

# **VISCOSIDADE**

PCC-5726

Antonio Figueiredo & Renata Monte

# Objetivos da aula

- Introduzir o conceito de viscosidade para materiais “não sólidos” (serão melhor trabalhados na disciplina de reologia).
- Introduzir os conceitos de fluência e relaxação e entender como estes comportamentos são afetados por características dos materiais e condições ambientais.

# DEFORMAÇÃO VISCOSA

- Os líquidos sempre apresentam mecanismo de deformação dependente do tempo (**deformação viscosa**)
- Os sólidos amorfos ou parcialmente amorfos apresentam deformação viscosa com mais intensidade que os materiais cristalinos
  - Dependem do nível de tensão.
- Um corpo não consegue suportar uma tensão de cisalhamento atuante

# DEFORMAÇÃO VISCOSA

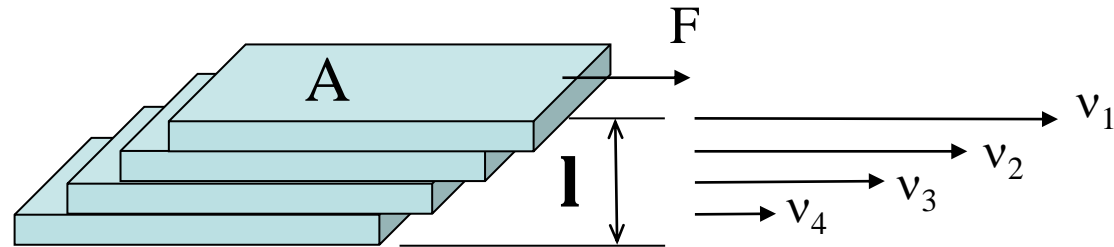
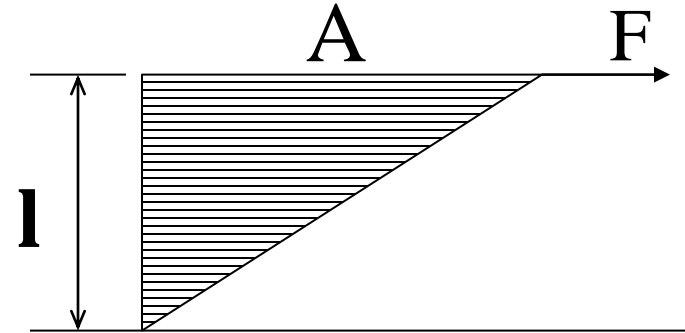
- Deformação viscosa ocorre com o passar do tempo com grande variação de velocidade.
- Viscosidade: propriedade que mede a resistência ao escoamento  
(propriedade típica de um material viscoso)
- Resistência que um líquido apresenta durante o fluxo  
(Atrito interno)

# Fluído Newtoniano

$$\tau = Fs/A$$

$$\tau = \eta \frac{dv}{dl}$$

$$\eta = \tau / \left( \frac{dv}{dl} \right)$$



$\tau$  = tensão de cisalhamento

$v$  = velocidade

$\eta$  = viscosidade (Pa.s) (N.s/m<sup>2</sup>)

# Fluído Newtoniano

$$\tau = \eta \frac{dv}{dl}$$

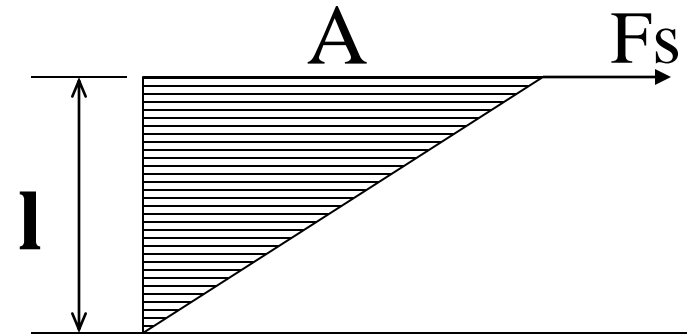
$$dv = \frac{dx}{dt}$$

$$\tau = F_s \cdot A$$

$$\frac{dv}{dl} = \frac{dx/dt}{dl}$$

$$\frac{dv}{dl} = \frac{d\gamma}{dt}$$

$$d\gamma = \frac{dx}{dl}$$

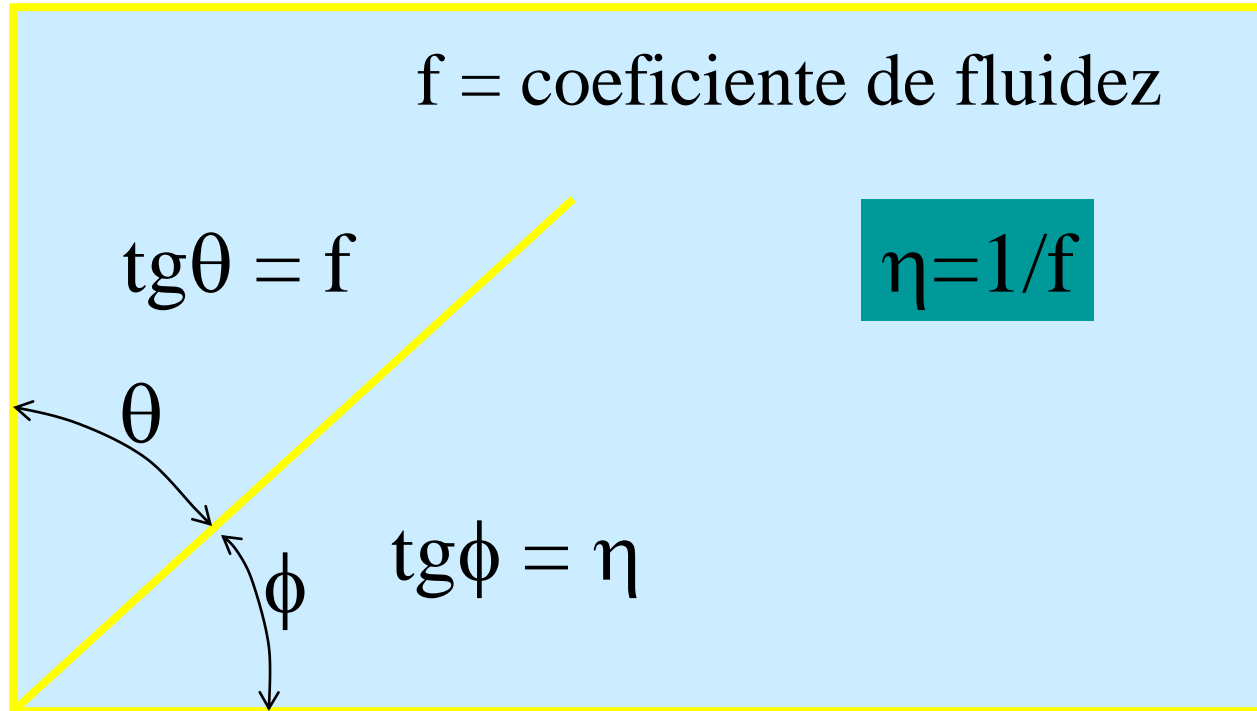


$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} = \eta \cdot \gamma$$

$$(\sigma = E \cdot \epsilon)$$

$\gamma$  = taxa de variação de deformação por cortante no tempo

# Fluído Newtoniano



$\tau$  = tensão de cisalhamento

$\eta$  = viscosidade (Pa.s) ( $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ )

$\eta$  Viscosidade é o “coeficiente de rigidez” do fluido ao movimento

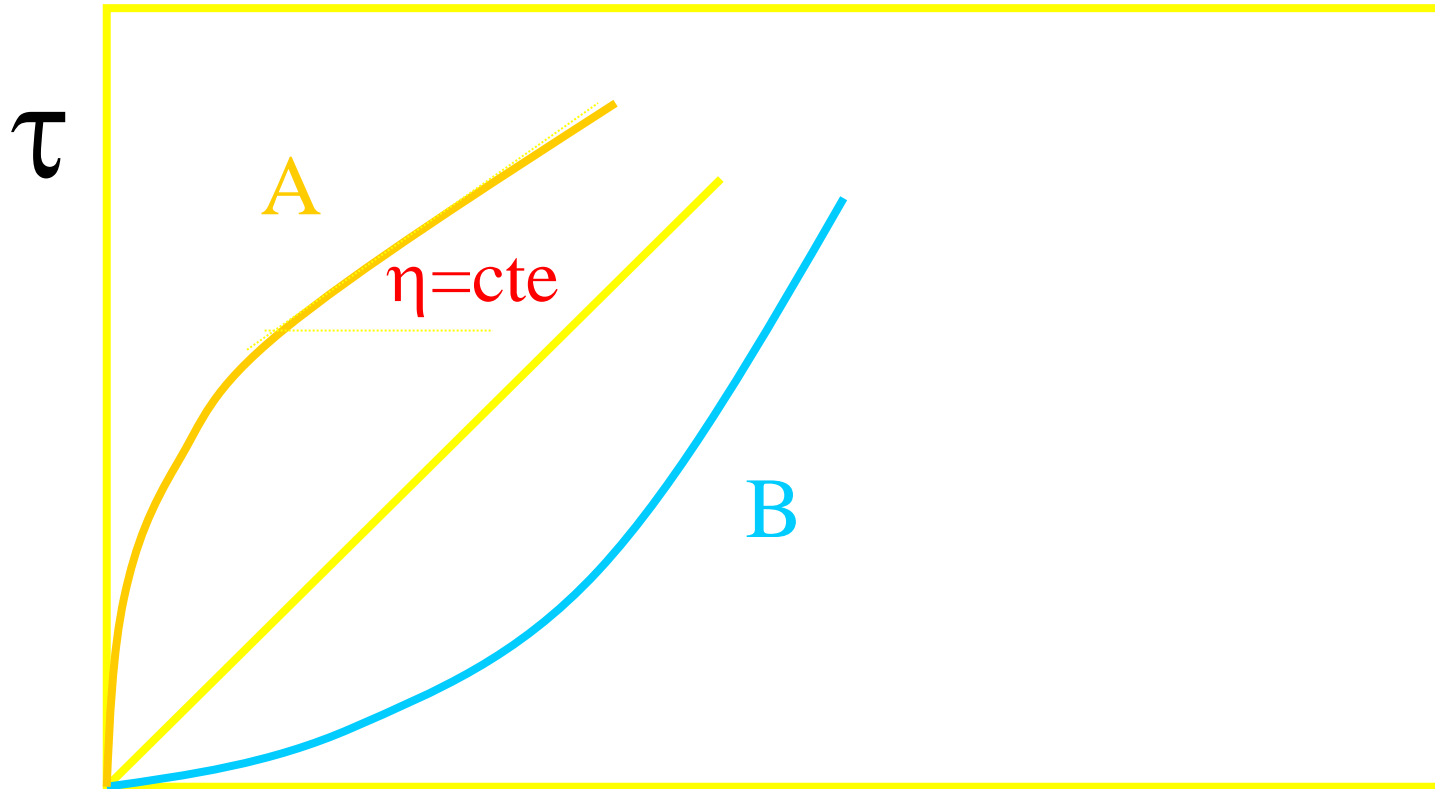
$\gamma$  = taxa de variação de deformação cortante no tempo

# Materiais não Newtonianos

- Suspensões concentradas, polímeros e materiais moleculares complexos apresentam comportamento Não-Newtoniano.
- Variações da viscosidade podem ocorrer com a taxa de variação de deformação no tempo ( $\dot{\gamma}$ ) ou com a intensidade da tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e com o tempo ( $t$ ) além da temperatura ( $T$ ).



# Materiais não Newtonianos

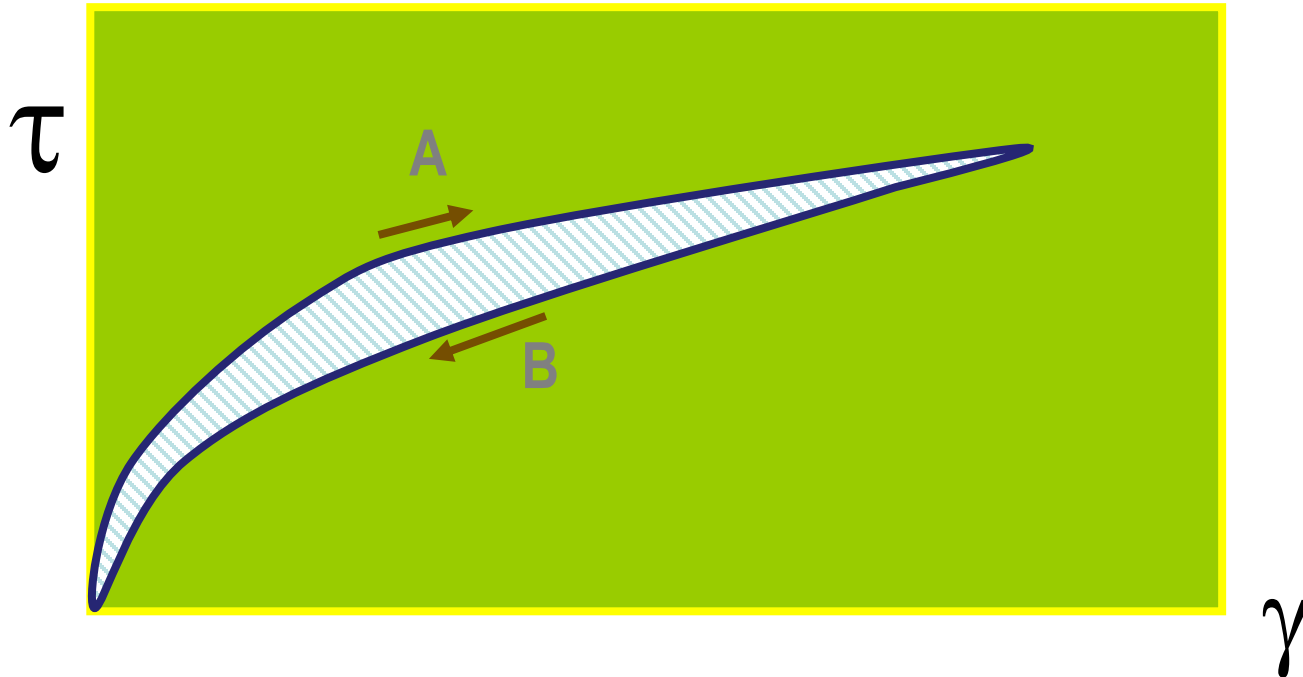


A = pseudo-plástico – ketchup, tintas

B = dilatante – maisena, algumas argilas e areias

# Materiais não Newtonianos

## Fenômenos dependentes do tempo



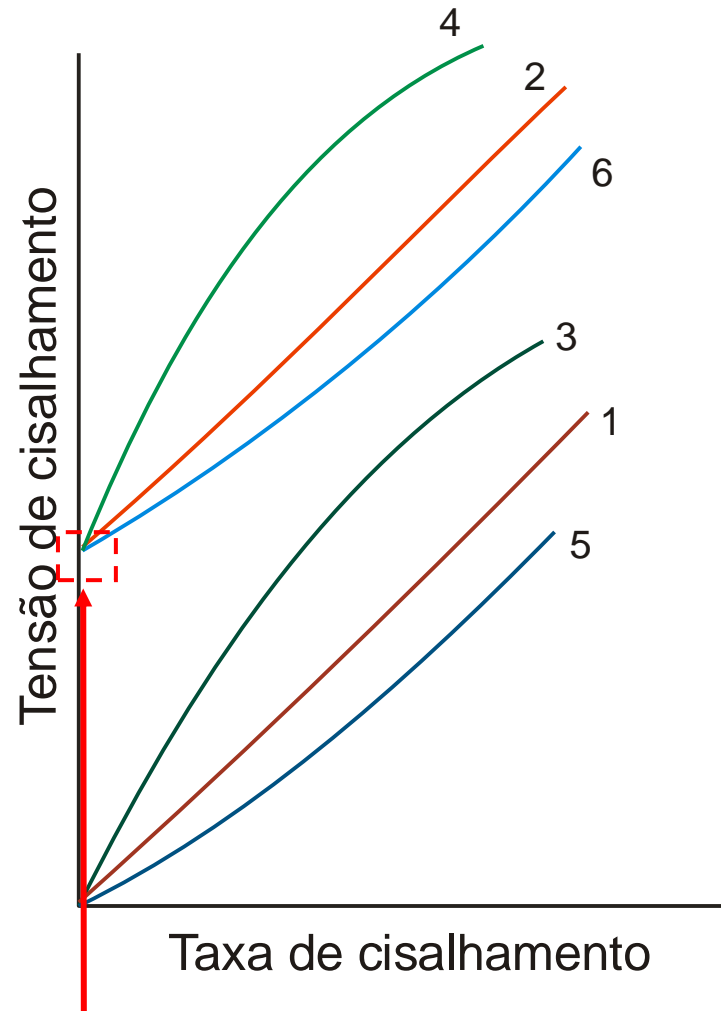
A = quebra rápida de floculações na mistura de uma suspensão

B = reconstrução lenta de floculações na mistura de uma suspensão

# Comportamentos reológicos básicos

Possibilidades reológicas são ilimitadas

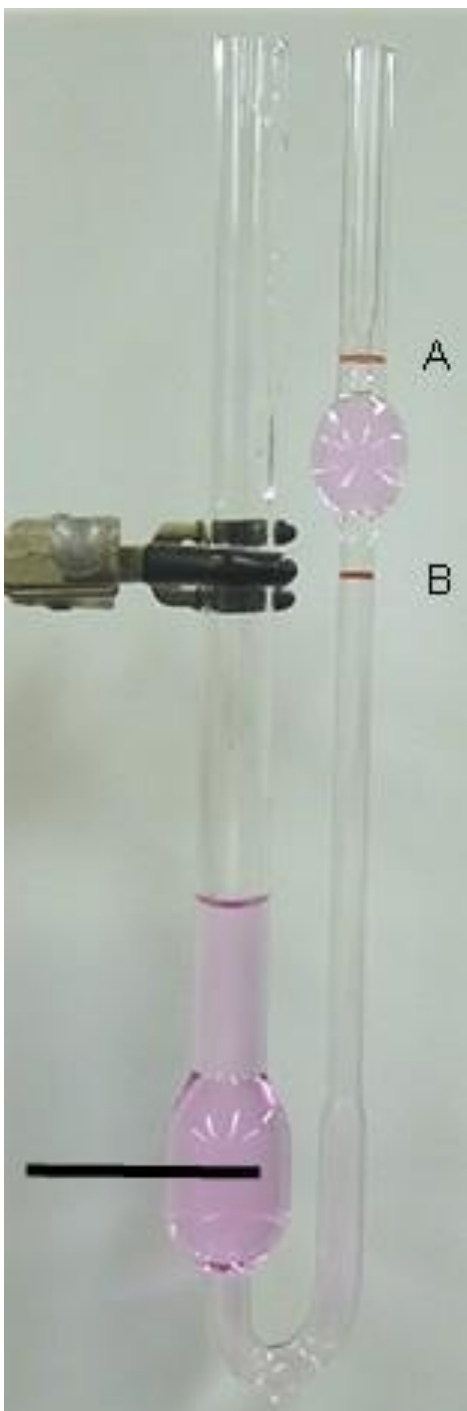
- (1) newtoniano
- (2) de Bingham
- (3) pseudoplástico
- (4) pseudoplástico com tensão de escoamento
- (5) dilatante
- (6) dilatante com tensão de escoamento



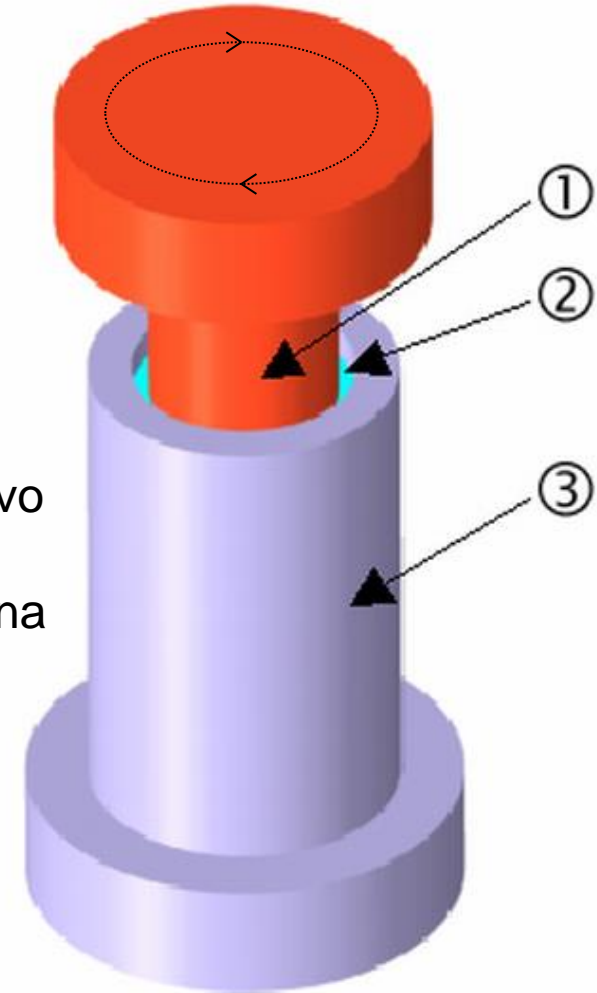
# Formas de medida: viscosímetros

Viscosímetro de Couette

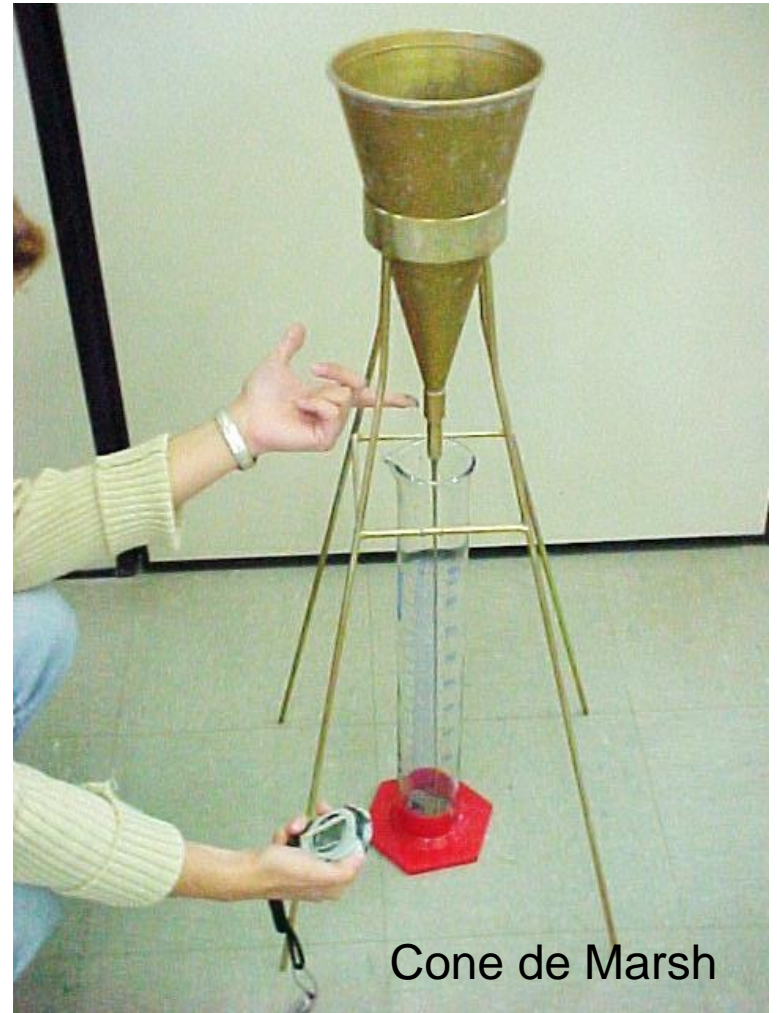
Viscosímetros  
em tubo U



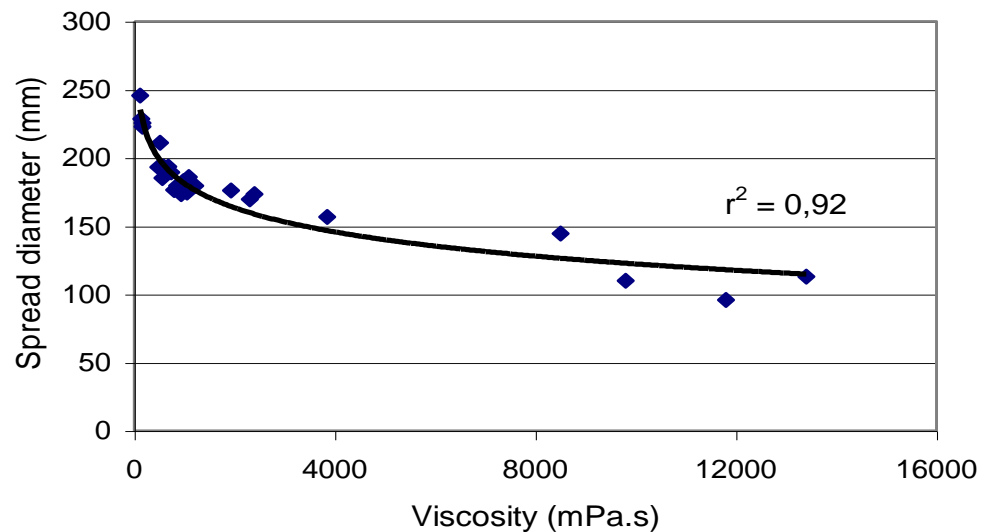
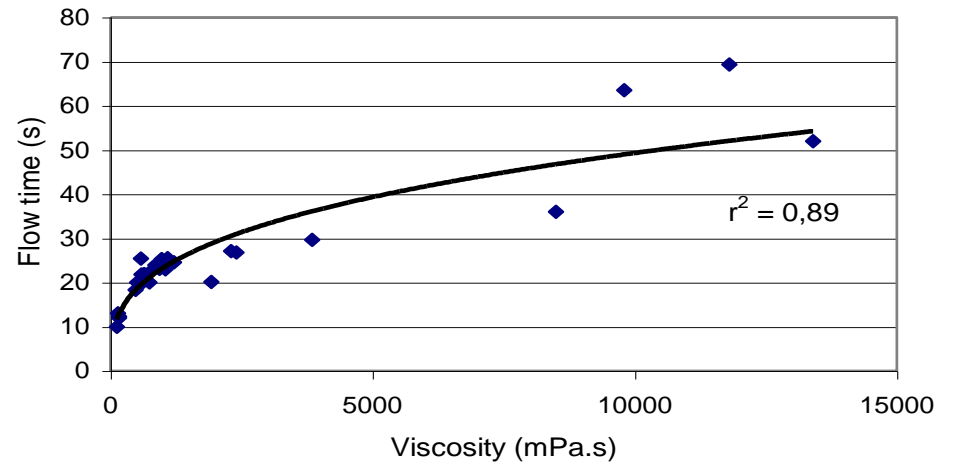
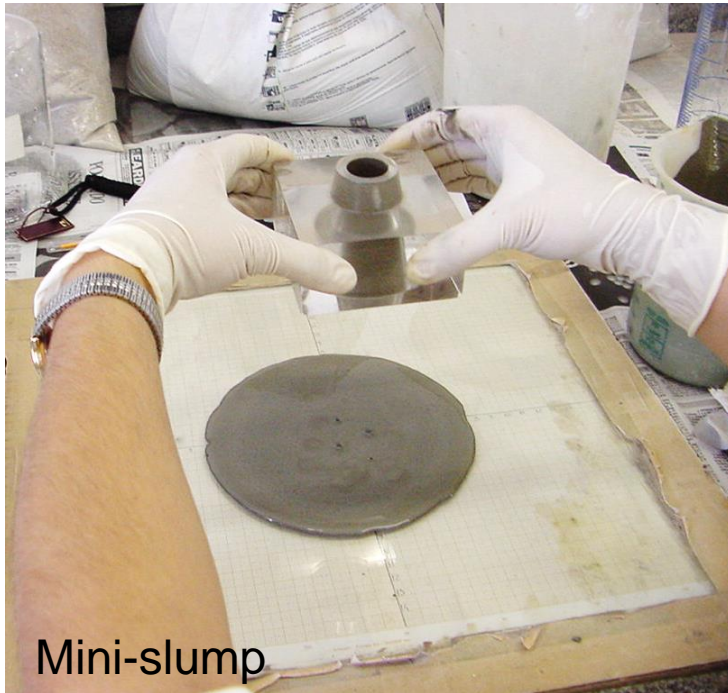
1. Cilindro rotativo
2. Fluido
3. Camisa externa



# Formas de medida: viscosímetros para pastas

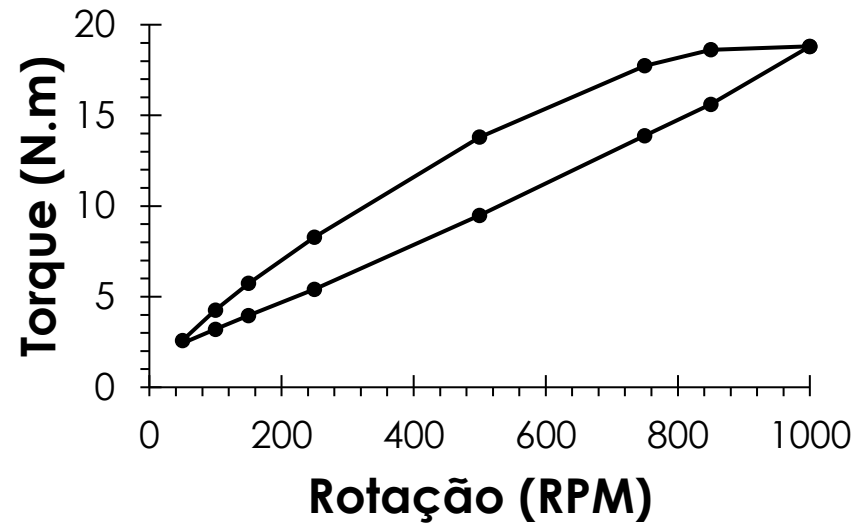
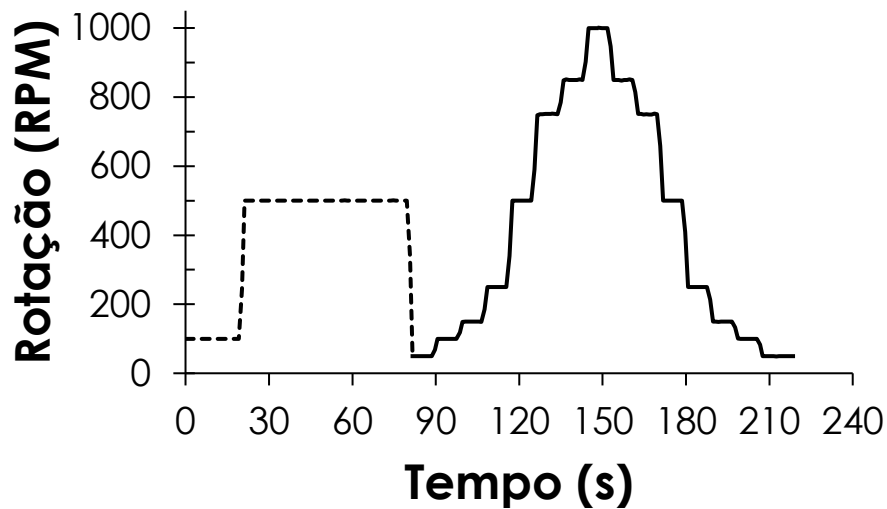


# Formas de medida: viscosímetros para pastas



# Concreto complica: Reometria rotacional

- Estudo utiliza cerca de 18L de concreto
- Impõe-se ciclos rotacionais (cisalhamento)
- Etapa de pré-homogeneização
- Variação de velocidade 50 – 1000 – 50 RPM
- Patamares de velocidade (9s)
- Obtenção do Torque (N.m) em função da rotação (RPM)



# Problema fundamental:

- Medida de grandezas fundamentais permitem modelagem.
- Concreto avaliado por reômetro rotacional fornece parâmetros empíricos como o abatimento.
- Grande vantagem: não é um ensaio monoponto.



# Comportamento viscoso dos materiais estruturais

- Fluência
- Relaxação
- Podem gerar riscos para a segurança/estabilidade e condições de serviço da obra.







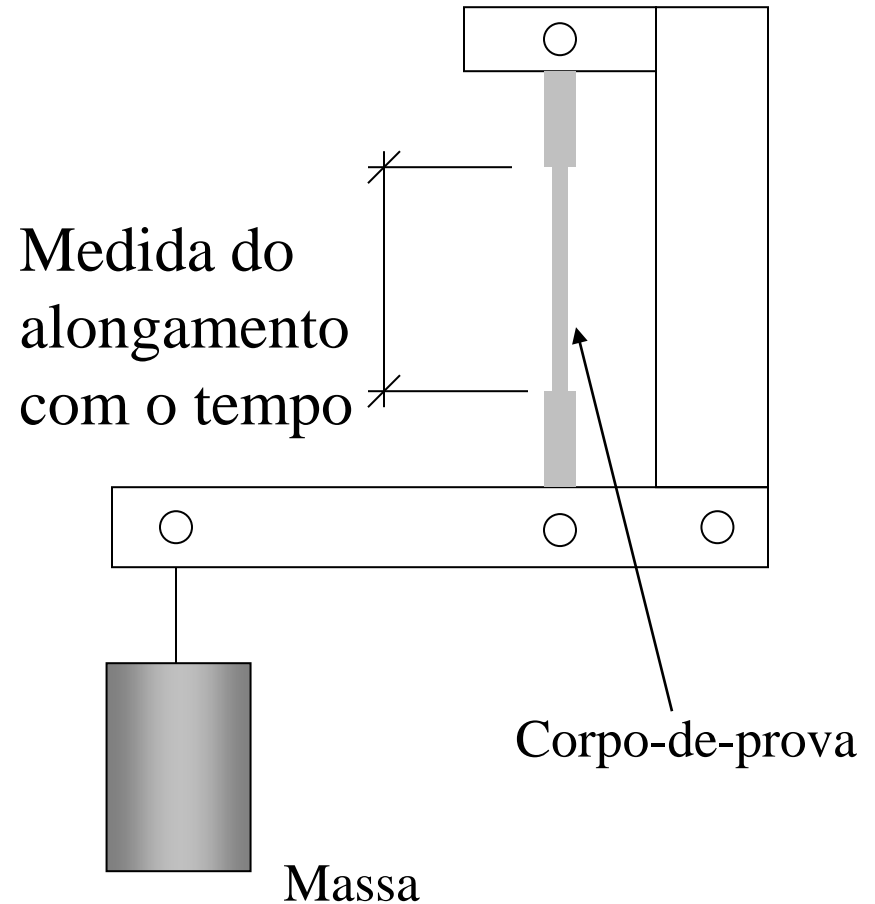


# Deformação lenta

- Deformação em função do tempo para uma carga (ou tensão) constante: **FLUÊNCIA**
- OCORRÊNCIA: Observada em metais e materiais amorfos como vidros e polímeros. Cristais iônicos e covalentes apresentam menor nível de deformação viscosa: quase tudo.

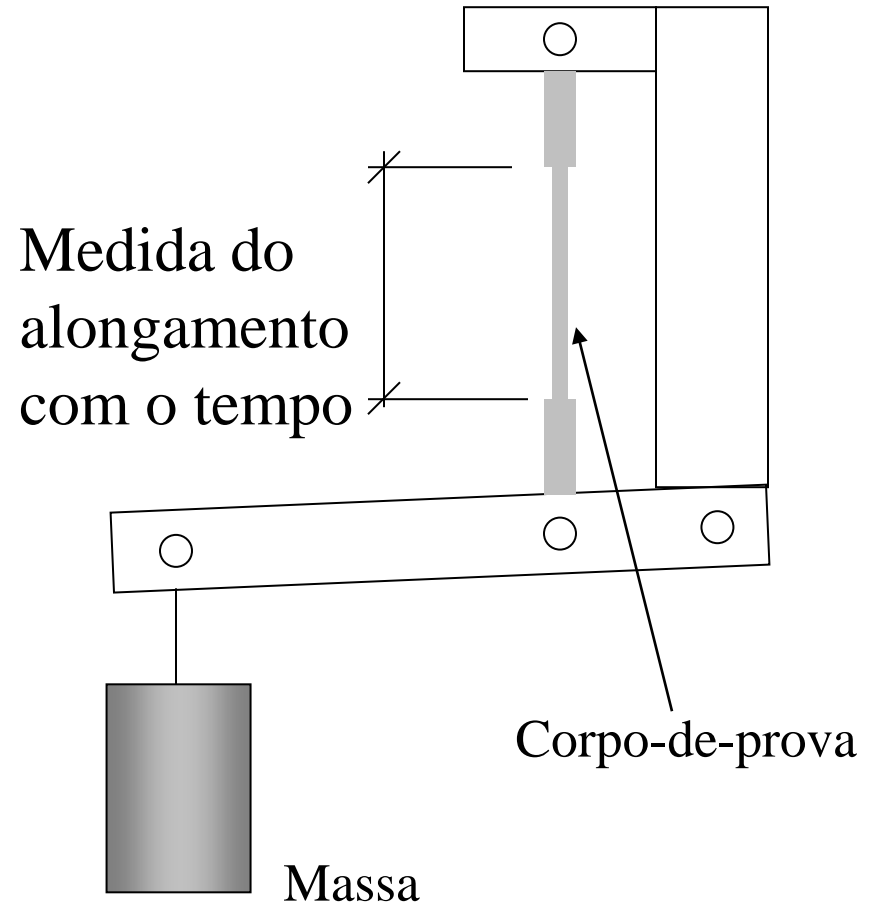
# Fluência

- Tensão constante a temperatura constante.
- Deformação crescente
- Deslocamento relativo entre moléculas (polímeros)
- Deformação típica de concreto submetido a cargas de longa duração (movimentação de água)
- Deformação em metais com movimentação de discordância.



# Fluência

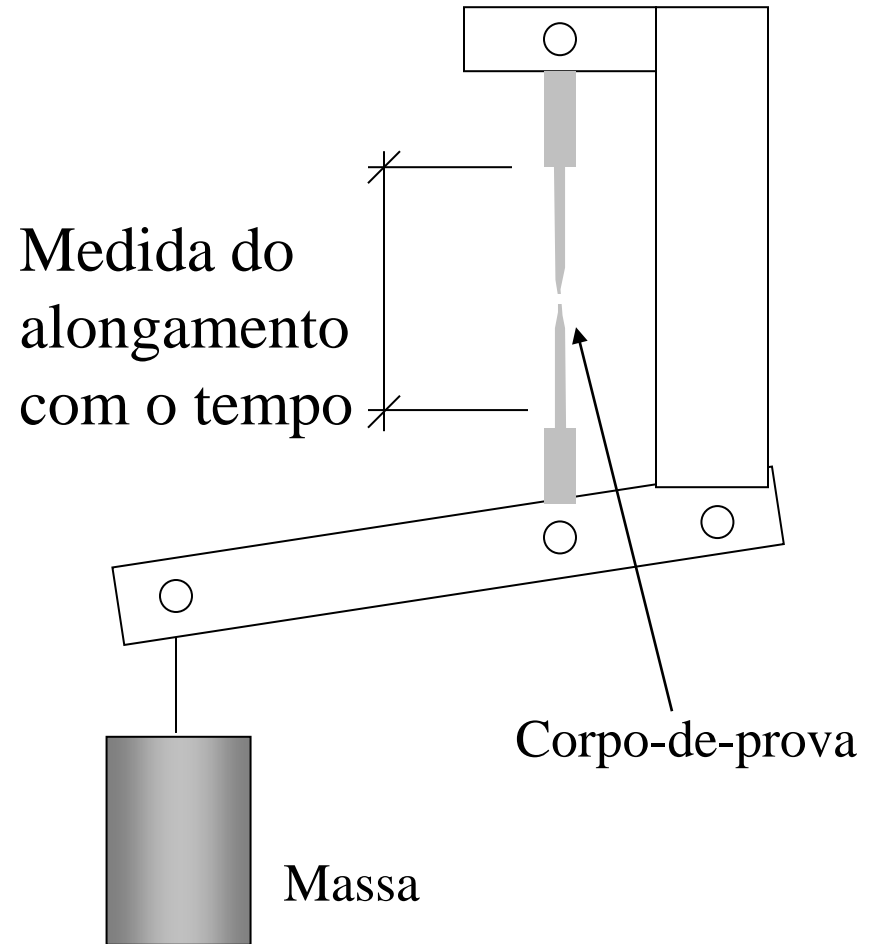
- Tensão constante a temperatura constante.
- Deformação crescente
- Deslocamento relativo entre moléculas (polímeros)
- Deformação típica de concreto submetido a cargas de longa duração (movimentação de água)
- Deformação em metais com movimentação de discordância.





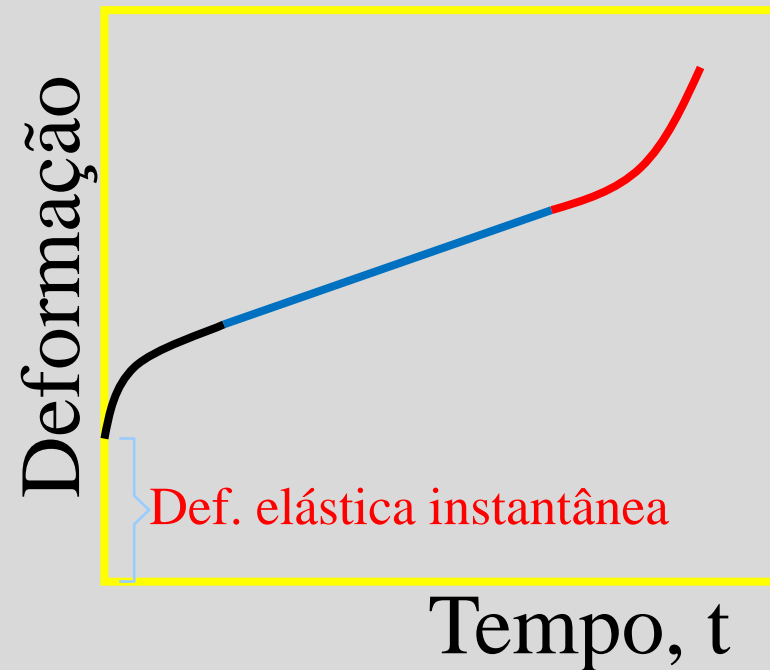
# Fluência

- Tensão constante a temperatura constante.
- Deformação crescente
- Deslocamento relativo entre moléculas (polímeros)
- Deformação típica de concreto submetido a cargas de longa duração (movimentação de água)
- Deformação em metais com movimentação de discordância.



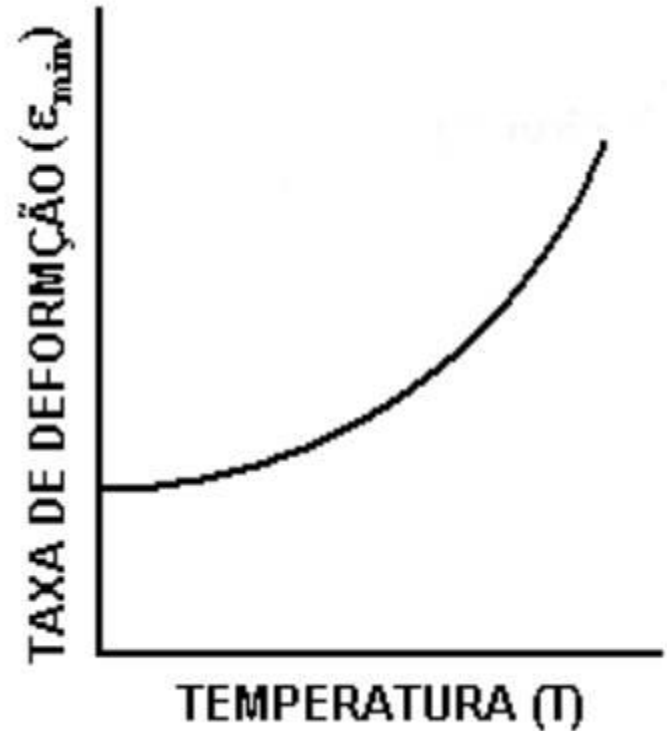
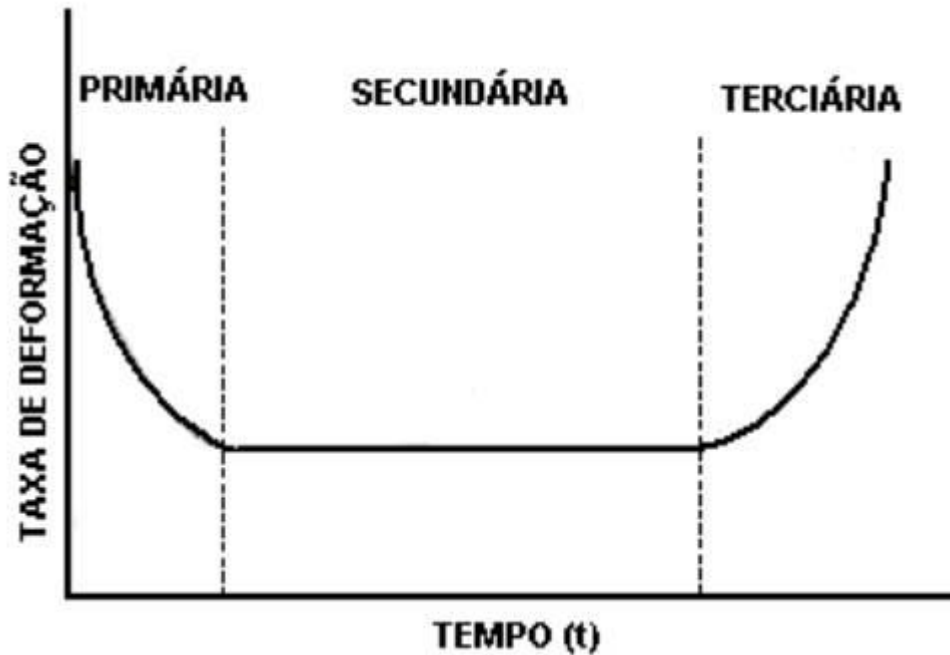
# Fluência

- ☀ Primário ou transiente
  - ☀ diminui devido ao endurecimento
  - ☀ similar à elasticidade retardada e recuperável
- Secundário ou constante
  - equilíbrio entre o endurecimento e a relaxação
  - viscosa ou plástica
- Terciário
  - após a estrição



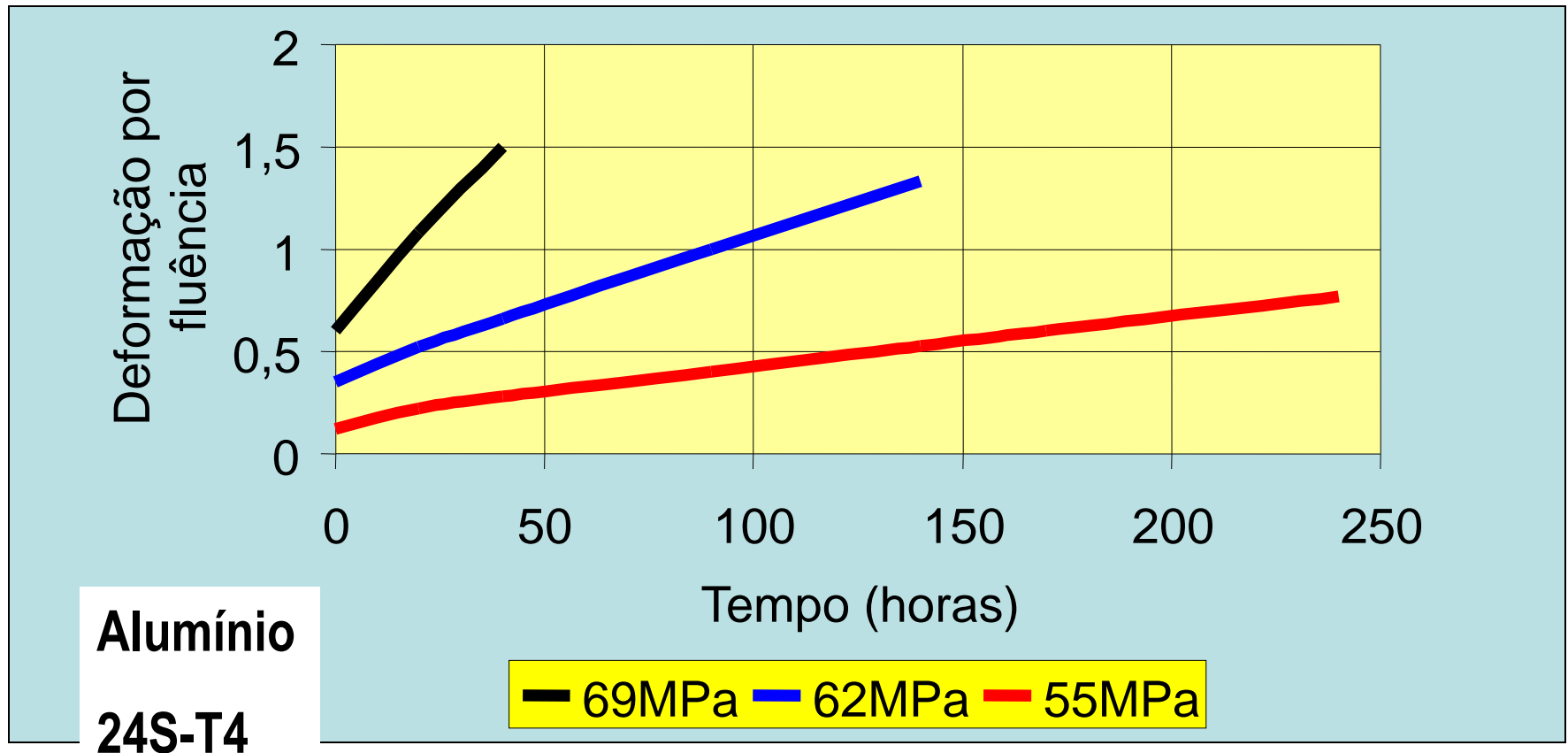
# Taxa de deformação

# X Tempo e temperatura



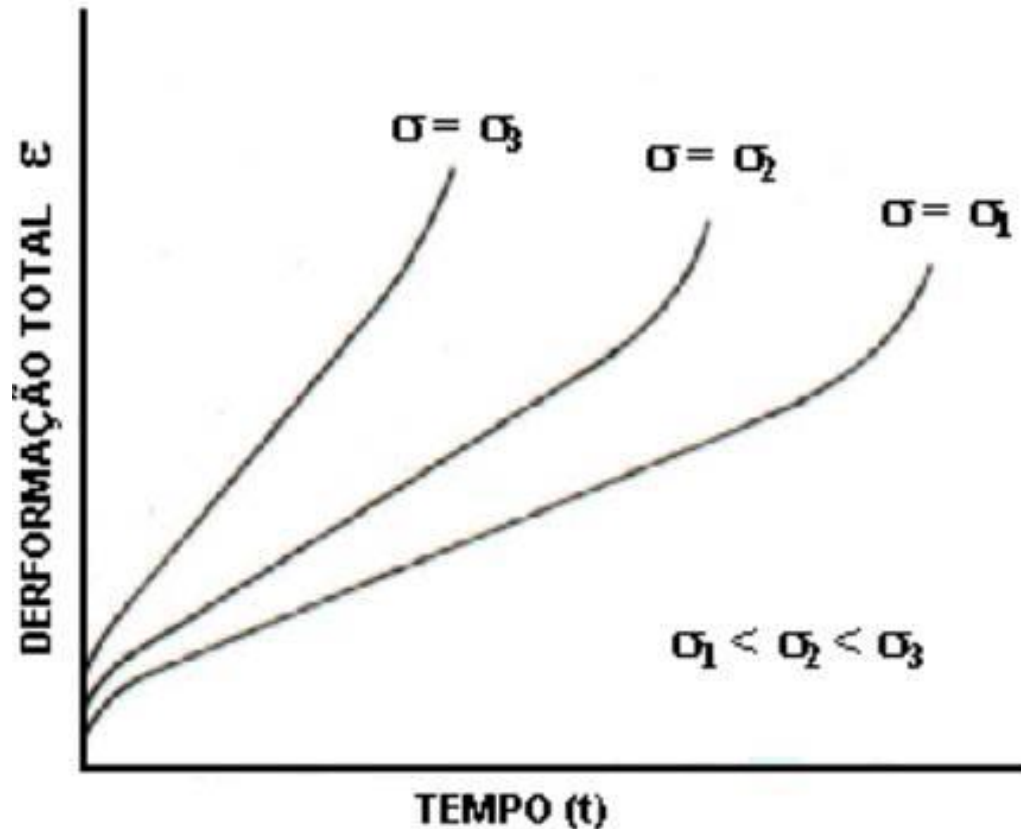
# Fluência

- ☀ Efeito de  $\sigma/\sigma_0$  (similar à T)
  - ☀ Quanto maior  $\sigma/\sigma_0$  maior é a fluência (Análise sobre fluência secundária)

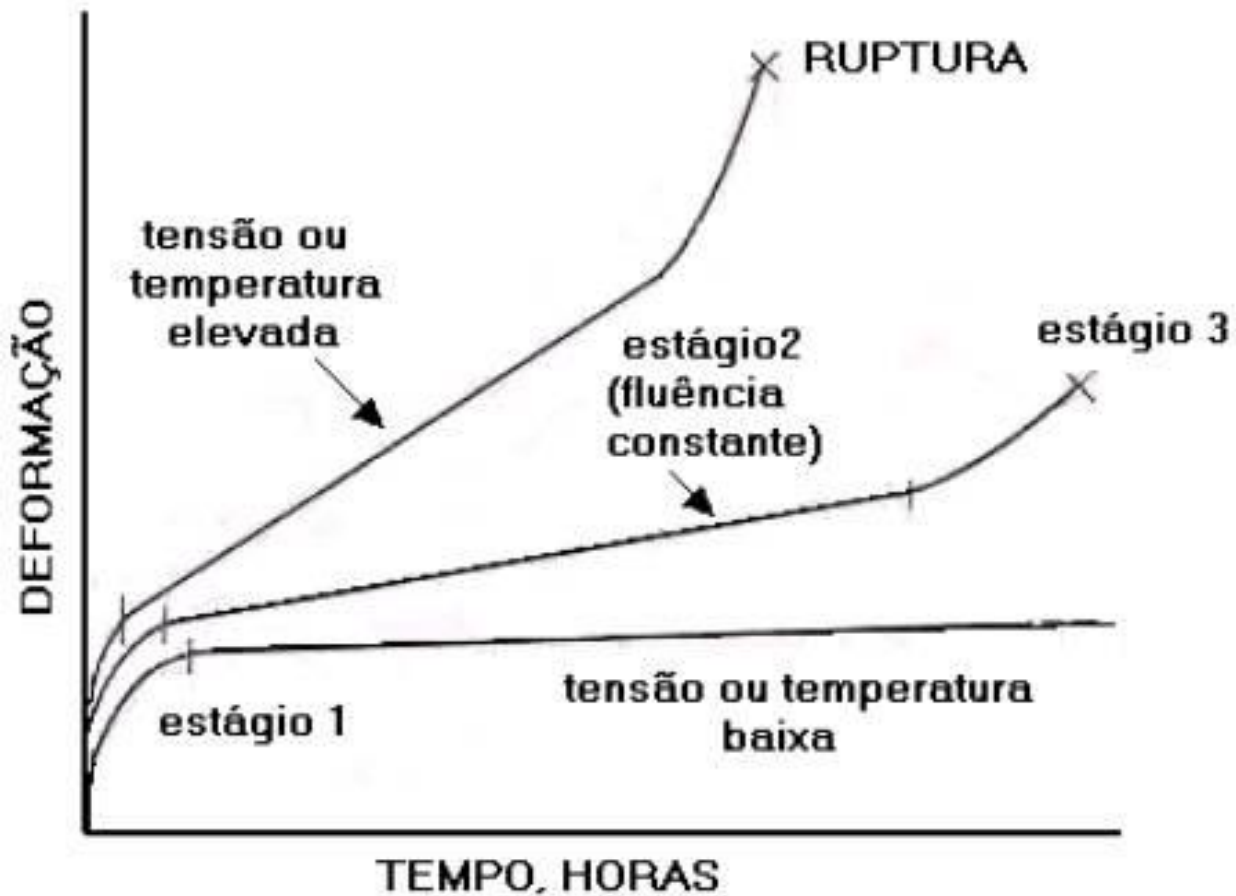


# Fluência

- ☀ Efeito de  $\sigma/\sigma_0$  (similar à T)
  - ☀ Quanto maior  $\sigma/\sigma_0$  maior é a fluência (Análise sobre fluência total)



# FLUÊNCIA EM METAIS



# Comportamento viscoelástico em polímeros

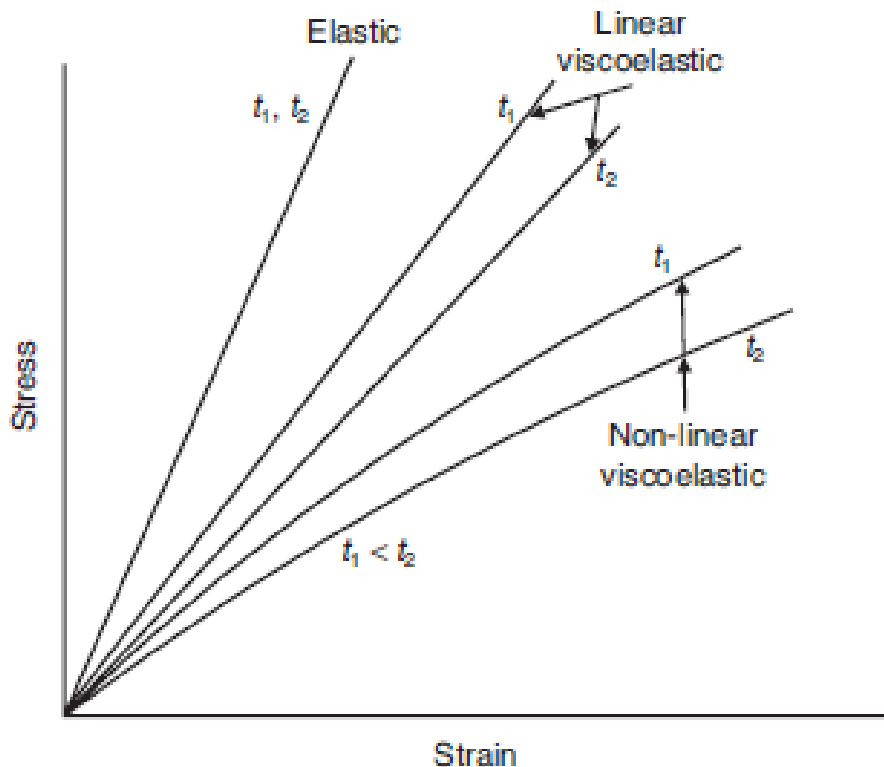


Fig. 38.3 Stress-strain behaviour of elastic and viscoelastic materials at two values of time.

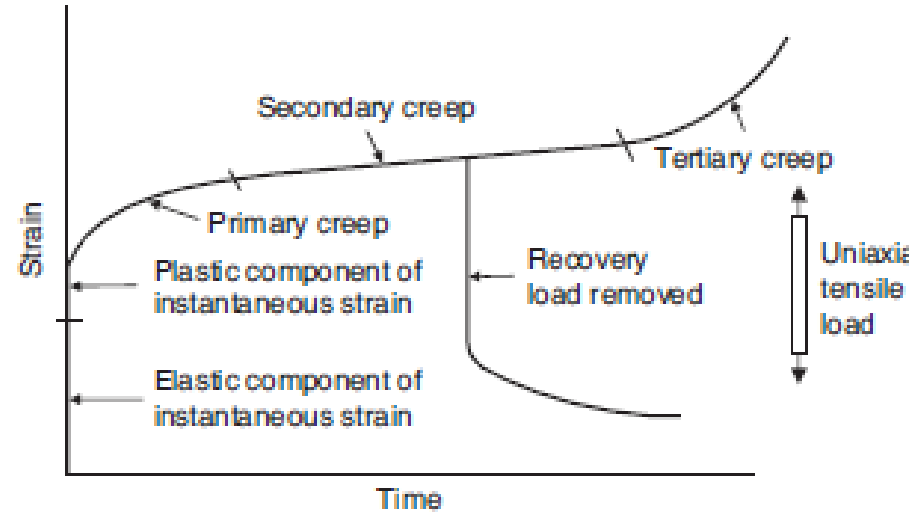


Fig. 38.2 Total creep curve for a polymer under a uniaxial tensile stress.

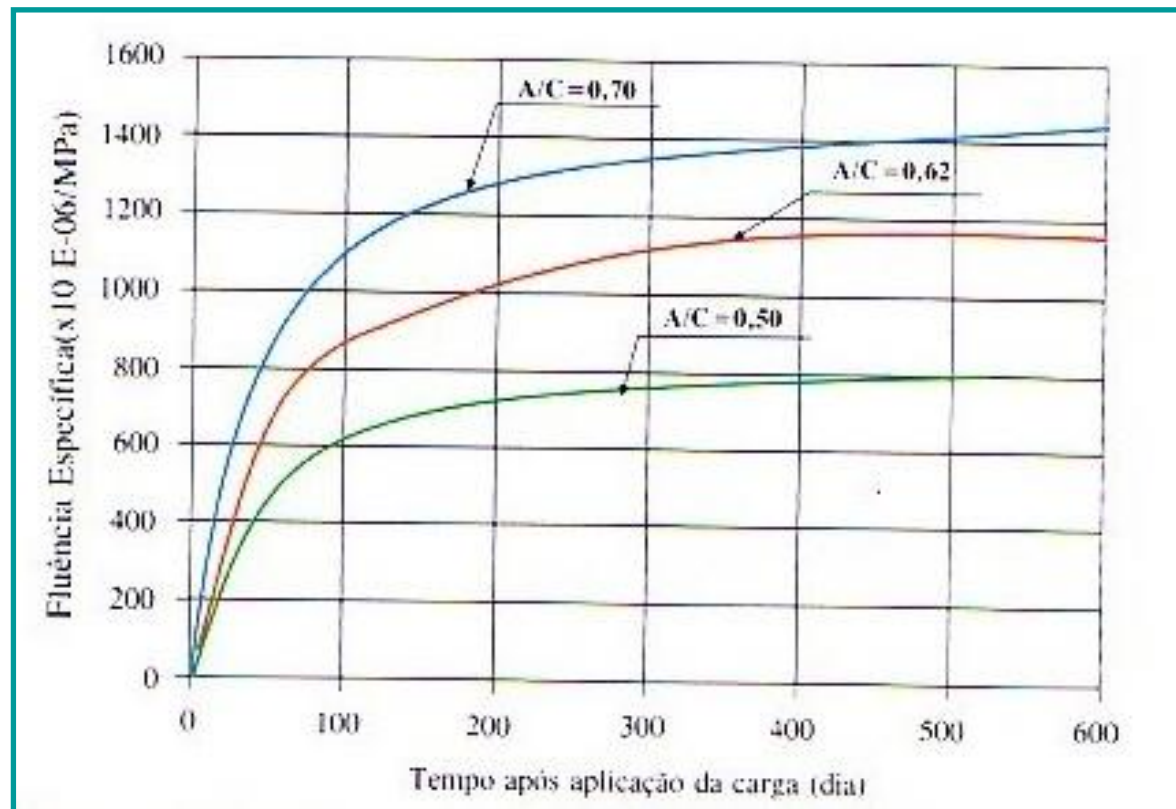
Como ocorre a  
fluência no concreto?

Pode haver ruptura  
por fluência no  
concreto?



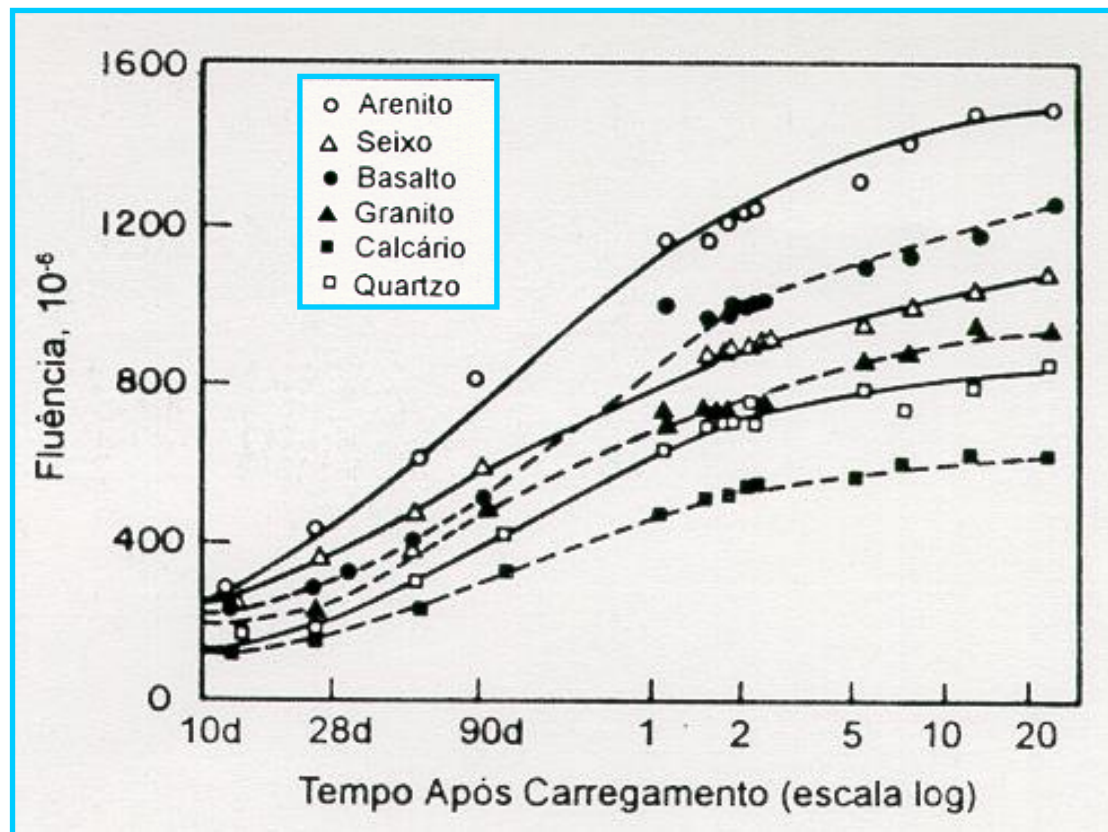
# Deformação por Fluência

- Reduzir a quantidade de água
- Reduzir o volume de pasta e a relação água/cimento



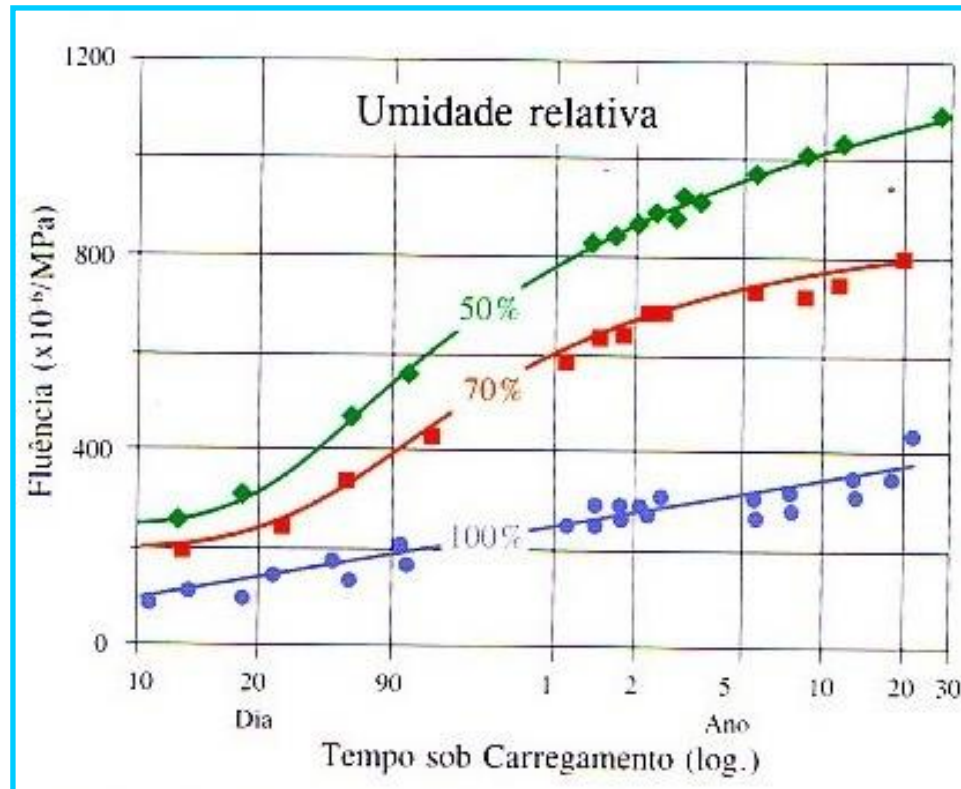
# Deformação por Fluência

- Aumentar o volume de agregado e selecionando o mais rígido



# Deformação por Fluência

- Considerar adequadamente as condições ambientais locais



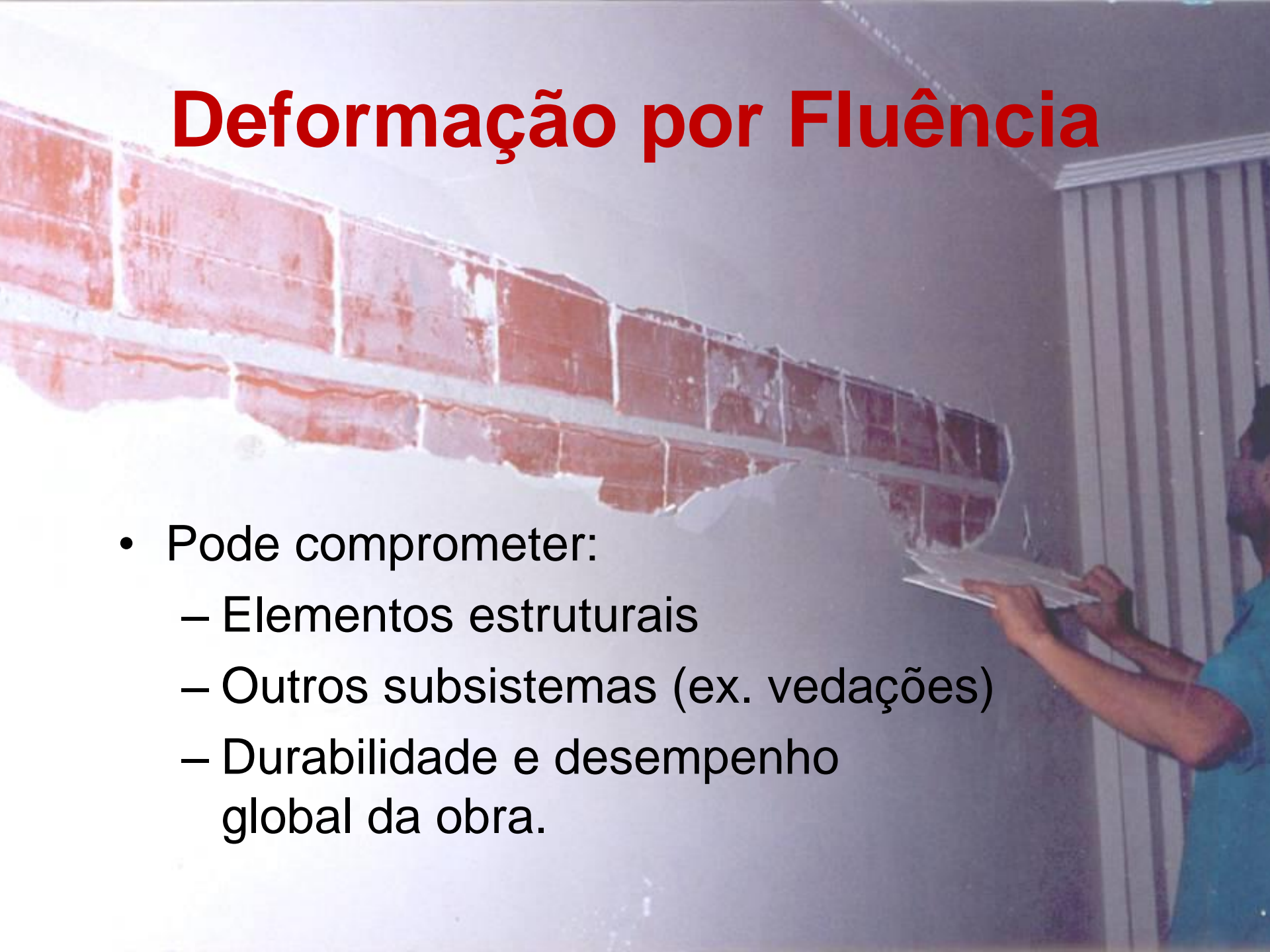
# Modelo de previsão (NBR 6118)

- Considerar a relação Área/Volume da peça

Umidade ambiente (%)		40%		55%		75%		90%	
Espessura Equivalente $2A_e/u$ (cm)		20	60	20	60	20	60	20	60
$\phi(t_\infty, t_0)$	$t_0$ (dias)	5	30	60	5	30	60	5	30
	5	4,4	3,9	3,8	3,3	3,0	2,6	2,3	2,1
	30	3,0	2,9	2,6	2,5	2,0	2,0	1,6	1,6
	60	3,0	2,6	2,2	2,2	1,7	1,8	1,4	1,4

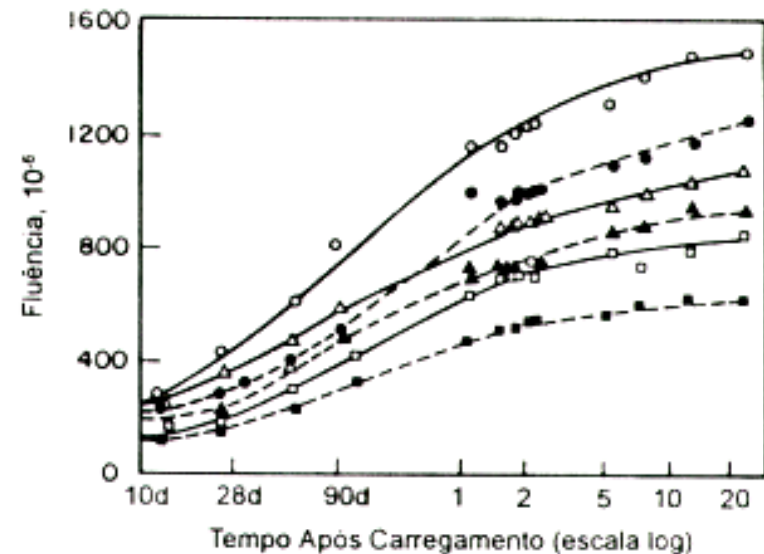
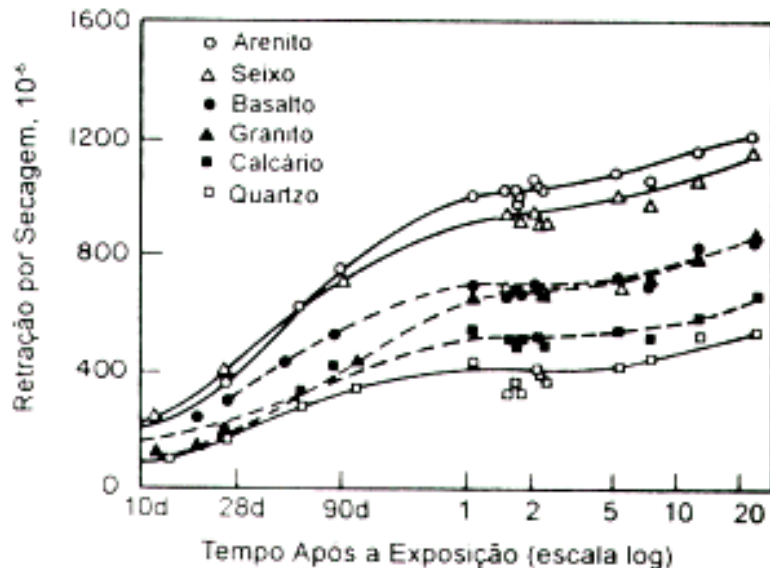
# Deformação por Fluência

- Pode comprometer:
  - Elementos estruturais
  - Outros subsistemas (ex. vedações)
  - Durabilidade e desempenho global da obra.



# Retração e fluência

- Dependem da movimentação de água no material
- As tensões e deformações dependem do módulo de elasticidade



**HÁ FLUÊNCIA EM MADEIRA?**

# Fluência na madeira

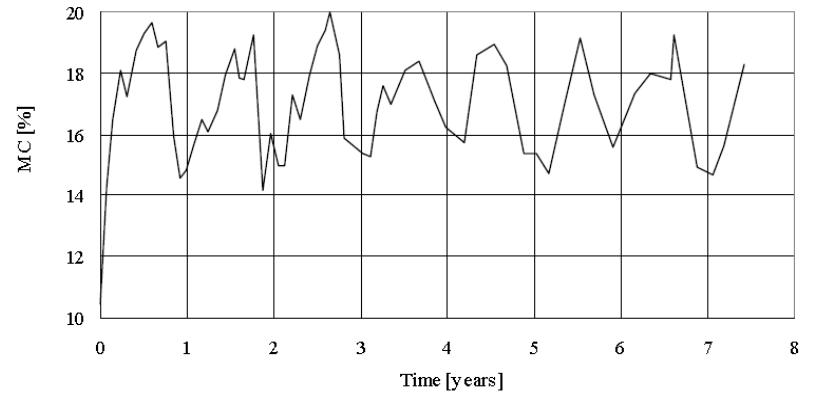
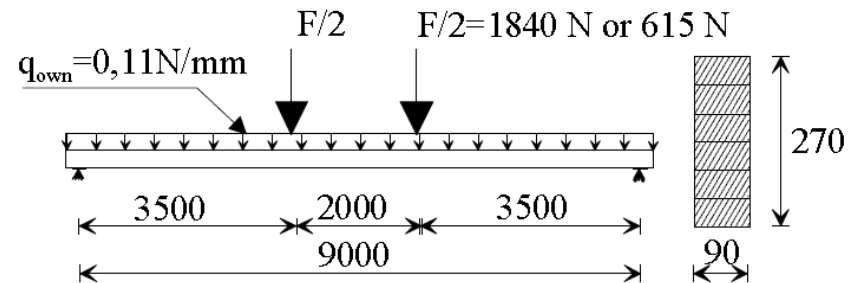


Figure 3. Mean moisture content of 3 end-sealed, untreated 16 to 22 mm thick boards in sheltered environment.





# Fluência na madeira

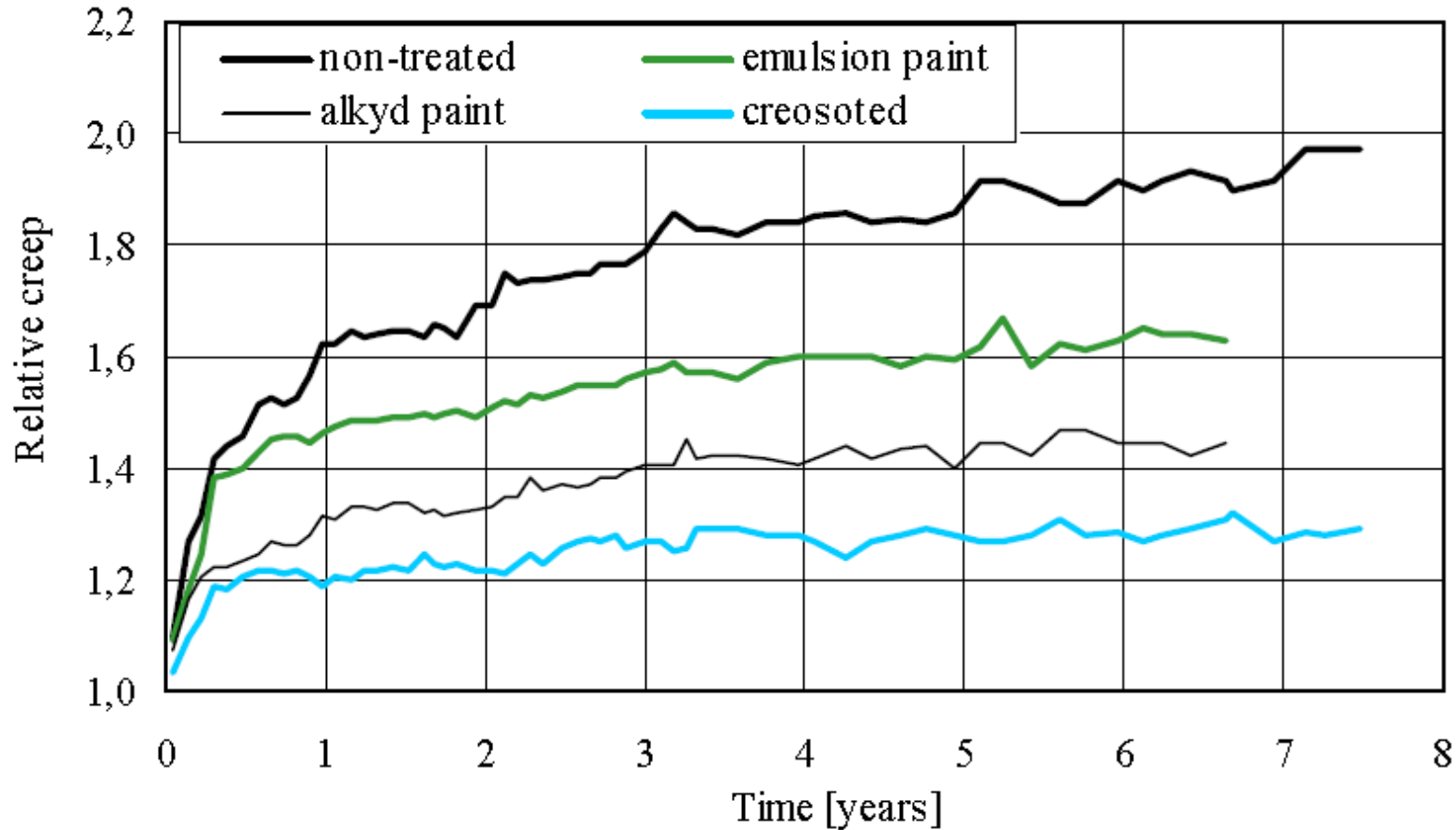
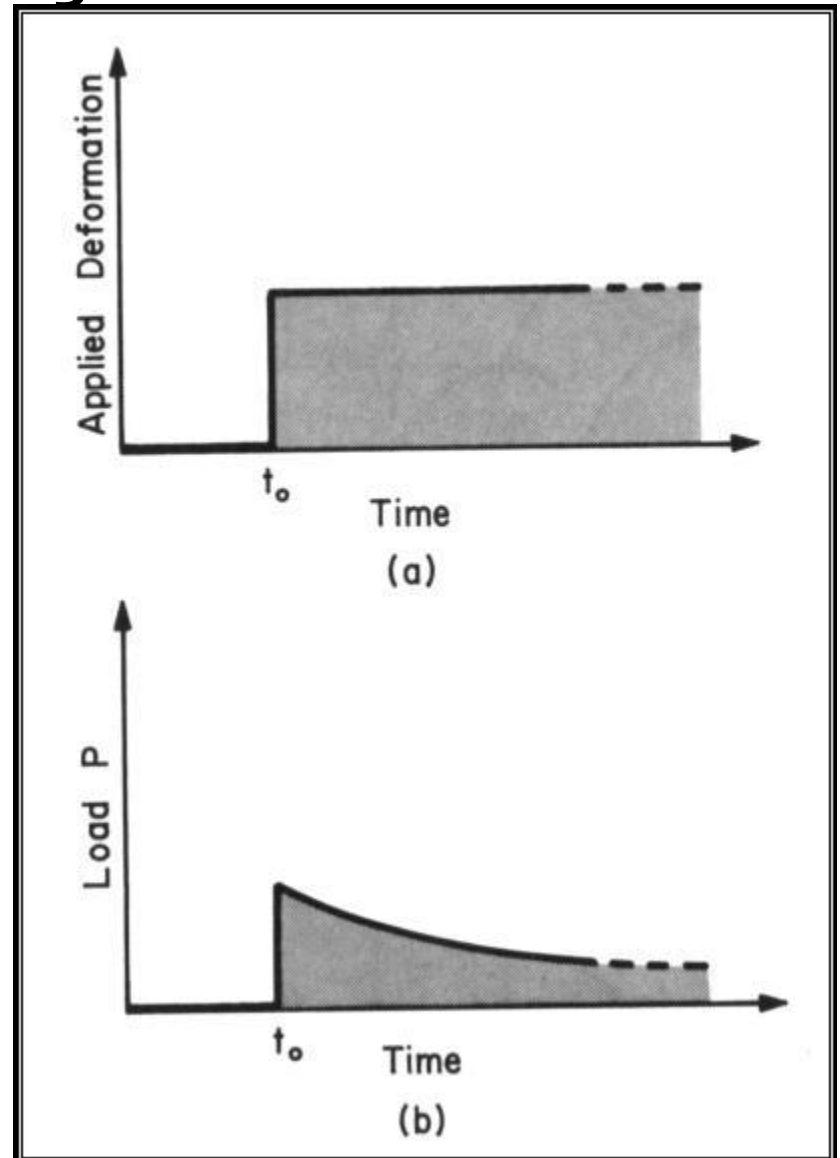


Figure 4. Average relative creep in sheltered environment for different surface coatings and treatments (pine, 7 MPa).

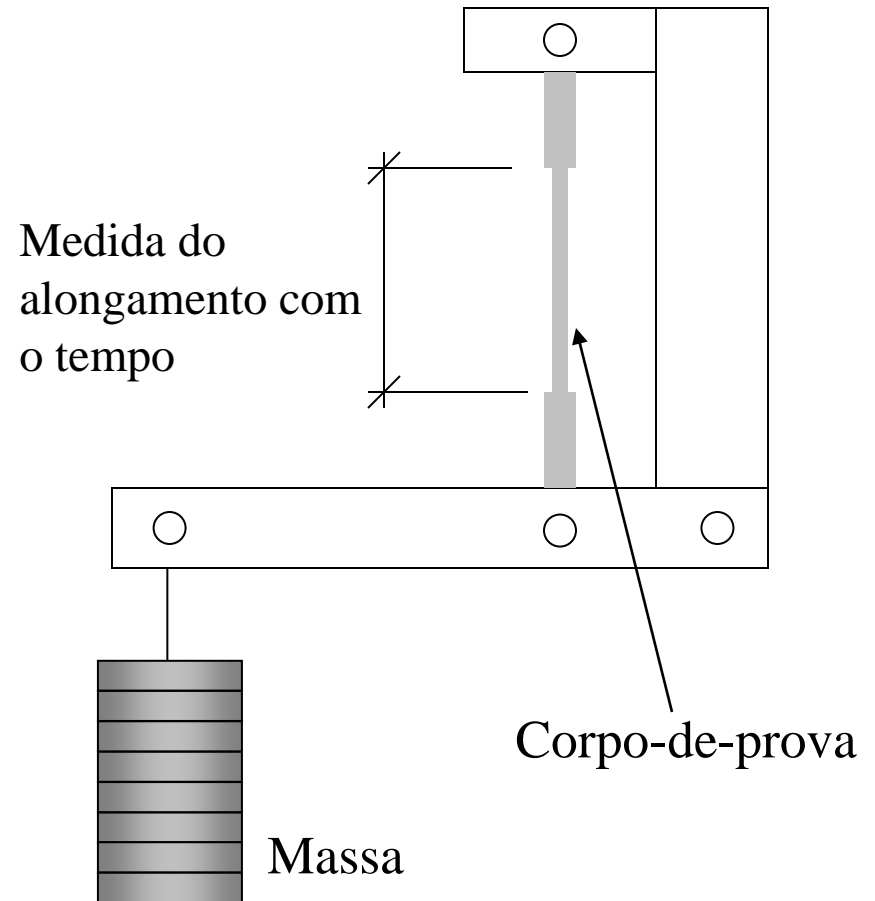
# Relaxação

- Perda de tensão ao longo do tempo
- Função do carregamento inicial



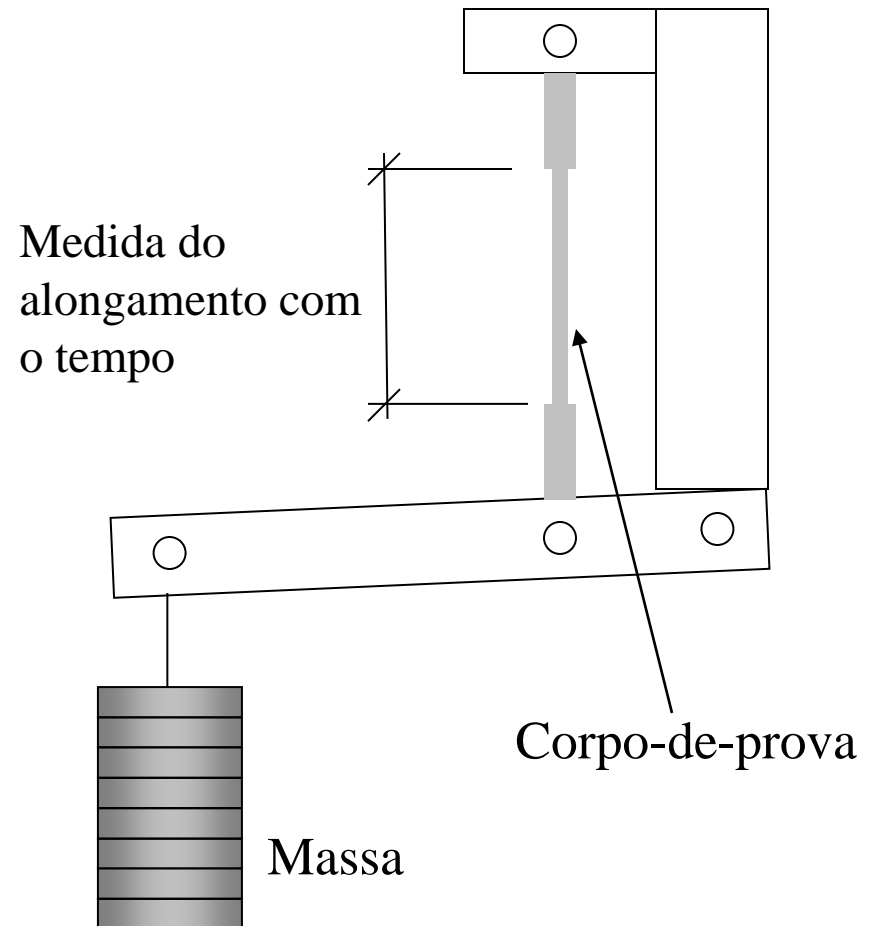
# Ensaio de relaxação

- Deformação constante
- Tensão decrescente
- Remoção progressiva dos pesos.



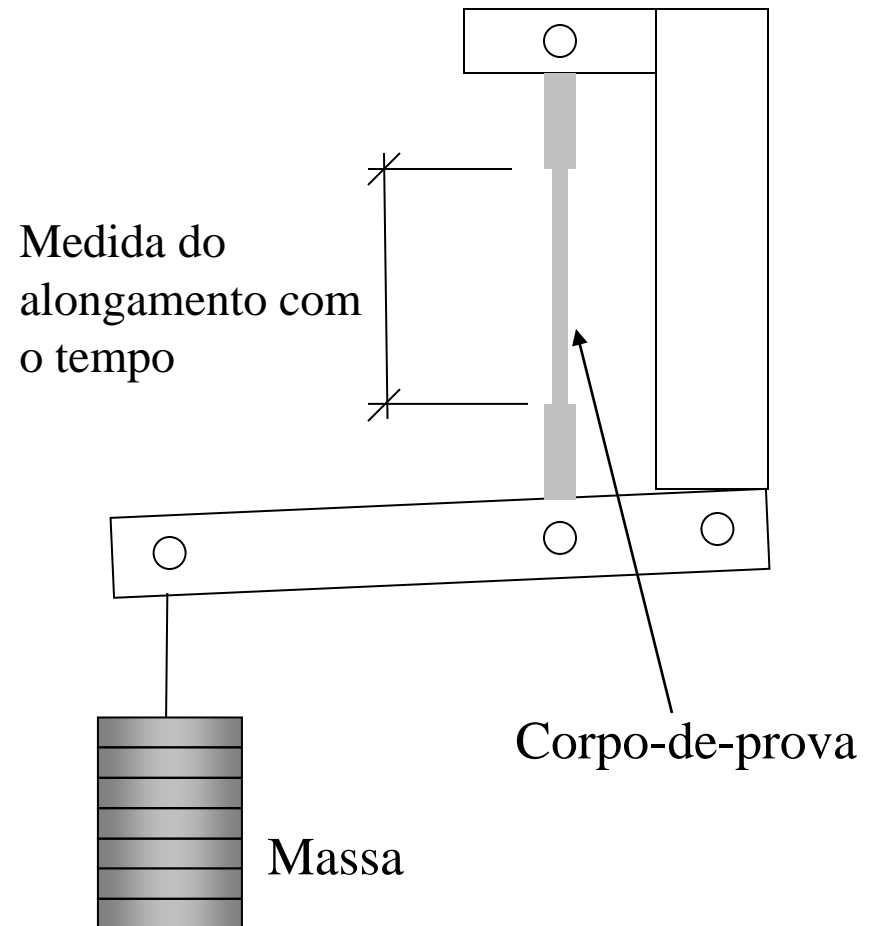
# Ensaio de relaxação

- Deformação constante
- Tensão decrescente
- Remoção progressiva dos pesos.



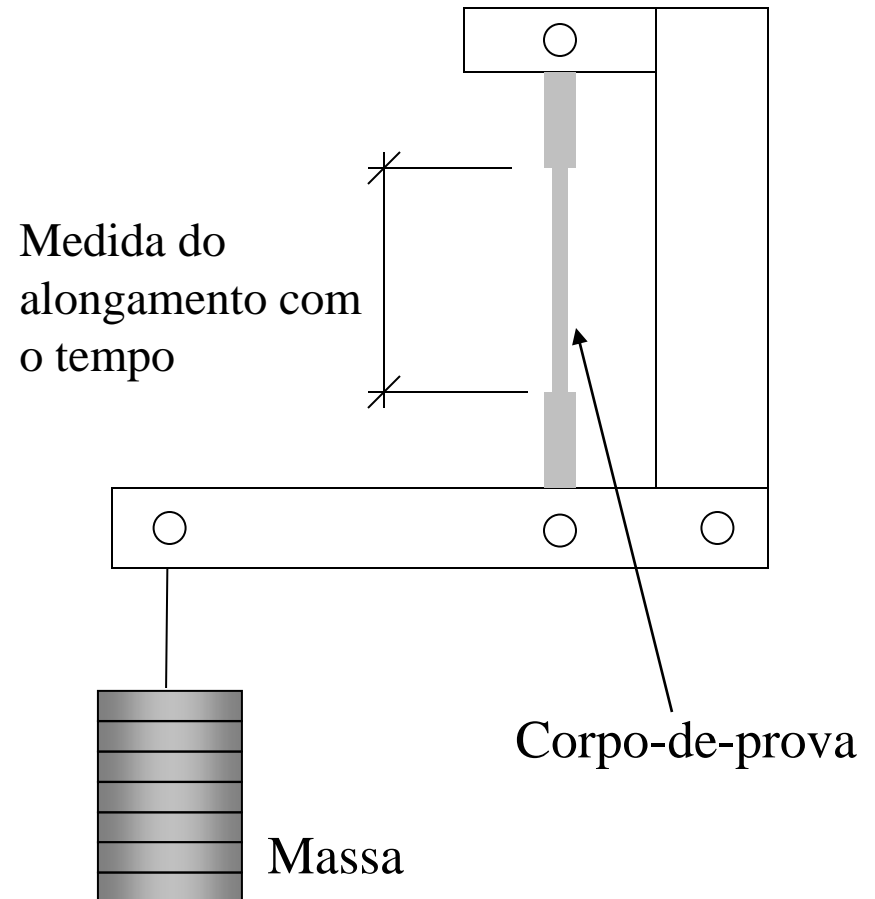
# Ensaio de relaxação

- Deformação constante
- Tensão decrescente
- Remoção progressiva dos pesos.



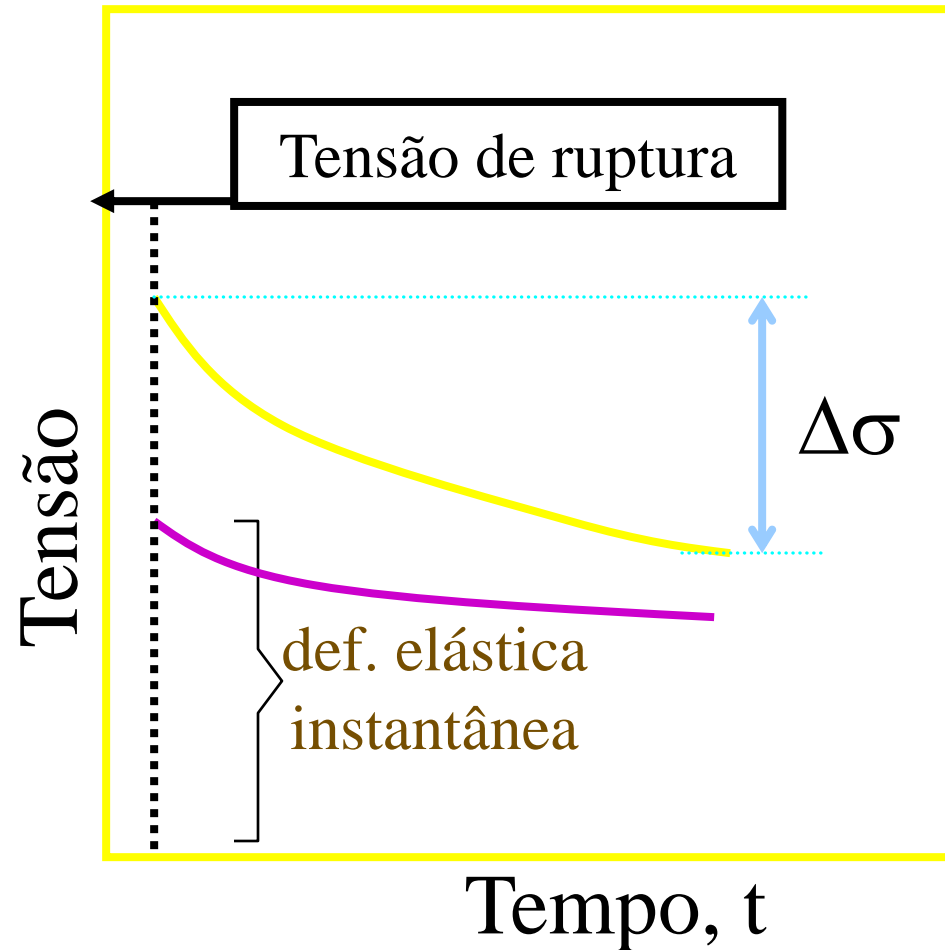
# Ensaio de relaxação

- Deformação constante
- Tensão decrescente
- Remoção progressiva dos pesos.



# Relaxação

- Perda de tensão ao longo do tempo
- Função do carregamento inicial

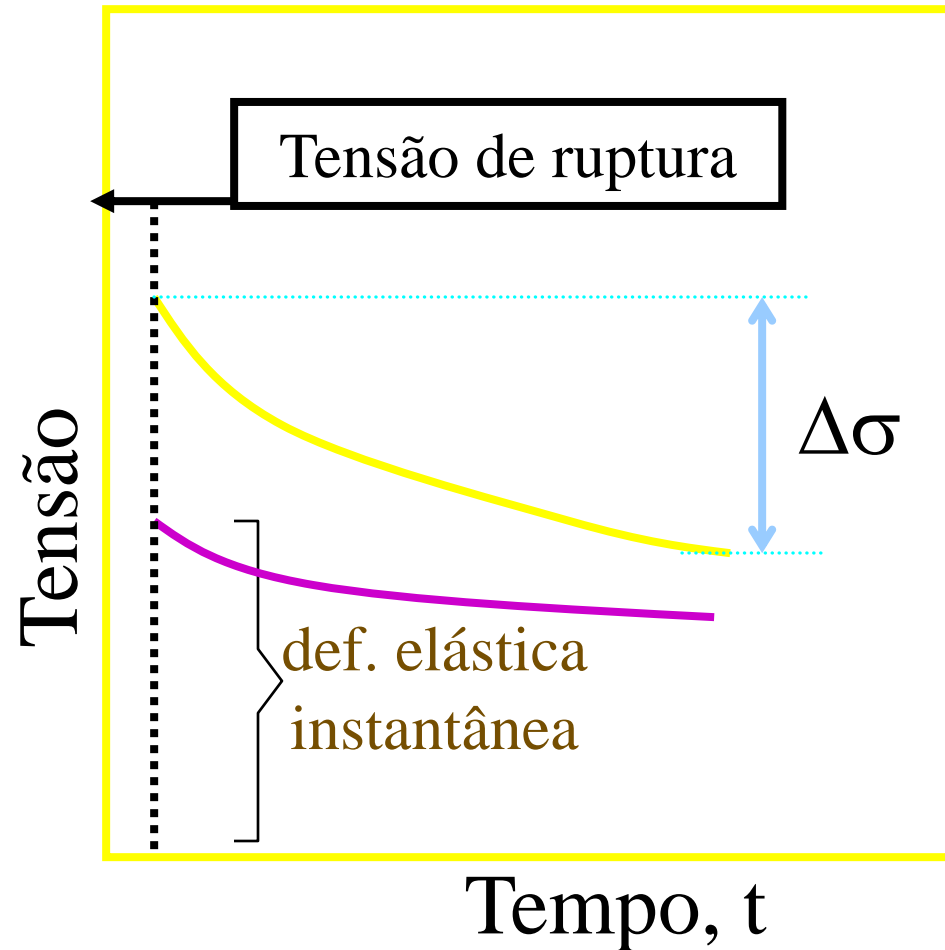


Carregamento inicial elevado

Carregamento inicial baixo

# Relaxação

- Tensão variável a temperatura constante.
- Deformação constante
- Deslocamento relativo entre moléculas (polímeros)
- Deformação típica de concreto submetido a cargas de longa duração (movimentação de água)
- Deformação em metais com movimentação de discordância.

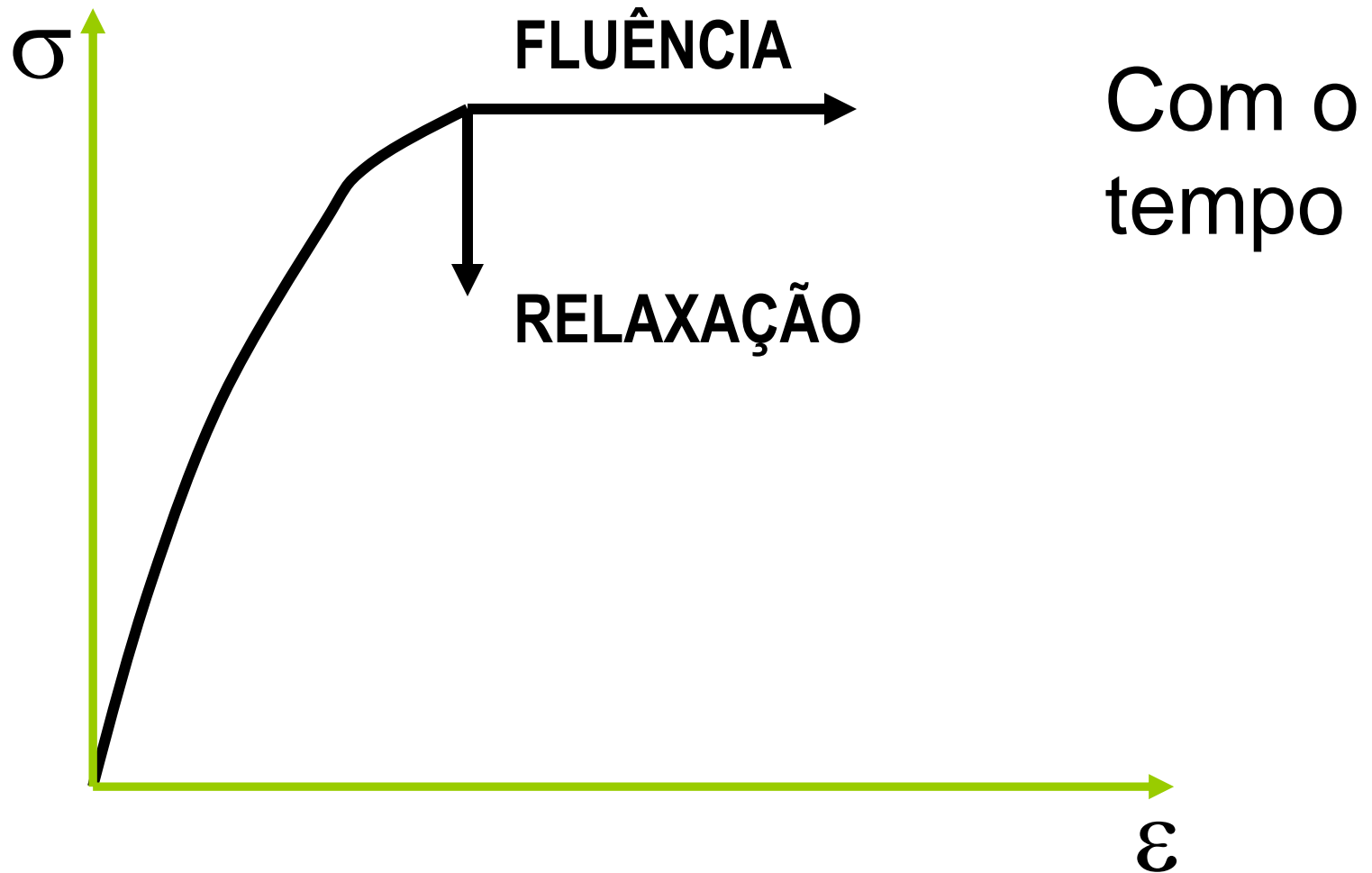


Carregamento inicial elevado

Carregamento inicial baixo



# Fluência X Relaxação



# Pontos importantes:

**Fratura retardada  $\neq$  Fratura por fluência**

**Como ocorre a fratura por fluência?**

**Quais as diferenças entre ruptura por fadiga e ruptura por fluência?**

**Quais as diferenças entre relaxação e fratura retardada?**