



CLASE 3. Propiedades mecánicas

Parte 2



Agenda

- CLASE 17/03.
 - Introducción a la reología
 - Reología de alimentos fluidos
 - Viscoelasticidad
- CLASE 24/03
 - Reología de sólidos
 - Ejemplos de métodos no destructivos
 - Introducción al laboratorio

Reología de sólidos

Conceptos generales

Reología de alimentos sólidos

Qué propiedades mecánicas nos interesa conocer de los alimentos sólidos?

- Elasticidad
- Falla
- Transición vítrea



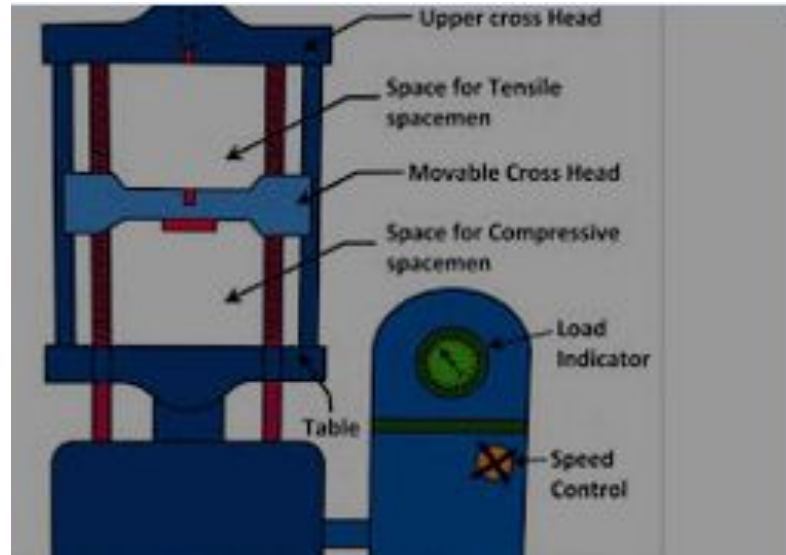
Cuál es la motivación?



- Control de calidad
- Diseño de procesos
- Empacado
- Procesamiento
- Almacenado
- ...

Máquinas universales

- Velocidad constante impuesta
- Monitoreo de fuerza vs. deformación



Máquinas universales





Formas más comunes de operación

- Compresión: El movimiento es hacia abajo (incluimos aquí penetración y doblado)
- Tensión: El movimiento es hacia arriba
- Relajación: Extensión o compresión fijas
- Carga cíclica

Materiales a los que generalmente se les hace ensayos mecánicos

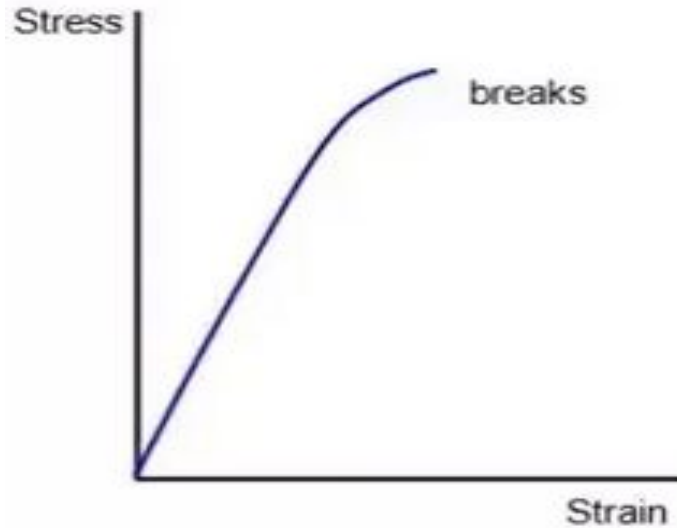
- Compresión



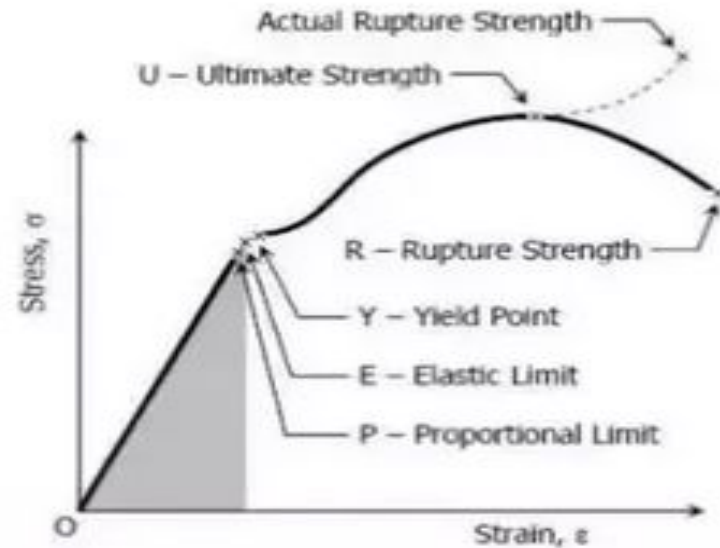
- Tensión



Curvas de esfuerzo-deformación

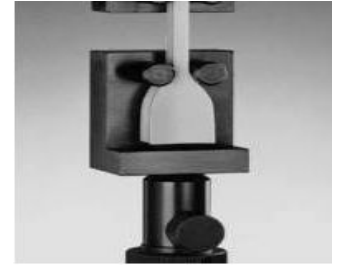


BRITTLE MATERIAL

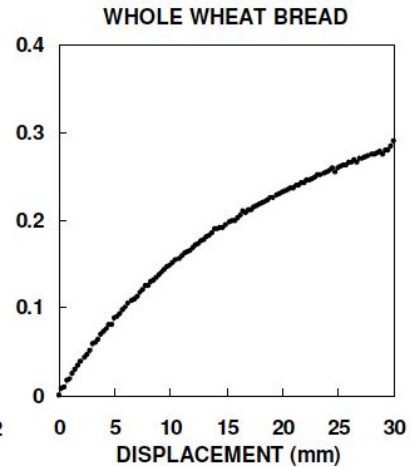
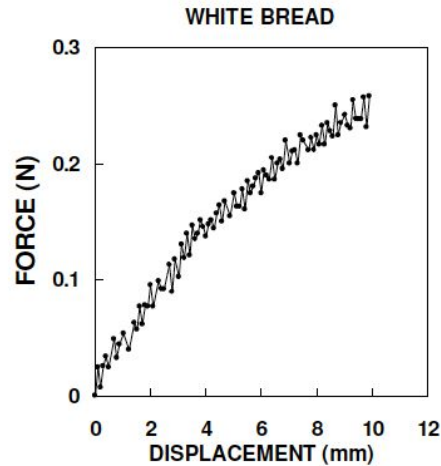
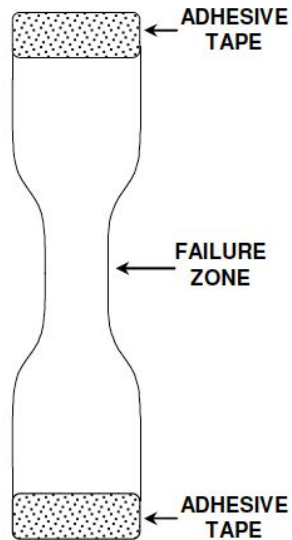


DUCTILE MATERIAL

Tensión en alimentos: problemas de agarre

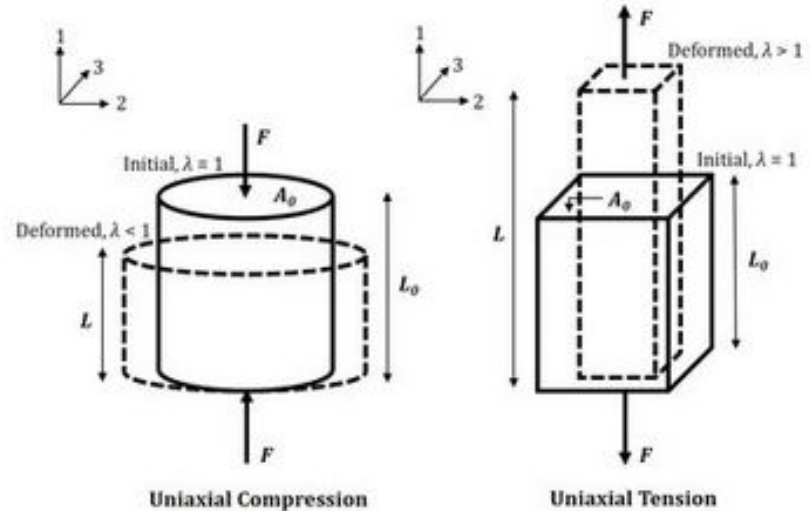


Ejemplo: miga de pan



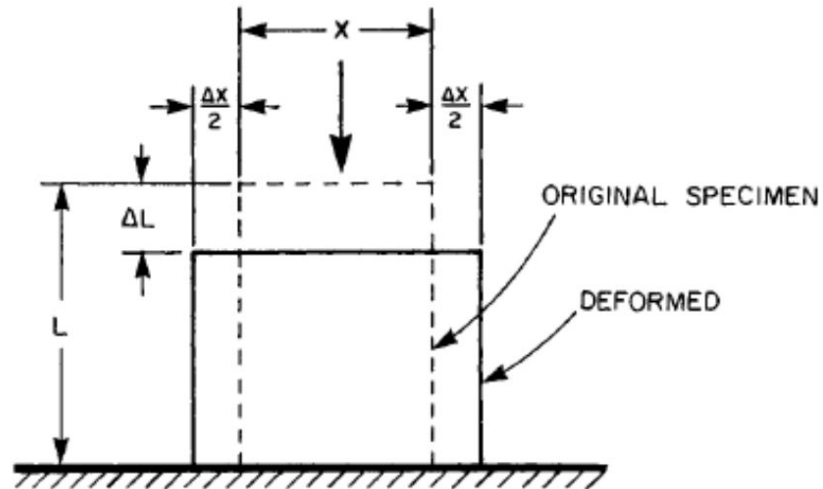
Muestra incompresible en compresión y tensión uniaxial

- En deformaciones grandes ($>20\%$)
- Esfuerzo: Fuerza momentánea/Área de aplicación momentánea
- Deformación: Tiene distintas definiciones

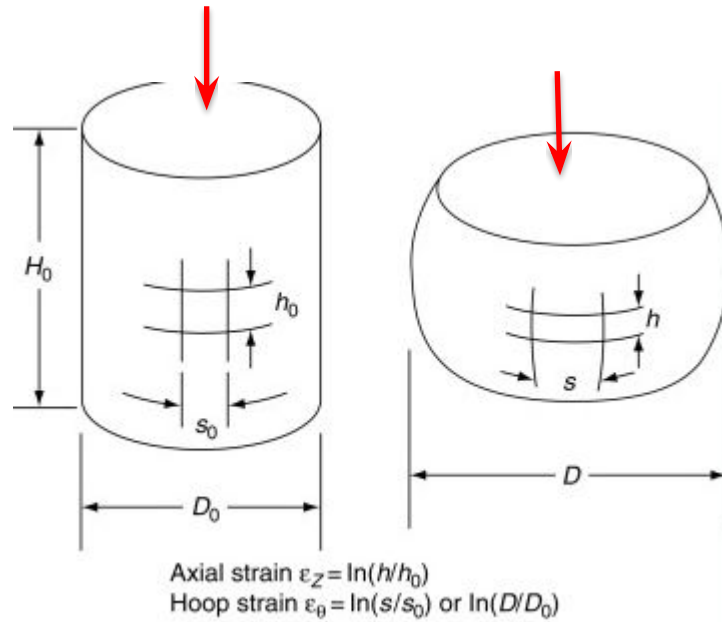


Radio de Poisson

$$\text{POISSON RATIO} = \frac{\Delta X/X}{\Delta L/L}$$

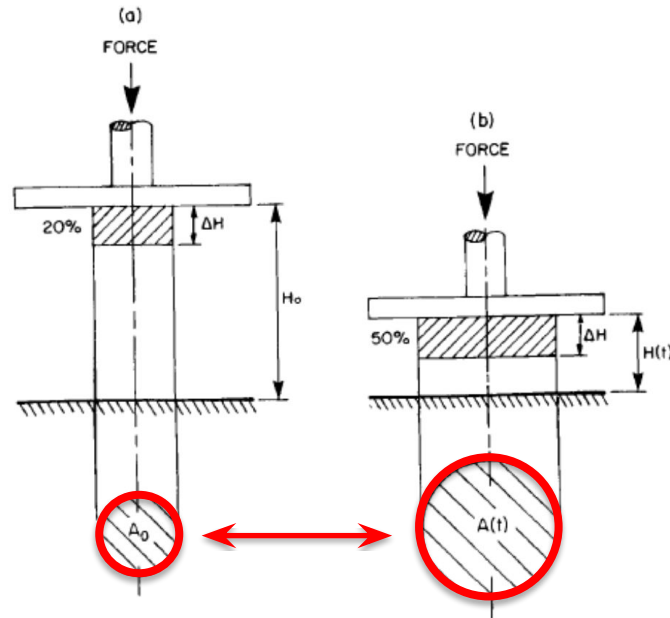


Lubricación y fricción



Muestra cilíndrica en compresión (lubricada)

Expansión del área transversal



- Esfuerzo: Fuerza momentánea/Área de aplicación momentánea



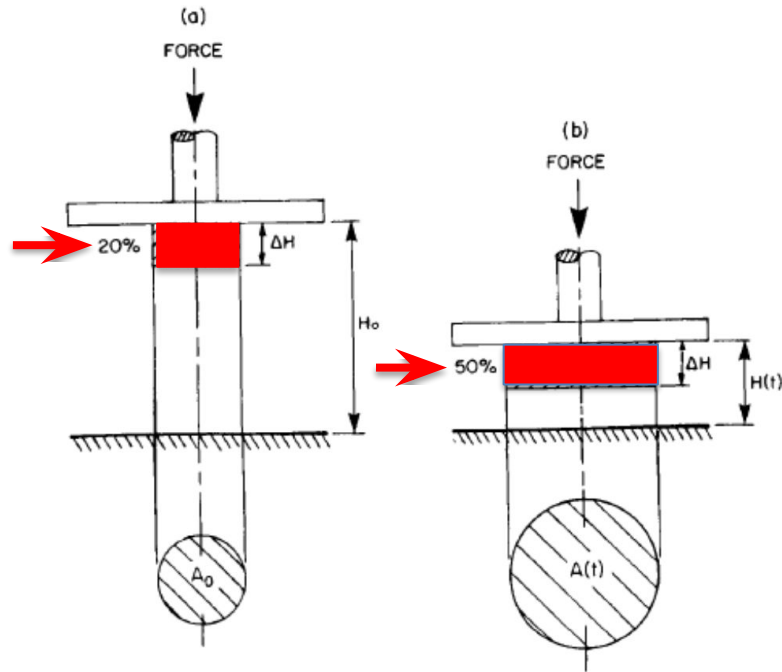
Cálculo del área transversal (muestras incompresibles)

$$Volume = H_0 A_0 = [H_0 - \Delta H(t)] A(t)$$

$$A(t) = \frac{A_0 H_0}{H_0 - \Delta H(t)}$$

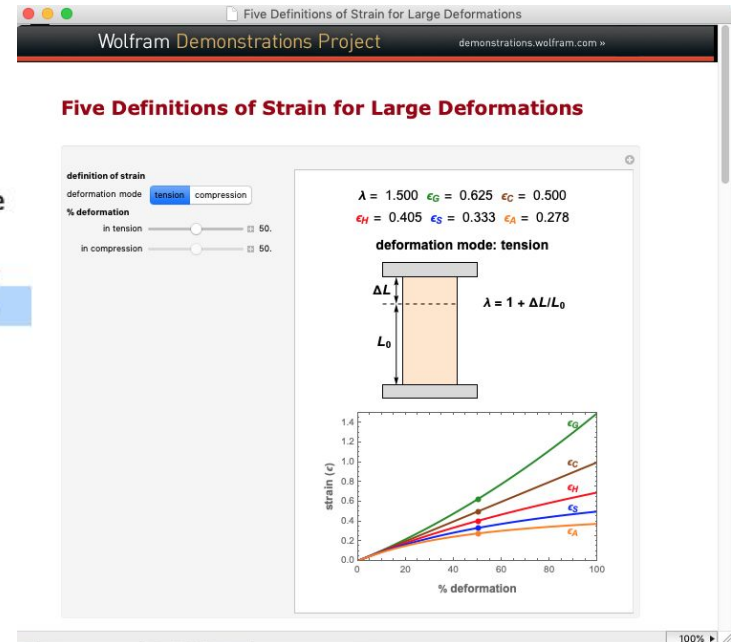
Muestra cilíndrica en compresión (lubricada)

- Igual deformación absoluta pero distinta deformación relativa!



Deformación en grandes deformaciones

and the percent deformation of specimens subjected to uniaxial tension and compression. The percent deformation is selected with a slider and the corresponding strain values are displayed numerically and as moving dots on curves. Also shown is the ratio, λ , between the length of the stretched or compressed specimen, $L_0 \pm \Delta L$ and L_0 , where L_0 is the initial length and ΔL the absolute deformation in length units. The strain definitions are: Cauchy's strain, $\epsilon_C = \lambda - 1$, Hencky's, $\epsilon_H = \log(\lambda)$, Green's, $\epsilon_G = (\lambda^2 - 1)/2$, Swalinger's, $\epsilon_S = (\lambda - 1)/\lambda$, and Almansi's, $\epsilon_A = (\lambda^2 - 1)/2\lambda^2$. Each strain is plotted versus the percent deformation, $100 \Delta L/L_0$, as a colored curve along which the dots move.





Deformación de Hencky o deformación verdadera o natural

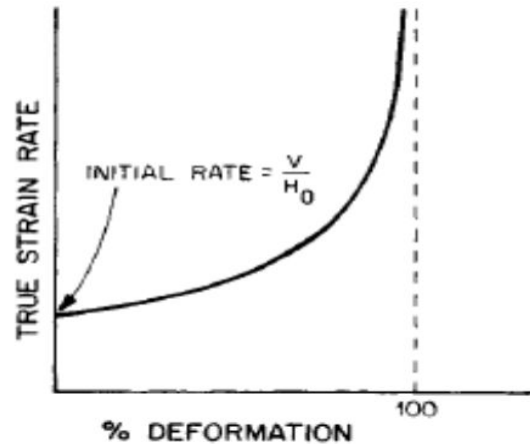
$$\epsilon_E = \frac{\Delta H}{H_0} \quad \circ \quad \epsilon_E = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100$$

Donde $H(t) \sim H_0$ $d\epsilon(t)/dt \sim dH(t)/H_0$ $\epsilon(t) = \Delta H(t)/H_0$

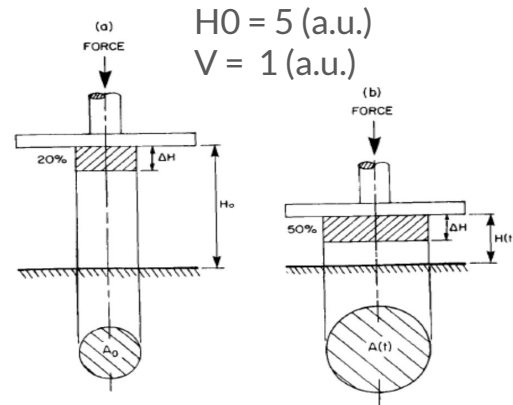
$$\epsilon_T = \ln\left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta H}\right)$$

Where $H(t) \neq H_0$ (in compression) $d\epsilon(t)/dt = -dH(t)/H(t)$ $\epsilon(t) = \ln[H_0/H(t)]$

Velocidad constante no es lo mismo que deformación constante



$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{H_0 - Vt}$$



Same displacement rate - V
 20% per time unit 50% per time unit

Curvas esfuerzo-deformación aparentes y corregidas

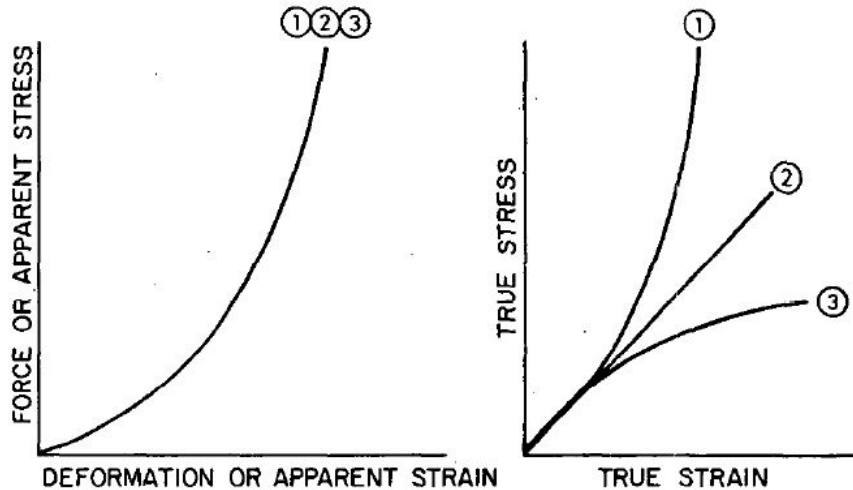


Fig. 1—Schematic representation of the difference between apparent and true compressive stress-strain relationships.

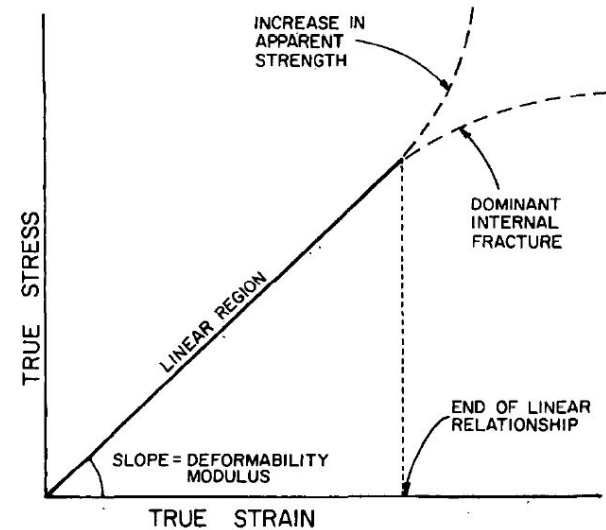
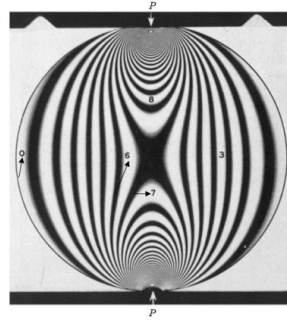
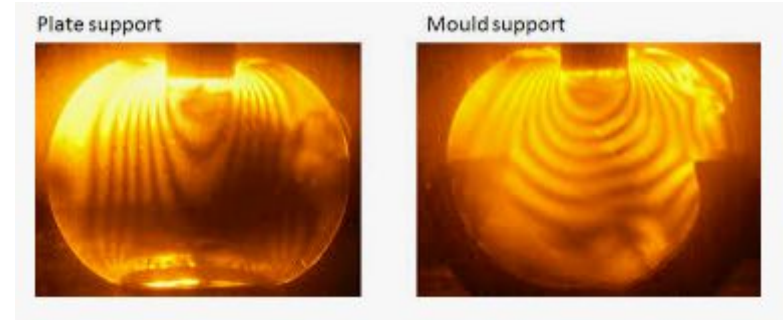


Fig. 2—Mechanical characterization of fish flesh by true stress-strain curves.

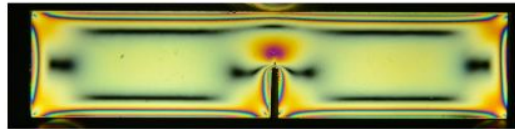
Esfuerzo de contacto



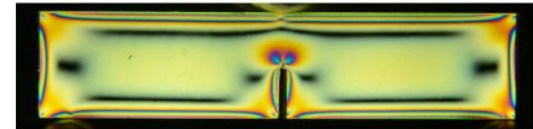
Compressed disk



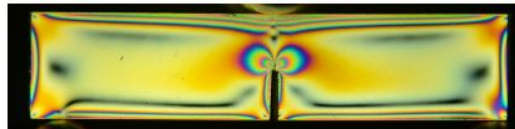
“Penetrometer”



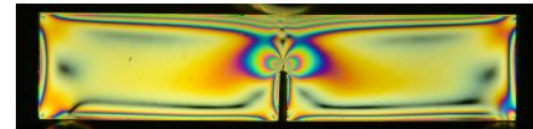
(a)



(b)



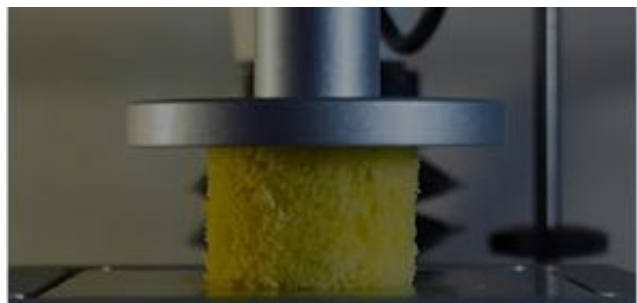
(c)



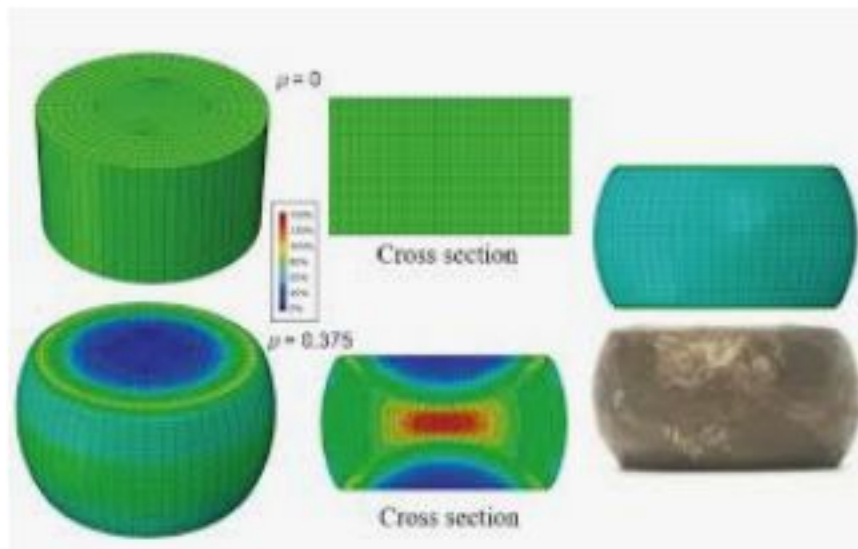
(d)

3 points loading (bending)

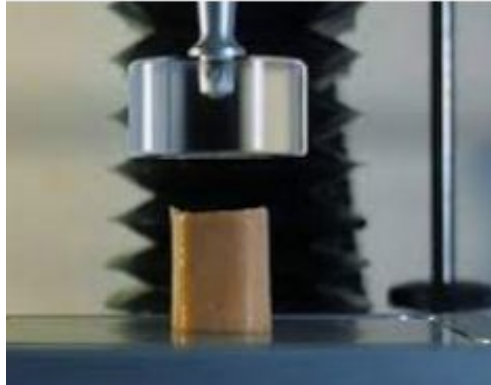
Incluso en muestras “sencillas”



Texture Profile Analysis | Texture ...



Carga radial y carga axial



Efecto del diámetro de la muestra en la curva de fuerza desplazamiento

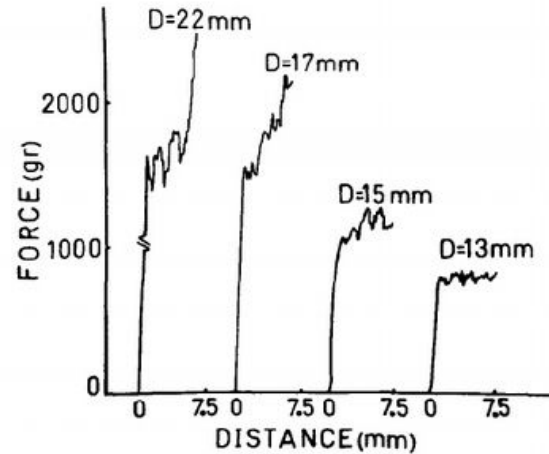


Fig. 6—The effects of the specimen diameter on the shape of the force deformation curve of a ripe watermelon.

Medidas instrumentales

MIT Denture Tenderometer

- 1950s



Métodos empíricos: Texturómetro

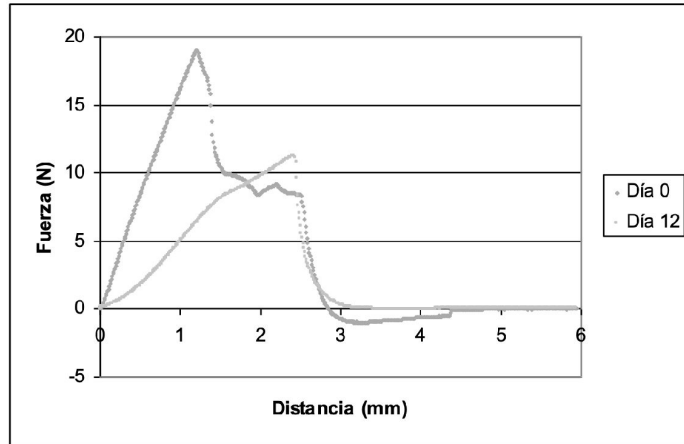
Diseñado para simular masticación. (Lo logra?)

Consiste en bajar y subir una sonda a una velocidad controlada midiendo la fuerza necesaria para lograr este desplazamiento una vez que la sonda entra en contacto con el alimento.

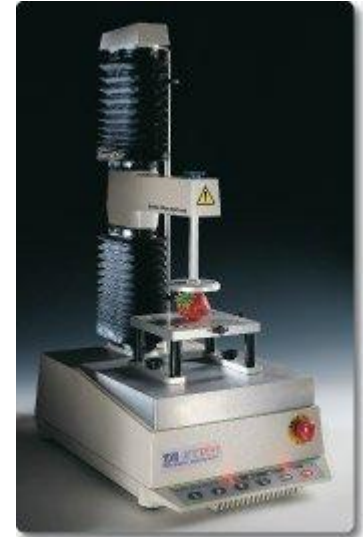


Texturómetro: Ensayos de compresión

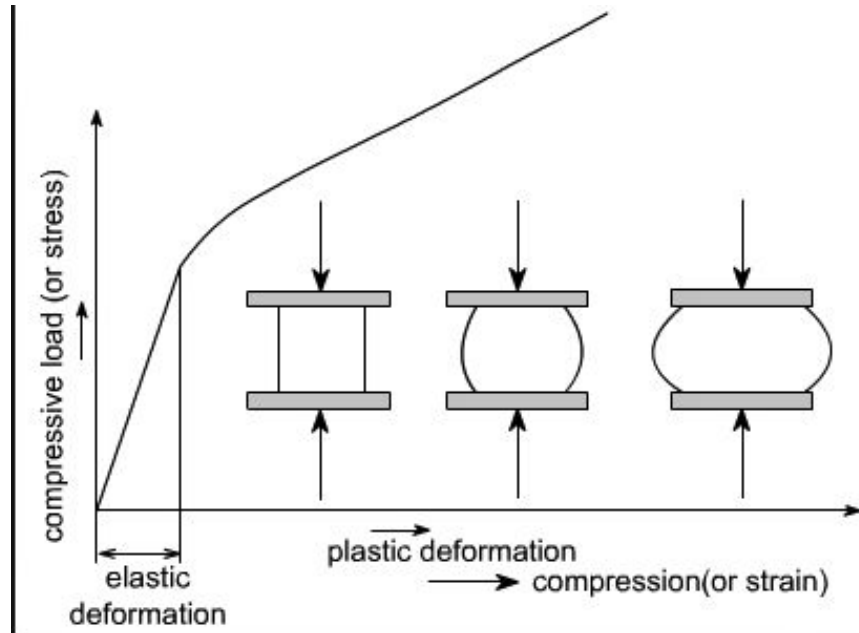
- Se utiliza en geles, frutas, quesos, entre otros



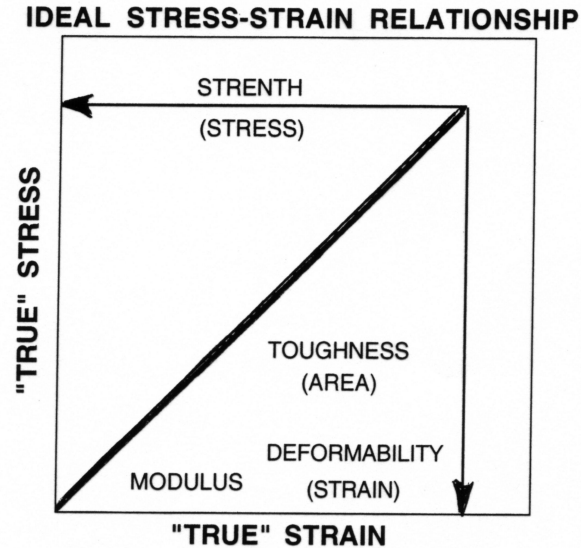
Duraznos almacenados a 5oC



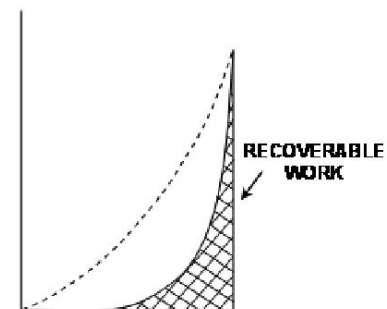
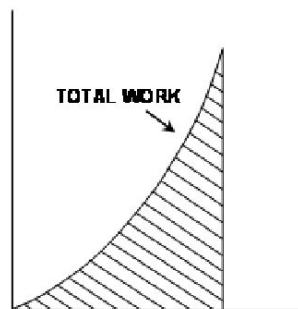
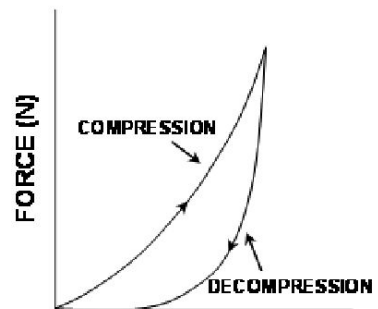
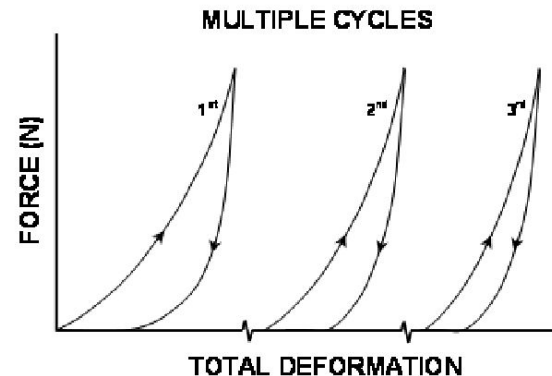
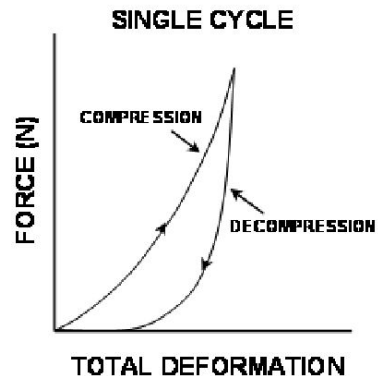
Curva de compresión de sólidos incompresibles



Relación esfuerzo-deformación clásica

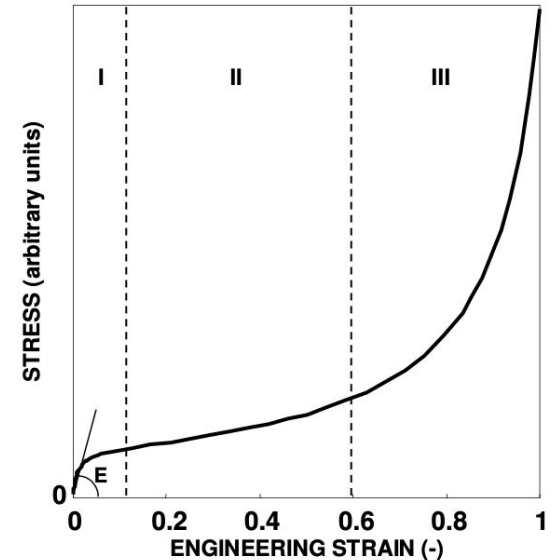
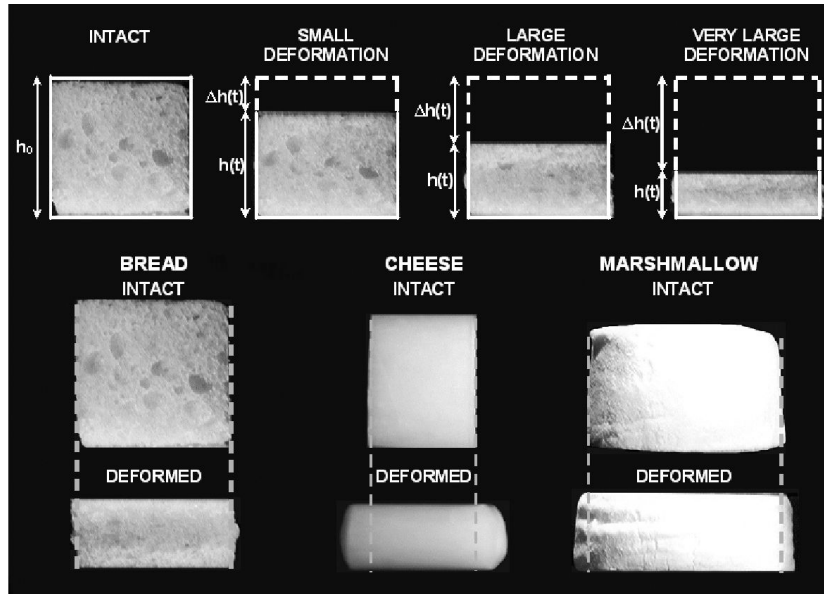


Ciclos de compresión descompresión



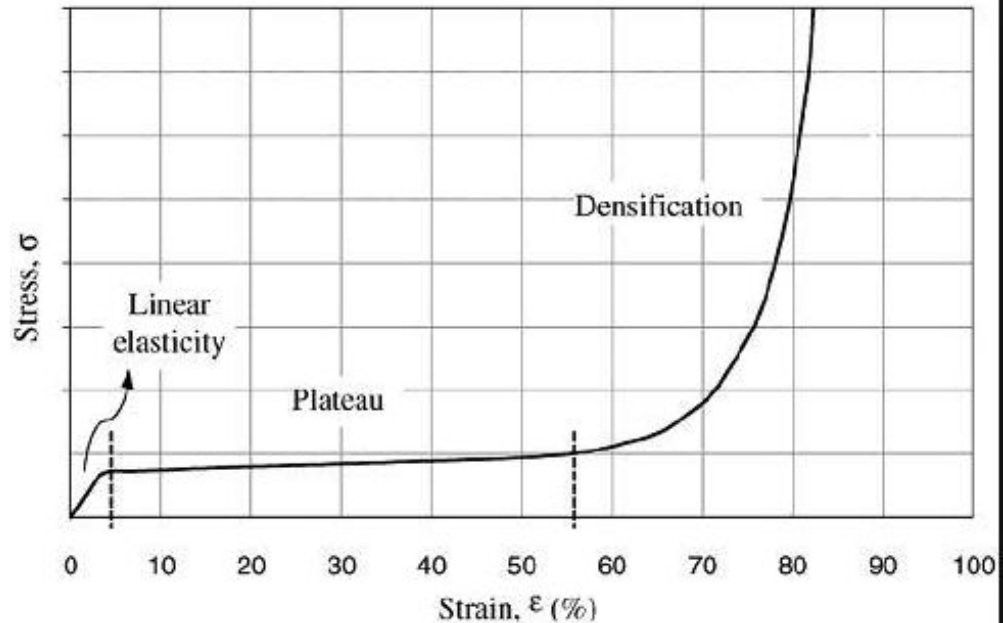
TOTAL DEFORMATION

Ensayos de compresión: esponjas

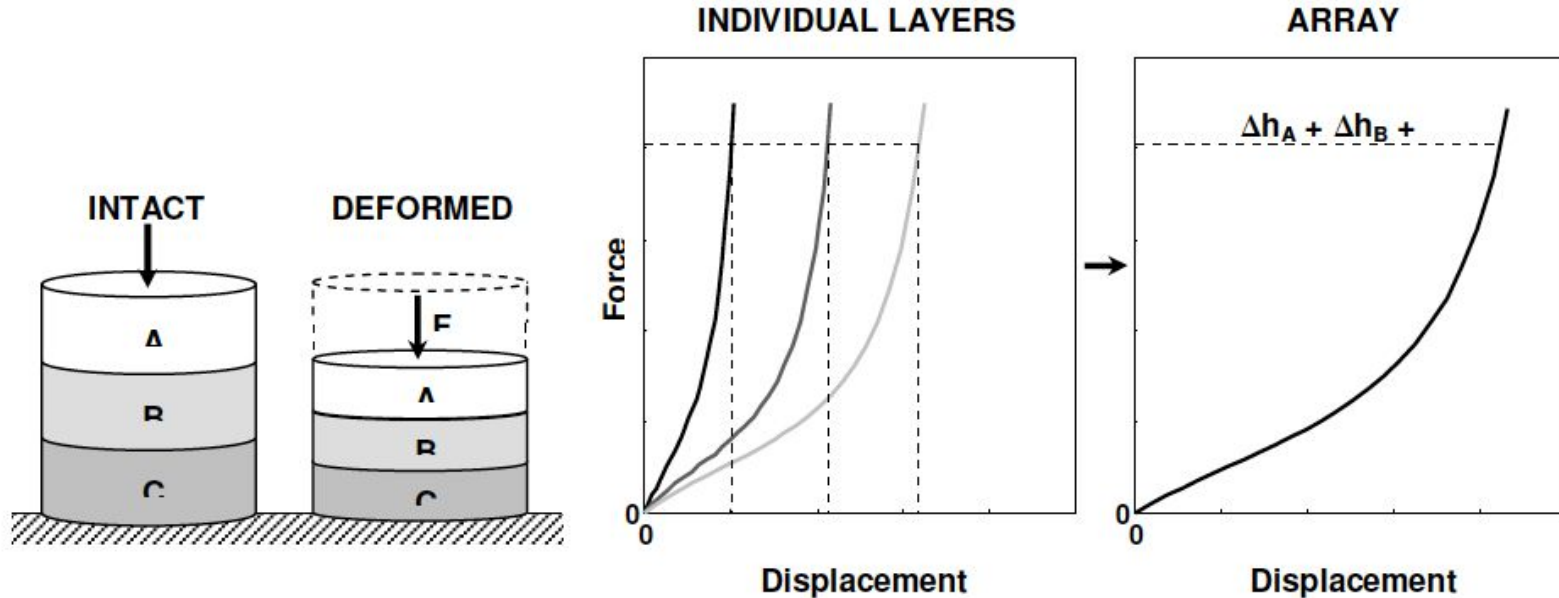


Ensayos de compresión: esponjas

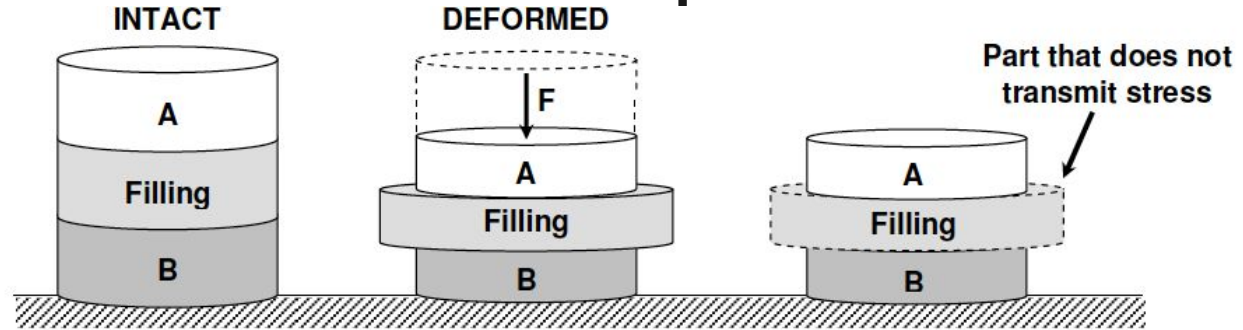
- Grandes deformaciones para bajos esfuerzos
- Por eso se usan para amortiguar



Esfuerzo-deformación para un arreglo de esponjas

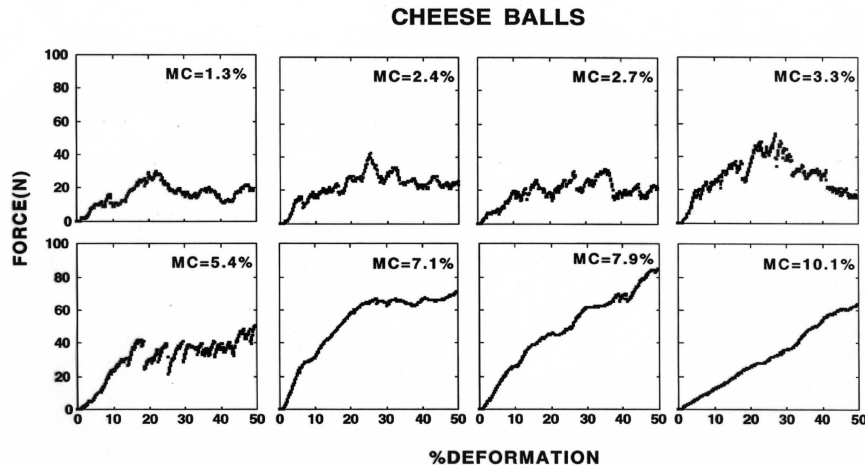


Deformación de alimentos en capas



Ensayos de compresión: importancia de la humedad

- Los resultados dependen de la humedad de la muestra



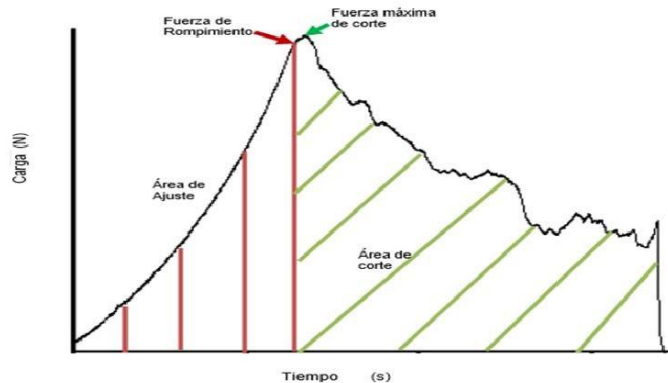
Texturómetro: Ensayos de corte

- Se utiliza para chocolate, galletitas, etc

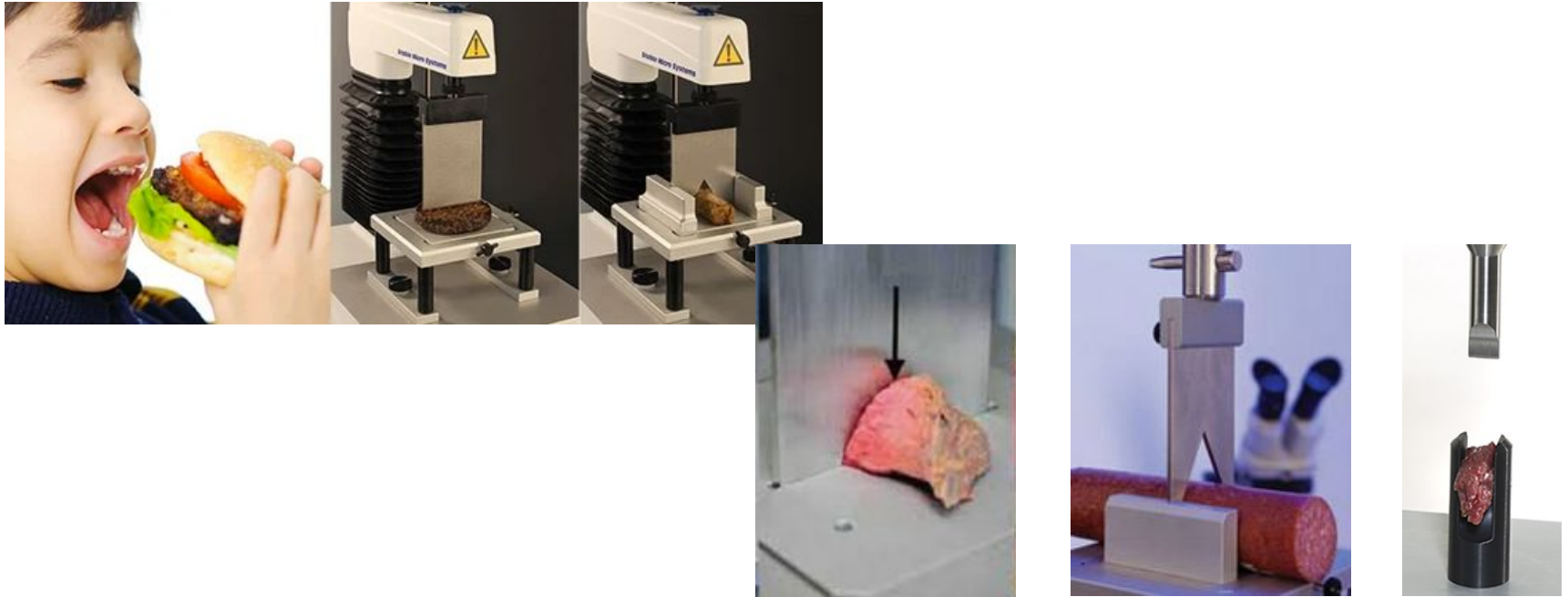


Texturómetro: Ensayos Warner Bratzler

- Método para medida de terneza de carne



Qué estamos imitando?



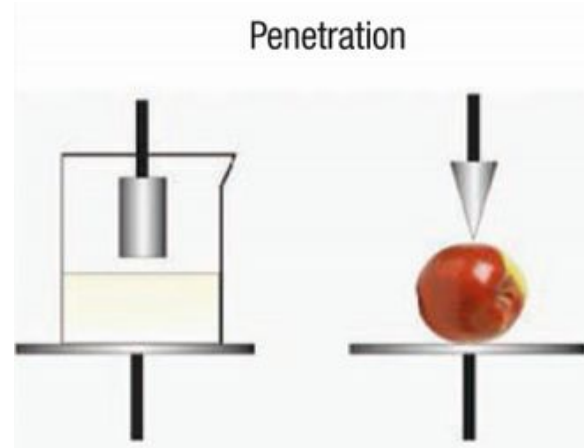
Texturómetro: Otras geometrías



Texturómetro: Otras geometrías



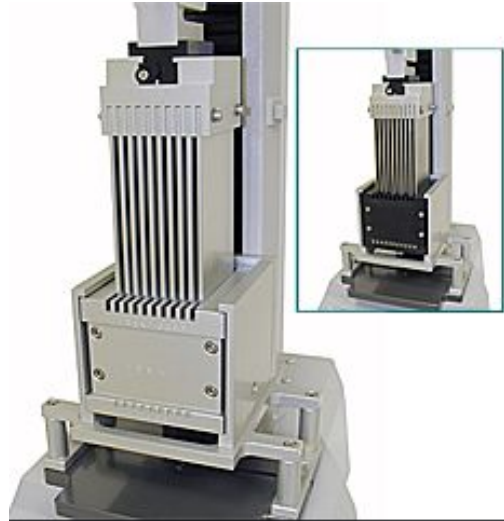
La textura del alimento realmente depende de la geometría de la sonda?



La textura del alimento realmente depende de la geometría de la sonda?



La textura del alimento realmente depende de la distancia entre las cuchillas?



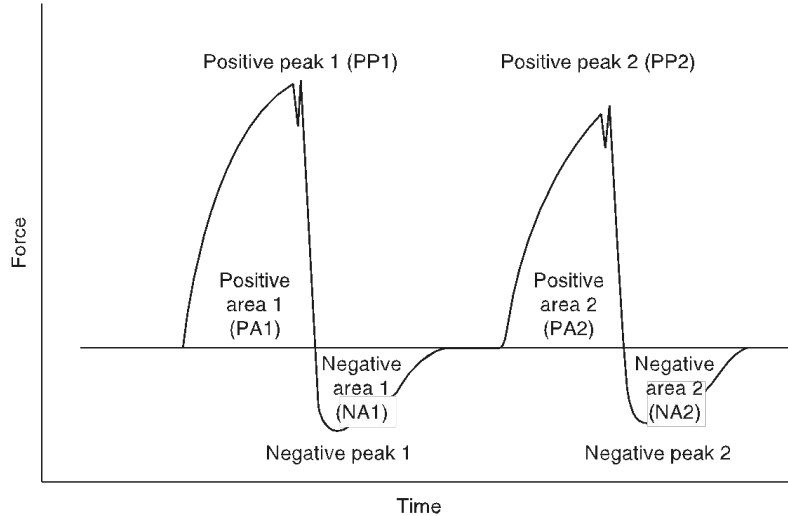
Texturómetro: Análisis de perfil de textura (TPA)

- Busca imitar la masticación
- Consiste en dos compresiones consecutivas
- Se miden picos de fuerza y áreas del gráfico, y se definen distintos parámetros en función de estas



MÉTODO EMPÍRICO

Texturómetro: Análisis de perfil de textura (TPA)



- Fracturabilidad: PA1
- Dureza: PP1
- Cohesividad: PA2/PA1
- Adhesividad: NA1
- Elasticidad: Altura que recupera el alimento entre ambas compresiones
- Gomosidad: dureza x cohesividad
- Masticabilidad: gomosidad x elasticidad

Area under the curve -dimension

Force - deformation

$$U = \text{Work (Energy)}$$

Stress - strain

$$= \text{stress} = \frac{F}{L^2} = \frac{FL}{L^2 L} = \frac{\text{work}}{\text{volume}}$$



RECORDATORIO IMPORTANTE

- Las medidas instrumentales siempre dan resultados
- Lo importante es determinar si estos resultados son significativos

Otras consideraciones

La geometría no es exactamente la misma







Entonces qué hacemos?

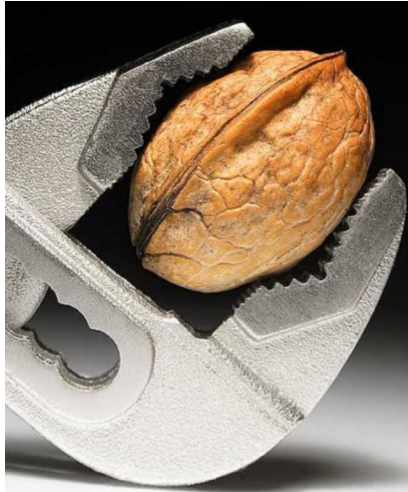
- Tratamos de encontrar una correlación entre las evaluaciones sensoriales y las medidas instrumentales
- Cómo se relacionan?



Asumiendo que esta correlación existe...

- Los instrumentos y los humanos tienen la misma sensibilidad?
- Podemos percibir propiedades de textura independientemente de atributos químicos, térmicos etc.?

Máquinas rígidas vs. máquinas blandas



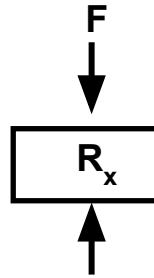
La “máquina inversa”

- Prácticamente toda la deformación tiene lugar en la máquina y no en el objeto medido



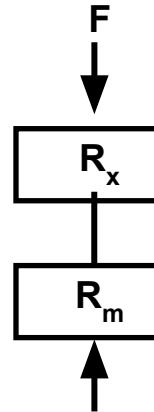
Máquinas rígidas vs. máquinas blandas

Stiff Machine



$$R = R_x$$

Soft Machine

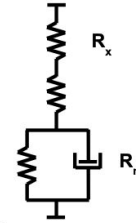


$$R = \frac{R_x R_m}{R_x + R_m}$$

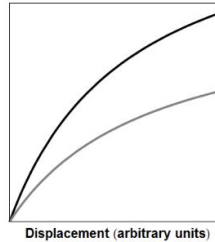
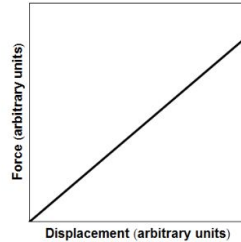
Máquinas rígidas vs. máquinas blandas

Rigid machine

Soft viscoelastic machine



Deformation



High rate

Low rate

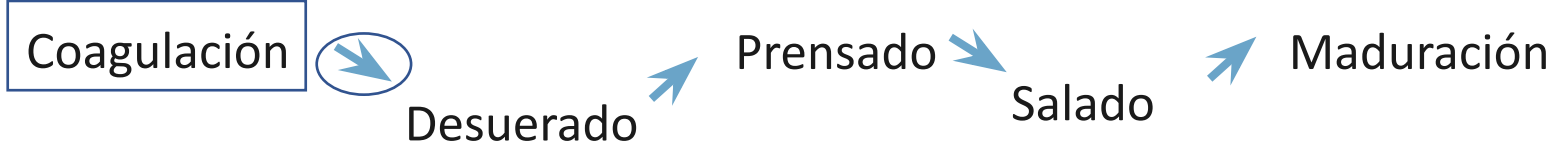
Ejemplos de métodos no destructivos



Medidas no destructivas

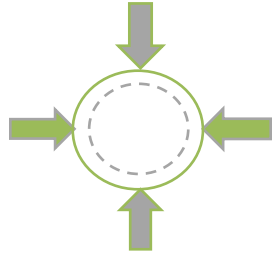
- Es posible medir reología de forma no destructiva?
 - Tomografía
 - Viscosímetro vibracional
 - Ultrasonido

Ejemplo: coagulación de leche



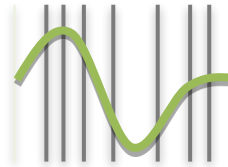
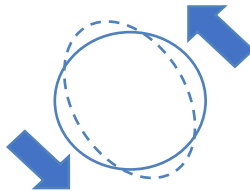
- Por qué son importantes?
 - Afecta el rendimiento
 - Afecta la calidad del queso

Ejemplo: coagulación de leche

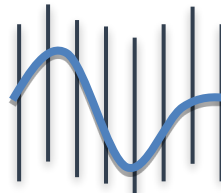


Módulo de compresión: K

Módulo de corte: μ



Ondas de
compresión



Ondas de
corte

Ecografía

$$K = \rho v_{us}^2$$

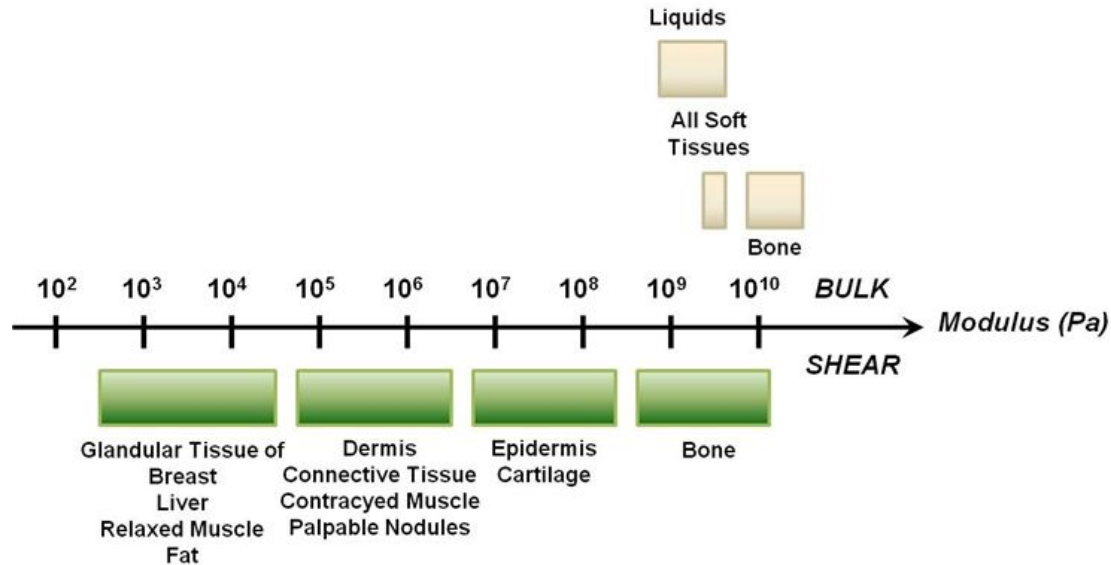
~ 1500
m/s

Elastografía

$$\mu = \rho v_s^2$$

$\sim \text{pocos}$
m/s

Ejemplo: coagulación de leche



Ecografía

$$K = \rho v_{us}^2$$

~1500 m/s

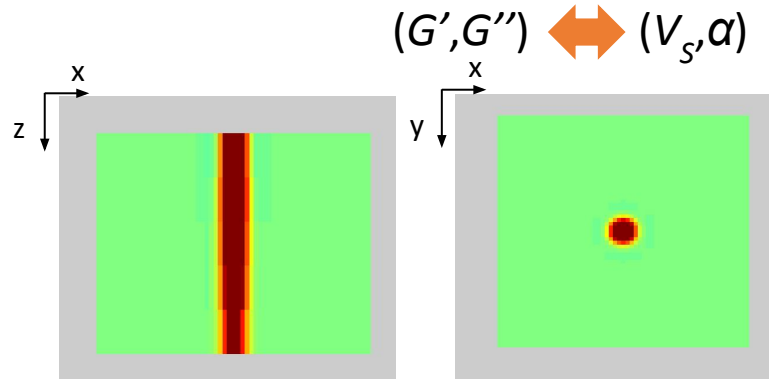
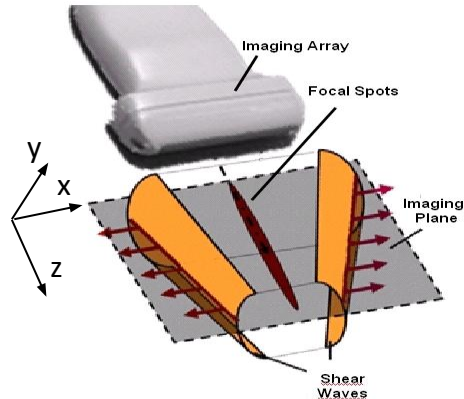
Elastografía

$$\mu = \rho v_s^2$$

~pocos m/s

Ejemplo: coagulación de leche

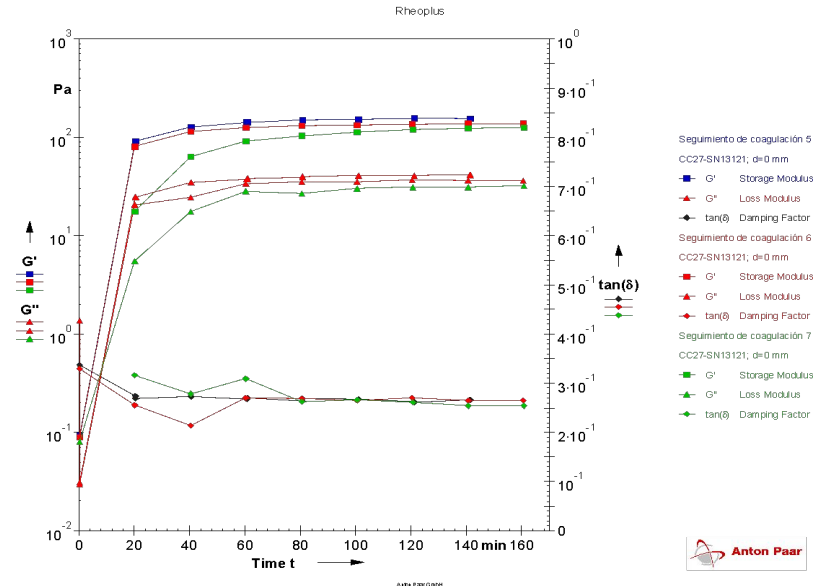
- Podemos relacionar la velocidad y atenuación de las ondas de corte con los módulos de almacenamiento y pérdida del material



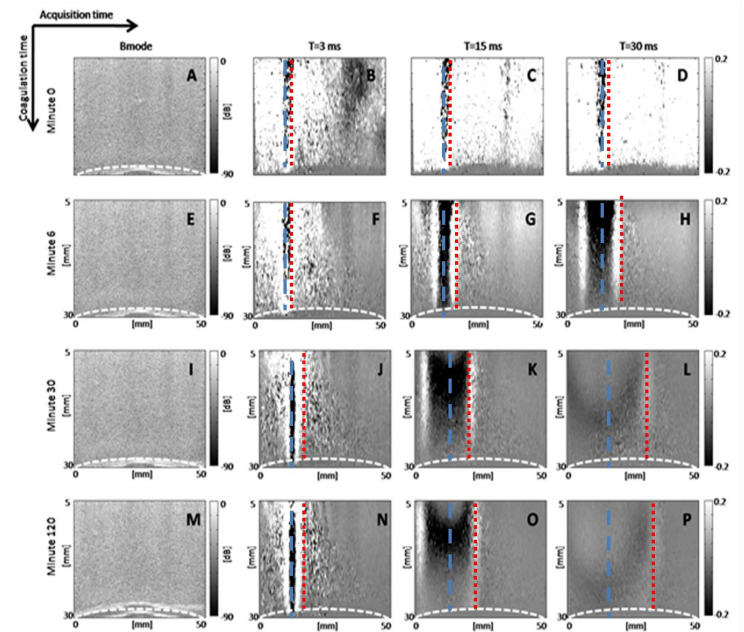
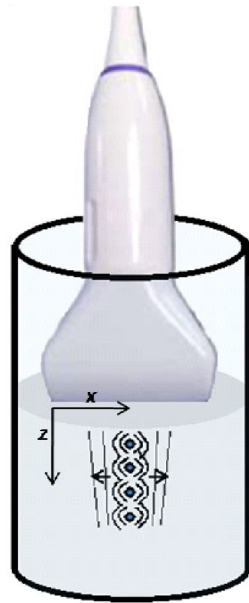
$$G' = \frac{\rho v_s^2}{\left| 1 - \left(\frac{\alpha v s}{\omega} \right)^2 \right|^2 * \left(\frac{2}{1 - \left(\frac{\alpha v s}{\omega} \right)^2} - 1 \right)^2}$$

$$\rho_s^2 * \frac{\sqrt{\left(\frac{2}{1 - \left(\frac{\alpha v s}{\omega} \right)^2} - 1 \right)^2 - 1}}{\left| 1 - \left(\frac{\alpha v s}{\omega} \right)^2 \right|^2 * \left(\frac{2}{1 - \left(\frac{\alpha v s}{\omega} \right)^2} - 1 \right)^2}$$

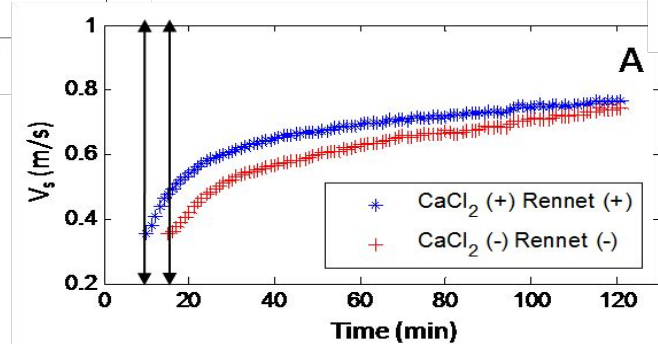
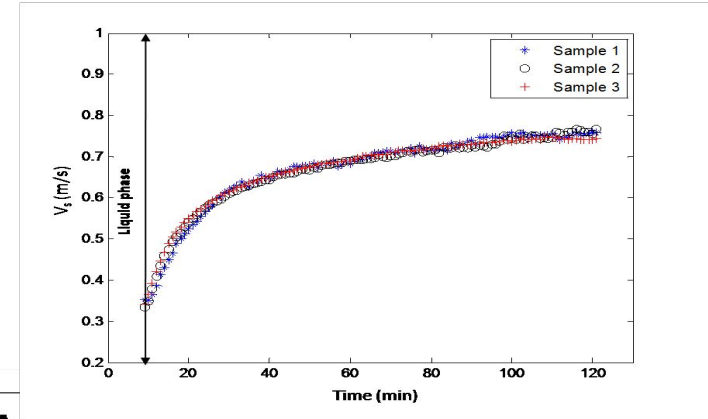
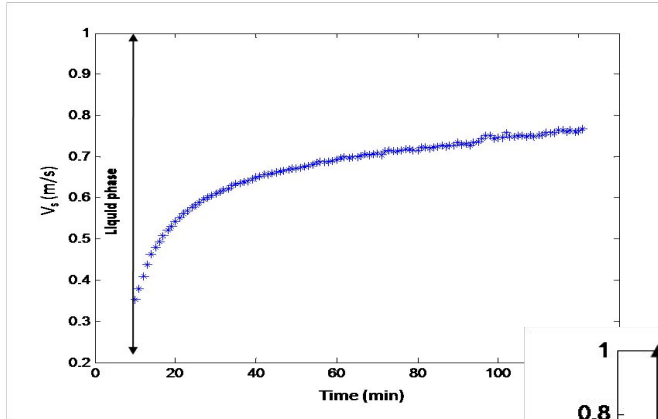
Ejemplo: coagulación de leche



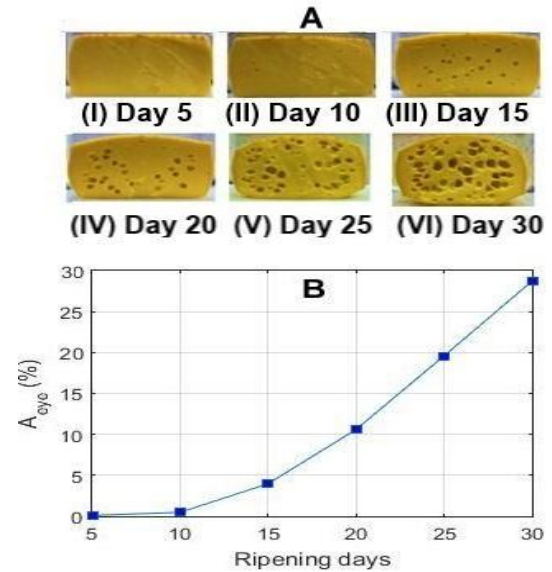
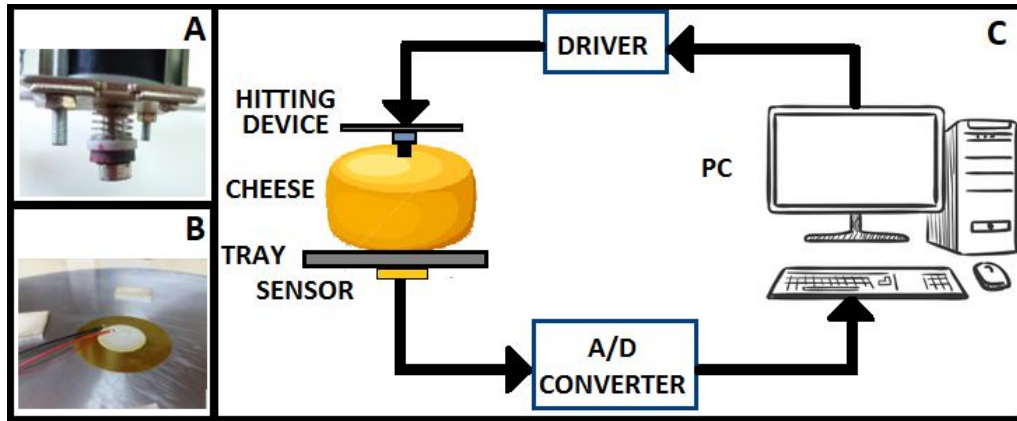
Ejemplo: coagulación de leche



Ejemplo: coagulación de leche



Ejemplo: maduración queso



Ejemplo: maduración queso

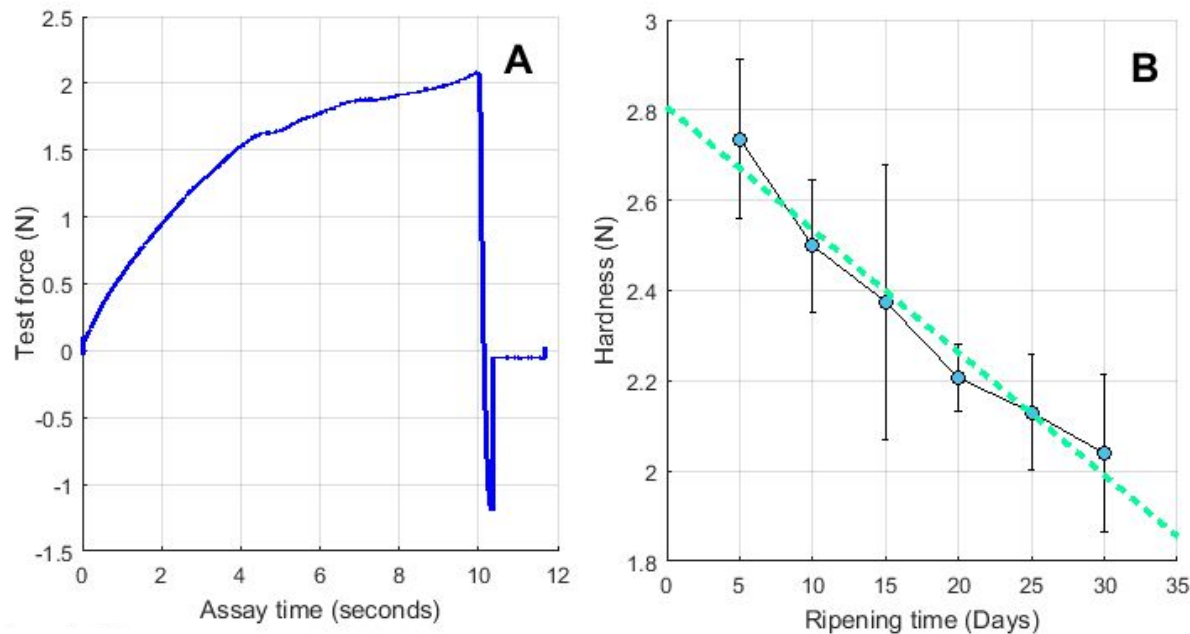
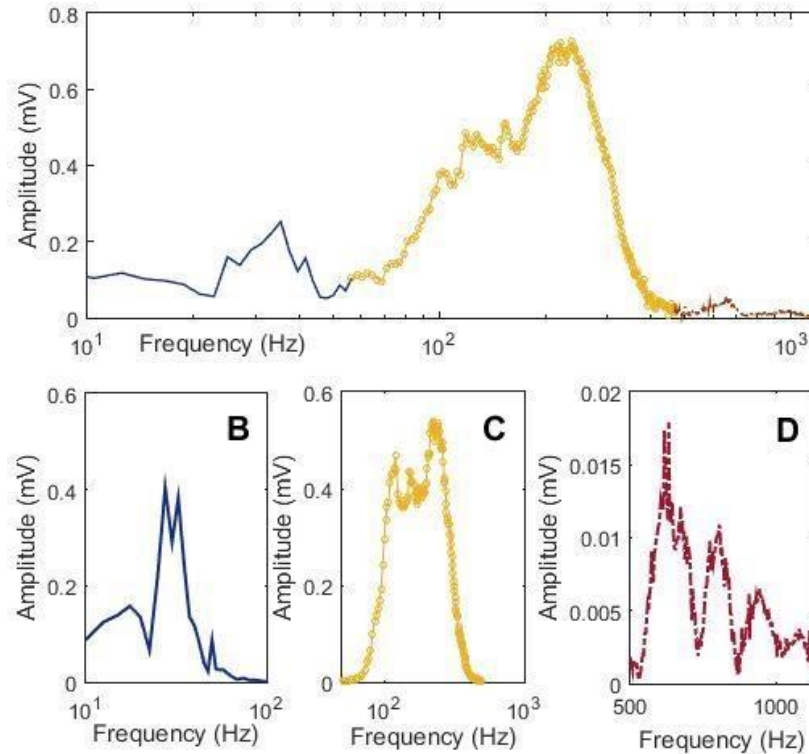


Figure 4. Texture measurement and evolution over ripening time. (A) Penetration test curve for a cheese sample at day 30. (B) Hardness evolution over ripening time. In continuous line and circular markers (-O-) is the experimental data and in discontinuous line (---) is the linear regression that best fit the data. Error bars correspond to standard deviation of the measurements.

Ejemplo: maduración queso



Ejemplo: maduración queso

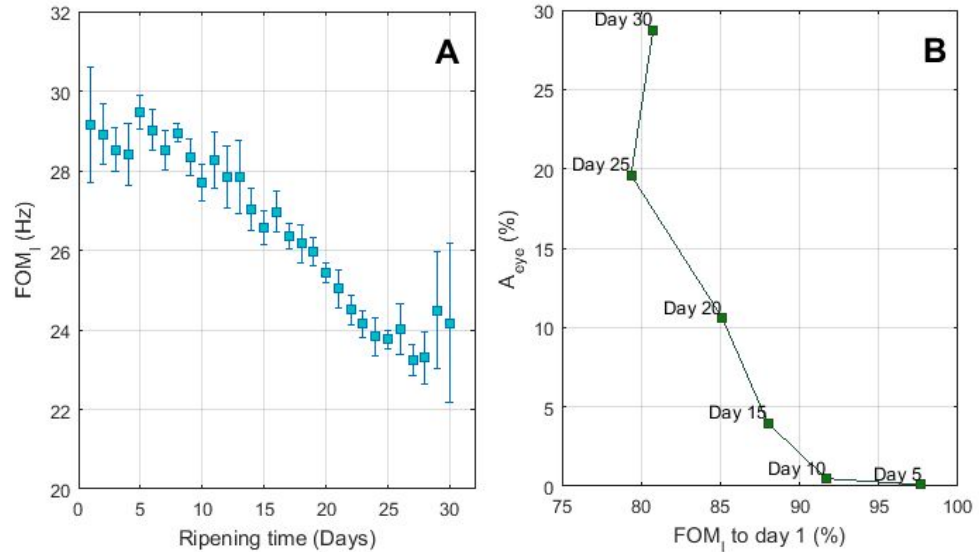


Figure 6. FOM results and relationship with eye area. (A) Squares (■): FOM results for low frequencies during ripening. Error bars correspond to standard deviation of the measurements. (B) Squares (■): eye area as function of normalized FOM for low band. Continuous line (—): tendency line connecting data points.

Introducción al laboratorio



Laboratorio 1

- Cuándo?
 - 28/03 de 18 a 20 hs
- Dónde?
 - Laboratorio de TAPA 5to. piso Facultad de Ingeniería
- Qué?
 - Medidas en texturómetro de:
 - Frutas
 - Snacks
 - Panes