicas de  
líquidos/fluidos ideais/Newtonianos?

Introdução

Modelos  
Ideais

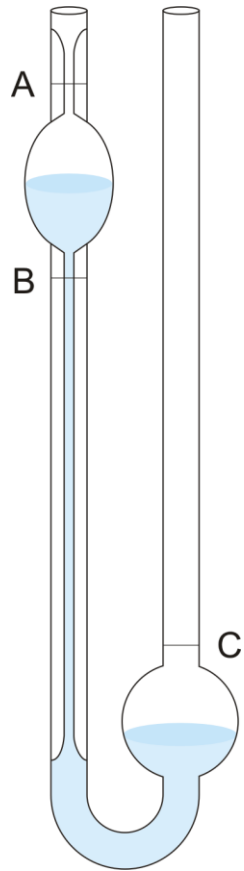
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

Lembrando Físico-Química Experimental



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

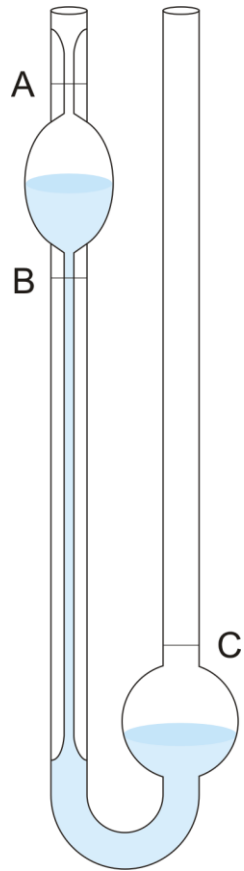
Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

Lembrando Físico-Química Experimental

Gravidade, ar comprimido ou um pistão podem ser usados para gerar pressão no fluido.



Introdução

Modelos  
Ideais

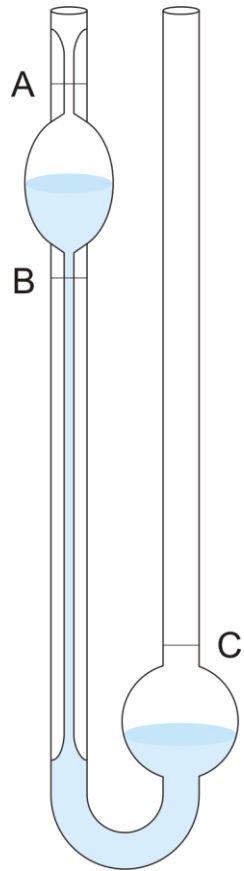
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lembrando Físico-Química Experimental



Gravidade, ar comprimido ou um pistão podem ser usados para gerar pressão no fluido.

Alguns pressupostos importantes:

1. Fluxo laminar homogêneo, estável e isotérmico

Introdução

Modelos  
Ideais

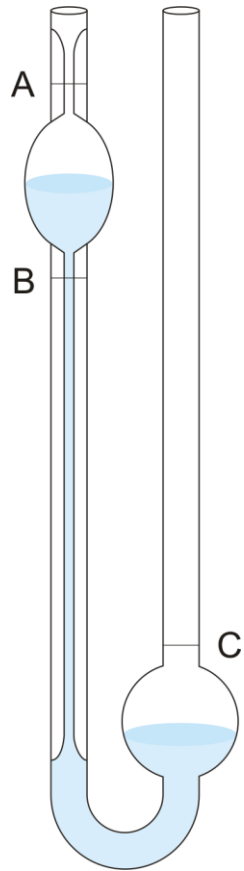
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

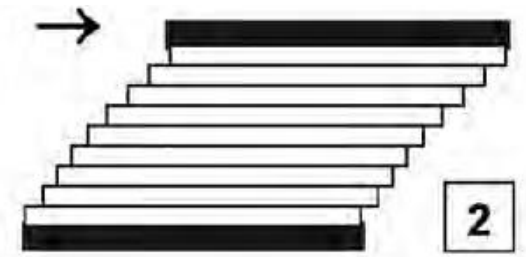
## Lembrando Físico-Química Experimental



Gravidade, ar comprimido ou um pistão podem ser usados para gerar pressão no fluido.

Alguns pressupostos importantes:

Fluxo laminar homogêneo



Introdução

Modelos  
Ideais

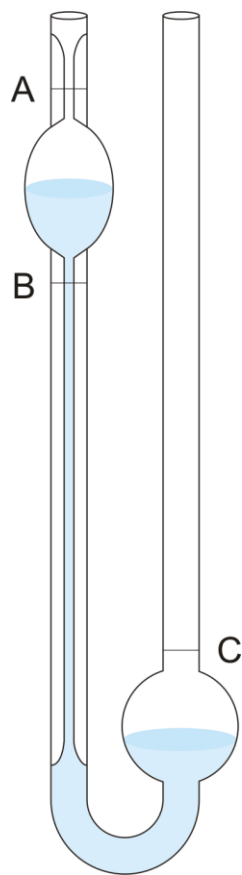
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

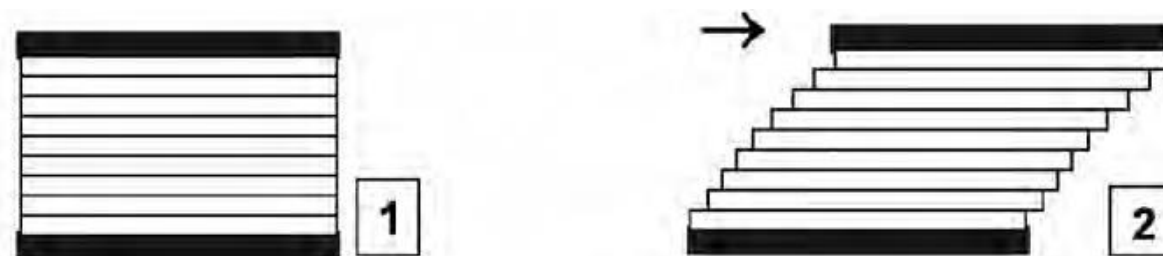
## Lembrando Físico-Química Experimental



Gravidade, ar comprimido ou um pistão podem ser usados para gerar pressão no fluido.

Alguns pressupostos importantes:

Fluxo laminar homogêneo



Fluxo laminar "wall-slip" e "plástico"





Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

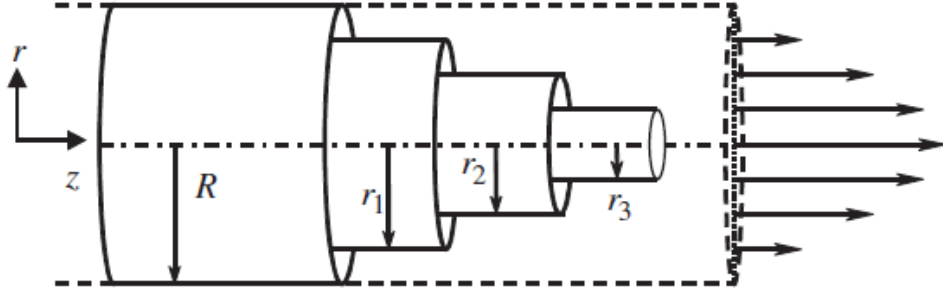
Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lei de Poiseuille

Obter uma expressão para velocidade como função do raio do capilar.

$$v = f(r)$$



Introdução

Modelos  
Ideais

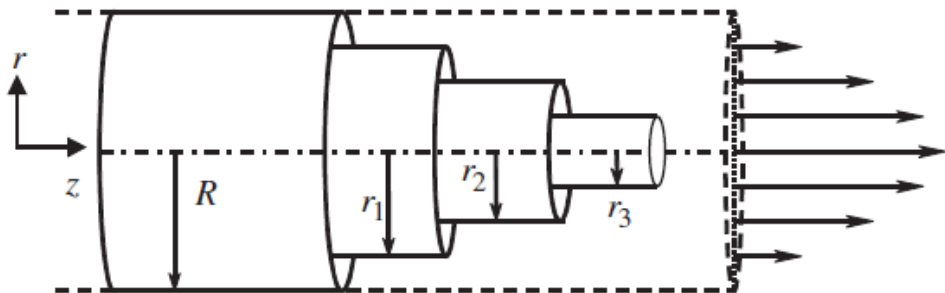
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lei de Poiseuille



Obter uma expressão para velocidade como função do raio do capilar.

$$v = f(r)$$

Condições de contorno:

$$f(R) = 0$$

$f(0)$  é máximo de  $f(r)$

Introdução

Modelos  
Ideais

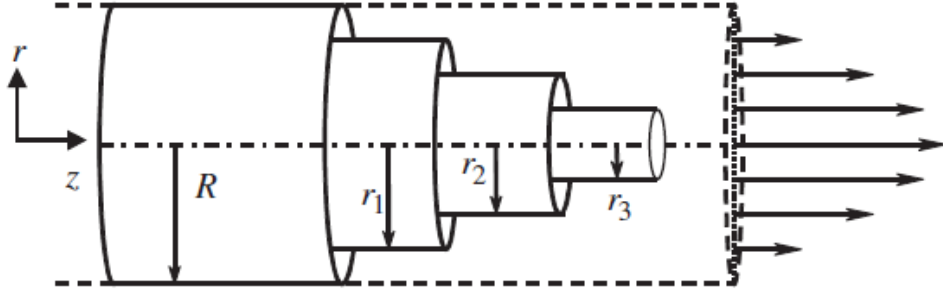
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lei de Poiseuille



Obter uma expressão para velocidade como função do raio do capilar.

$$v = f(r)$$

Condições de contorno:

$$f(R) = 0$$

$f(0)$  é máximo de  $f(r)$

$$Q = \frac{\pi(P_0 - P_L)R^4}{8\mu L}$$

Lei de Poiseuille

Introdução

Modelos  
Ideais

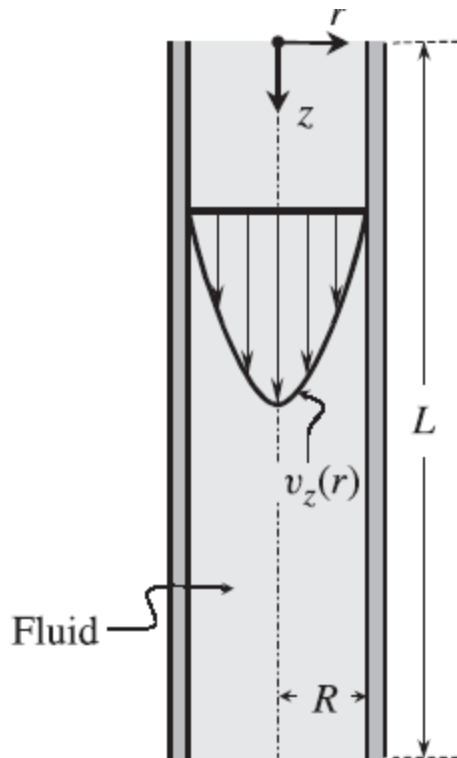
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lembrando Físico-Química Experimental



Gravidade, ar comprimido ou um pistão podem ser usados para gerar pressão no fluido.

Alguns pressupostos importantes:

1. Fluxo laminar homogêneo, estável e isotérmico
2. Não há velocidade ao longo de  $r$  e  $\theta$

Introdução

Modelos  
Ideais

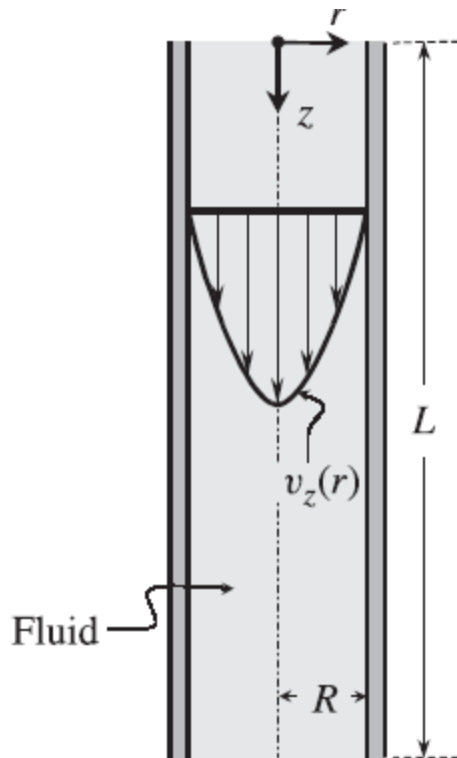
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lembrando Físico-Química Experimental



Gravidade, ar comprimido ou um pistão podem ser usados para gerar pressão no fluido.

Alguns pressupostos importantes:

1. Fluxo laminar homogêneo, estável e isotérmico
2. Não há velocidade ao longo de  $r$  e  $\theta$
3.  $V_z = 0$  em  $R$  (O fluido não escorrega nas paredes)

Introdução

Modelos  
Ideais

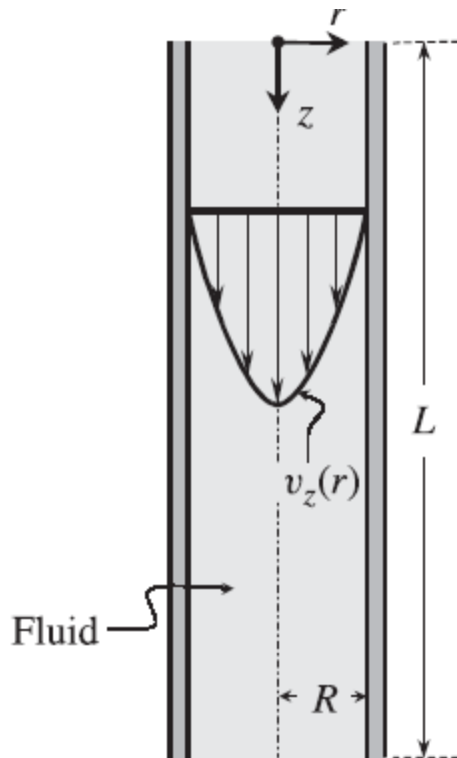
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Lembrando Físico-Química Experimental



Gravidade, ar comprimido ou um pistão podem ser usados para gerar pressão no fluido.

Alguns pressupostos importantes:

1. Fluxo laminar homogêneo, estável e isotérmico
2. Não há velocidade ao longo de  $r$  e  $\theta$
3.  $V_z = 0$  em  $R$  (O fluido não escorrega nas paredes)
4. O fluido é incompressível (A viscosidade não depende da pressão)

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

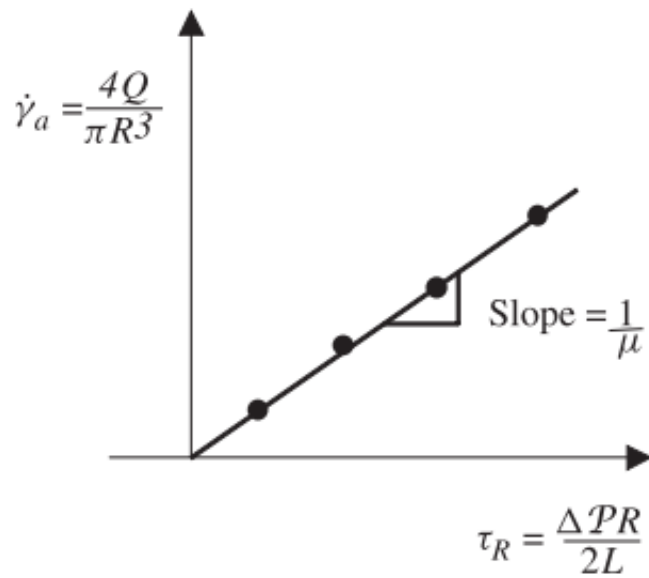
Viscoelasticidade

Géis e espumas

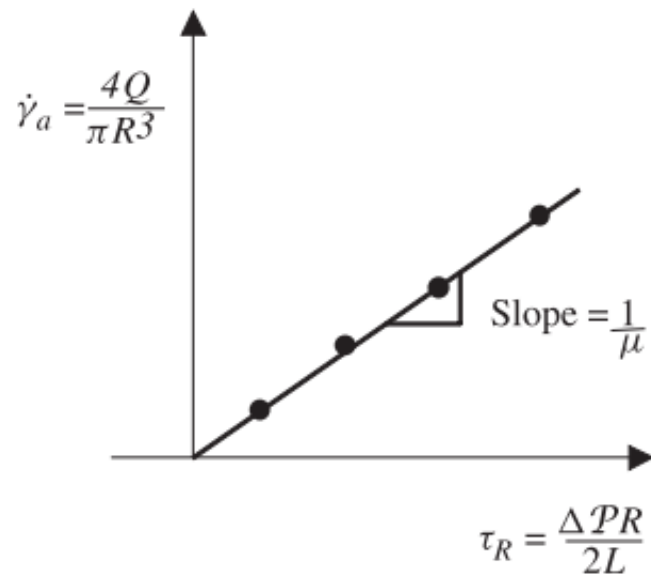
## Viscosimetria Capilar



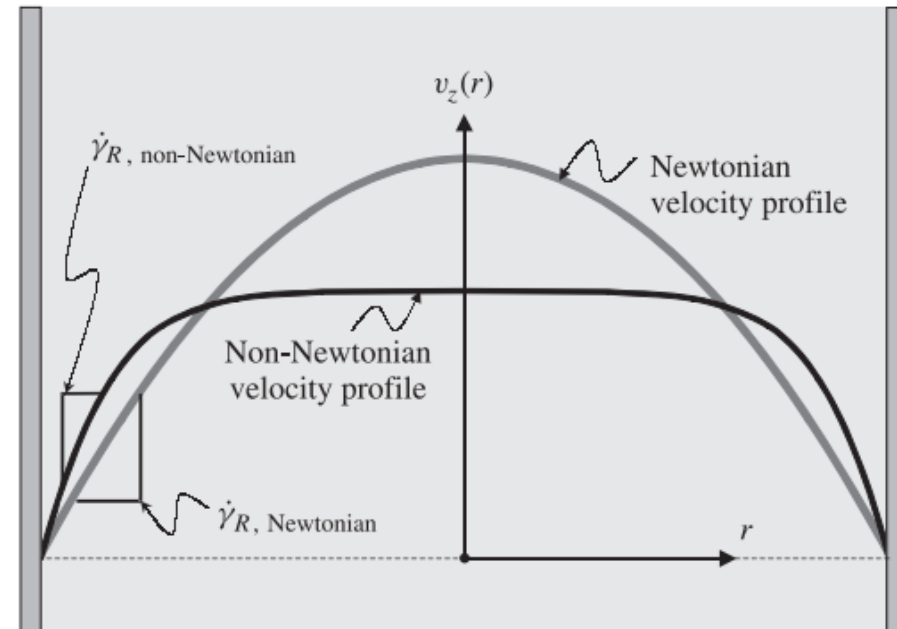
A taxa de cisalhamento e a deformação dependem do raio do capilar



## Viscosimetria Capilar



A taxa de cisalhamento e a deformação dependem do raio do capilar





Introdução

Modelos  
Ideais

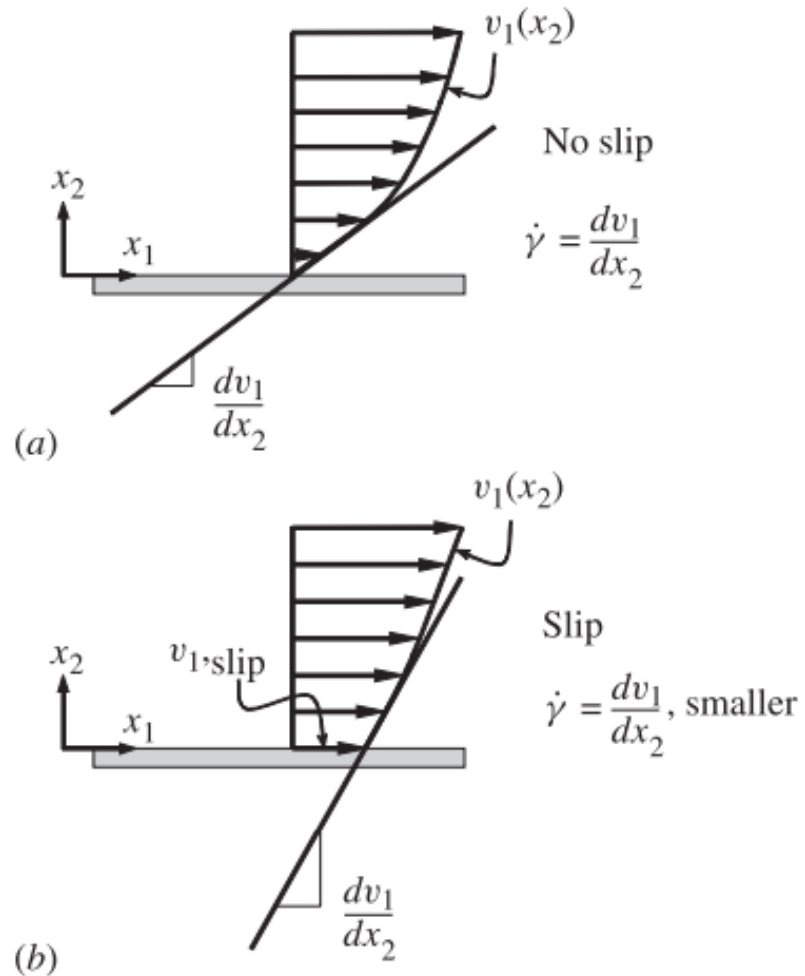
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Viscosimetria Capilar



A taxa de cisalhamento e a deformação dependem do raio do capilar



Tratamento de dados - Correções são necessárias

Introdução

Modelos  
Ideais

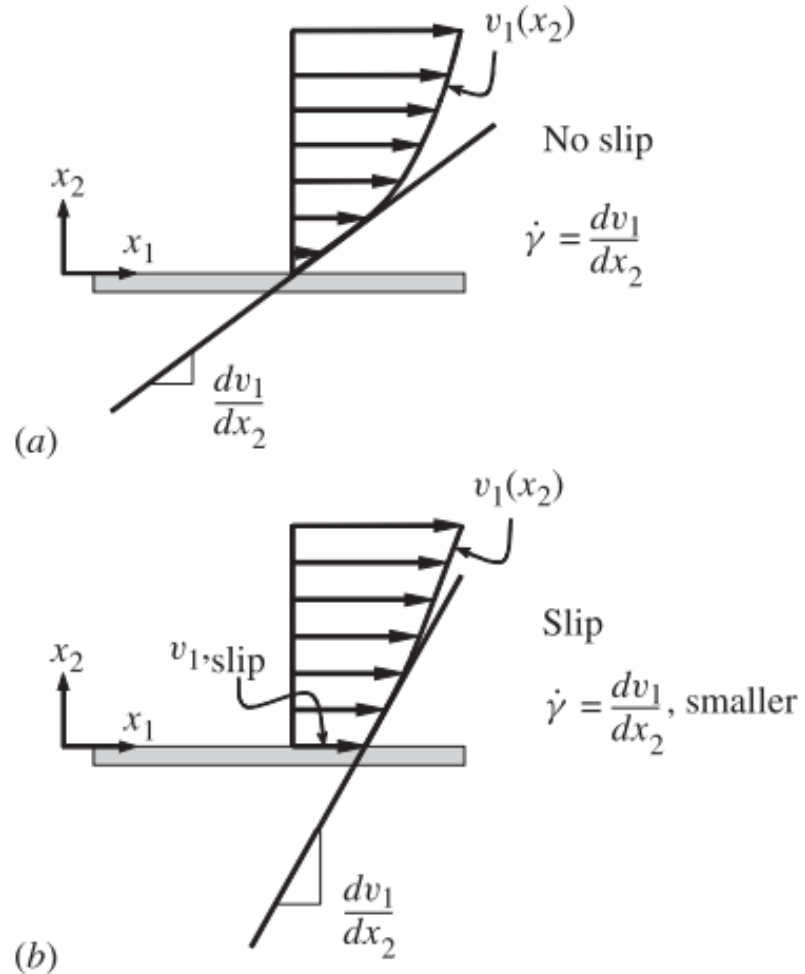
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Viscosimetria Capilar



A taxa de cisalhamento e a deformação dependem do raio do capilar



Tratamento de dados - Correções são necessárias



Quantidade de amostra - Alguns mL

Introdução

Modelos  
Ideais

Outros  
exemplos de  
viscosímetros

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

Tempo de Escoamento

Copo Ford



Introdução

Modelos  
Ideais

Outros  
exemplos de  
viscosímetros

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Tempo de Escoamento

Copo Ford



O princípio de funcionamento se baseia na Lei de Poiseuille

$$\Phi = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot r^4}{\eta \cdot L \cdot 8}$$

Introdução

Modelos  
Ideais

Outros  
exemplos de  
viscosímetros

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Tempo de Escoamento

Copo Ford



O princípio de funcionamento se baseia na Lei de Poiseuille

$$\Phi = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot r^4}{\eta \cdot L \cdot 8}$$

Cada copo (orifício) possui uma expressão que relaciona a viscosidade com o tempo de escoamento

Introdução

Modelos  
Ideais

Outros  
exemplos de  
viscosímetros

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Tempo de Escoamento

Viscosímetro de queda de bolas



Introdução

Modelos  
Ideais

Outros  
exemplos de  
viscosímetros

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

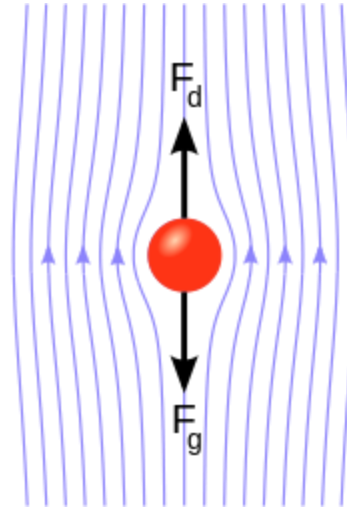
Géis e espumas

## Tempo de Escoamento

Viscosímetro de queda de bolas



O princípio de funcionamento se baseia na Lei de Stokes



$$F = 6\pi a\eta v.$$

Introdução

Modelos  
Ideais

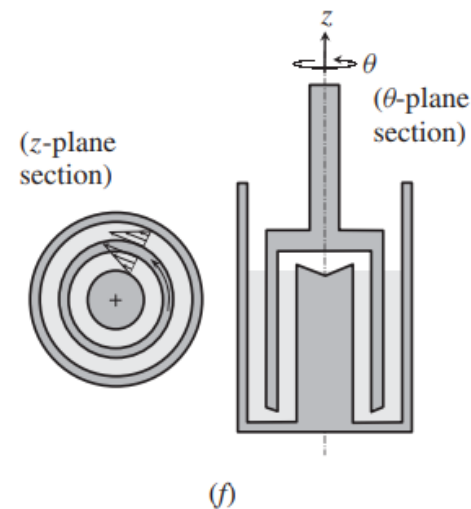
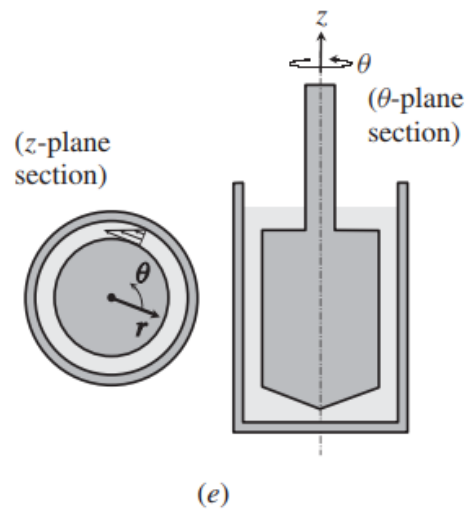
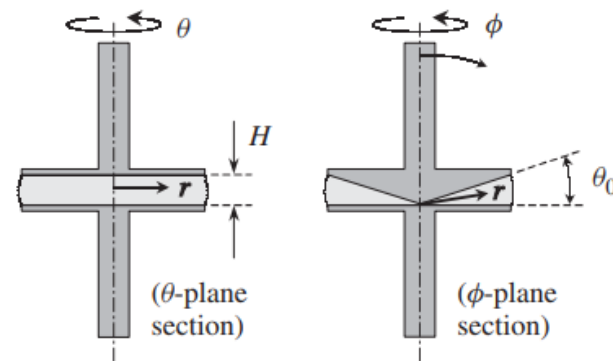
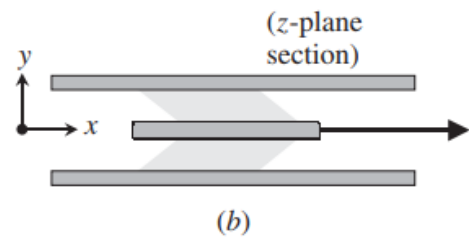
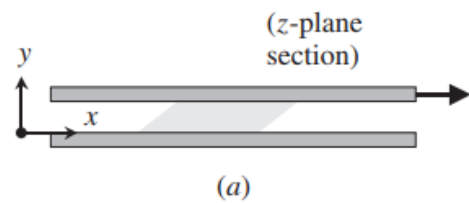
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Geometrias





Introdução

Modelos  
Ideais

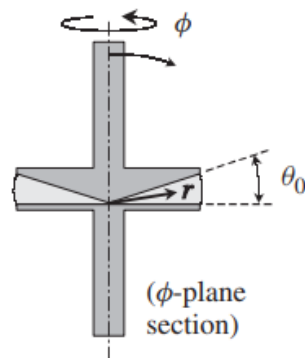
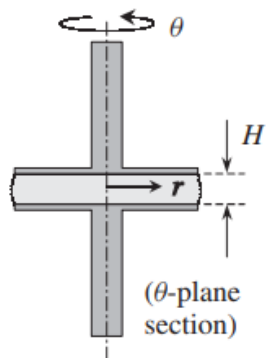
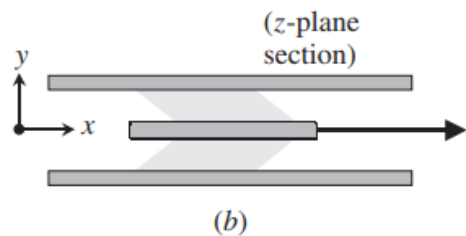
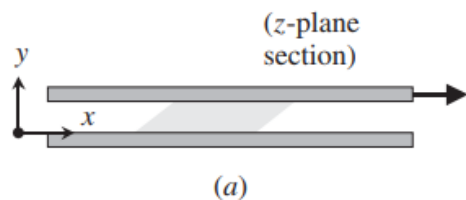
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

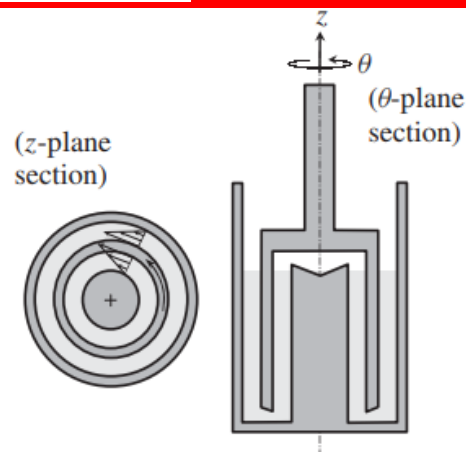
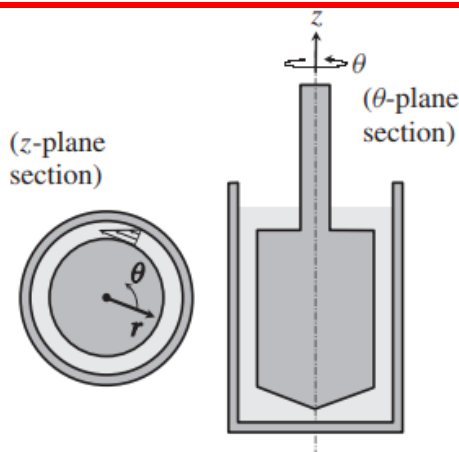
Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Geometrias



A taxa de cisalhamento é constante



(e)

(f)

Introdução

Modelos  
Ideais

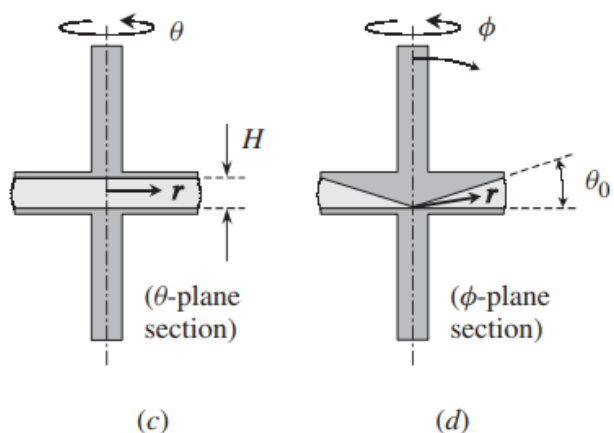
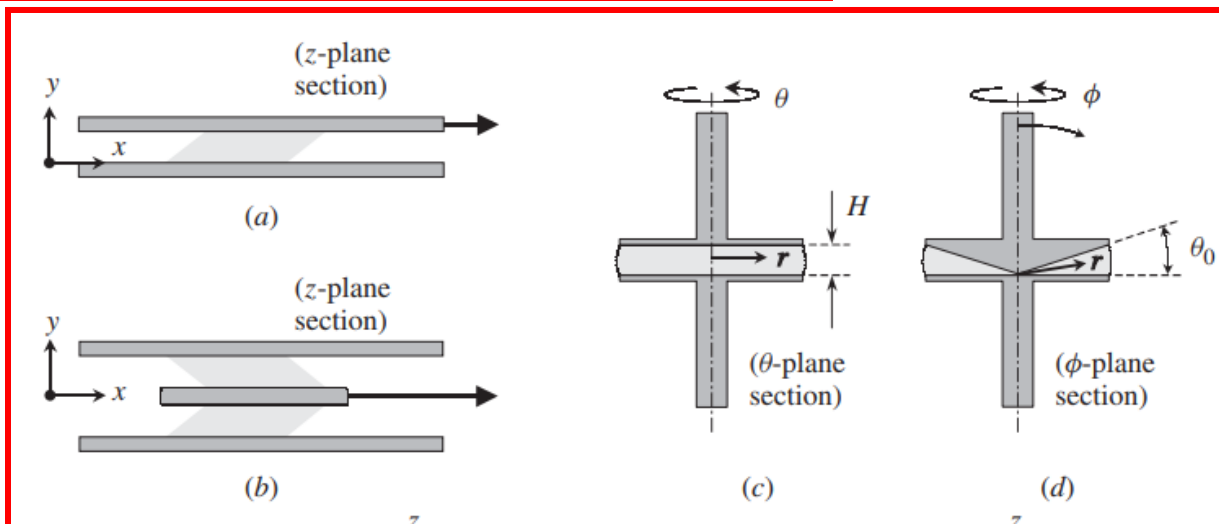
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

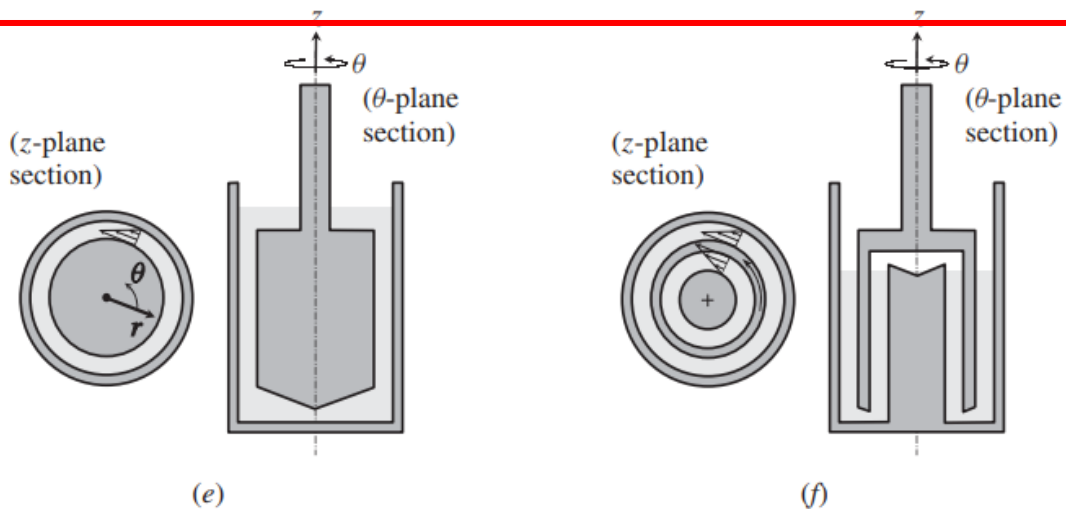
Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Geometrias



Preferenciais para materiais altamente viscosos ( $\eta > 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ )



Introdução

Modelos  
Ideais

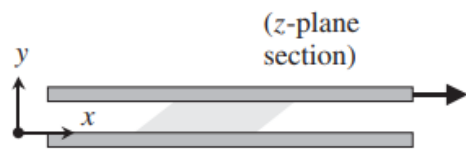
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

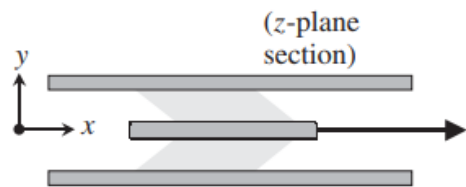
Viscoelasticidade

Géis e espumas

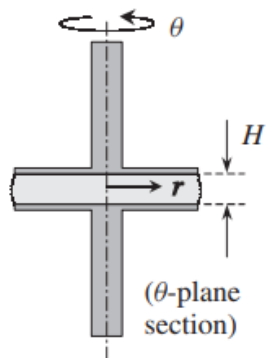
## Geometrias



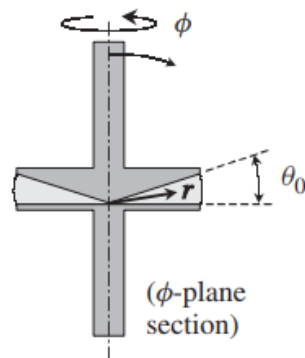
(a)



(b)



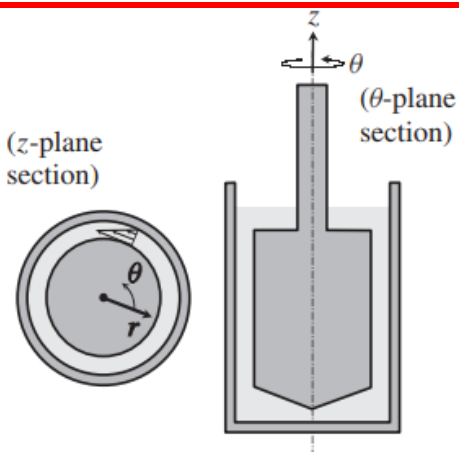
(c)



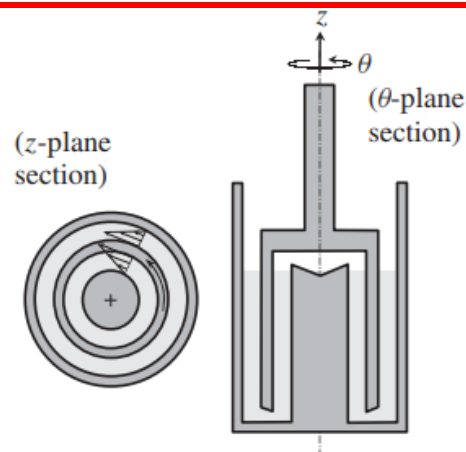
(d)



Preferenciais para materiais pouco viscosos ( $\eta \sim 1$  mPa.s)



(e)



(f)

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Reômetros



Brookfield Rheometer



HAAKE MARS



MCR 302

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

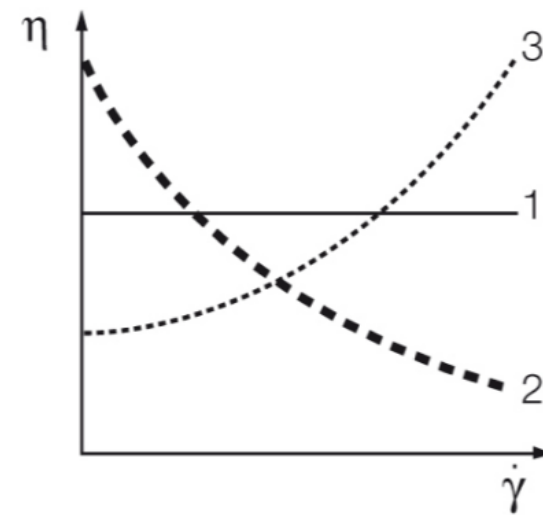
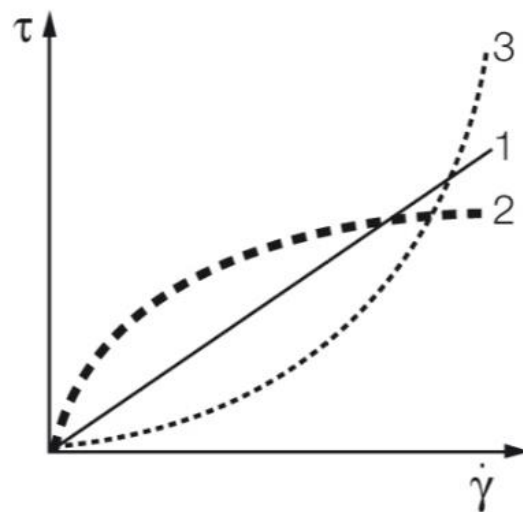
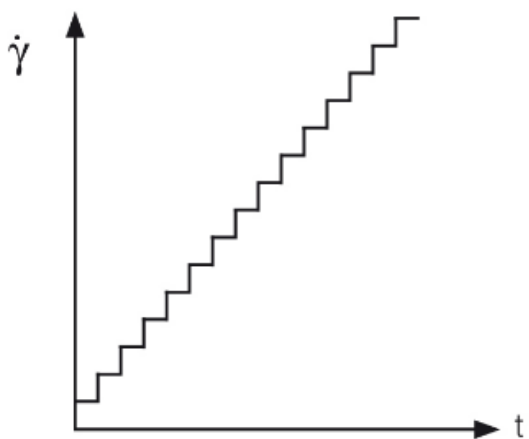
Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Curvas de Fluxo

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

»»» Taxa de cisalhamento controlada »»» Tensão medida »»» Viscosidade calculada



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

**Visão geral do comportamento reológico**

Liquids		Solids	
(ideal-) viscous flow behavior Newton's law	viscoelastic flow behavior Maxwell's law	viscoelastic deformation behavior Kelvin/Voigt's law	(ideal-) elastic deformation behavior Hooke's law
flow/viscosity curves	creep tests, relaxation tests, oscillatory tests		

Introdução

Modelos  
Ideais

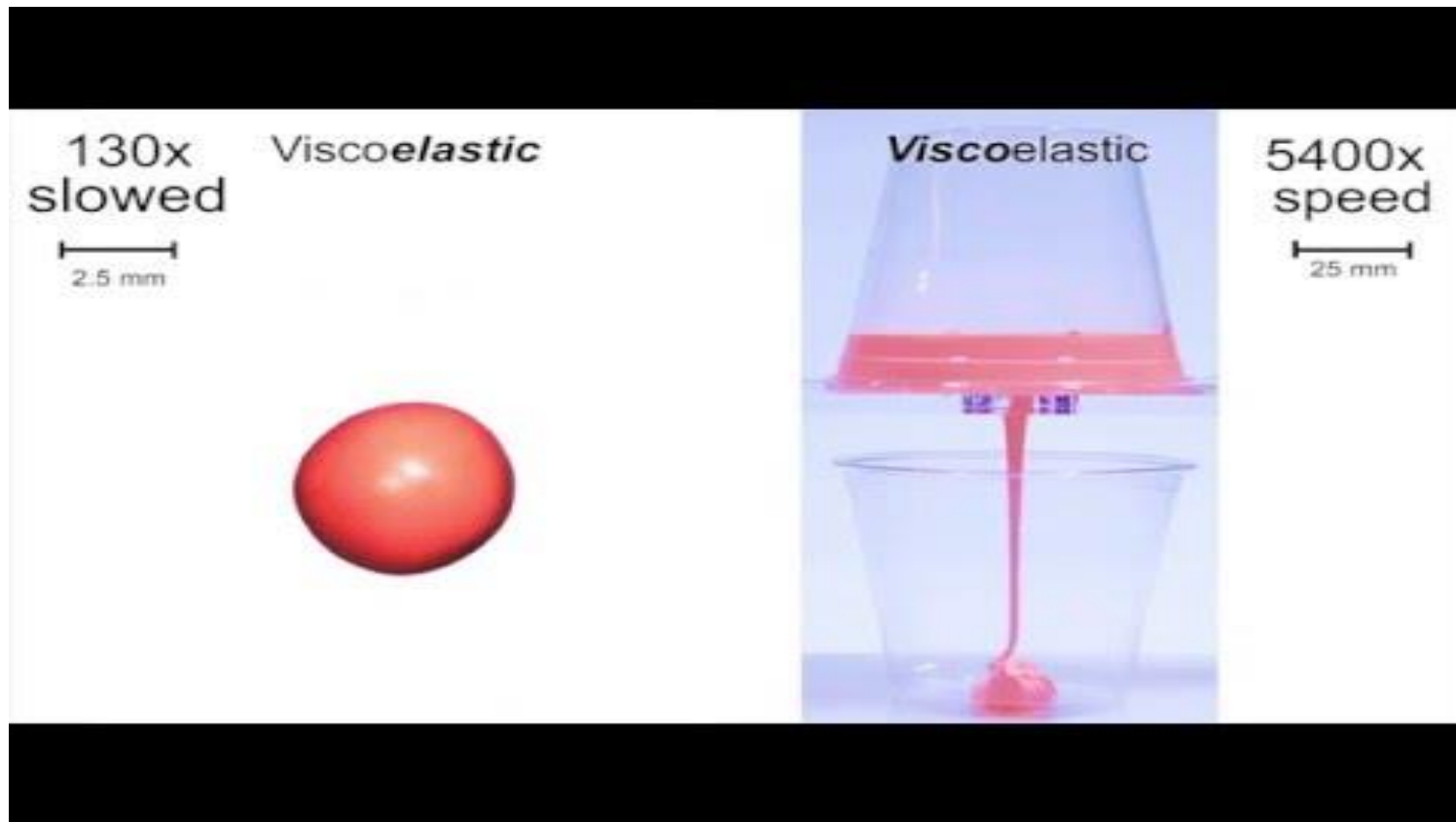
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

Viscoelasticidade



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

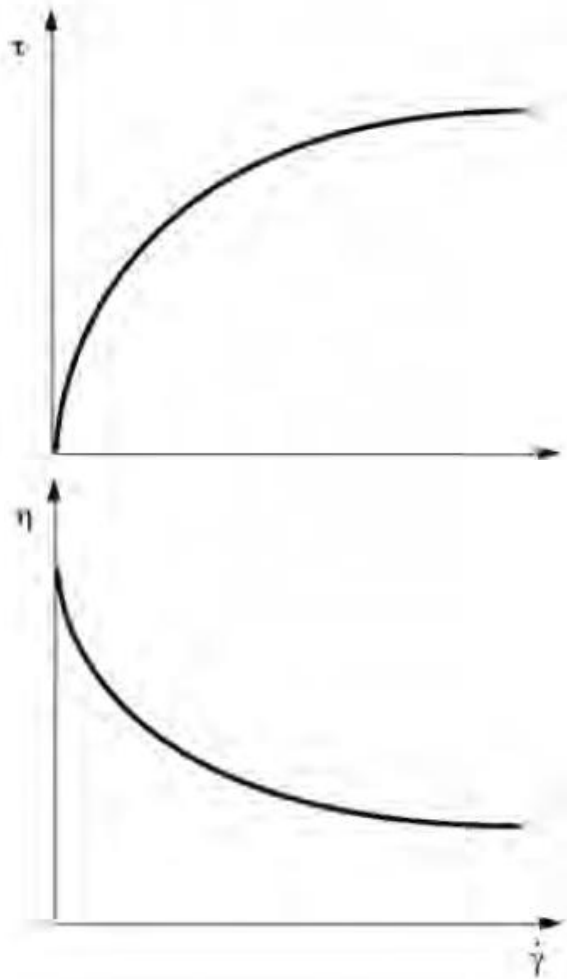
**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

**Shear-thinning**



Shear-thinning ou pseudoplástico





Introdução

Modelos  
Ideais

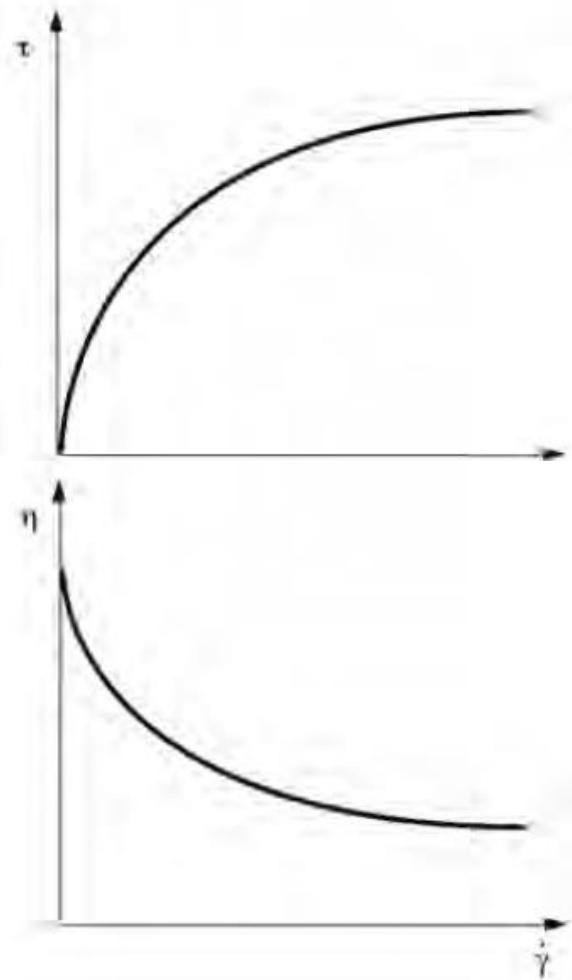
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

## Shear-thinning



🎯 Shear-thinning ou pseudoplástico

🎯 Exemplos de materiais pseudoplásticos: soluções poliméricas, colas e xampus

Introdução

Modelos  
Ideais

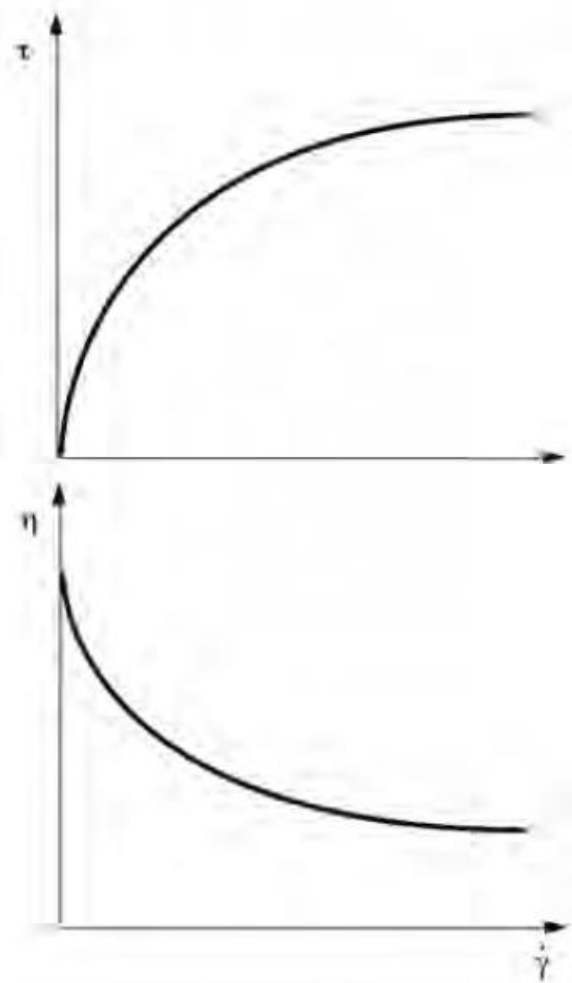
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

## Shear-thinning



Shear-thinning ou pseudoplástico



Exemplos de materiais pseudoplásticos: soluções poliméricas, colas e xampus



Como a viscosidade varia com o cisalhamento, é possível reportar uma "viscosidade aparente"

$$\eta(\dot{\gamma} = 100\text{s}^{-1}) = 345\text{mPas}$$

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

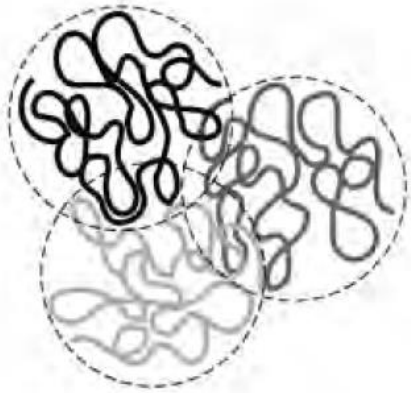
**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

**Exemplo: PE**



Considere uma molécula PE de comprimento  $L = 1 \mu\text{m}$  e diâmetro de  $d = 0,5 \text{ nm}$ . ( $L/d = 2000:1$ ). Ou seja, em repouso:



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

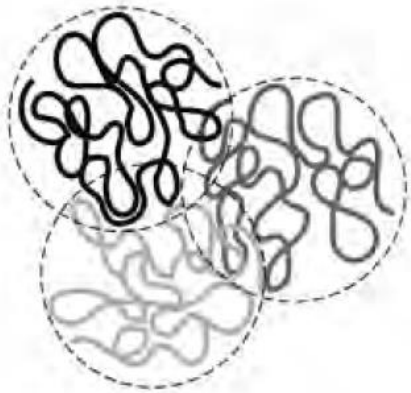
**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

### Exemplo: PE



Considere moléculas de PE de comprimento  $L = 1 \mu\text{m}$  e diâmetro de  $d = 0,5 \text{ nm}$ . ( $L/d = 2000:1$ ). Ou seja, em repouso:



Durante o cisalhamento, as moléculas estão mais ou menos orientadas na direção do fluxo. Quando em movimento, as moléculas se desenrolam até certa extensão, o que reduz a resistência ao fluxo.



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

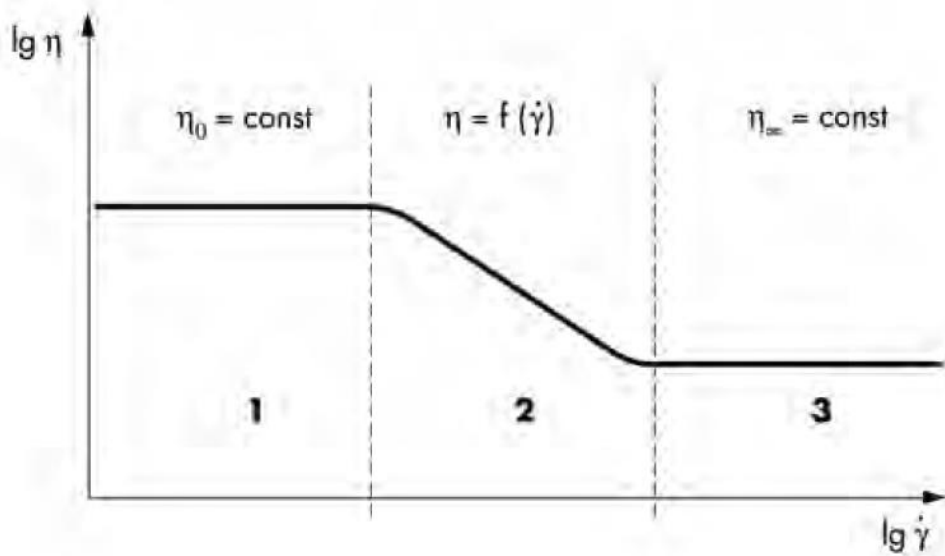
**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

**Exemplo: PE**



- (1) Região Newtoniana- Viscosidade de cisalhamento zero (zero-shear viscosity)
- (2) Região de pseudoplasticidade
- (3) Região Newtoniana - Viscosidade de cisalhamento infinito (infinite-shear viscosity)



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

**Exemplo: PE**

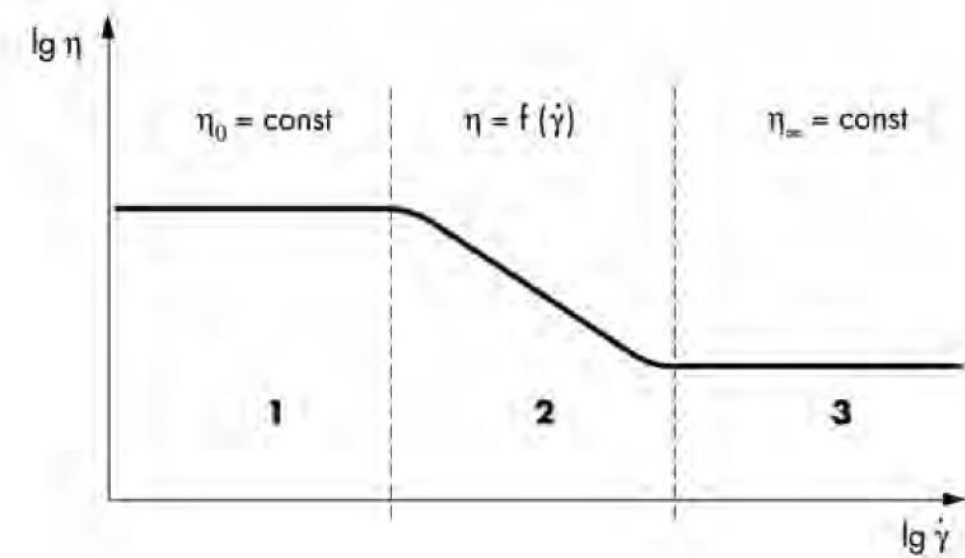


(1) Região Newtoniana- Viscosidade de cisalhamento zero (zero-shear viscosity)



Condições de baixo cisalhamento (até 1/s)

$$\eta_0 = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta(\dot{\gamma})$$



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

**Exemplo: PE**



(1) Região Newtoniana- Viscosidade de cisalhamento zero (zero-shear viscosity)

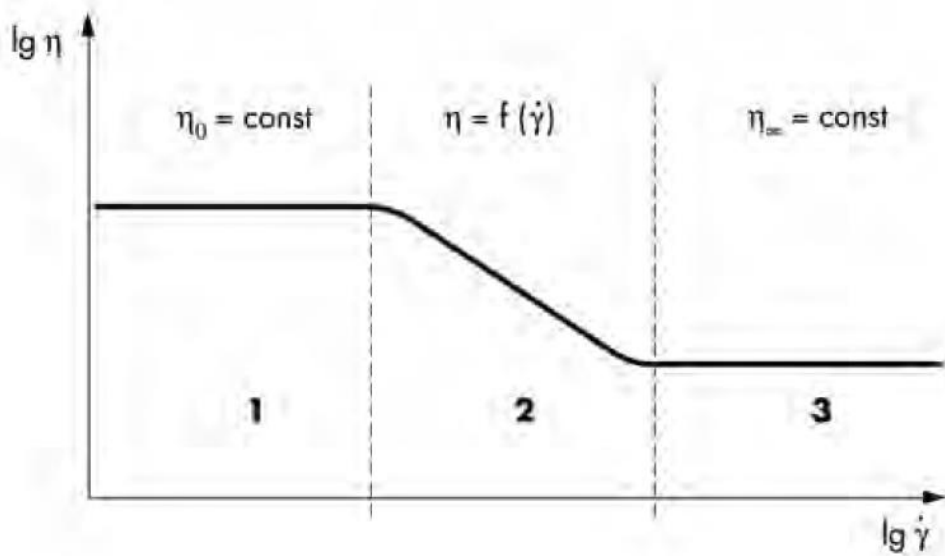


Condições de baixo cisalhamento (até 1/s)

$$\eta_0 = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta(\dot{\gamma})$$



Nessas condições ocorrem dois efeitos simultâneos: as moléculas se desenrolam e se enrolam; consequência da viscoelasticidade.



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

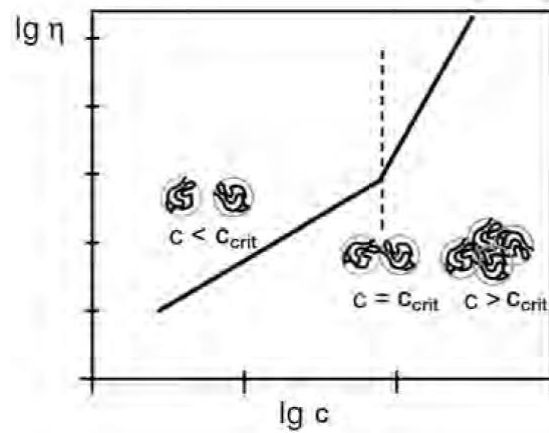
**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

## Viscosidade de cisalhamento zero



Dependência com a concentração





Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

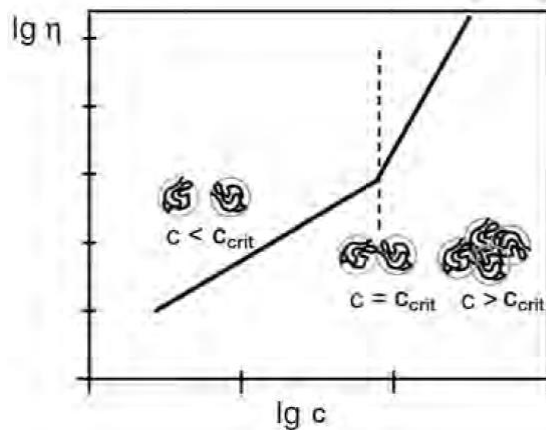
**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

## Viscosidade de cisalhamento zero



Dependência com a concentração



- Quando a concentração é baixa ( $< C_{crit}$ ), as moléculas apresentam um comportamento de fluxo ideal. A viscosidade é diretamente proporcional a concentração
- Quando a concentração é alta ( $> C_{crit}$ ), o grau de enovelamento causa um aumento significativo na viscosidade (visto pela maior inclinação da reta)

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

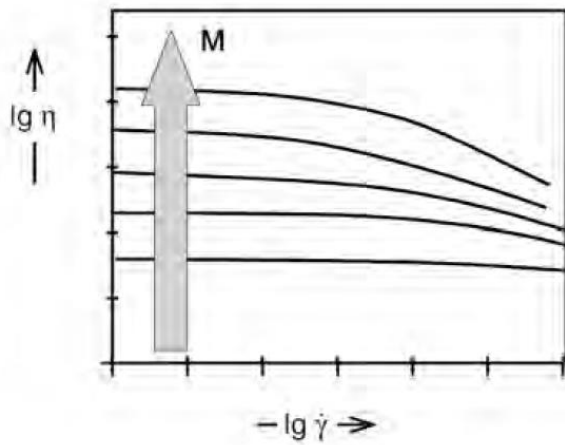
**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

## Viscosidade de cisalhamento zero



Dependência com a massa molar



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

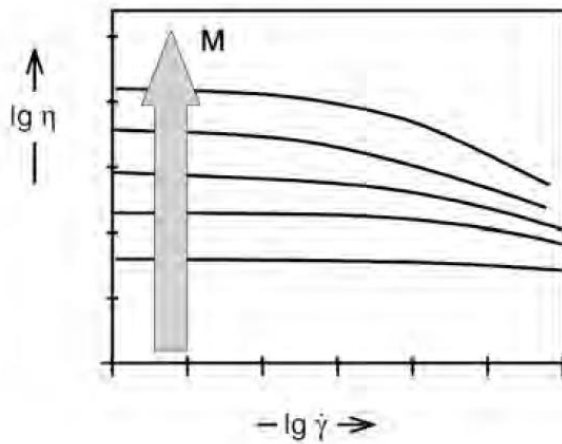
**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

## Viscosidade de cisalhamento zero



Dependência com a massa molar



Polímeros com moléculas pequenas não apresentam um enovelamento significativo, que implica em um comportamento de fluxo ideal. Nesse caso a viscosidade é diretamente proporcional a massa molar.

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

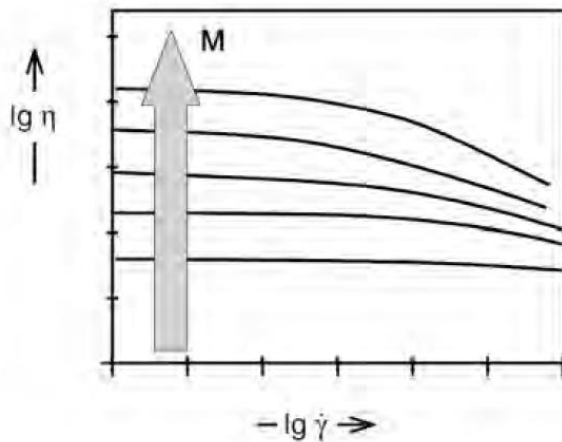
Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Viscosidade de cisalhamento zero



Dependência com a massa molar



Polímeros com moléculas pequenas não apresentam um enovelamento significativo, que implica em um comportamento de fluxo ideal. Nesse caso a viscosidade é diretamente proporcional a massa molar.

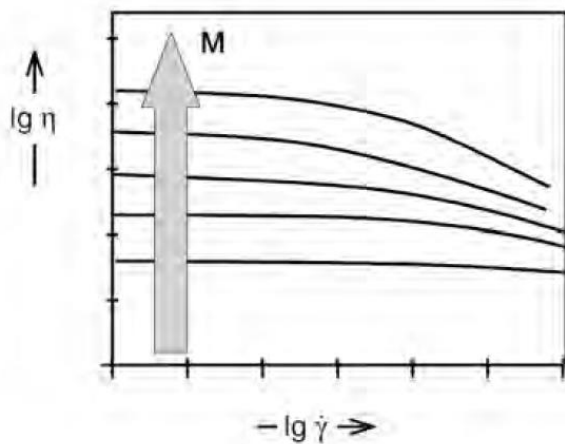
Acima de uma massa molar crítica, o enovelamento é significativo. A relação que descreve a dependência da viscosidade com a massa molar é dada pela relação de Fox:

$$\eta_0 = c_2 \cdot M^{3.4}$$

## Viscosidade de cisalhamento zero



Dependência com a massa molar



Polímeros com moléculas pequenas não apresentam um enovelamento significativo, que implica em um comportamento de fluxo ideal. Nesse caso a viscosidade é diretamente proporcional a massa molar.

Acima de uma massa molar crítica, o enovelamento é significativo. A relação que descreve a dependência da viscosidade com a massa molar é dada pela relação de Fox:

$$\eta_0 = c_2 \cdot M^{3.4}$$

Alguns valores de massa molar crítica (em g/mol):  
PE (4000); PB (5600); PMMA (27500); PS (35000)

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

**Viscoelasticidade**

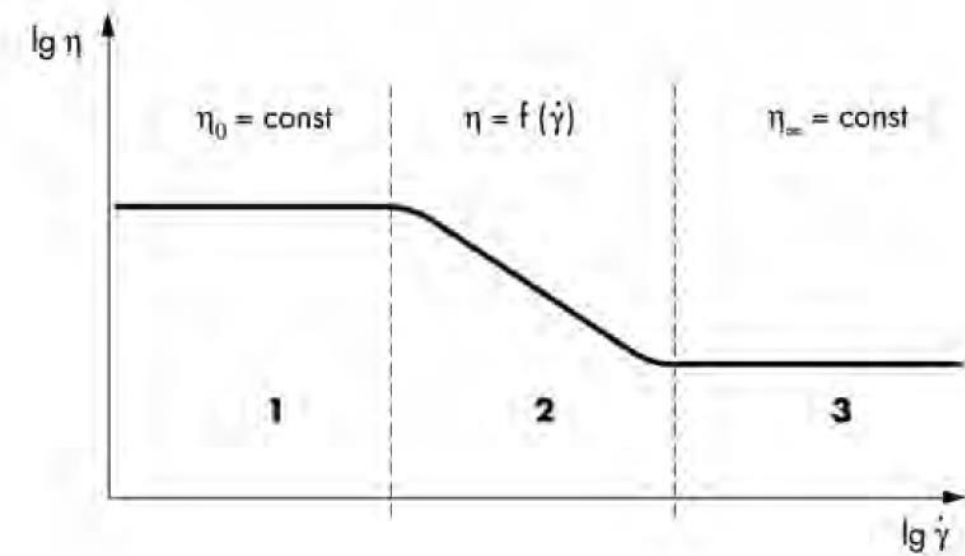
Géis e espumas

**Exemplo: PE**



(2) Região de fluxo

Com o aumento da taxa de cisalhamento, o grau de desenovelamento se torna cada vez maior que o de enovelamento. Como consequência há o comportamento pseudoplástico.



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

**Exemplo: PE**

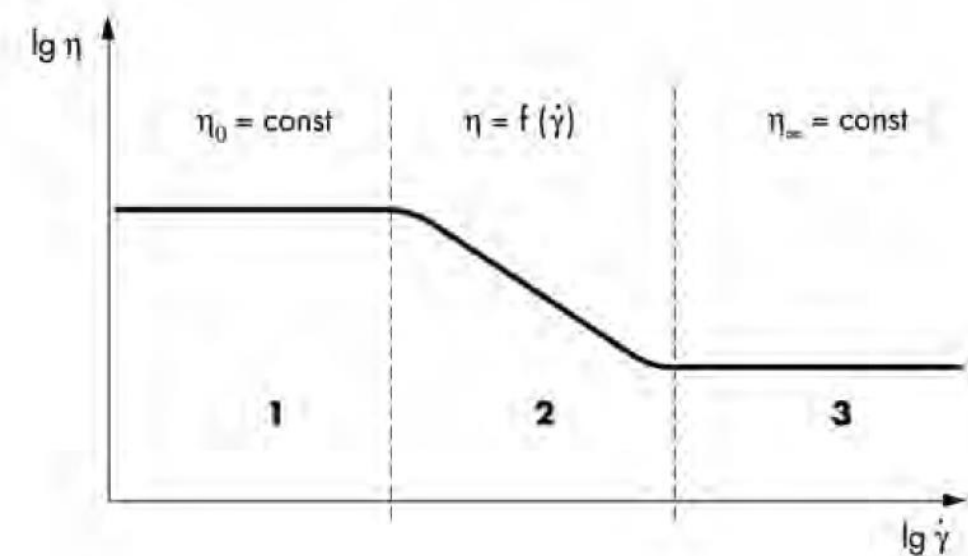


(3) Região Newtoniana - Viscosidade de cisalhamento infinito (infinite-shear viscosity)



Condições de alto cisalhamento (até 1000/s)

$$\eta_{\infty} = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta(\dot{\gamma})$$



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

**Exemplo: PE**



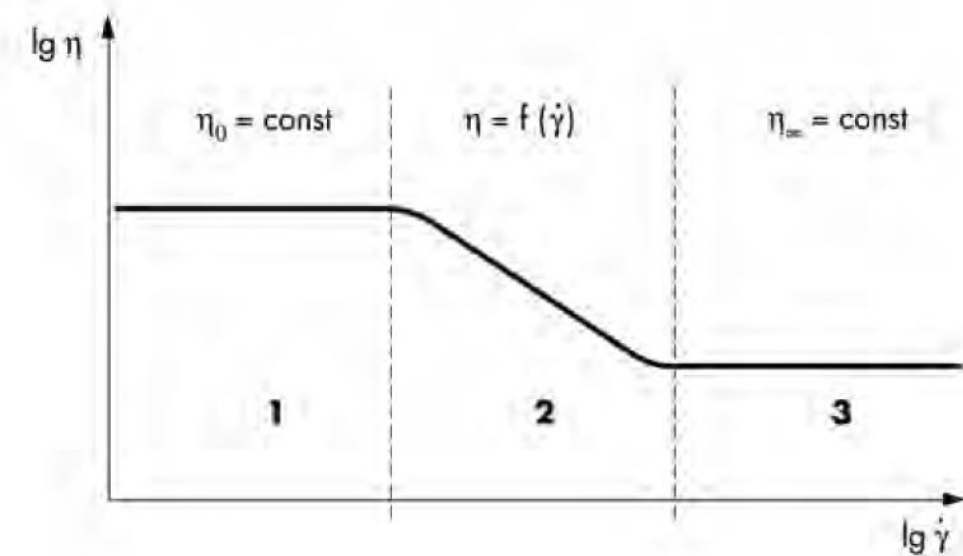
(3) Região Newtoniana - Viscosidade de cisalhamento infinito (infinite-shear viscosity)



Condições de alto cisalhamento (até 1000/s)  $\eta_{\infty} = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta(\dot{\gamma})$



Nessas condições as moléculas estão totalmente desenoveladas e alinhadas ao fluxo. A resistência foi diminuída ao máximo (correspondendo a fricção das moléculas deslizando uma sobre as outras)





Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

**Exemplo: PE**

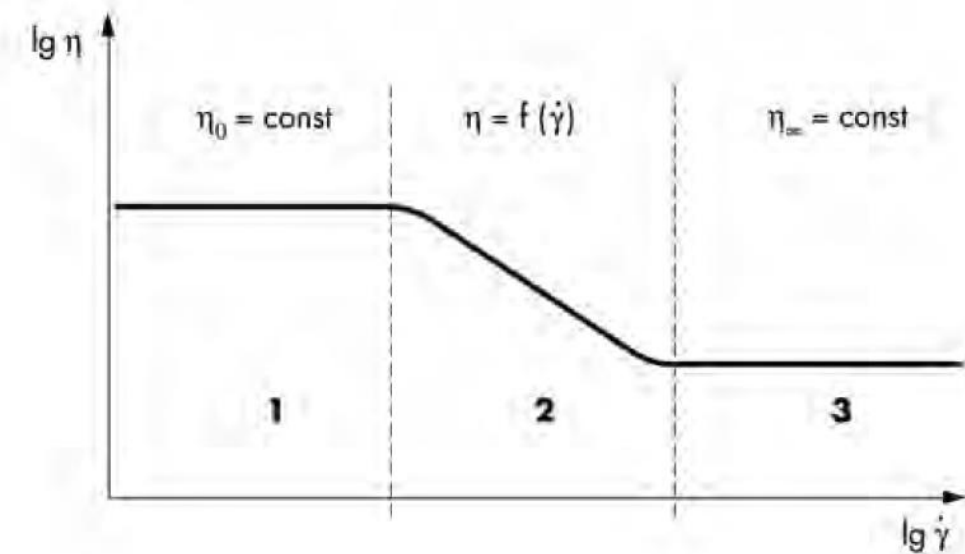


(3) Região Newtoniana - Viscosidade de cisalhamento infinito (infinite-shear viscosity)

Condições de alto cisalhamento (até 1000/s)  $\eta_{\infty} = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta(\dot{\gamma})$

Nessas condições as moléculas estão totalmente desenoveladas e alinhadas ao fluxo. A resistência foi diminuída ao máximo (correspondendo a fricção das moléculas deslizando uma sobre as outras)

Como garantir que nessas taxas não houve degradação?



Introdução

Modelos  
Ideais

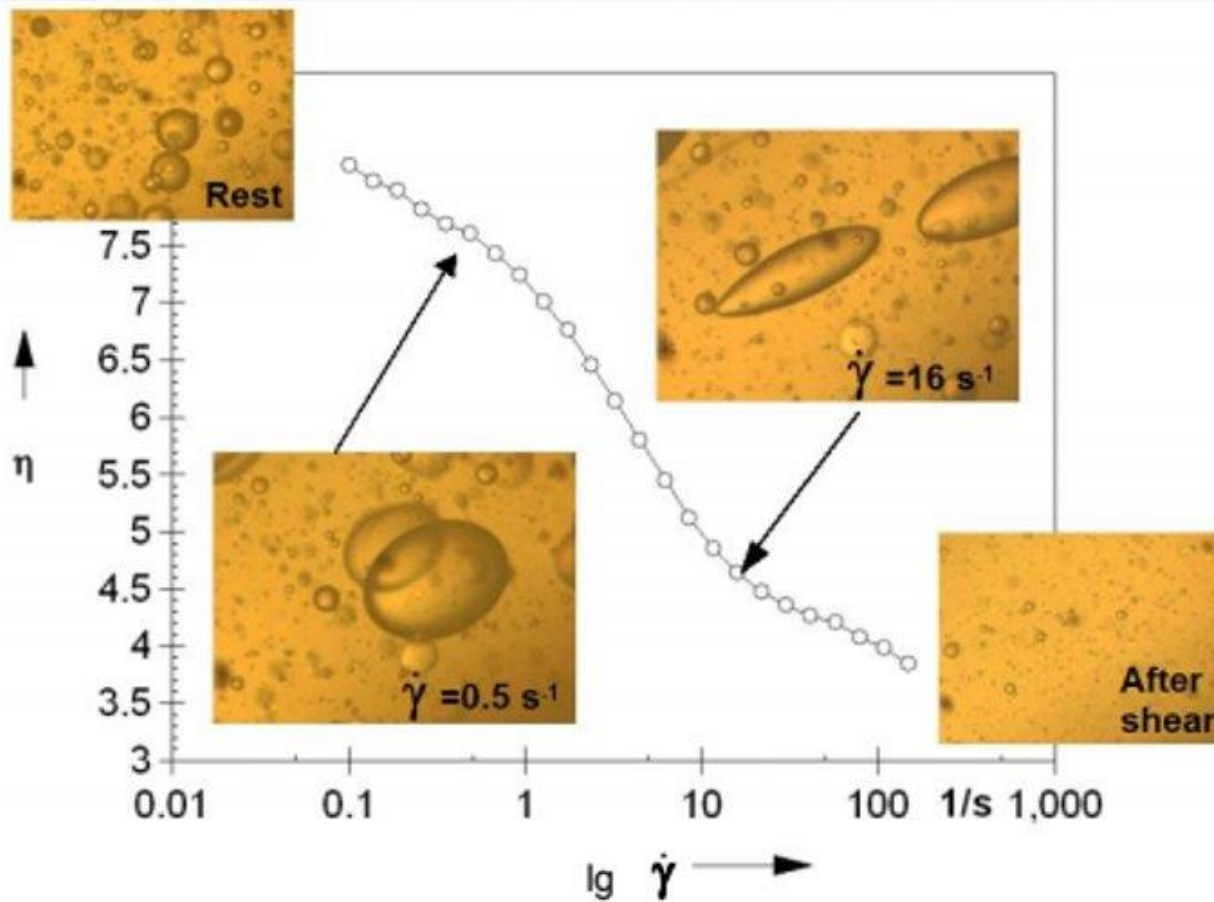
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

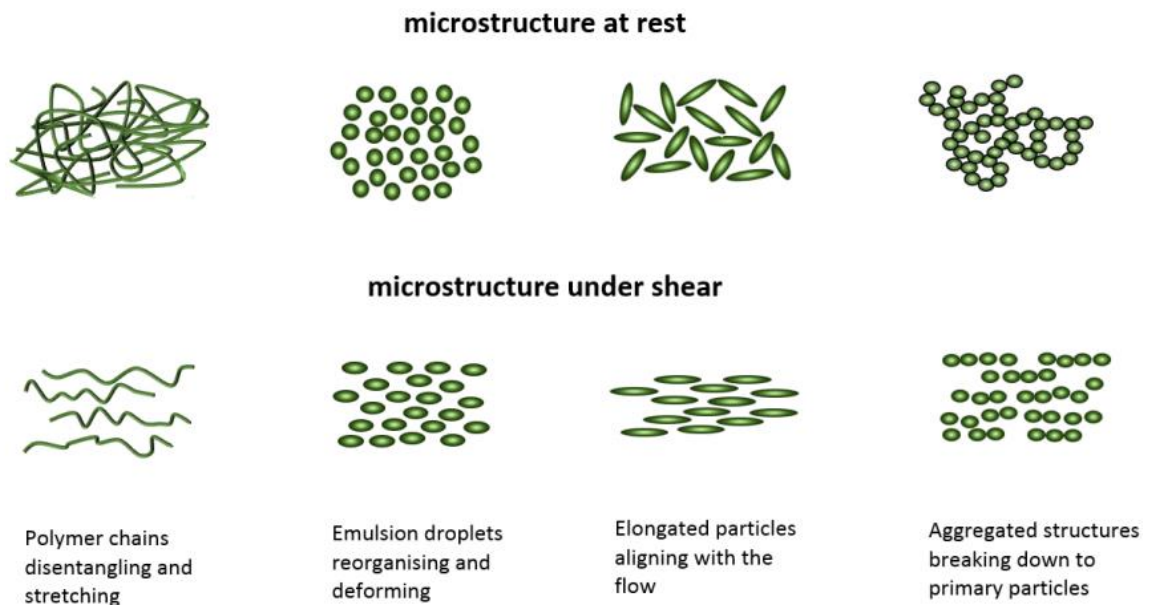
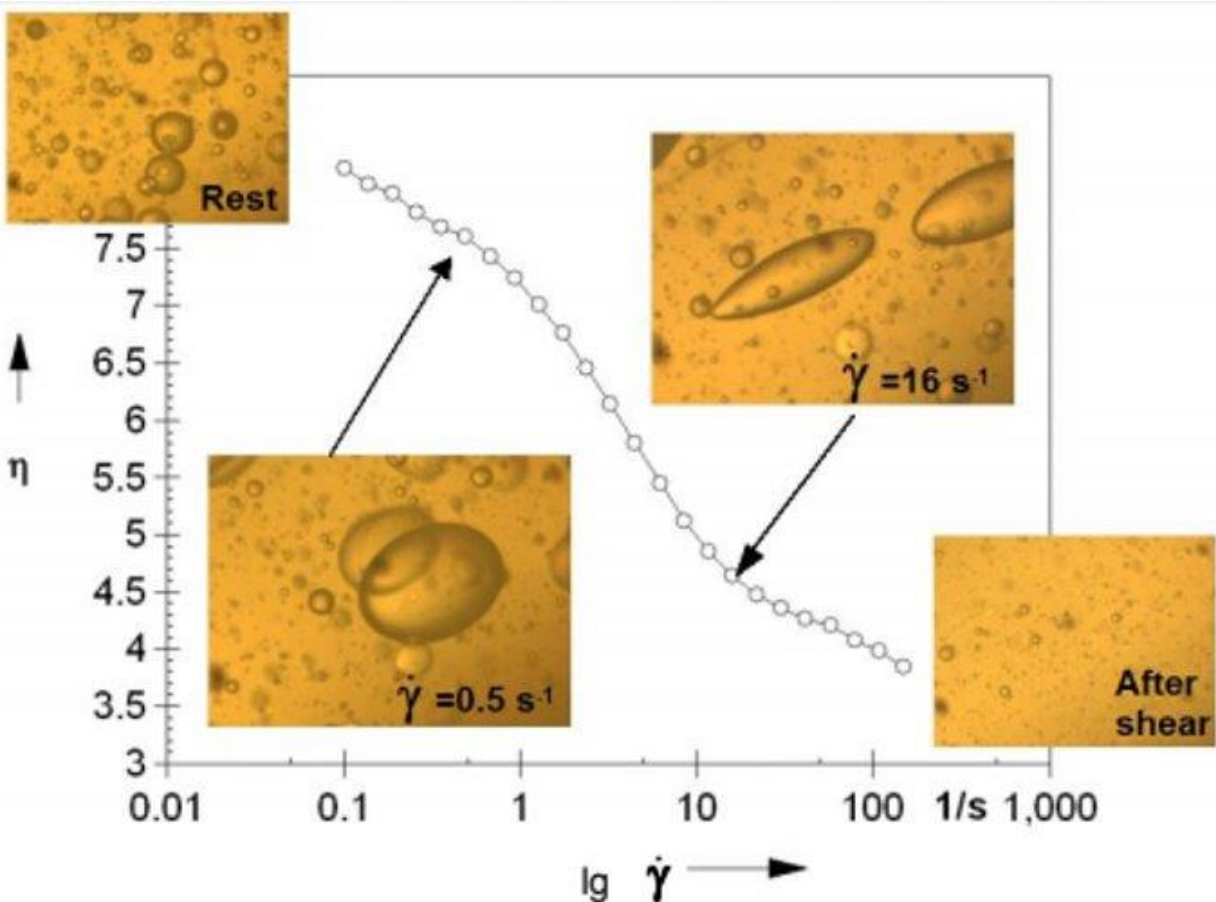
**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

Exemplo: Dispersão de silicone em água



**Exemplo: silicone em água**



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

## Shear-thickening



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

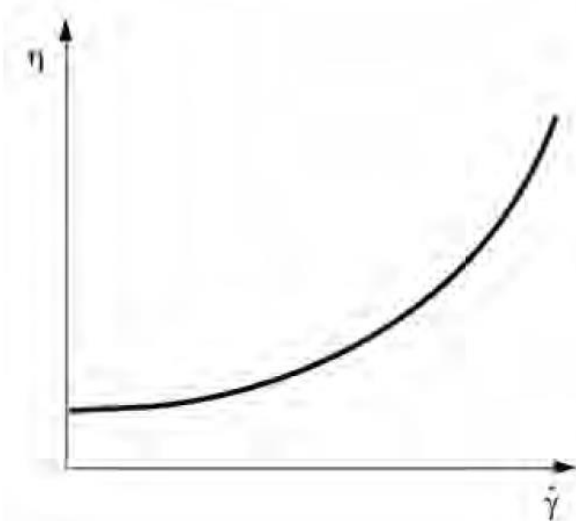
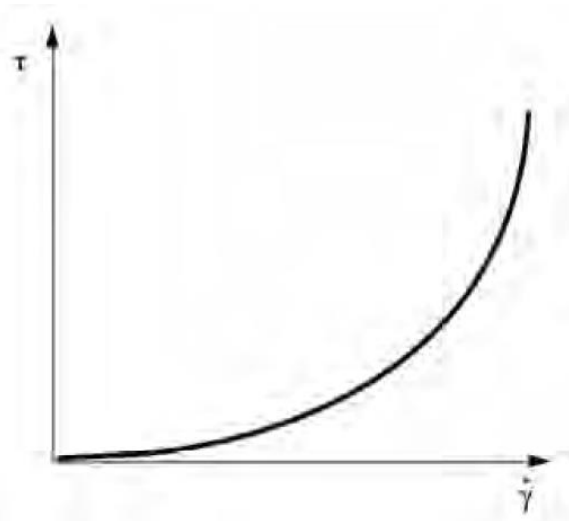
Reologia  
Fluidos Newtonianos

**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

## Shear-thickening

🎯 Shear-thickening, dilatant, shear-hardening ou shear-stiffening



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

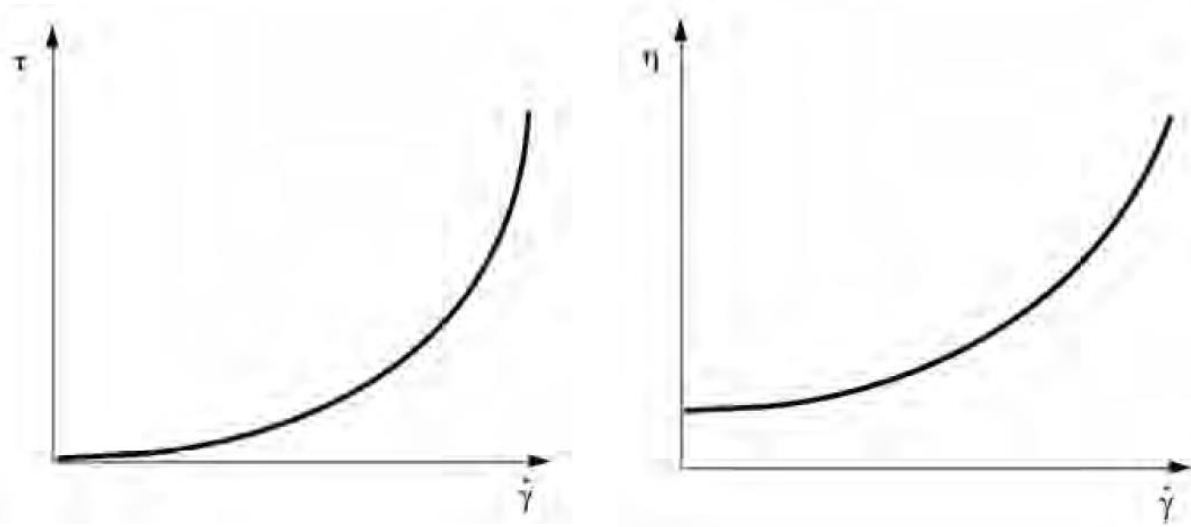
Reologia  
Fluidos Newtonianos

**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

## Shear-thickening

🎯 Shear-thickening, dilatant, shear-hardening ou shear-stiffening



🎯 Em dispersões, o comportamento dilatante ocorre quando a concentração de partículas é alta ou a taxa de cisalhamento é alta.

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

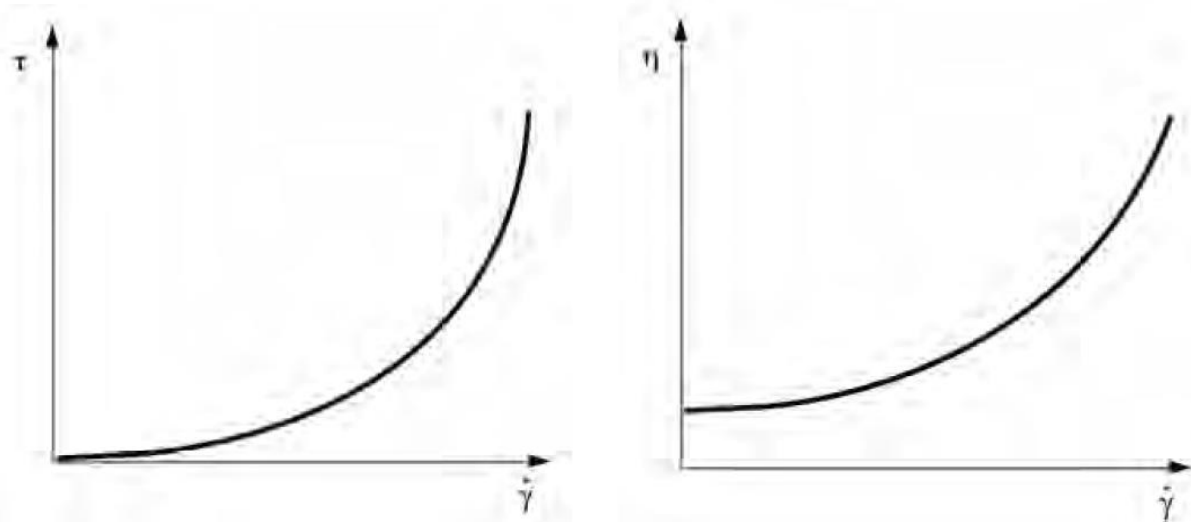
Reologia  
Fluidos Newtonianos

**Viscoelasticidade**

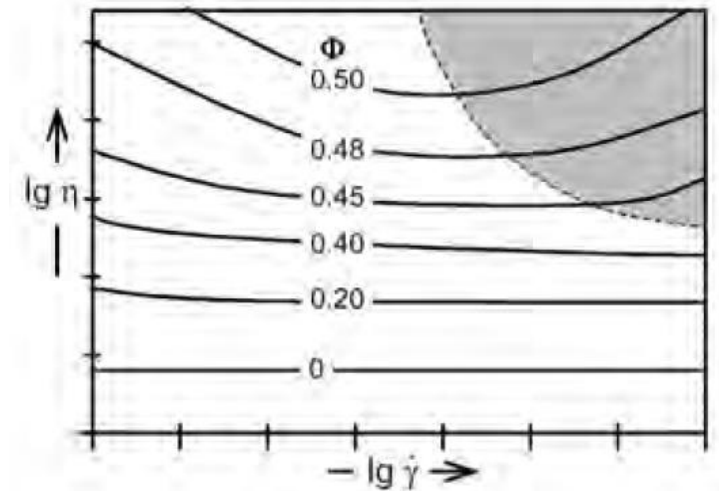
Géis e espumas

## Shear-thickening

🎯 Shear-thickening, dilatant, shear-hardening ou shear-stiffening



🎯 Em dispersões, o comportamento dilatante ocorre quando a concentração de partículas é alta ou a taxa de cisalhamento é alta.



## Shear-thickening

## The influence of carbon nanotube addition on the properties of shear thickening fluid

PAULINA NAKONIECZNA\*<sup>ORCID</sup>, ŁUKASZ WIERZBICKI, RAFAŁ WRÓBLEWSKI,  
TOMASZ PŁOCIŃSKI and MARCIN LEONOWICZ

Faculty of Materials Science and Engineering, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland

\*Author for correspondence (Paulina.Nakonieczna.dokt@pw.edu.pl)

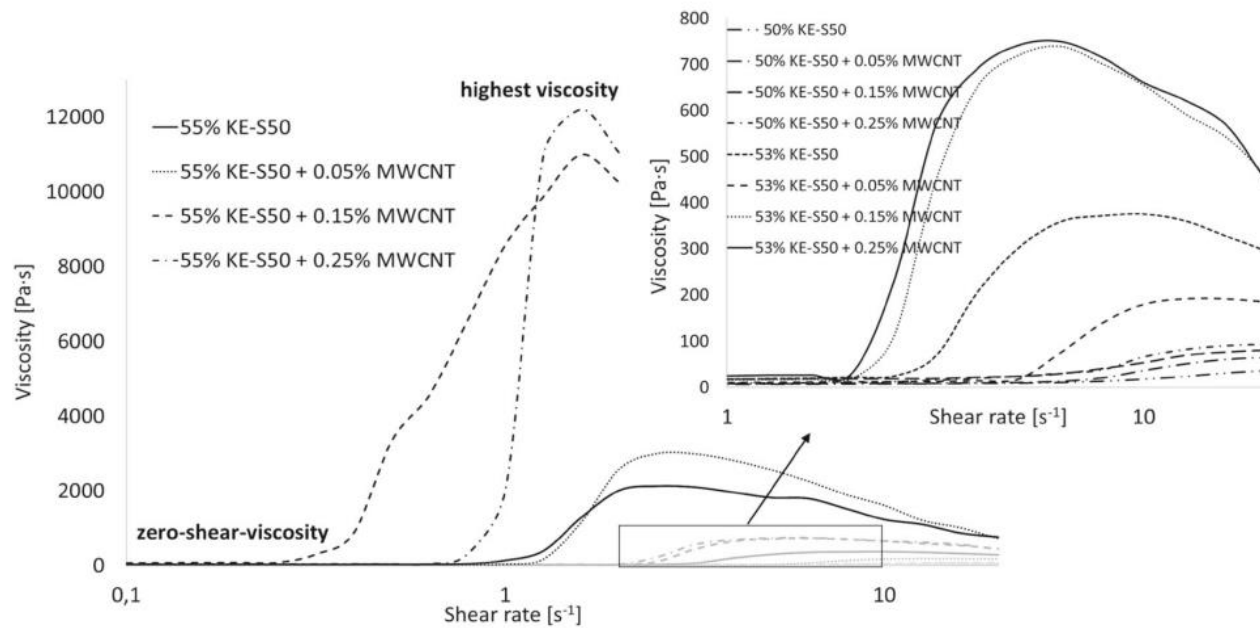


Figure 1. Viscosity vs. shear rate for the STF with different contents of CNTs.

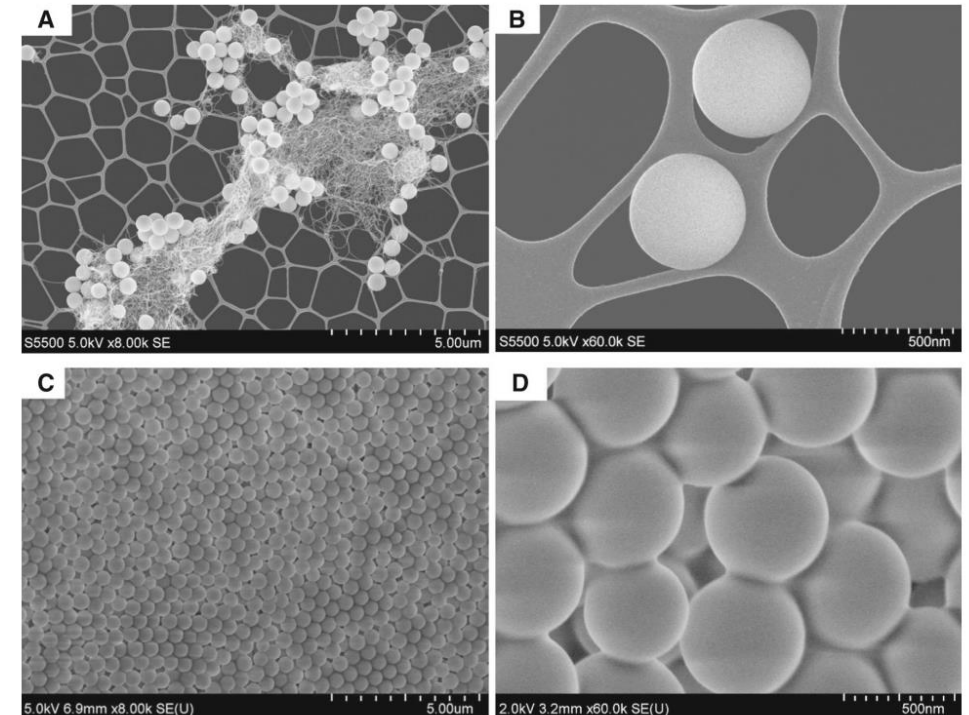


Figure 2. SEM images of (a) the starting mixture of KE-S50 silica and agglomerates of CNTs, (b) image of the KE-S50 silica, (c and d) the arrangement of solid components in the STF.



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

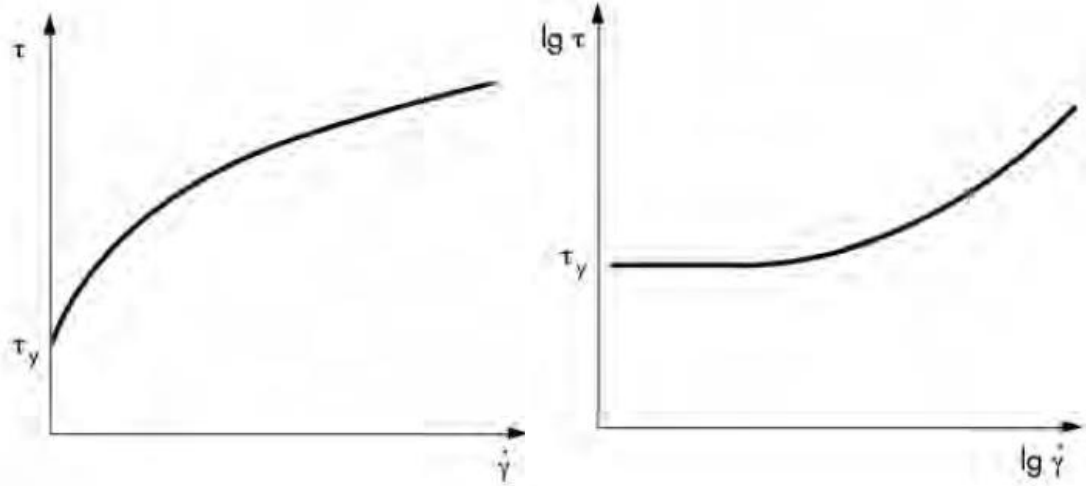
**Viscoelasticidade**

Géis e espumas

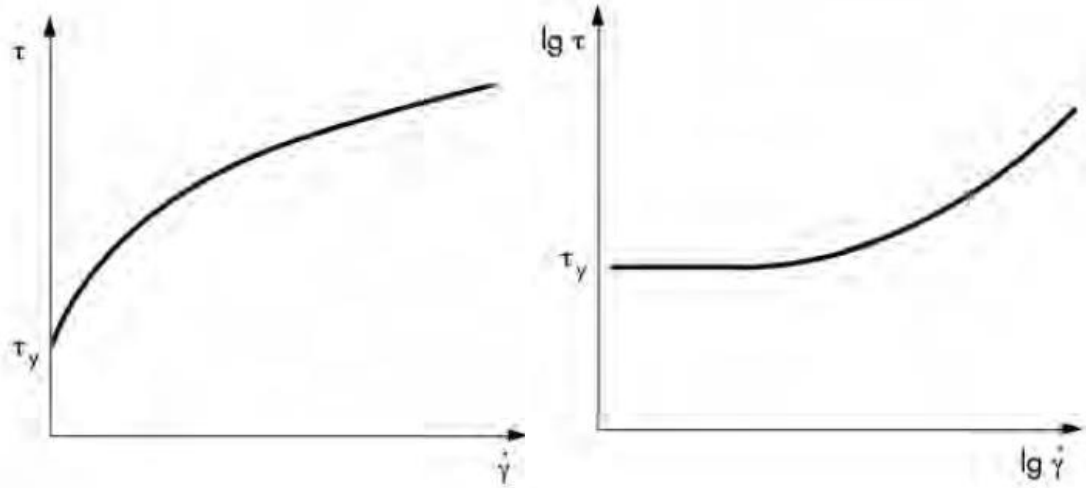
## Yield point



Uma amostra com um yield point começa a fluir quando as forças externas que agem no material são maiores que as forças estruturais internas.



## Yield point



Uma amostra com um yield point começa a fluir quando as forças externas que agem no material são maiores que as forças estruturais internas.



Exemplos de materiais com yield point: géis, pasta de dente, selantes, tintas, massas cerâmicas, batom, cremes, ketchup, maionese, chocolate, margarina, iogurte, sistemas concentrados em surfactates.

Yield point

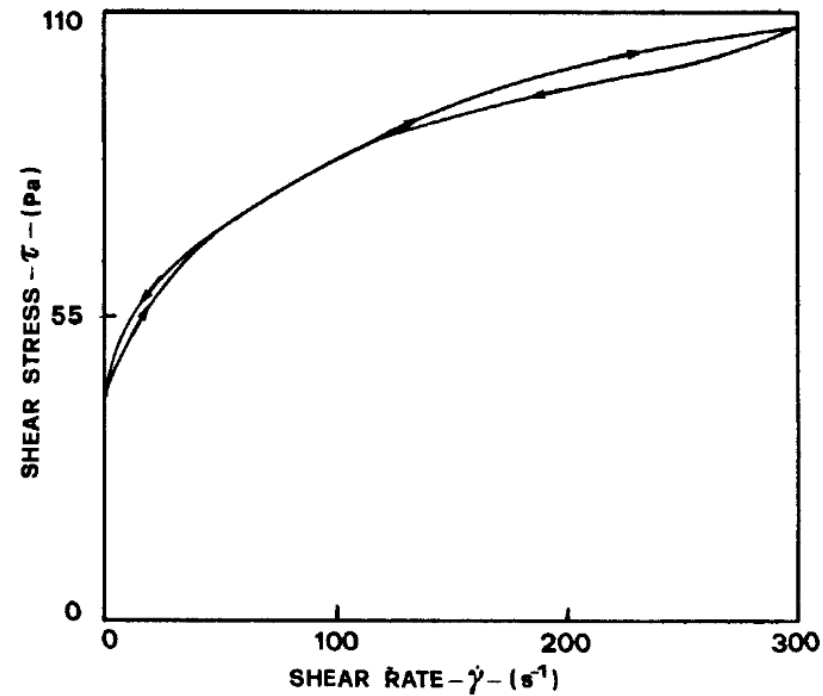
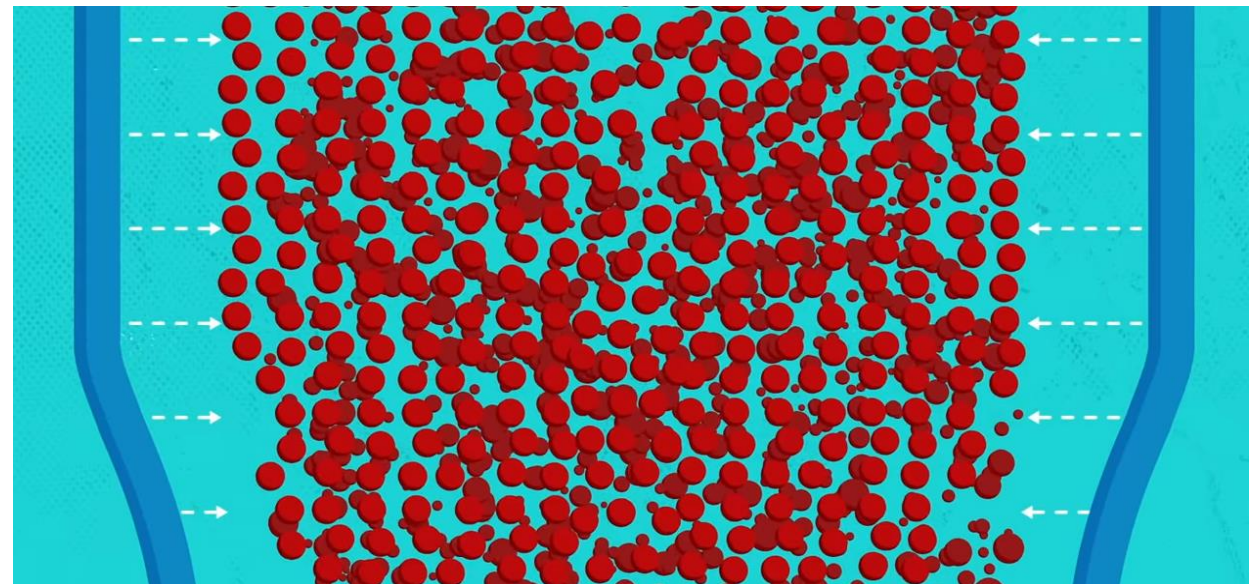


FIG. 1. TYPICAL FLOW CURVE OF KETCHUPS MEASURED BY HAAKE ROTATIONAL VISCOMETER, AT THE TEMPERATURE OF  $30 \pm 0.1^\circ C$ , USING A MVII ROTOR



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

**Viscoelasticidade**

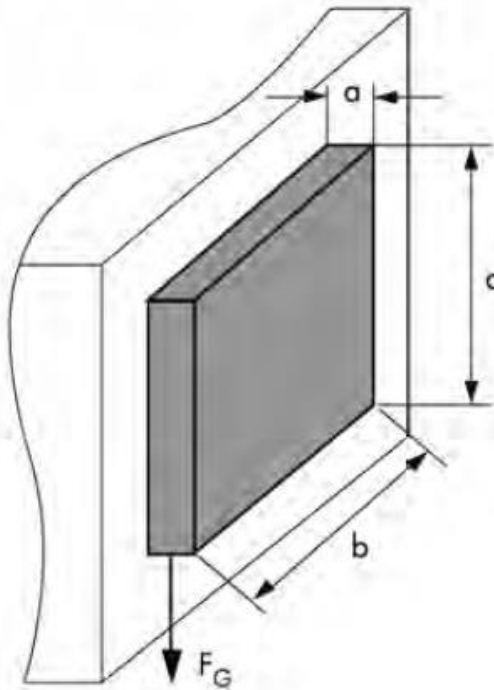
Géis e espumas

## Yield point



Usando o valor do yield point, é possível fazer uma estimativa simples e aproximada da espessura de um revestimento em uma parede vertical

$$a = \tau_y / (\rho \cdot g)$$



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Espumas - Problemas



Deslizamento nas paredes.



Compressão leva ao colapso das bolhas.

Introdução

Modelos  
Ideais

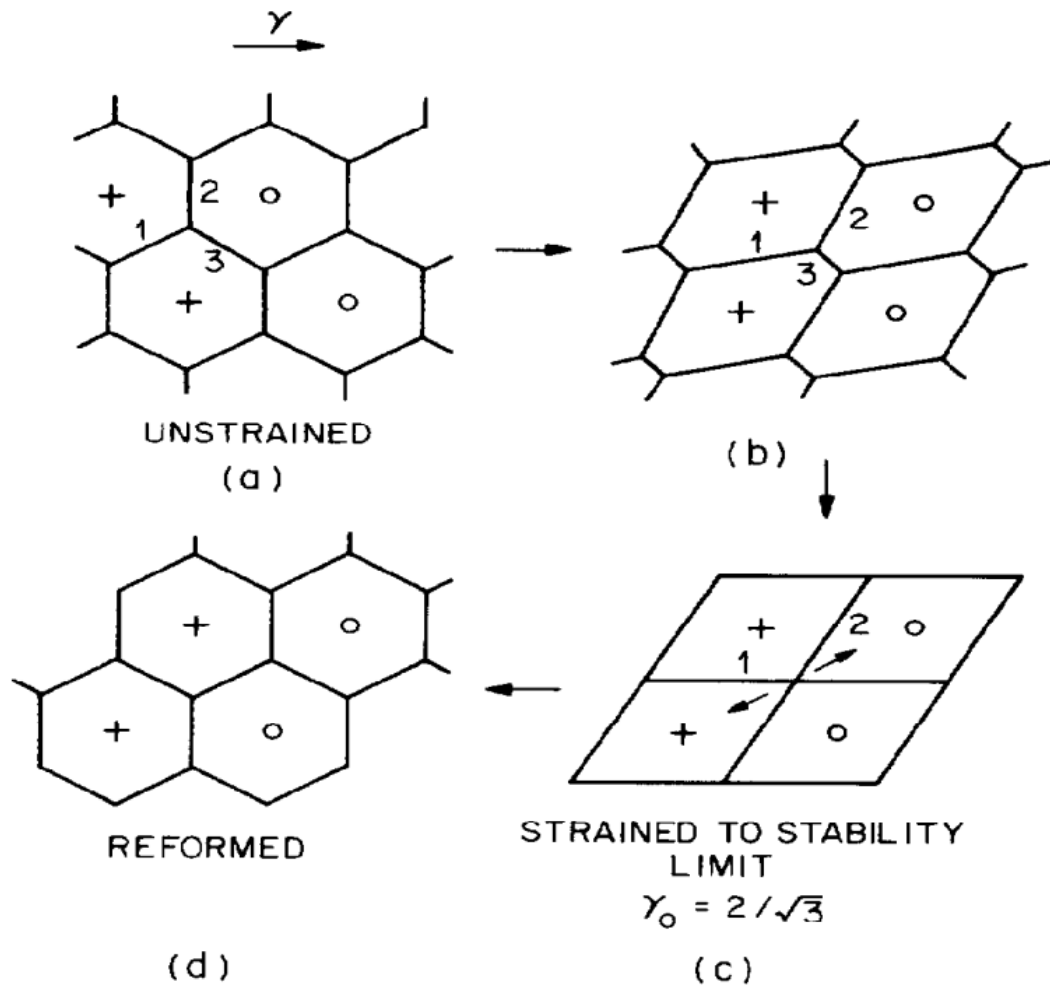
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

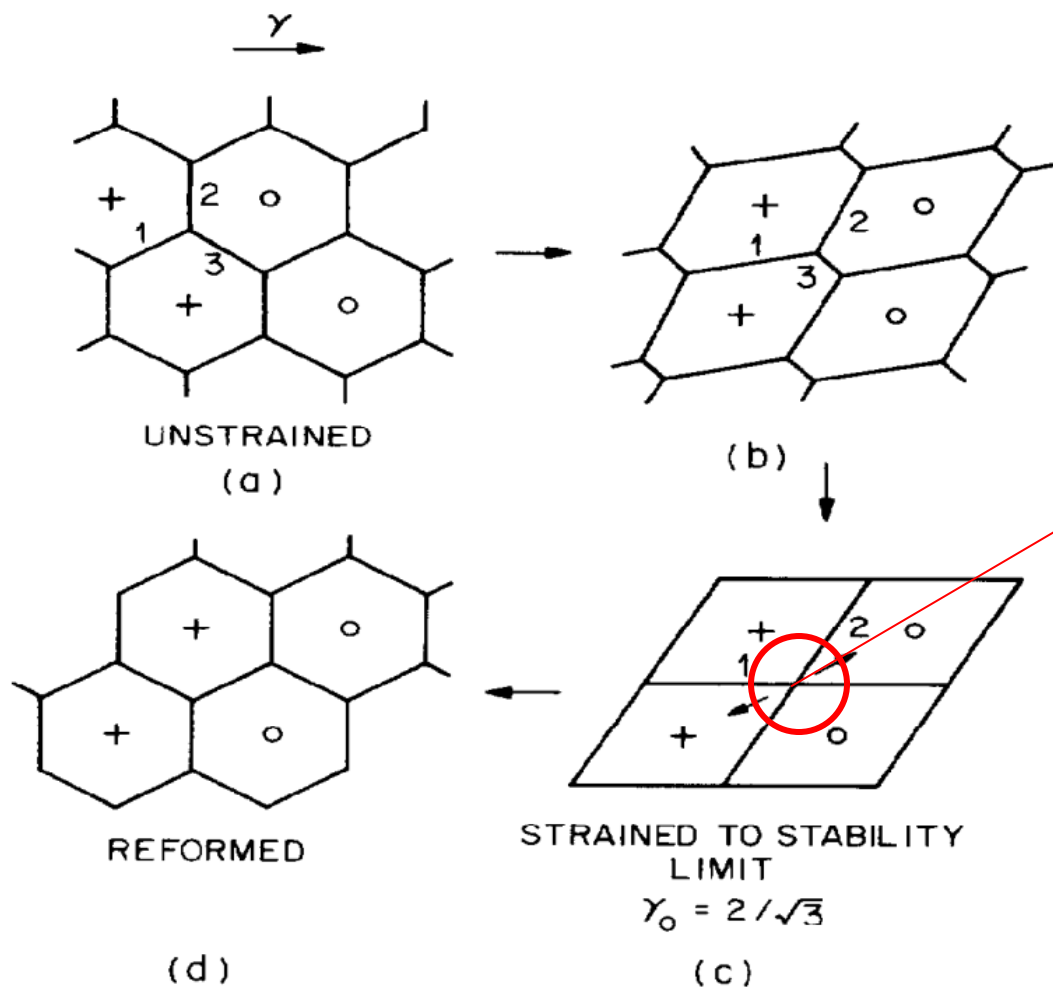
Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Espumas



## Espumas



Existe uma deformação crítica na qual um dos lados tem seu comprimento reduzido a zero.

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

Espumas

### Foam Formulation

	Weight %
<i>n</i> -Dodecanol	4
<i>n</i> -Butyl alcohol	10
Surfactant (Witconate AOK, Witco Chemicals)	7.5
5 wt% Polyethylene-oxide ( $\bar{M}_w = 3 \times 10^5$ , (Scientific Products))	40
Water	38.5

20 wt% of this concentrate is added in water to make final product.



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

Espumas

### Foam Formulation

	Weight %
<i>n</i> -Dodecanol	4
<i>n</i> -Butyl alcohol	10
Surfactant (Witconate AOK, Witco Chemicals)	7.5
5 wt% Polyethylene-oxide ( $\bar{M}_w = 3 \times 10^5$ , (Scientific Products)	40
Water	38.5

Por quê?

20 wt% of this concentrate is added in water to make final product.

## Espumas

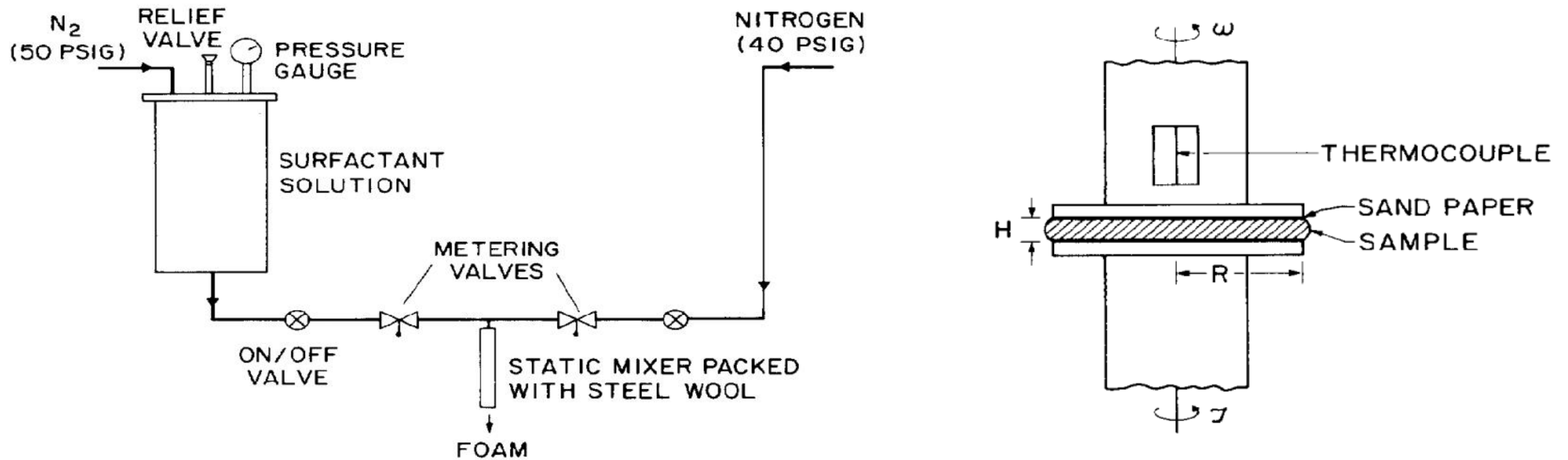


Fig. 2. Schematic diagram of the aqueous foam generator.

## Espumas

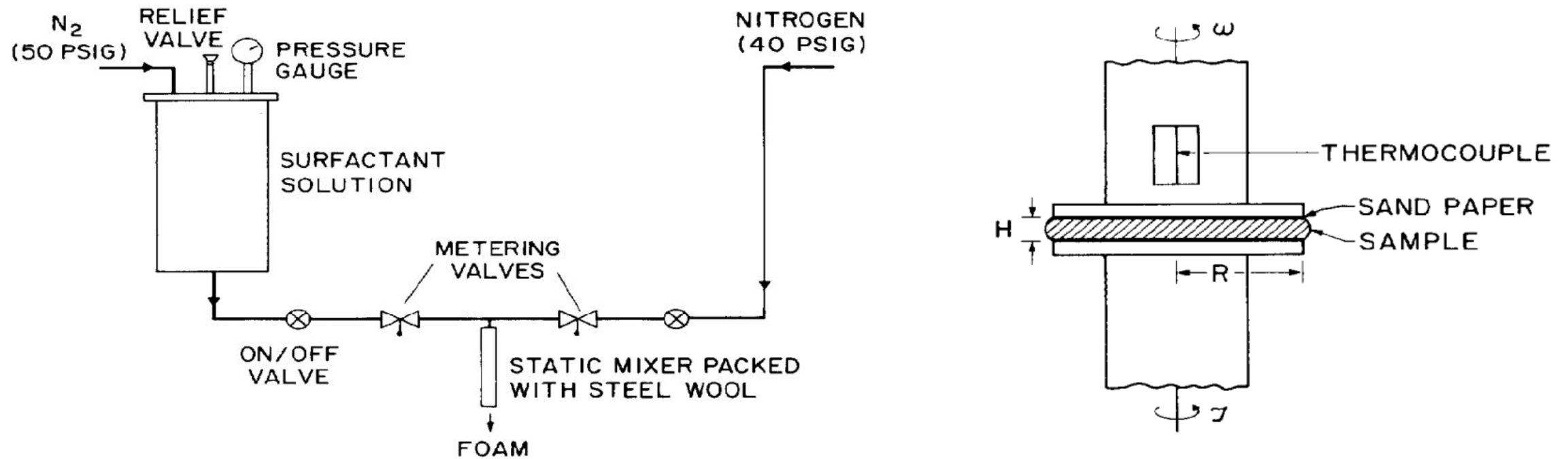


Fig. 2. Schematic diagram of the aqueous foam generator.

## Espumas

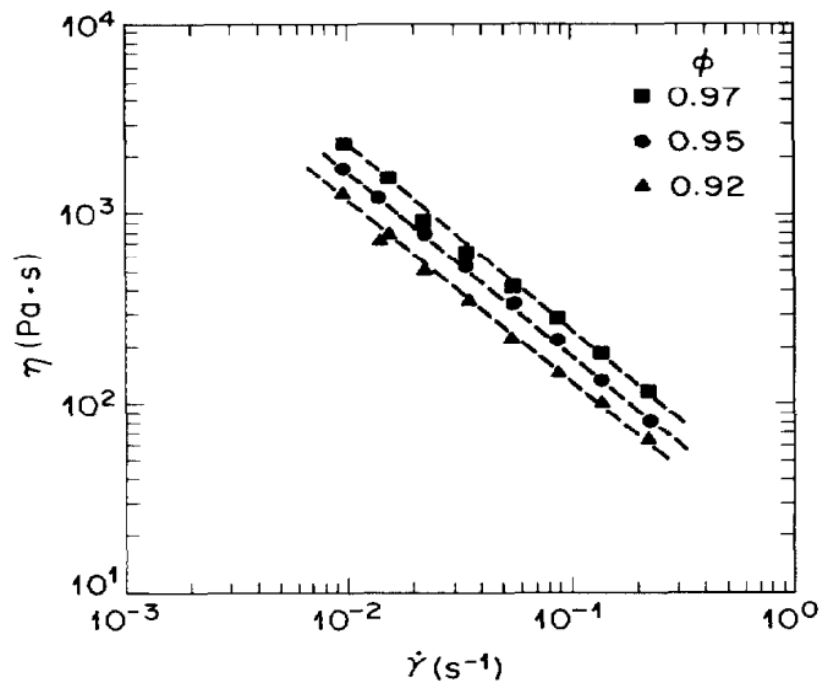


Fig. 5. Foam viscosity as a function of shear rate for three different gas volume fractions.  $\phi$ : (■) 0.97; (●) 0.95; (▲) 0.92.

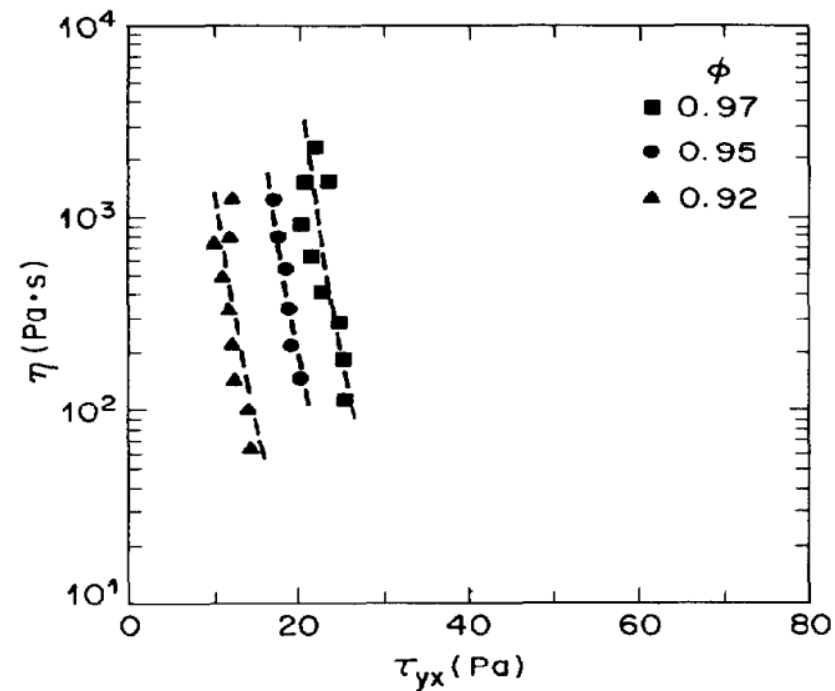


Fig. 6. Viscosity as a function of shear stress for three different gas volume fractions. The vertical asymptotes indicate the yield stress of the foam.  $\phi$ : (■) 0.97; (●) 0.95; (▲) 0.92.

Introdução

Modelos  
Ideais

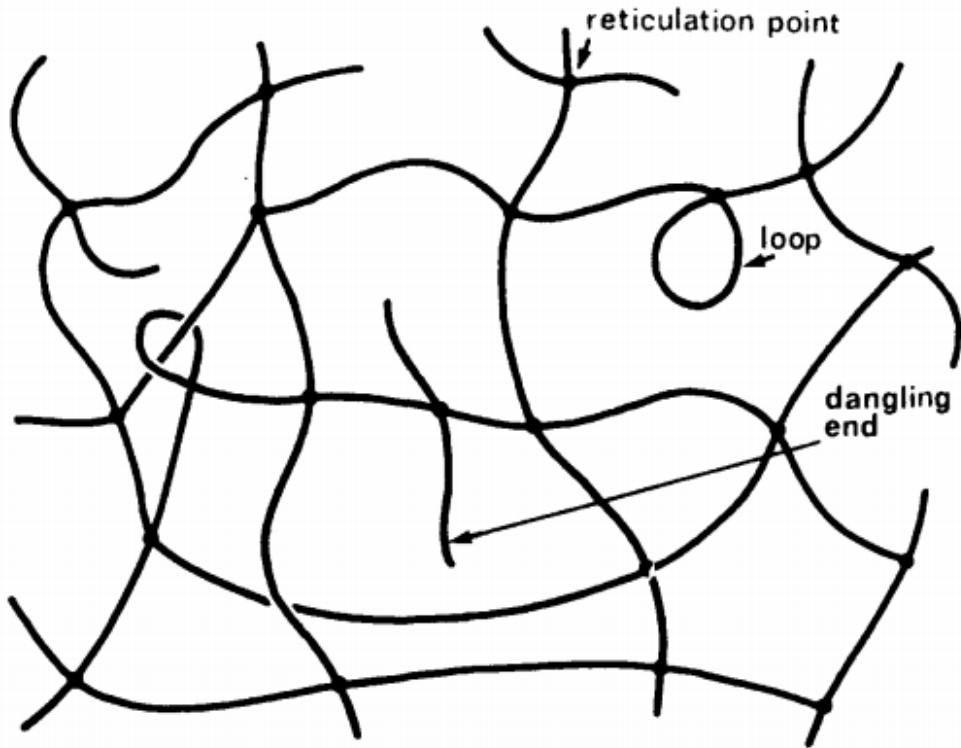
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Géis Poliméricos



Gelificação é a conversão de um líquido em um sólido desordenado pela formação de uma rede de ligações (químicas ou físicas) entre as moléculas ou partículas contidas no líquido.

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

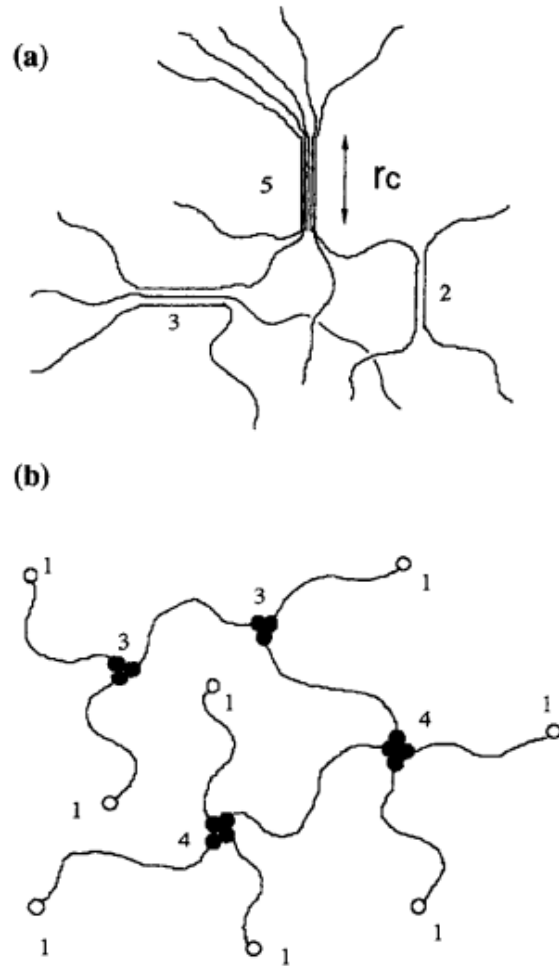
Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Géis Poliméricos



Géis físicos: resultado de associação intermolecular



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

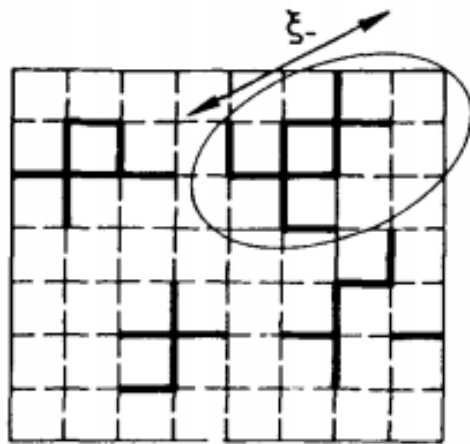
Viscoelasticidade

Géis e espumas

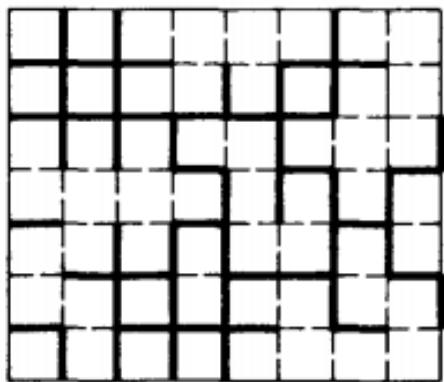
## Géis Poliméricos



Géis químicos: resultado de ligações randômicas



pre-gel



GP Network

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Géis Poliméricos



Líquido precursor com pequenas moléculas ou polímeros passa por um processo de gelificação



Introdução

Modelos  
Ideais


Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Géis Poliméricos

 Líquido precursor com pequenas moléculas ou polímeros passa por um processo de gelificação



As propriedades reológicas mudam de um líquido viscoso para um sólido elástico.

Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

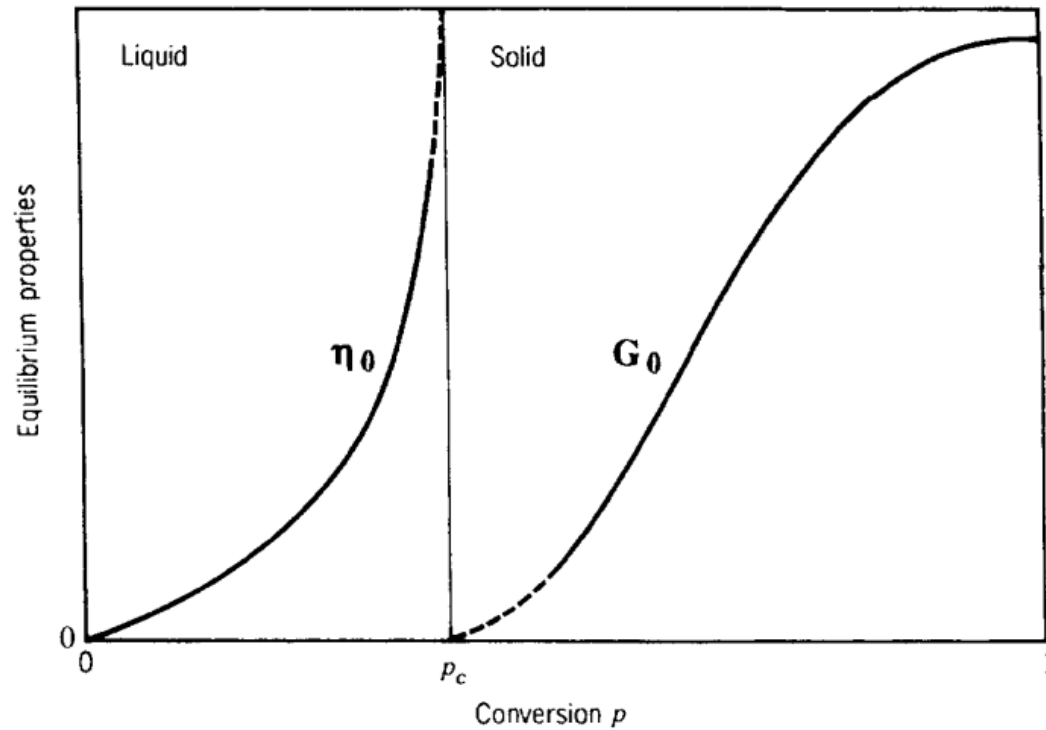
Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Géis Poliméricos

As propriedades reológicas mudam de um líquido viscoso para um sólido elástico.



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

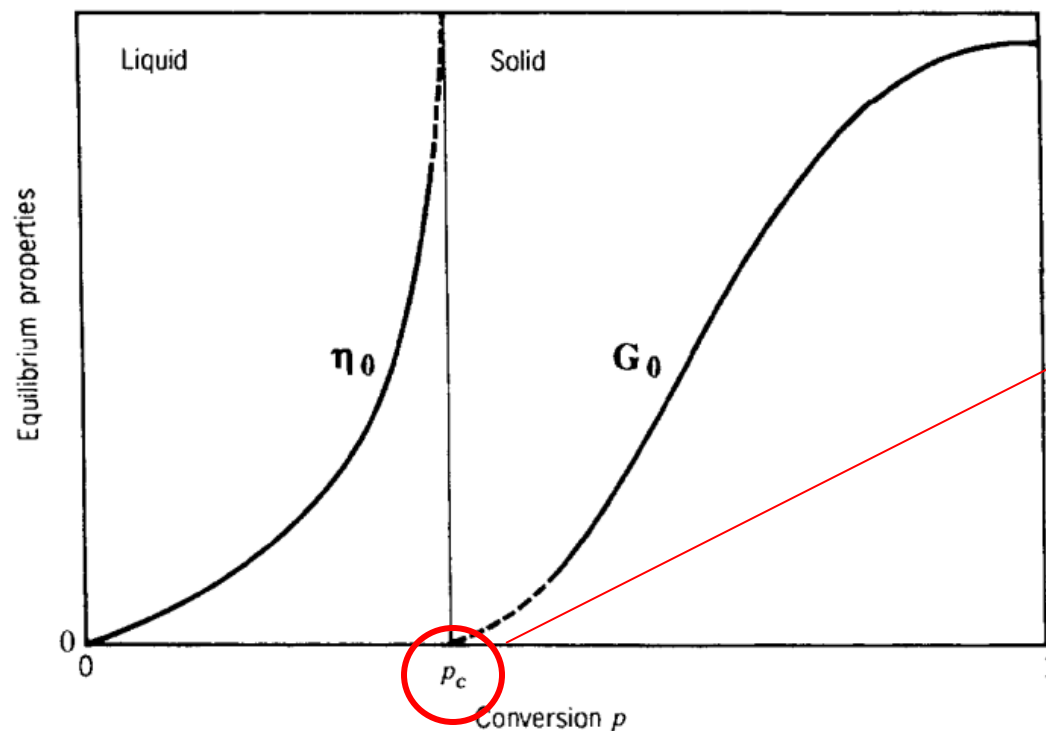
Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Géis Poliméricos

As propriedades reológicas mudam de um líquido viscoso para um sólido elástico.



No ponto de gelificação a viscosidade diverge para o infinito e o módulo elástico tende a zero.

Introdução

Modelos  
Ideais

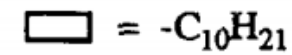
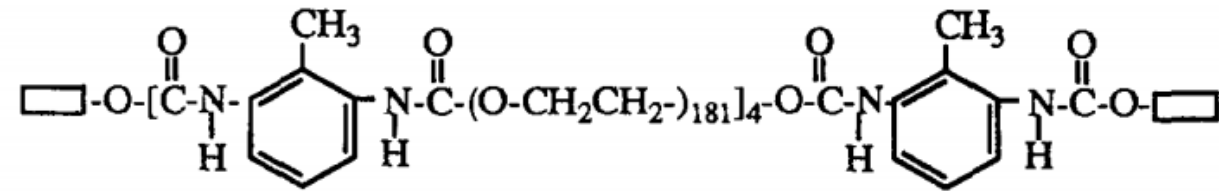
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Géis Poliméricos - Polímeros Telequéricos



Introdução

Modelos  
Ideais

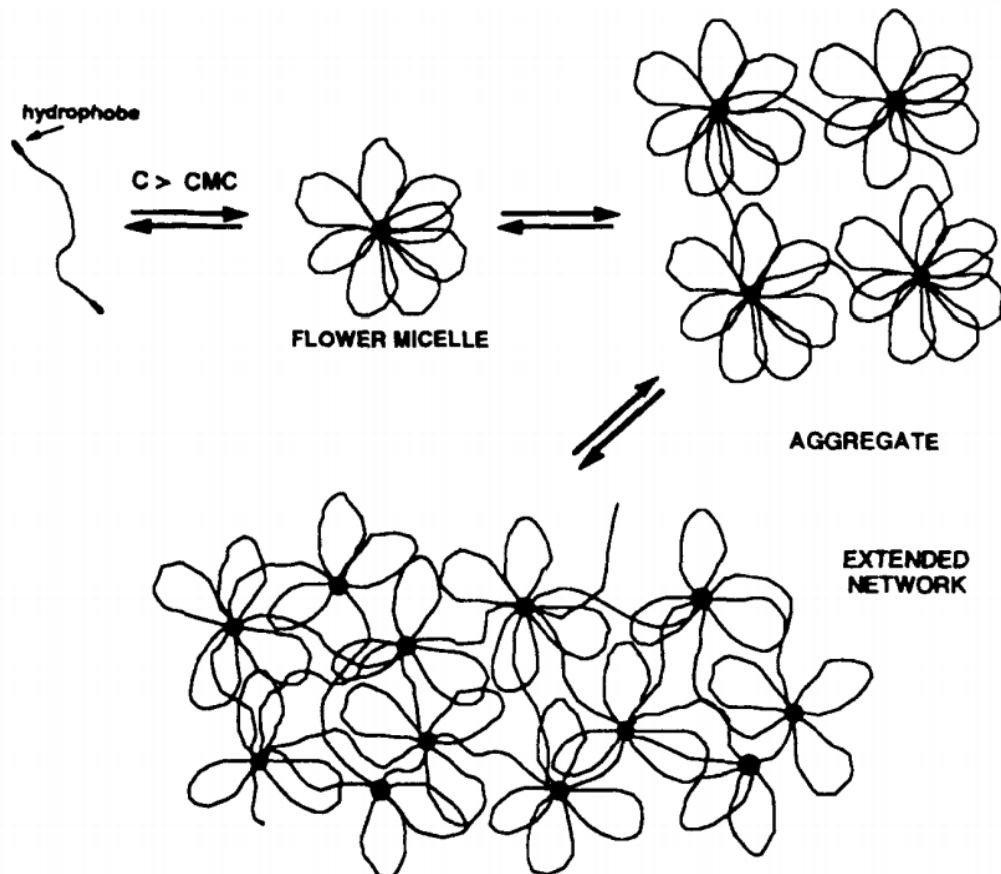
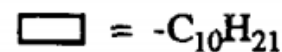
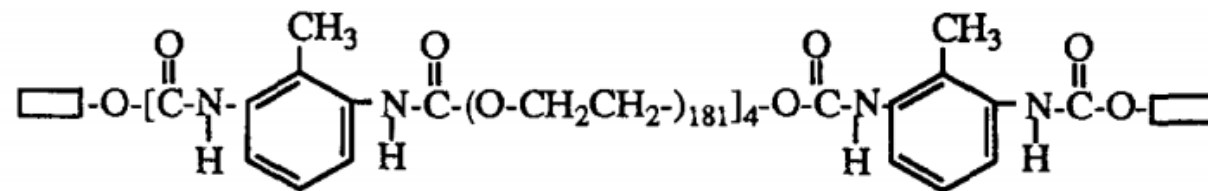
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Géis Poliméricos - Polímeros Telequéricos



Introdução

Modelos  
Ideais

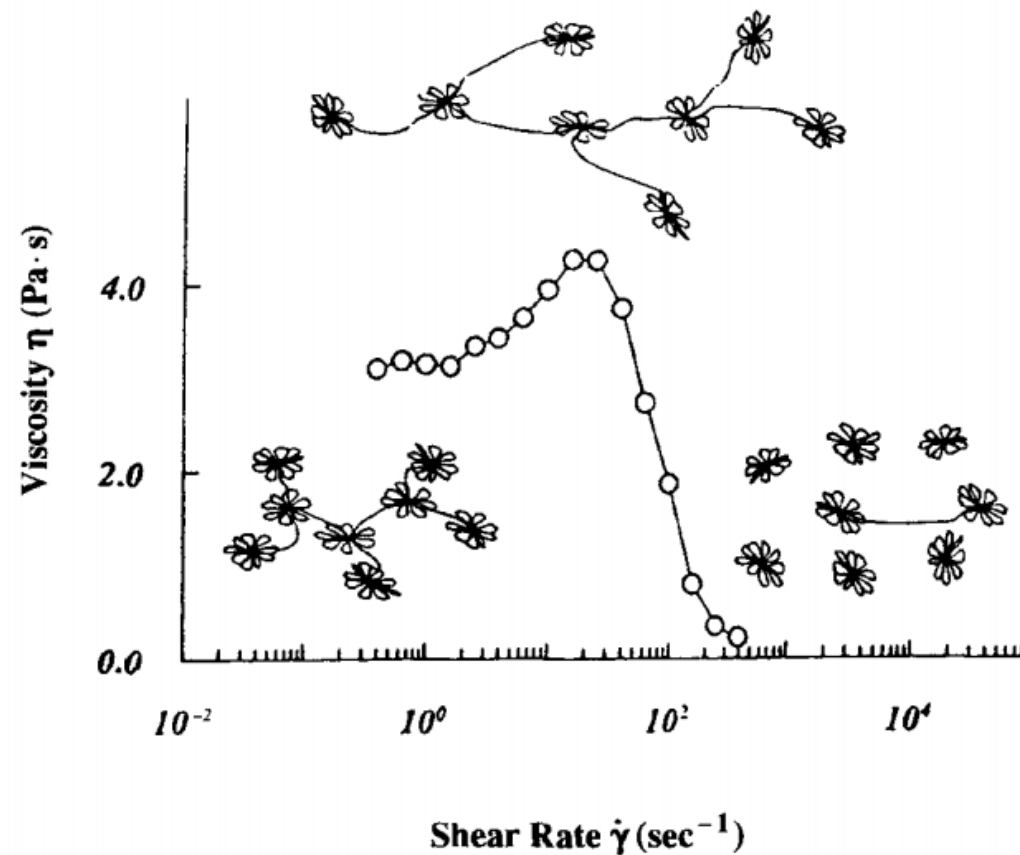
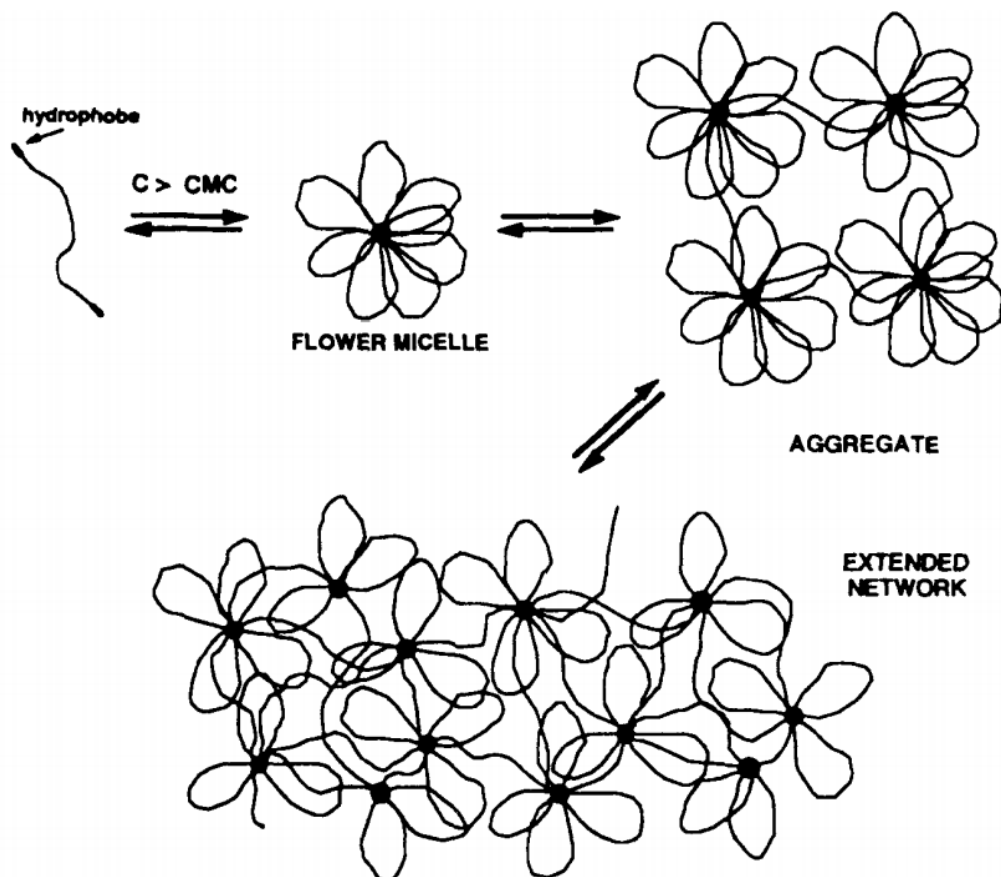
Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Géis Poliméricos - Polímeros Telequéricos



Introdução

Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas

## Géis Poliméricos - Polímeros Telequéricos

J|A|C|S  
COMMUNICATIONS

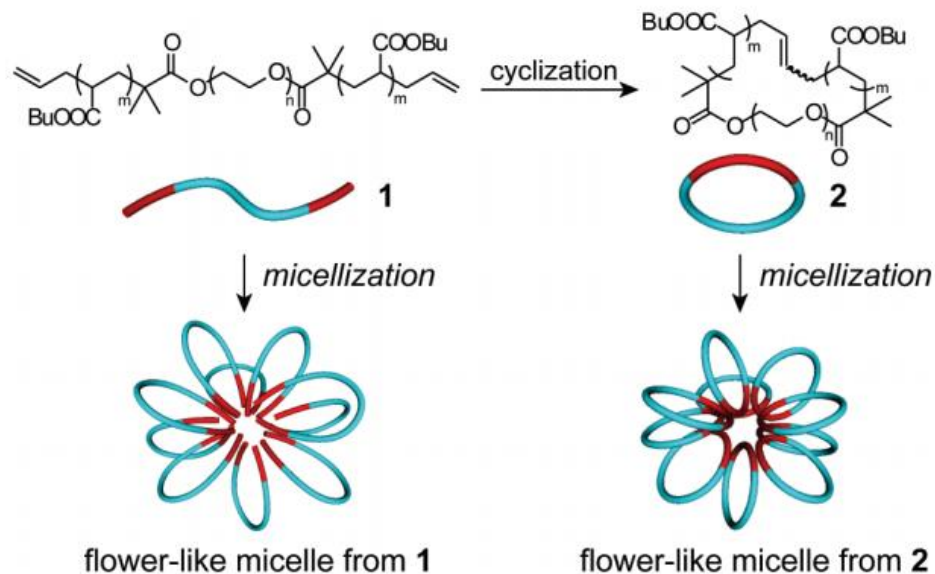
Published on Web 07/13/2010

### Topology-Directed Control on Thermal Stability: Micelles Formed from Linear and Cyclized Amphiphilic Block Copolymers

Satoshi Honda, Takuya Yamamoto,\* and Yasuyuki Tezuka\*

*Department of Organic and Polymeric Materials, Tokyo Institute of Technology, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan*

**Scheme 1.** Chemical Structures of Linear (1) and Cyclic (2) Amphiphilic Block Copolymers and Schematic Representation for the Formation of Flower-like Micelles



flower-like micelle from 1

flower-like micelle from 2

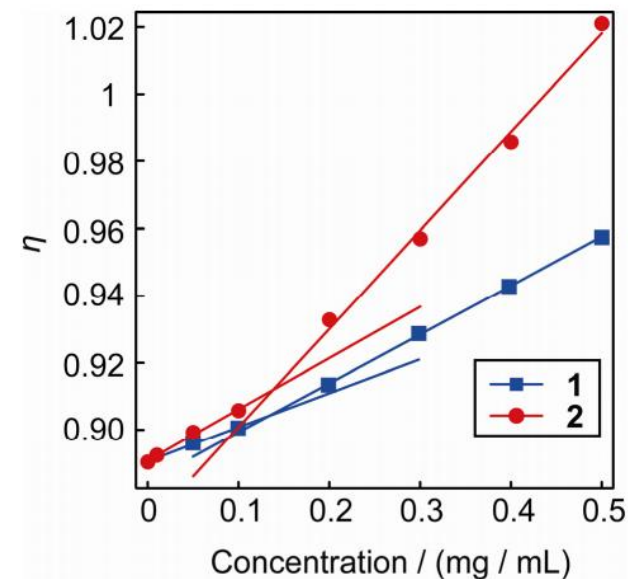
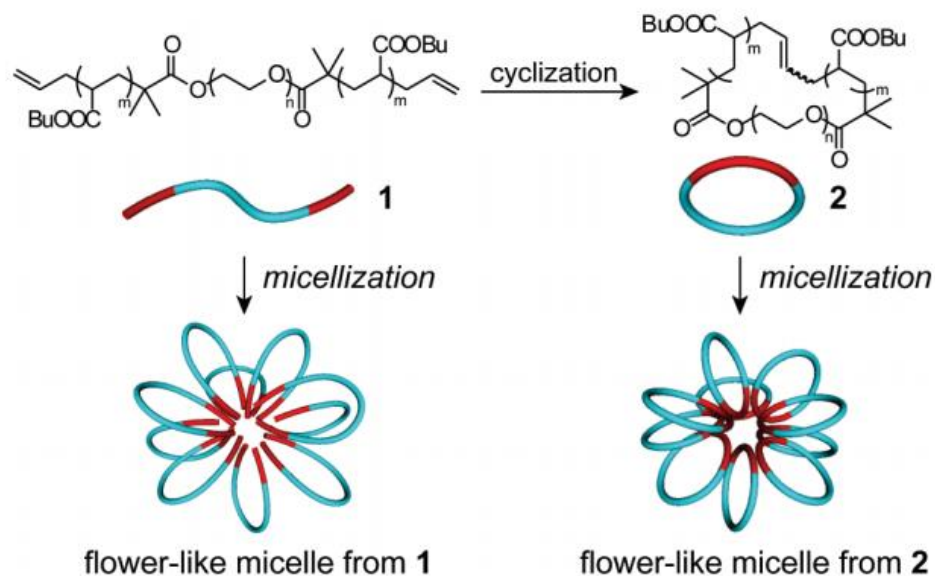
## Géis Poliméricos - Polímeros Telequéricos

J|A|C|S  
COMMUNICATIONS

Published on Web 07/13/2010

## Topology-Directed Control on Thermal Stability: Micelles Formed from Linear and Cyclized Amphiphilic Block Copolymers

Satoshi Honda, Takuya Yamamoto,\* and Yasuyuki Tezuka\*

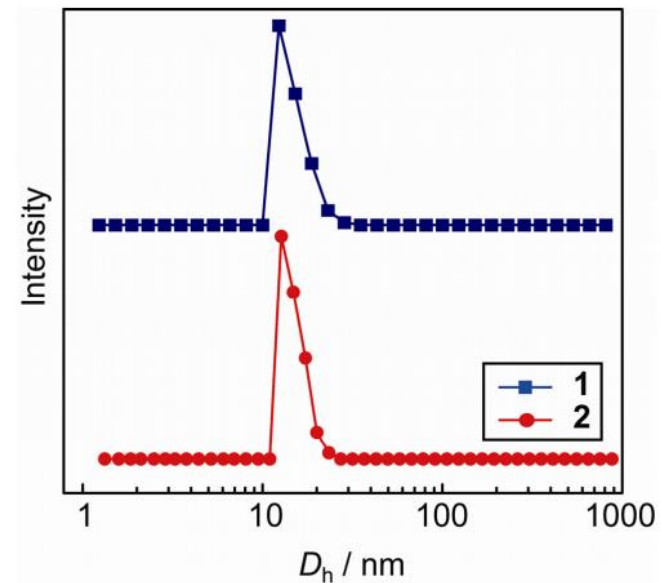
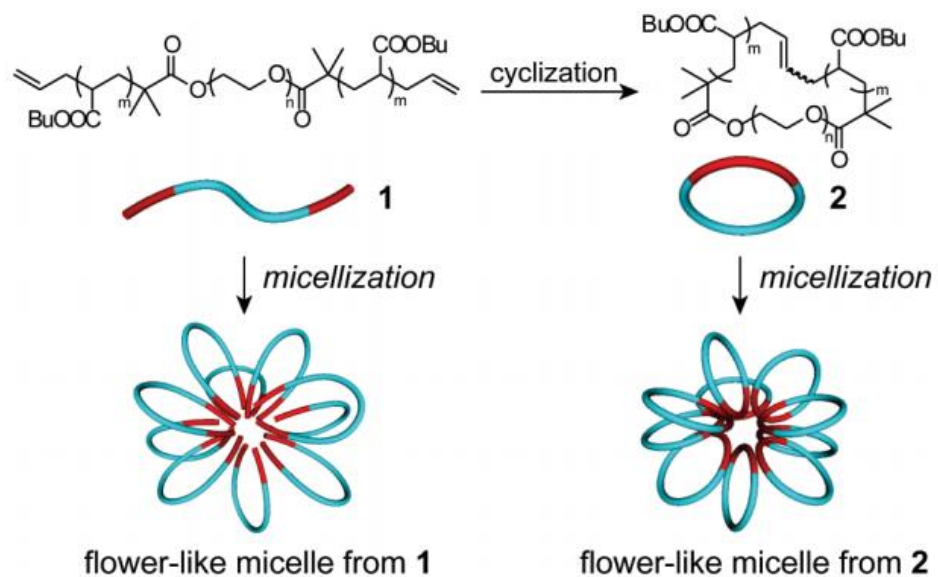
*Department of Organic and Polymeric Materials, Tokyo Institute of Technology, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan***Scheme 1.** Chemical Structures of Linear (1) and Cyclic (2) Amphiphilic Block Copolymers and Schematic Representation for the Formation of Flower-like Micelles

Plots of viscosity versus concentration. Blue square: 1. Red circle: 2.

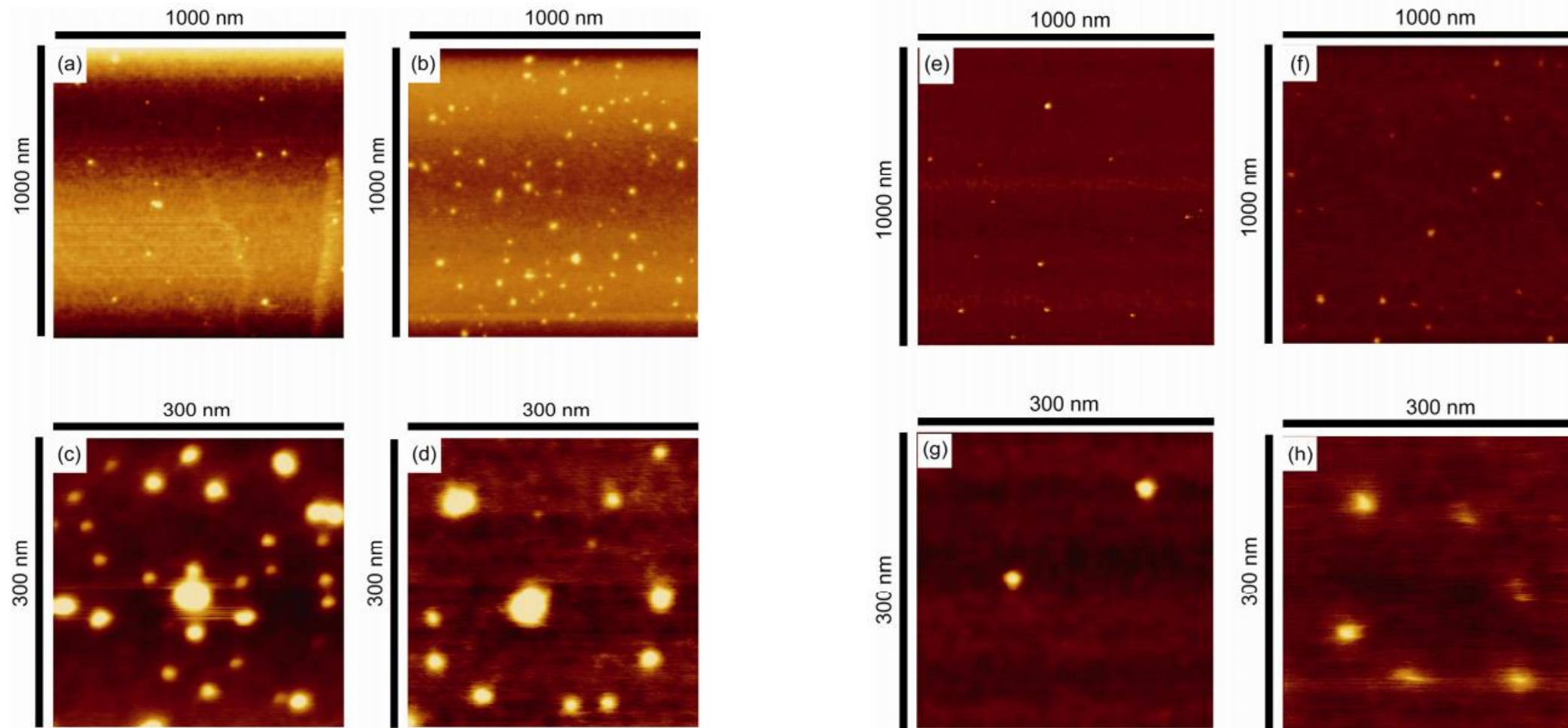


## Géis Poliméricos - Polímeros Telequéricos

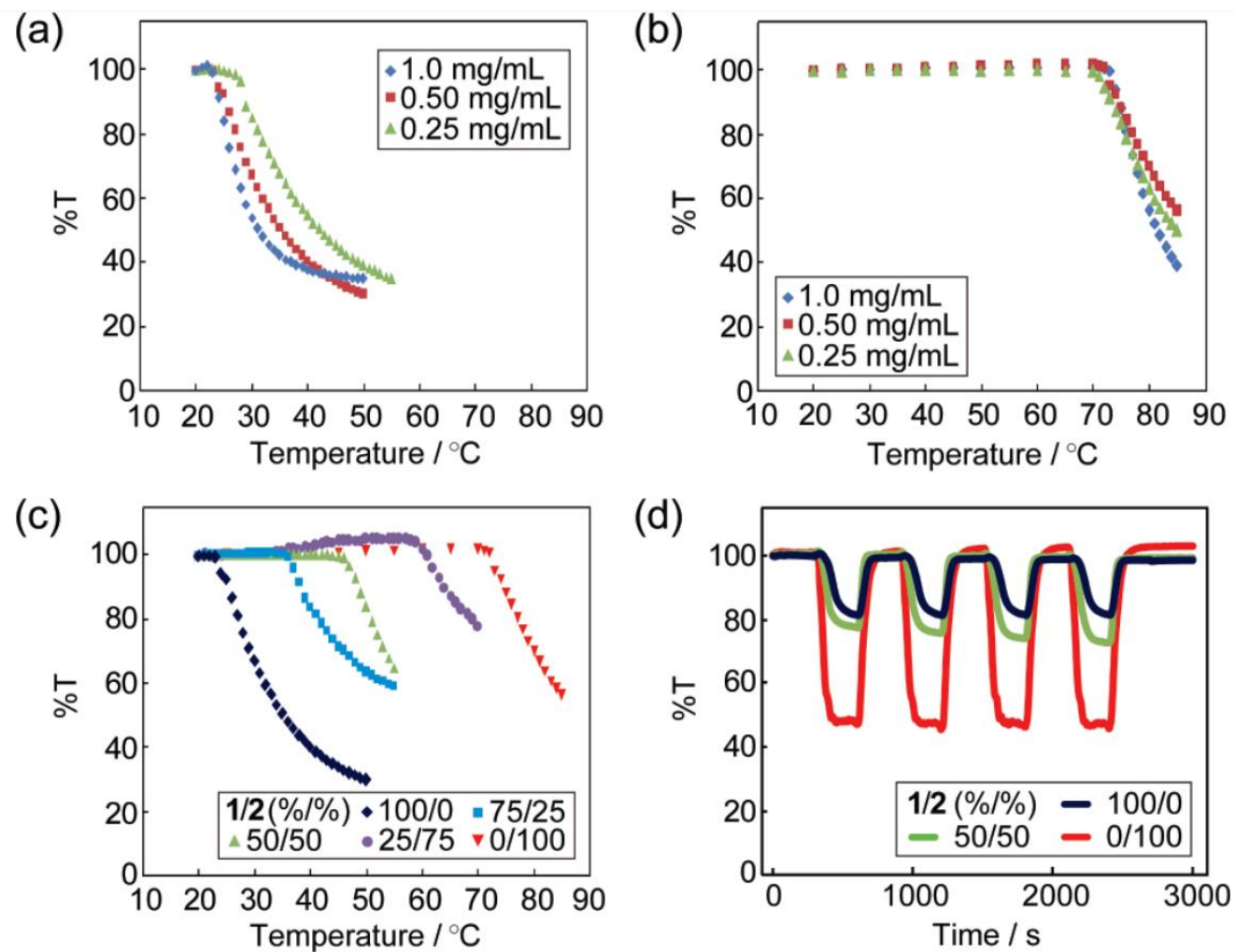
**Scheme 1.** Chemical Structures of Linear (1) and Cyclic (2) Amphiphilic Block Copolymers and Schematic Representation for the Formation of Flower-like Micelles



Number average  $D_h$  distributions for the micelles. Blue square: 1. Red circle: 2.



**Figure S5.** AFM images of spin-coated aqueous solutions of micelles from **1** and **2**. (a) **1** ( $M_n = 800-2600-800$ ), (b) **2** ( $M_n = 1600-2600$ ), (c) **1** ( $M_n = 800-2600-800$ ), (d) **2** ( $M_n = 1600-2600$ ), (e) **1** ( $M_n = 700-2800-700$ ), (f) **2** ( $M_n = 1400-2800$ ), (g) **1** ( $M_n = 700-2800-700$ ), and (h) **2** ( $M_n = 1400-2800$ ).



**Figure 1.** Turbidity measurements. Temperature dependence of (a) **1** and (b) **2** (1.0, 0.50, 0.25 mg/mL). (c) Temperature dependence of homoassemblies and coassemblies (25%/75%, 50%/50%, and 75%/25%). The total concentration of **1** and **2** in a solution was 0.50 mg/mL. (d) Response to heating and cooling (0.50 mg/mL). The temperature was equilibrated at  $T_c - 5$  °C prior to the measurements, set to  $T_c + 5$  °C at 300, 900, 1500, and 2100 s, and reset to  $T_c - 5$  °C at 600, 1200, 1800, and 2400 s.

Introdução

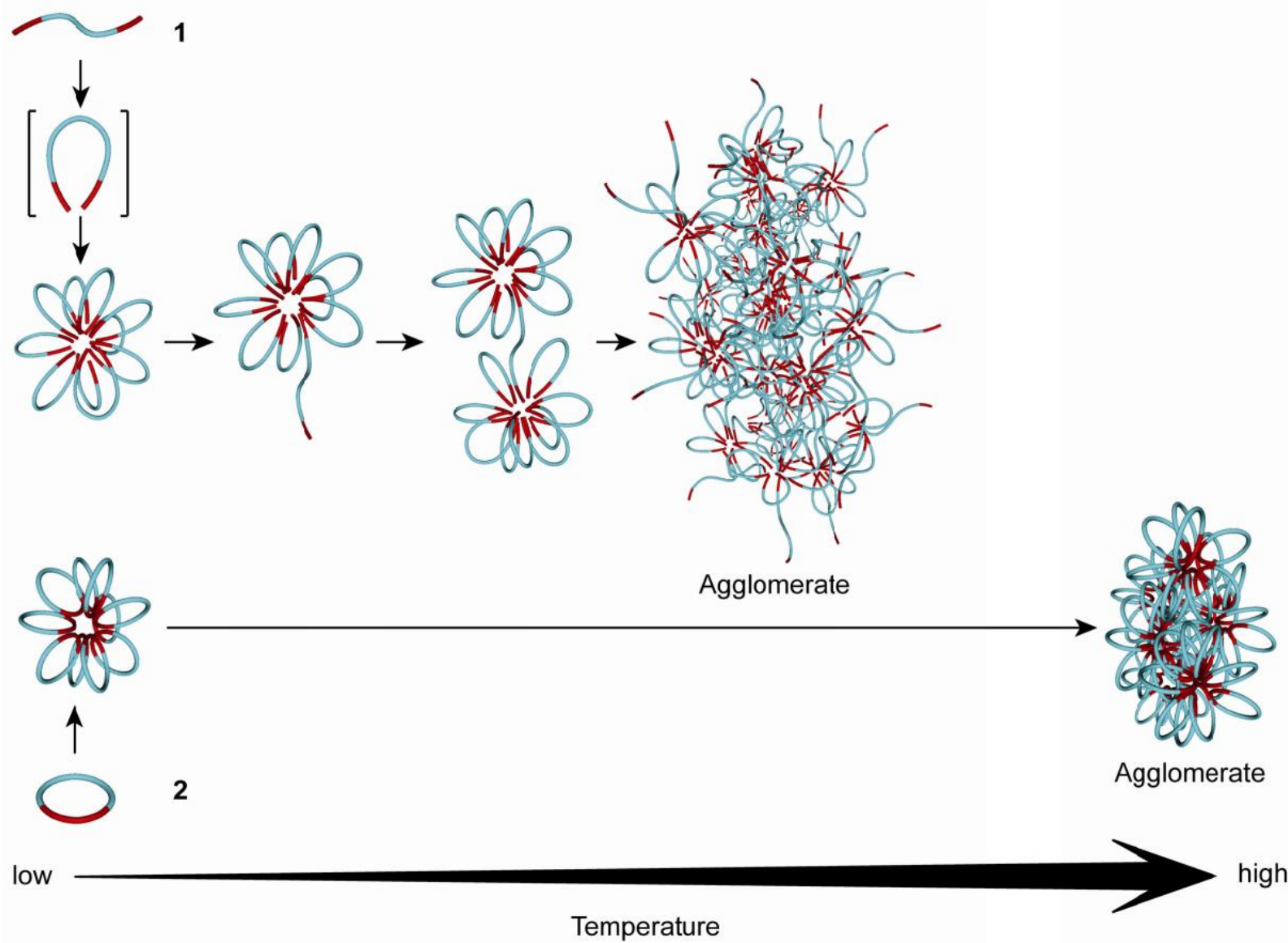
Modelos  
Ideais

Viscosimetria  
Capilar

Reologia  
Fluidos Newtonianos

Viscoelasticidade

Géis e espumas



# Reologia – Um vasto universo

Polímeros

Géis

Espumas

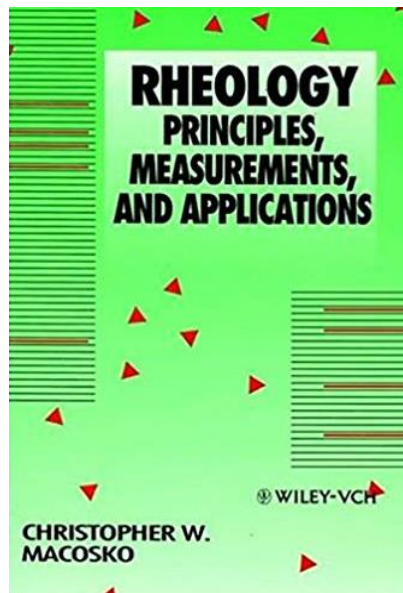
Suspensões

Cristais Líquidos

Emulsões

Surfactantes

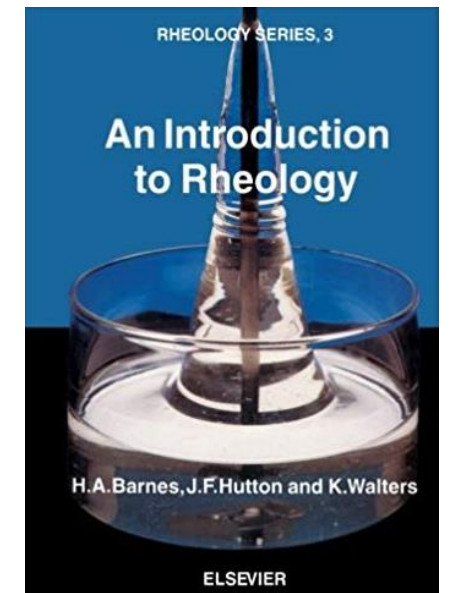
Insira aqui seu sistema



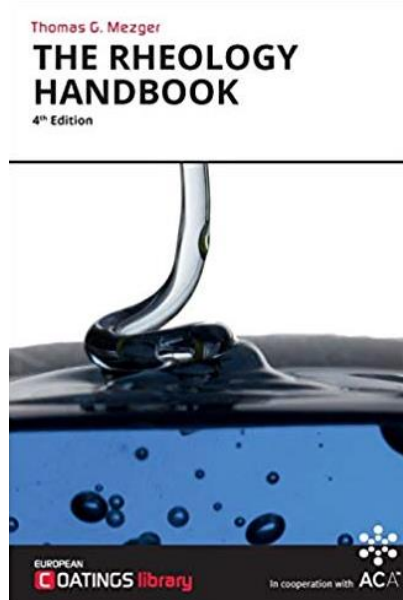
Christopher W. Macosko



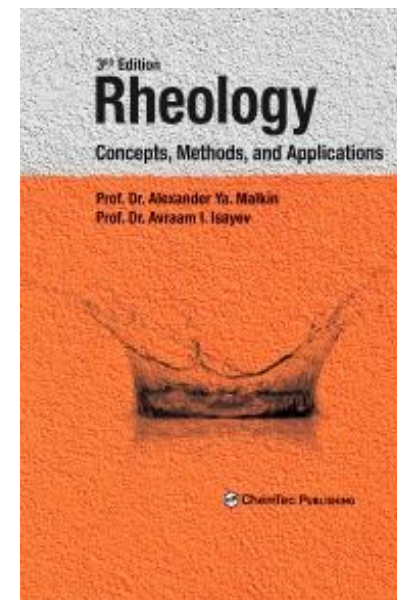
Ronald G. Larson



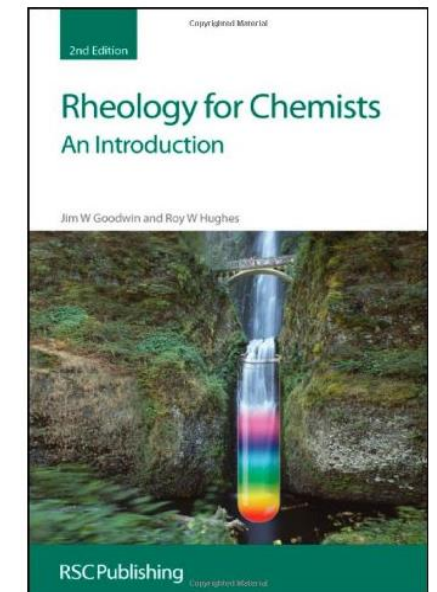
Barnes, Hutton & Walters



Thomas G. Mezger

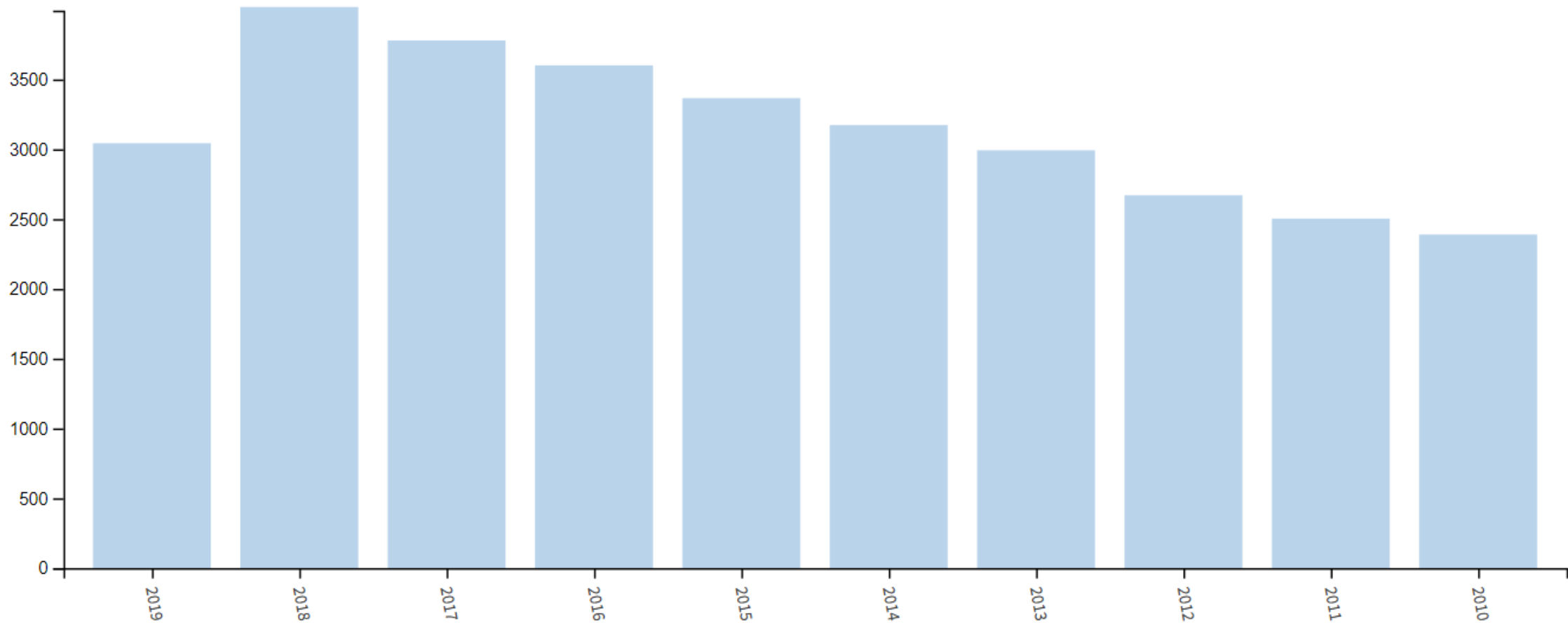


Malkin & Isayev

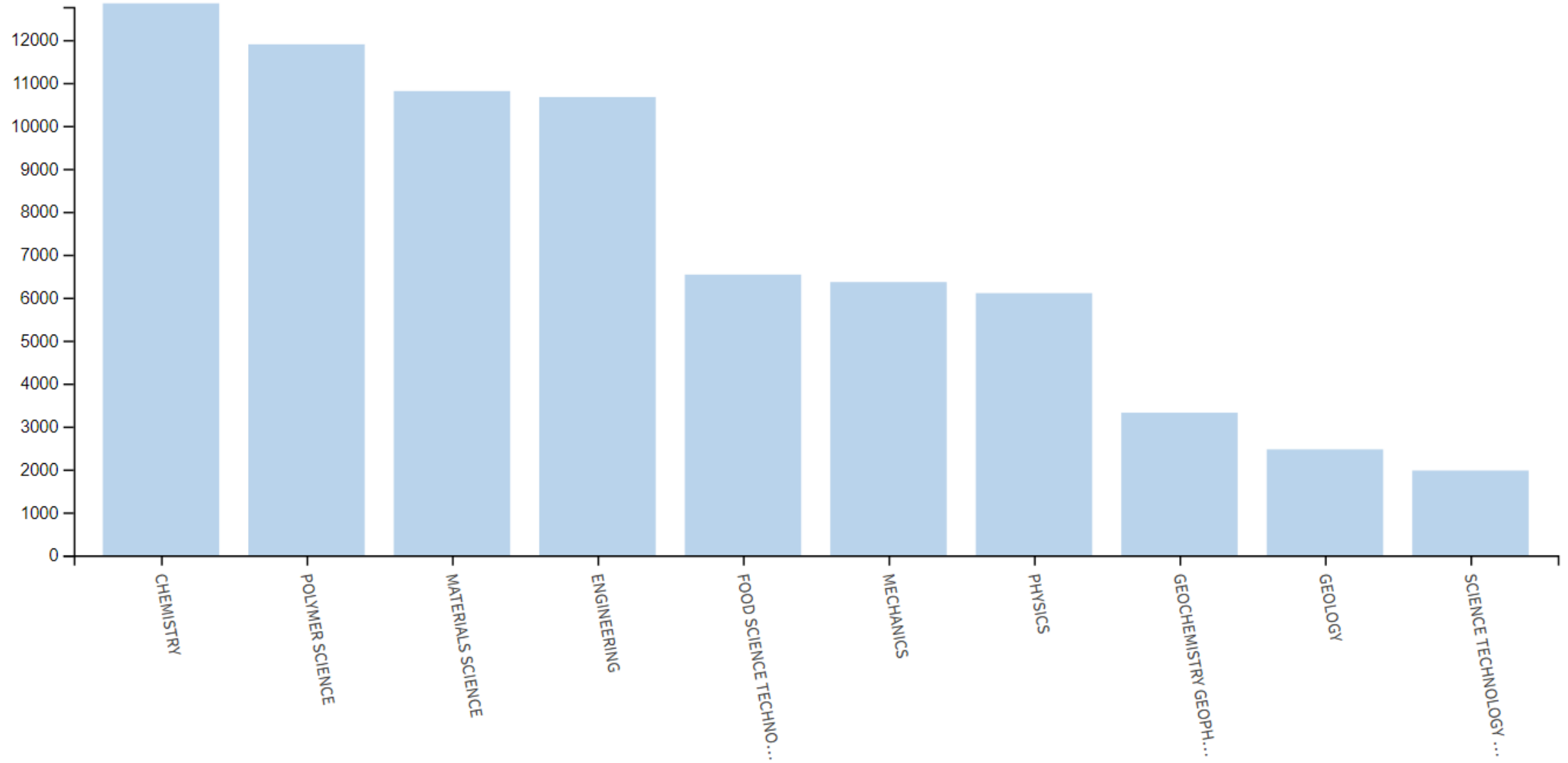


Jim Goodwin & Roy Hughes

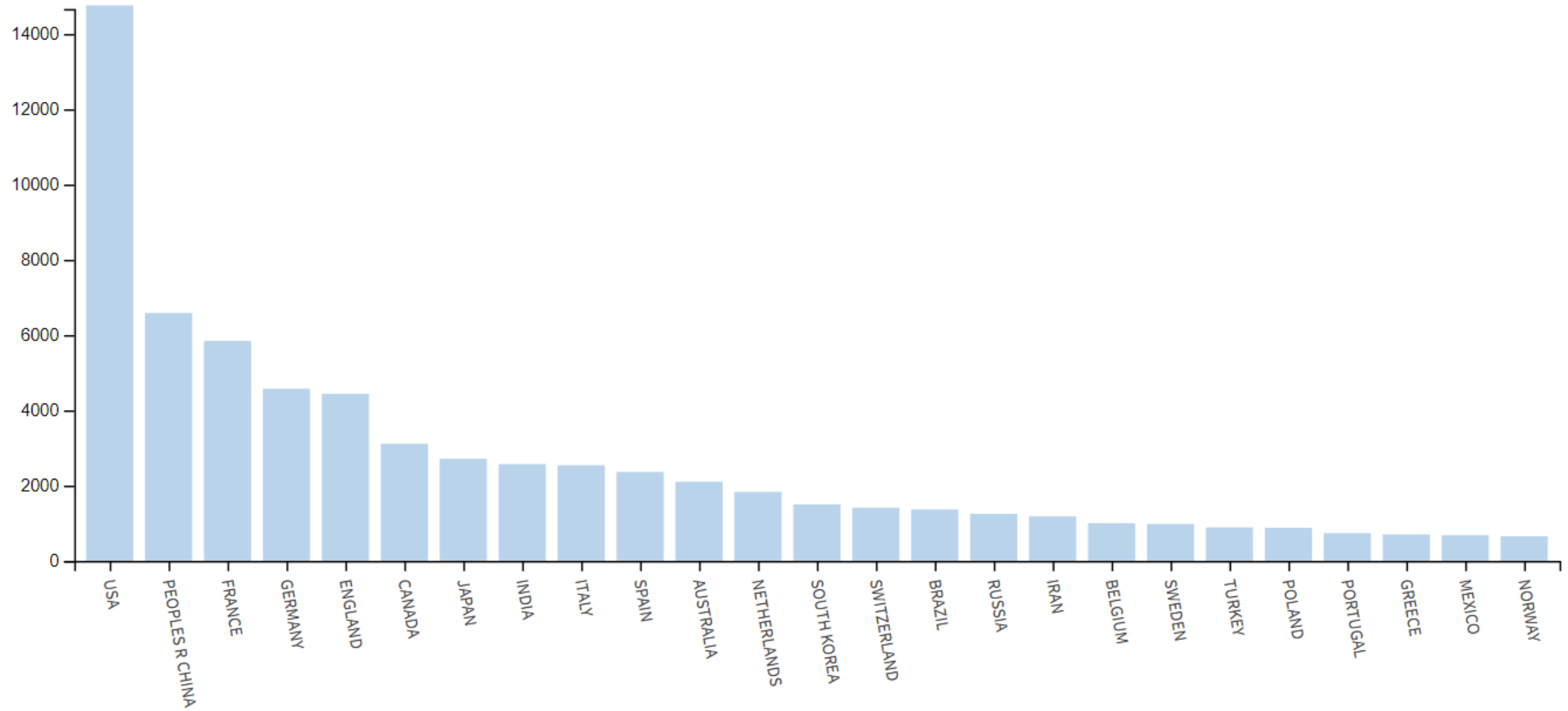
# Pesquisa: "Rheology"



# Pesquisa: "Rheology"



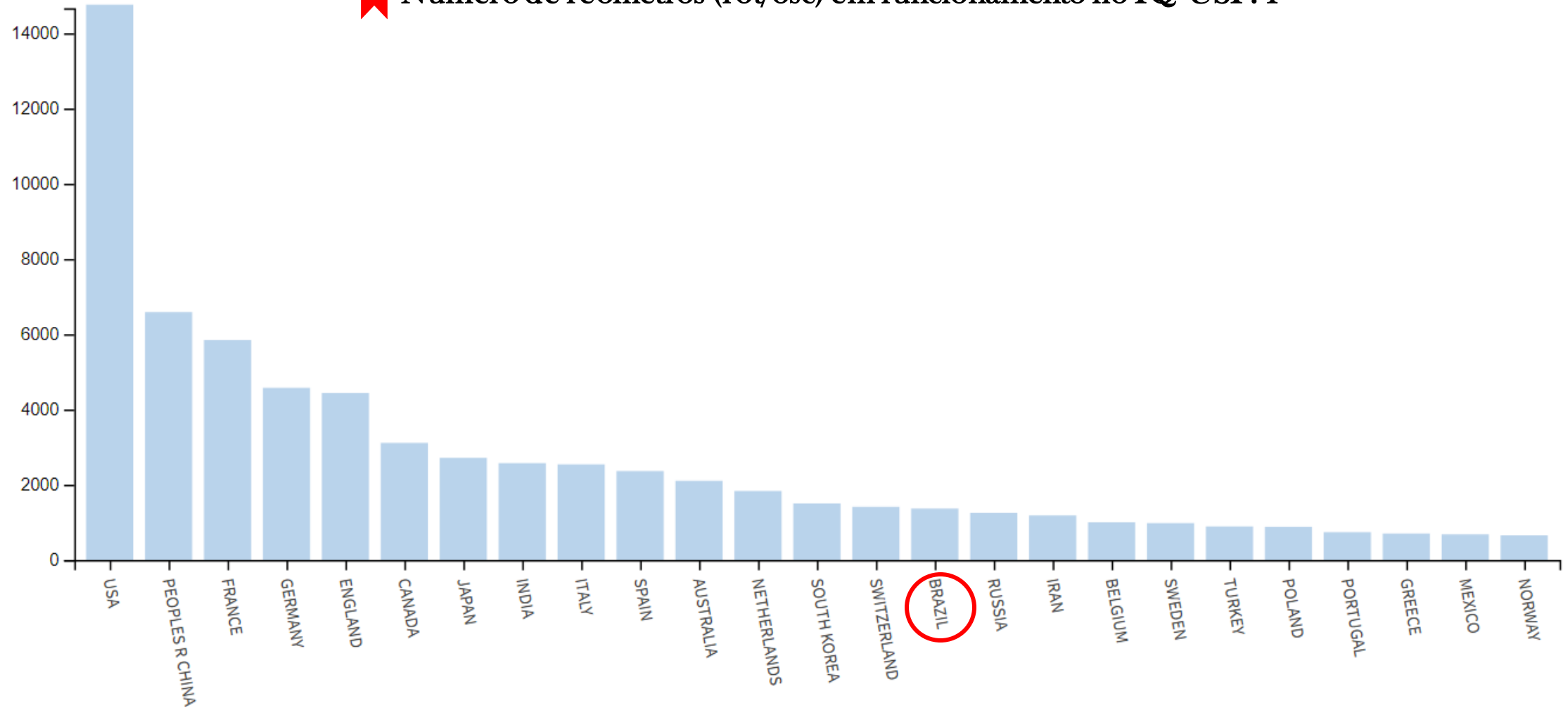
# Pesquisa: "Rheology"



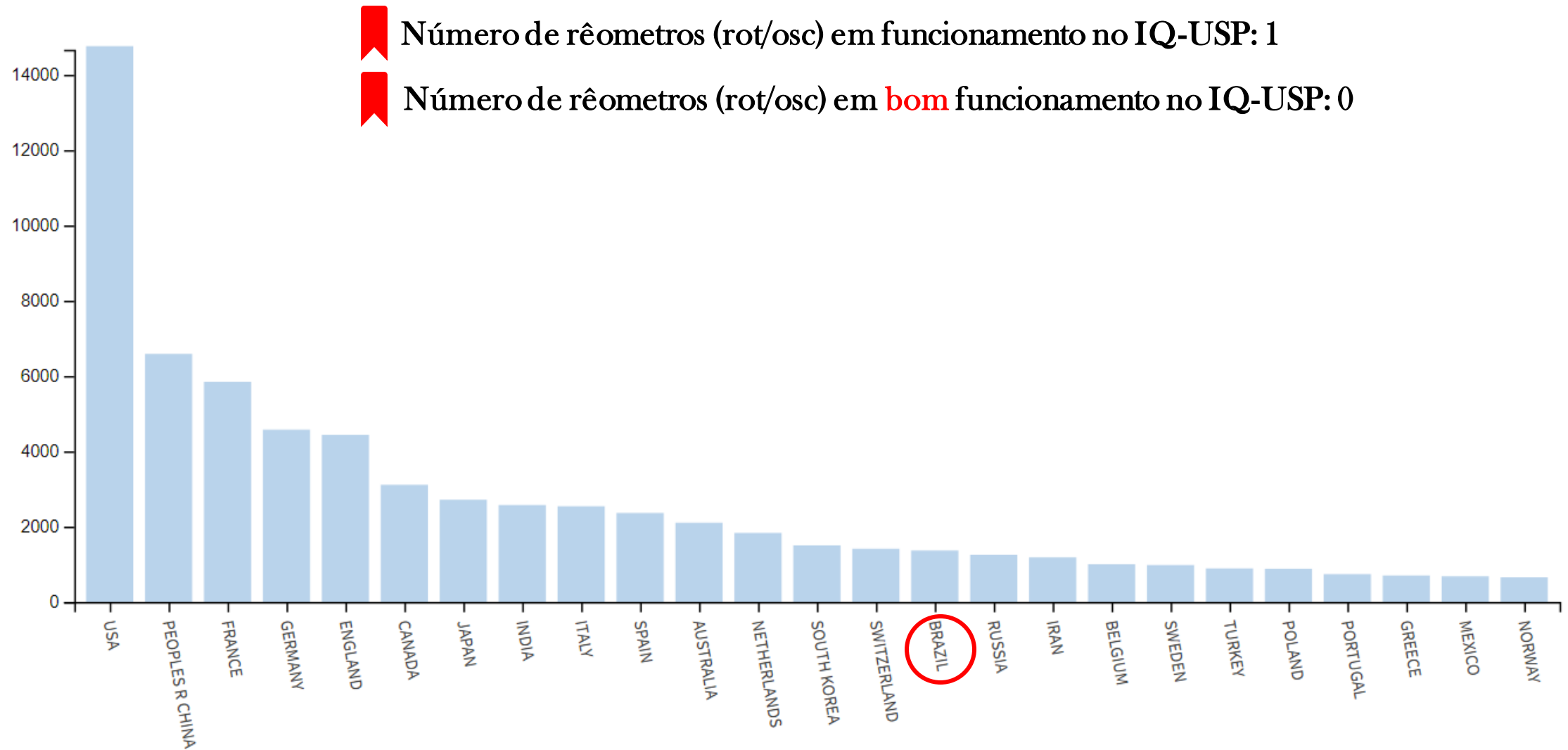


# Pesquisa: "Rheology"

Número de reômetros (rot/osc) em funcionamento no IQ-USP: 1



# Pesquisa: "Rheology"



# Pesquisa: "Rheology"

