

# Viscoelasticidade

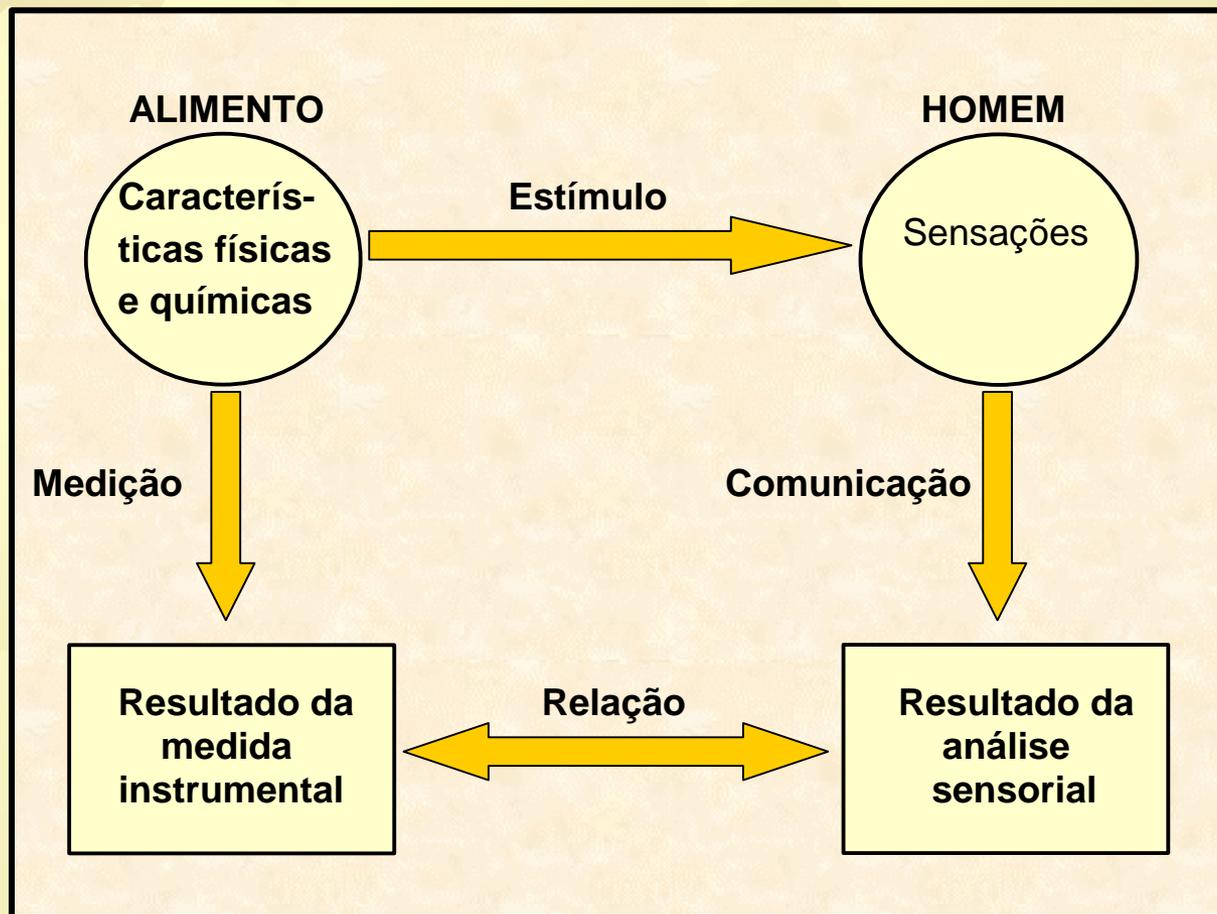
## Aplicações à Enga de Alimentos

Holmer Savastano Jr.  
ZEB 0566 – MÓDULO 7  
ZEB - FZEA - USP

DEFINIÇÃO: Reologia é a ciência que estuda o escoamento e a deformação dos corpos quando submetidos à ação de uma força externa.

- ⇒ Alimento sólido: quando estes são capazes de manter sua forma e tamanho (até um certo limite) sob a ação de forças que tendem a deformá-los.
- ⇒ As razões para o estudo das propriedades reológicas de alimentos sólidos podem ser enumeradas da seguinte forma:
  1. Permitir uma visualização da estrutura interna do material, já que o seu comportamento físico se deve à sua constituição química. Ex. Relação entre a ligação cruzada dos materiais poliméricos e sua elasticidade.
  2. Melhorar o controle de qualidade na indústria de alimentos.

3. Projetar equipamentos para o processamento de alimentos sólidos.
4. Correlacionar a aceitação dos consumidores com algumas propriedades reológicas.



## ***Aspectos Teóricos:***

Lei de Hooke: define o sólido ideal como aquele que se deforma instantânea e proporcionalmente à magnitude da força aplicada, e se recupera instantaneamente ao ser retirada esta força.

$$\sigma = E \varepsilon$$

$\sigma$  = força por unidade de área,  $E$  = módulo de elasticidade e  $\varepsilon$  = deformação linear relativa.

⇒ Alimento: não possui o comportamento de um sólido ideal. Todos mostram um comportamento viscoelástico em sua resposta mecânica, isto é, além do comportamento Hookeano, manifestam a presença de um componente viscoso.

⇒ Deformação do sólido viscoelástico: não é instantânea, se produz num tempo finito e mensurável.



Fig. 1. Classificação simplificada do comportamento reológico.

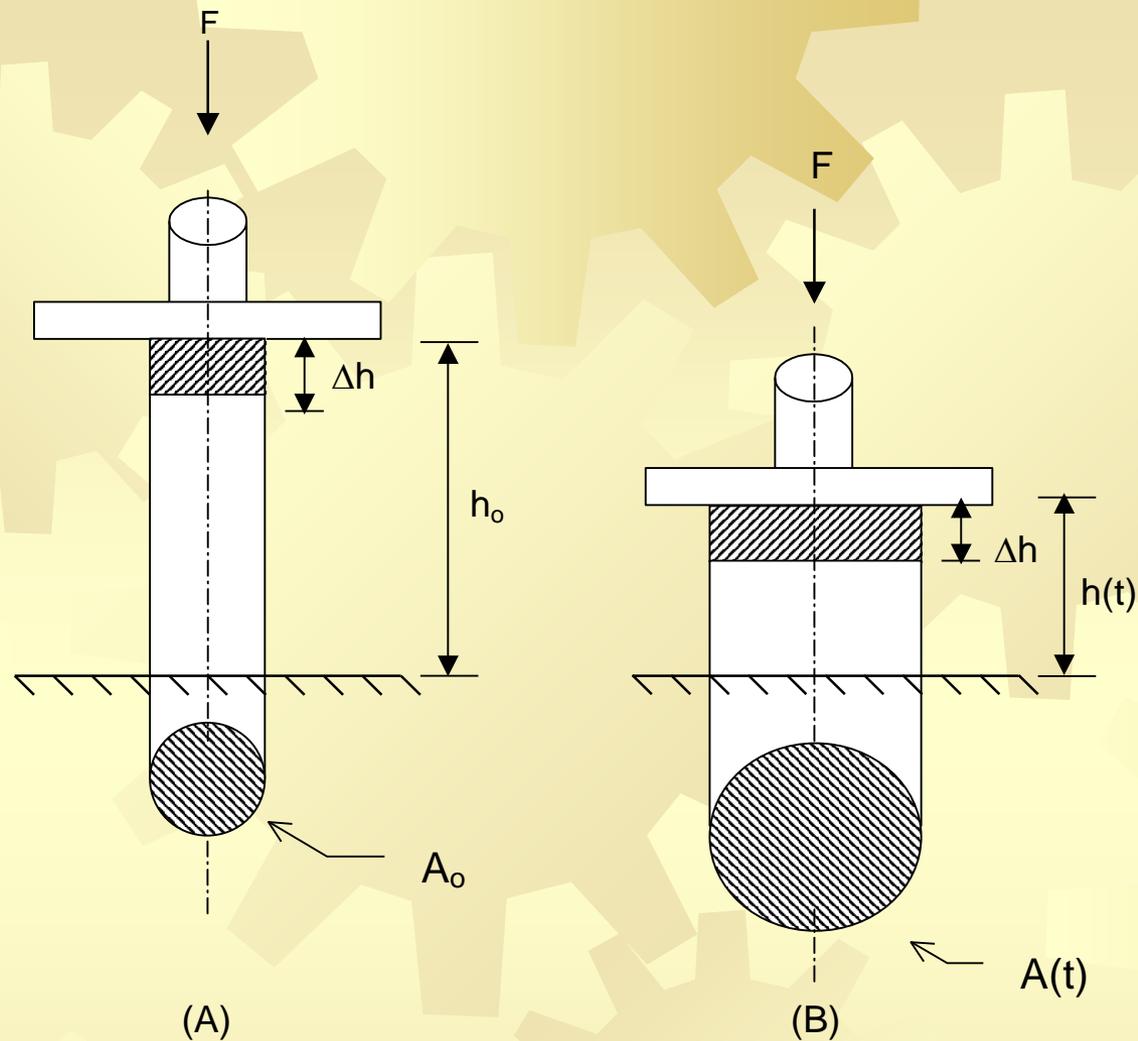


Fig. 2. Compressão uniaxial de uma amostra cilíndrica.

(A) deformações pequenas sem mudança de área.

(B) deformações grandes com aumento de área.

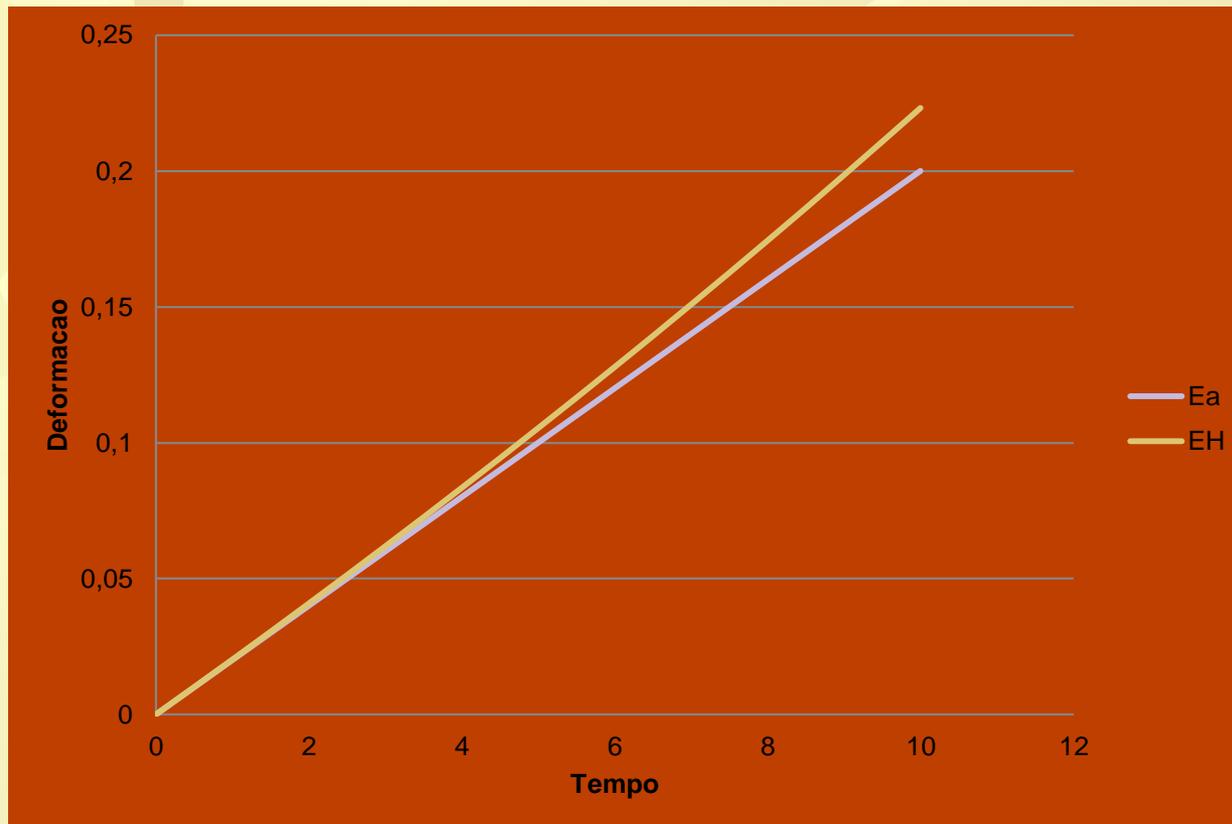
Deformação aparente:

$$\varepsilon_a = ((h_o - h_t)/h_o)$$

Deformação de Hencky:

$$\varepsilon_H = -\ln(1 - \varepsilon_a)$$

Exemplo de deformação aparente (Ea) e de Hencky (EH)



# Efeito do tempo no comportamento dos materiais

## ☀ Relaxação

- ☀ Deformação constante
- ☀ Queda da tensão com o tempo

## ☀ Fluência

- ☀ Tensão constante
- ☀ Aumento da deformação ao longo do tempo

## ***Modelos Reológicos:***

Modelo de Maxwell: representa o comportamento de um material viscoelástico cuja primeira fase de resposta frente à aplicação de uma força externa é a de um sólido elástico.

- Aplicações em estudos de Relaxação dos materiais.

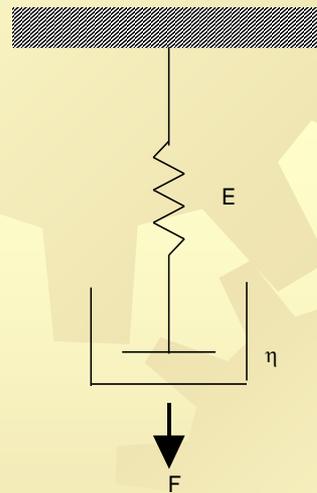


Fig. 3. Representação esquemática do modelo mecânico de Maxwell.

## Equação para o modelo simples de Maxwell:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \exp(-t/\lambda)$$

## Equação para o modelo generalizado de Maxwell:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^N \sigma_{0,i} \cdot \exp(-t/\lambda_i)$$

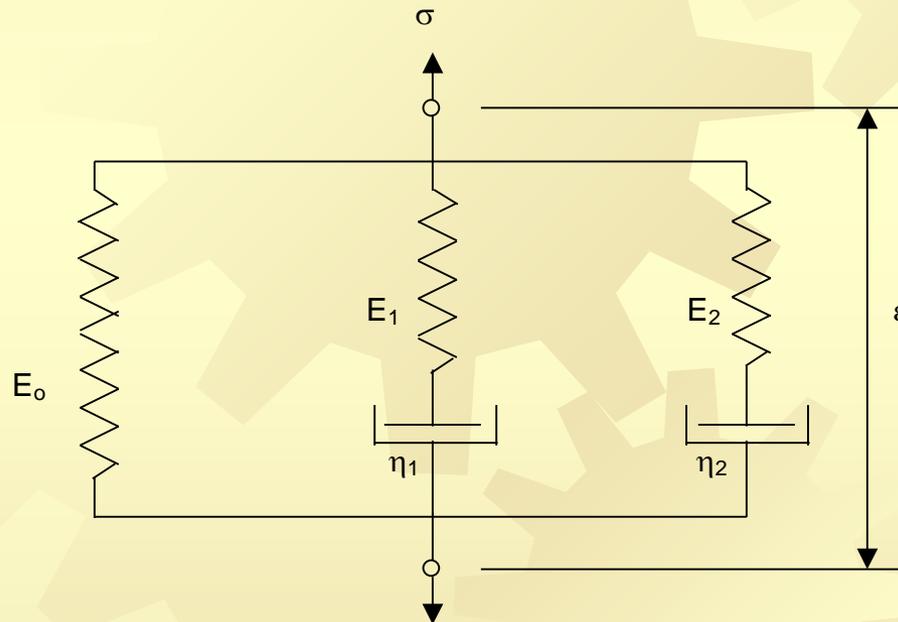


Fig. 4. Modelo generalizado de Maxwell de cinco elementos: Tensão,  $\sigma$  (kPa); deformação,  $\varepsilon$ ; constante elástica,  $E_i$  (kPa); viscosidade,  $\eta_i$  (kPa); tempo de relaxação,  $\lambda$  (s).

Modelo de Kelvin: representa o comportamento de um material, tal que ao ser aplicada uma força, seus elementos viscoso e elástico atuam simultaneamente desde o início.

-Aplicações em estudos de Fluência dos materiais.

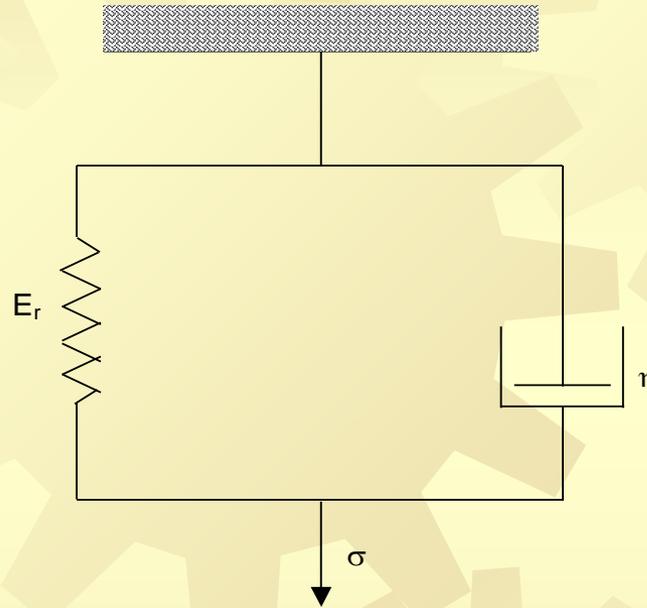


Fig. 5. Representação esquemática do modelo mecânico de Kelvin: Tensão,  $\sigma$  (kPa); deformação,  $\varepsilon$ ; constante elástica,  $E_r$  (kPa); viscosidade,  $\eta$  (kPa).

Equação de Kelvin:

$$\varepsilon = \sigma_0 / E \left( 1 - e^{-t / \lambda_{rel}} \right)$$

Modelo de Burgers (4-elementos): é composto de uma mola, e um amortecedor em série com um elemento de Kelvin.

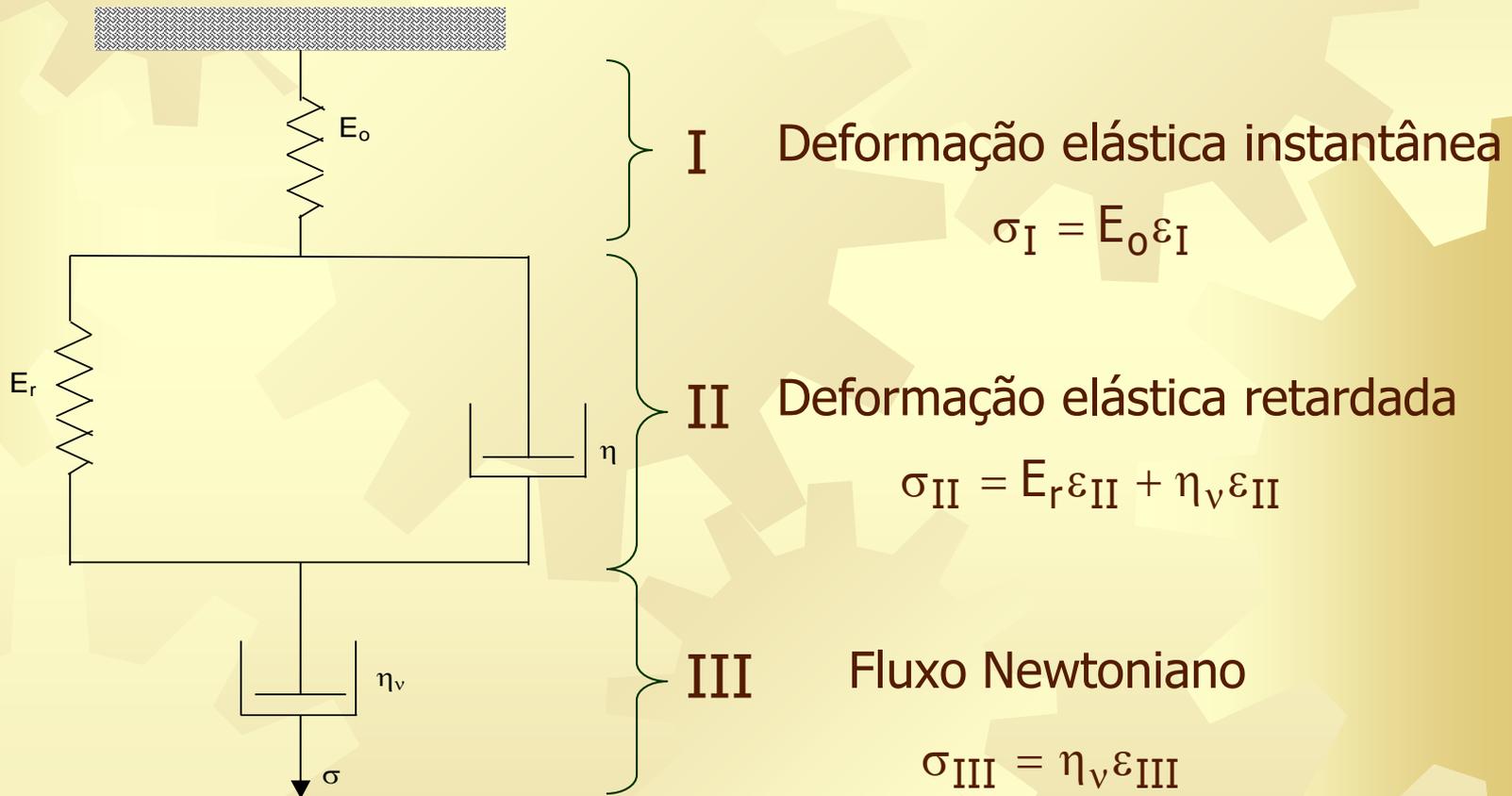


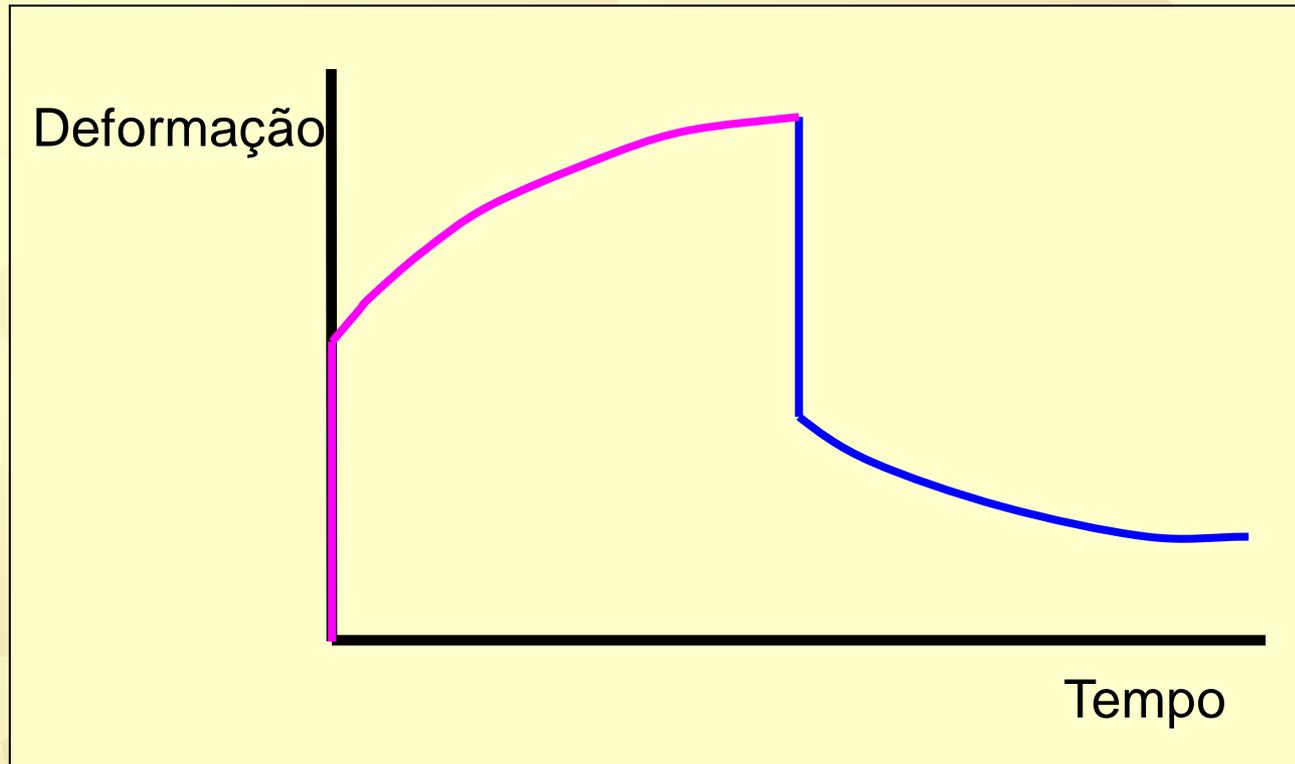
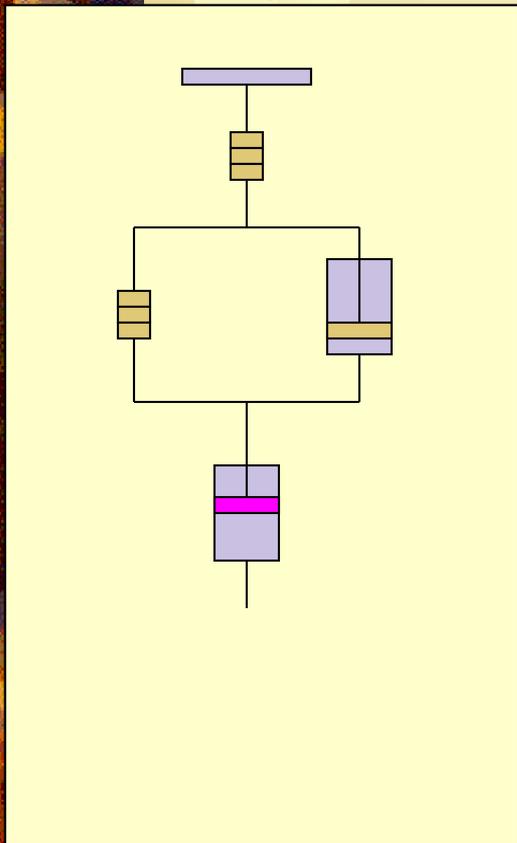
Fig. 6. Representação esquemática do modelo mecânico de Burgers.

# Deformação Viscoelástica

Polímeros



Deformação Viscoelástica



## Equação de Burgers:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 / E_0 + \sigma_0 / E_r \left( 1 - e^{-t / \lambda_{rel}} \right) + \frac{\sigma_0 t}{\eta_v}$$

## Modelo de Roy e Peleg (1989):

$$F = K(\varepsilon_H)^n \quad \text{ou} \quad \sigma = K(\varepsilon_H)^n$$

onde: K = índice de rigidez e n = índice de comportamento do sólido.

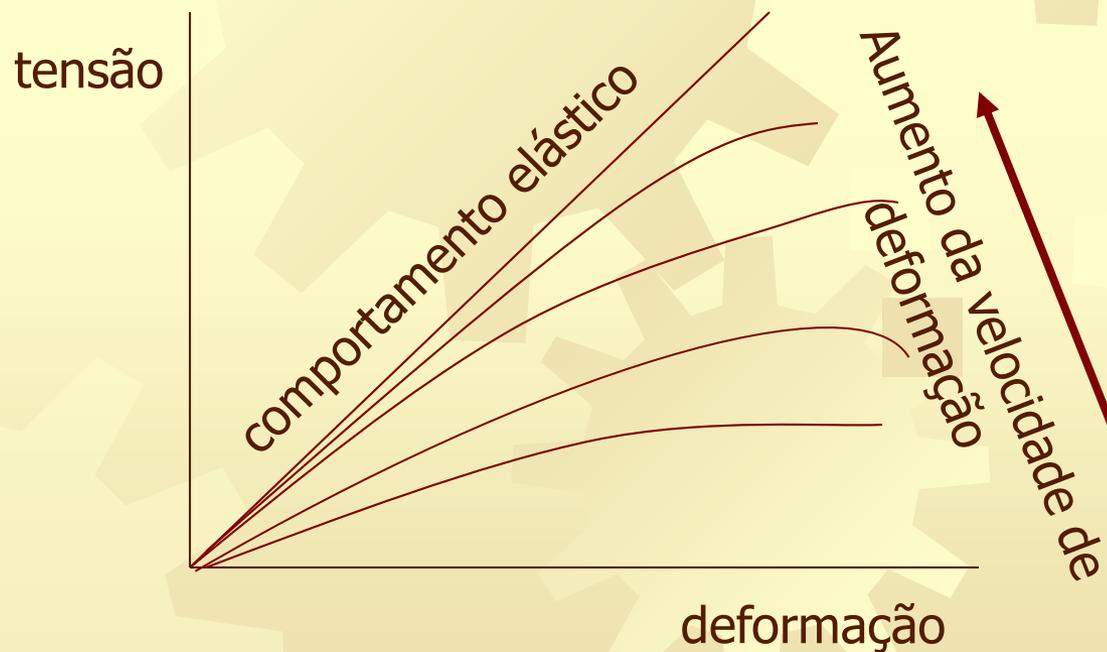


Fig. 7. Compressão crescente até a evolução do comportamento elástico.

# Nota:

O primeiro passo para a aplicação desses modelos é a escrita de EQUAÇÃO CONSTITUTIVA.

-Esta equação é construída considerando que para as associações em série as deformações são aditivas e as tensões constantes e que para as associações em paralelo as deformações são constantes e as tensões aditivas.

- Em processos de fluência define-se um tempo de retardamento e
- Em processos de relaxação de tensões define-se um tempo de relaxação

Perfil de Textura (TPA): registra todo o processo da resposta do alimento frente à aplicação de ensaios de compressão, proporcionando a obtenção de mais de uma variável mecânica em um só ensaio. Além disso, as variáveis obtidas estão relacionadas com uma série de atributos sensoriais da textura.

## Classificação dos Parâmetros de Textura:

### **Características Mecânicas**

Dureza (Hardness)

Coesividade (Cohesiveness)

Viscosidade (Viscosity)

Elasticidade (Elasticity/Springness)

Aderência (Adhesiveness)

Fragilidade (Brittleness/Fracturability)

Mastigabilidade (Chewiness)

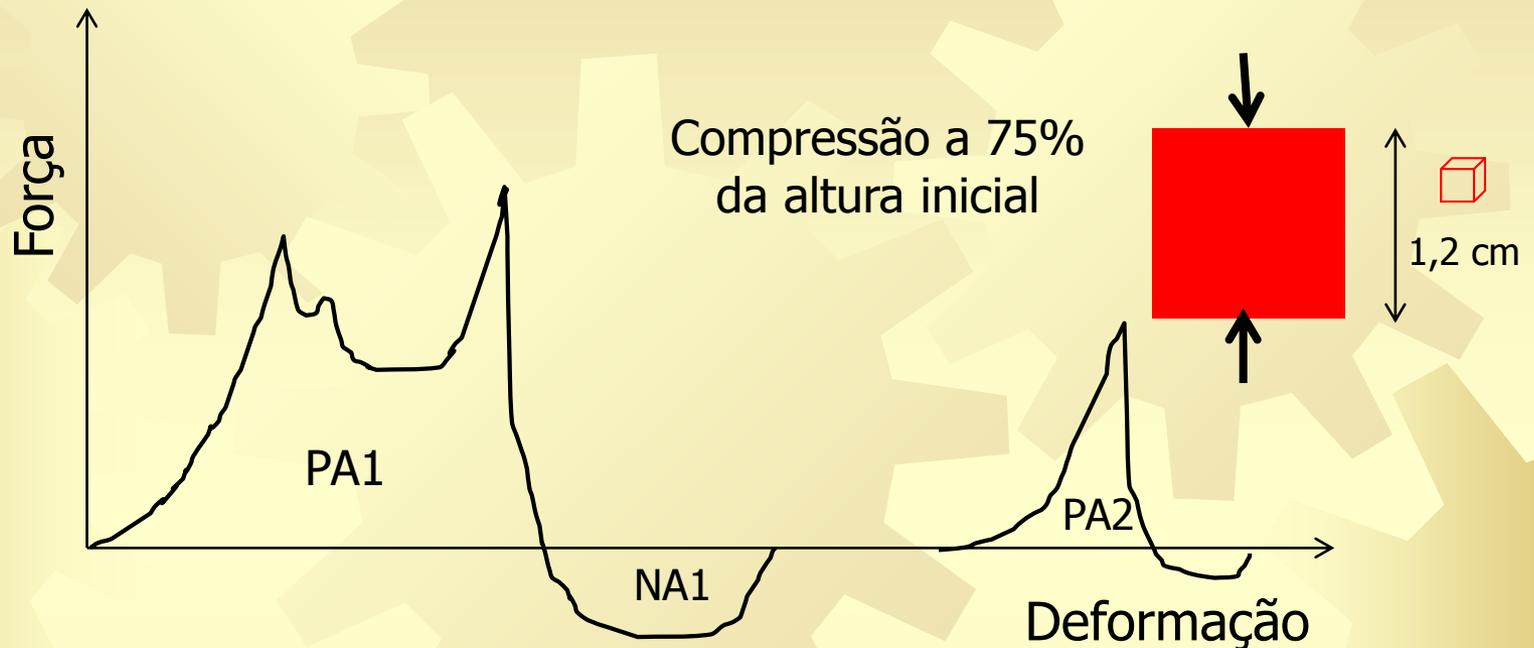
Gomosidade (Gumminess)

### **Características Geométricas**

Tamanho e forma das partículas

Forma e orientação das partículas

# Testes empíricos de simulação



**Fragilidade** (fraturabilidade): força para a 1ª quebra do material

**Dureza**: força máxima durante a primeira compressão (PA1)

**Coabilidade**: relação entre as áreas PA1 e PA2

**Adesividade**: área negativa NA1

**Elasticidade**: recuperação da altura entre o fim da 1ª compressão e o início da 2ª compressão

**Gomosidade**: Dureza x Coabilidade

**Mastigabilidade**: Gomosidade x Elasticidade

# APLICAÇÕES TEXTURÔMETRO TA-XT2i:



Fig. 9. Diferentes tipos de probes (cilindro, cone e placa) para os testes de penetração, perfuração ou compressão em alimentos como iogurtes, margarinas, géis, etc.

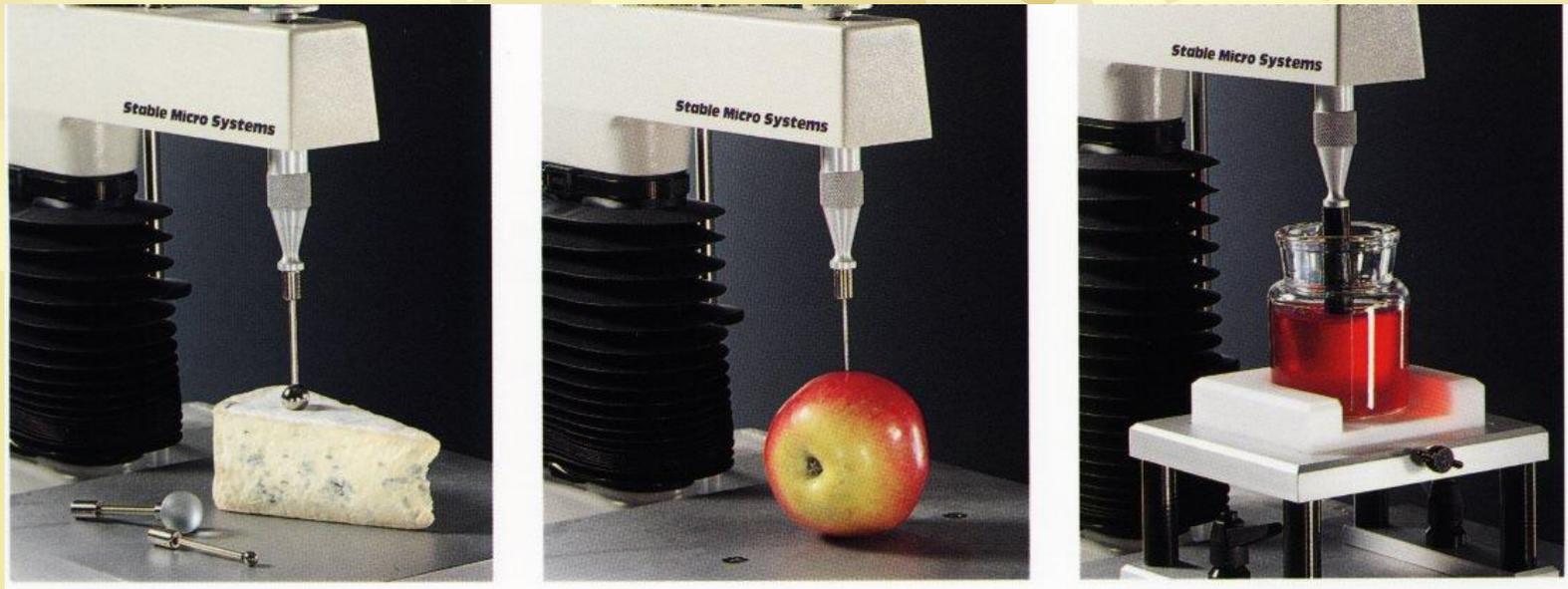


Fig. 10. Probes (bola esférica, agulha) utilizados para produtos de confeitaria, frutas, queijos, gelatinas entre outros, para a medida de características como dureza, resistência da casca, fraturabilidade (crocância).

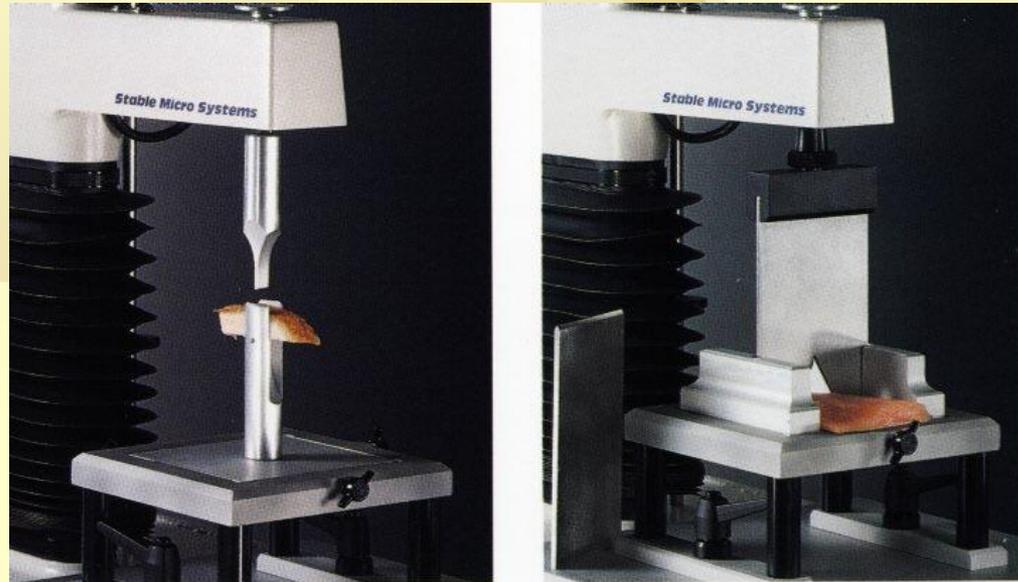


Fig. 11. Probes (dente incisivo, guilhotina) utilizados para produtos cárneos, vegetais ou algum tipo de produto que requeira testes de corte ou cisalhamento.

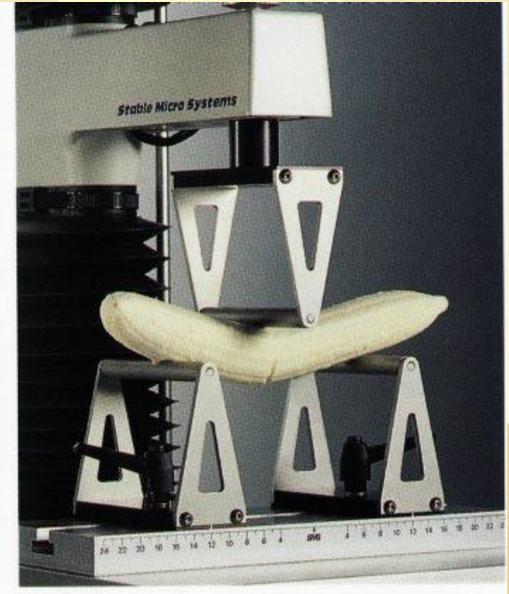


Fig. 12. Probes (crisp fracture support rig, disc plunger, three point bend rig) utilizados para batata frita, salgadinhos, géis, cremes, molhos, biscoitos, barras de chocolate, etc. As medidas são realizadas para a caracterização da fraturabilidade, viscosidade, força de quebra, entre outras.

# Leitura suplementar e vídeos

- ☀ Texto com muitas aplicações dos conceitos de viscoelasticidade aos alimentos e teste TPA
- ☀ <https://texturetechnologies.com/resources/texture-profile-analysis>
- ☀ Exemplos e exercícios de TPA:
- ☀ [https://www.youtube.com/watch?v=G\\_iJABEhE8U](https://www.youtube.com/watch?v=G_iJABEhE8U)

# Links de vídeos complementares:

- <https://youtu.be/l9bEpQ8cixY>
- <https://youtu.be/BE67KuH-yQg>
- <https://youtu.be/ZoBqiHai4wU>
- <https://youtu.be/PUwia6iB2yM>
- <https://youtu.be/uzyWxS0P0VE>
  
- <https://www.youtube.com/watch?v=KLQOefP2TO8>
- <https://www.youtube.com/watch?v=hY90bY74DBc>
- <https://www.youtube.com/watch?v=WxmhwA4DJM>
- <https://www.youtube.com/watch?v=ngZfZSJCWYo>
- <https://www.youtube.com/watch?v=1lzpZV8dlCU>
-