

# Proprietà reologiche e meccaniche degli alimenti

Modulo di: **Analisi Fisiche**  
C.d.L. Scienze e Tecnologie Alimentari

Prof. Giampiero Sacchetti  
[gsacchetti@unite.it](mailto:gsacchetti@unite.it)



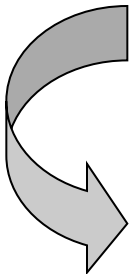
# Consistenza degli alimenti

Quando:

- Mescoliamo una salsa,
- Versiamo un liquido
- Mastichiamo un boccone
- Beviamo una bevanda ....

Rileviamo una **consistenza** con i nostri sensi.

## CONSISTENZA



Complesso delle proprietà che hanno origine dagli elementi strutturali ed il modo con cui esso interagisce con i sensi

**Importante parametro sensoriale**

# Alimenti e consistenza

- **Liquidi**, più o meno viscosi (olio, acqua, succhi)
- **Gel** di varia consistenza (a base amido: polenta, purè; gel pectici: marmellate; gelatine: di frutta, di carne)
- Solidi: alimenti **fibrosi** (proteine, cellulosa)
- Aggregati di cellule turgescenti (vegetali, carni fresche)
- Alimenti solidi untuosi di consistenza viscosa (grassi, cioccolato, ...)
- Alimenti solidi, secchi e friabili di struttura granulosa (biscotti)
- Alimenti solidi, secchi, friabili, di struttura cristallina (zucchero)
- Alimenti con struttura vetrosa (caramelle dure)
- Alimenti porosi ed aerati (pane)

# Consistenza degli alimenti e stato fisico

- **Corpo solido**: si deforma (elasticità)
- **Corpo liquido**: fluisce (viscosità)

**Un alimento**: può essere in parte solido e liquido.

Molti alimenti possono essere considerati in linea generale materiali **viscoelastici**

---



# Consistenza degli alimenti e struttura

Il modo con cui un alimento risponde

- fluisce
- si deforma
- si frattura

sotto le forze imposte da una sollecitazione di qualsiasi natura (tastamento o masticazione)

definisce la sua **consistenza** e dipende da:

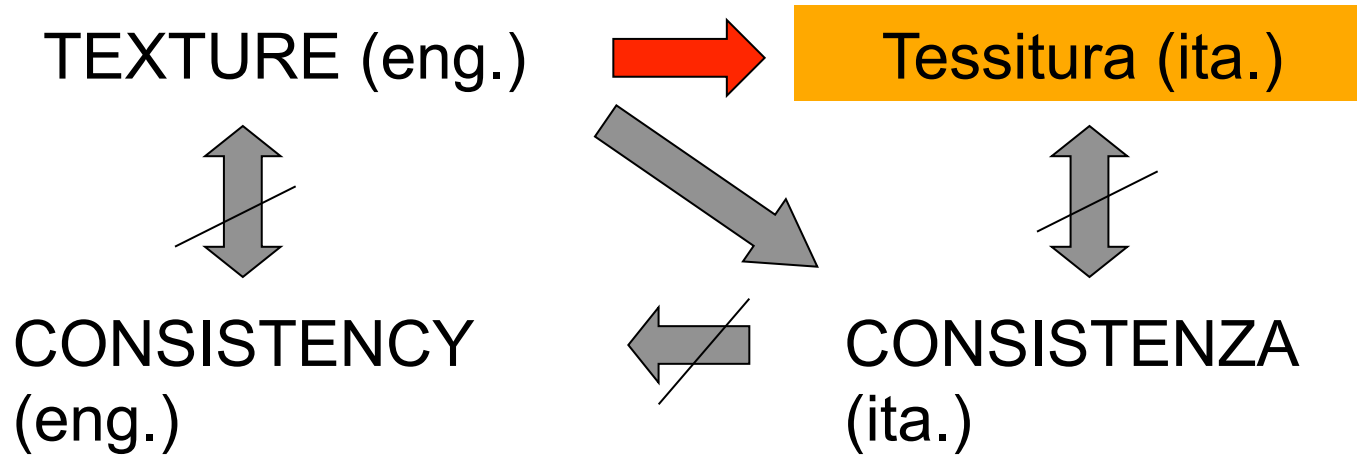
- Forma
- Grandezza
- Struttura (organizzazione delle sue molecole in elementi micro- e macrostrutturali)

# Consistenza degli alimenti e sollecitazione

Il modo con cui un alimento risponde a una sollecitazione dipende da:

- ❑ Natura della sollecitazione (compressione, taglio, masticazione, ...)
- ❑ Velocità della sollecitazione (es. se mastichiamo veloce lo percepiamo più duro)
- ❑ Estensione della sollecitazione (es. alimento si rompe solo se si taglia per un certa misura della sua dimensione)

# Consistenza o 'texture' e proprietà meccaniche o reologiche

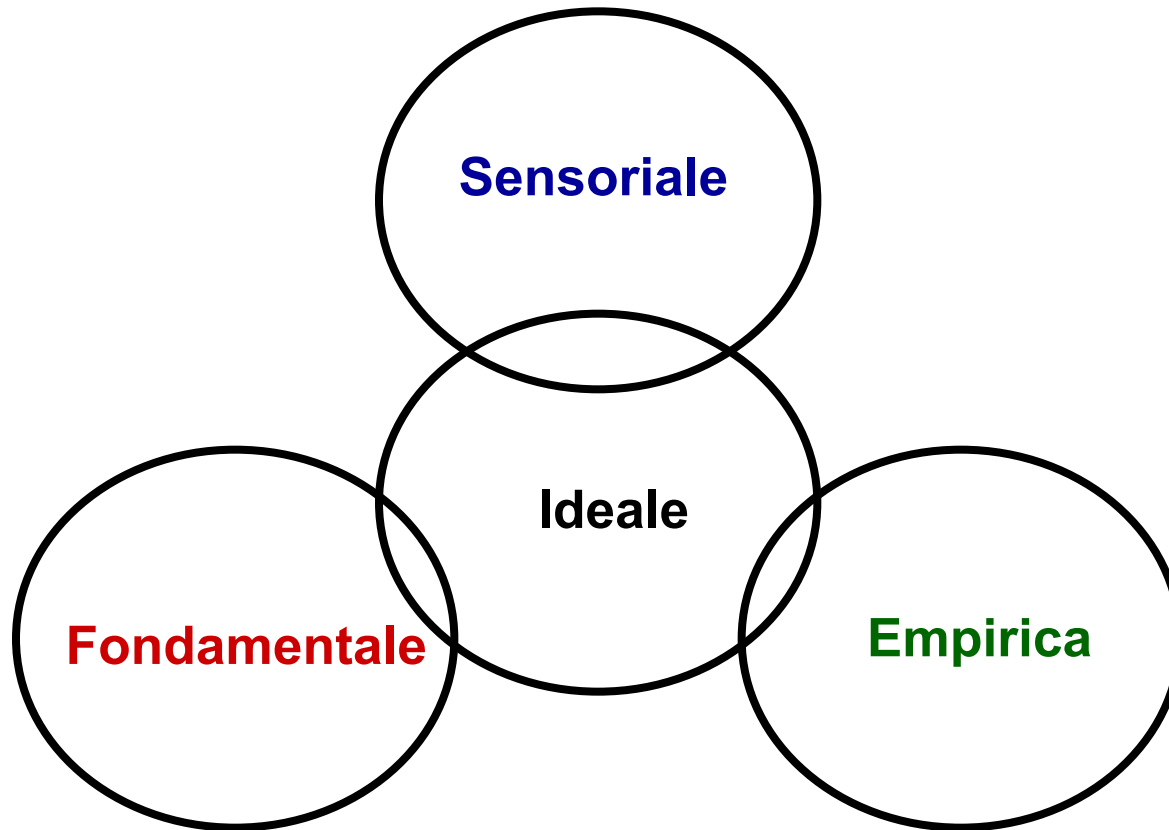


- **Valutazione della CONSISTENZA o TEXTURE:**  
valutazione sensoriale
- **Determinazione delle proprietà meccaniche o reologiche:**  
analisi strumentale oggettiva

# Analisi della texture degli alimenti

- **Fondamentale:** *analisi reologiche* che si basano sulla misura, svolta in condizioni di flusso o di deformazione controllato, della risposta del materiale a sollecitazioni meccaniche (solitamente di taglio) controllate. I risultati talora non possono essere posti in relazione con quelli ottenibili con le misure empiriche e/o sensoriali
- **Empirico-imitativa:** *analisi meccaniche* sviluppate per corpi solidi o per oggettivare (mediante idonei strumenti) situazioni reali (texture percepibile). Basate su esperienza pratica ed affidabili, ma richiedono un controllo estremamente standardizzato, in quanto *non operano in condizioni di sollecitazione controllata*.
- **Sensoriale (texture):** *analisi sensoriali* basate su valutazioni soggettive ma oggettivabili tramite test appositi.

# Misure reologiche dei prodotti alimentari



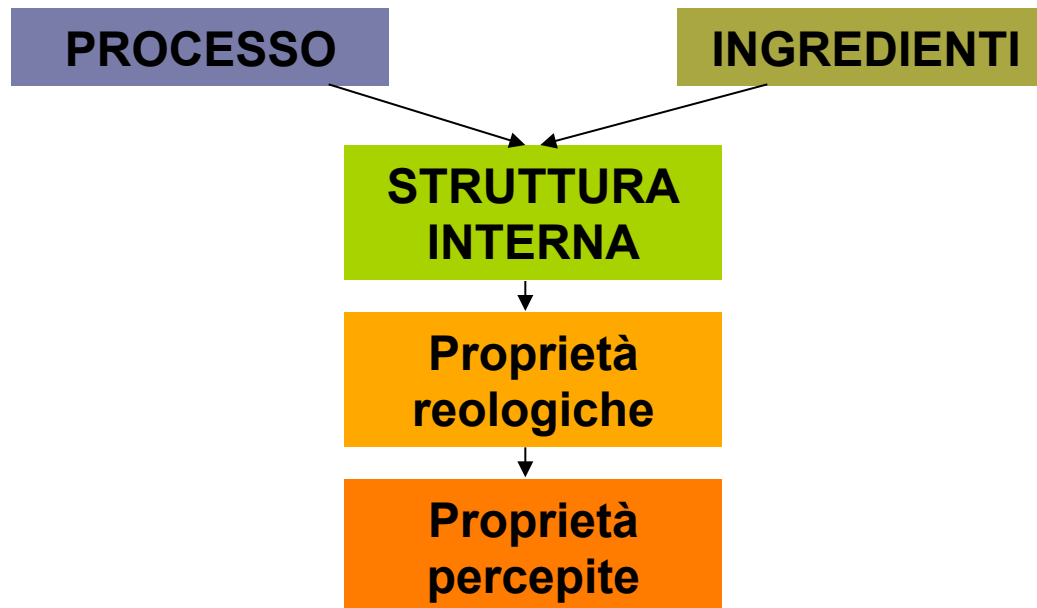
La misura reologica ideale deve essere vista come un insieme ottenibile dalla sovrapposizione di misure sensoriali, empiriche e fondamentali

# Definizioni

- **REOLOGIA:** scienza che studia il moto e le deformazioni dei corpi sottoposti a sollecitazioni meccaniche strettamente controllate. *Rheo* (gr.): flusso  
Studio delle relazioni tra forza, deformazione e tempo.  
Campo di applicazione: solidi, liquidi, gas
- **REOMETRIA:** disciplina che studia la misura delle proprietà reologiche dei materiali
- **MECCANICA:** scienza che studia moto ed equilibrio dei corpi in rapporto alla forza applicata. Applicata ingegneristicamente a sistemi di interesse pratico (utilizzata anche tecnologia alimentare).

# Reologia degli alimenti: obiettivi

- Controllo qualità dei prodotti alimentari alla fine del processo produttivo
- Progettazione processi e impianti di processo
- Progettazione e sviluppo prodotti alimentari
- Definizione shelf-life
- Definizione proprietà reologiche fondamentali



---

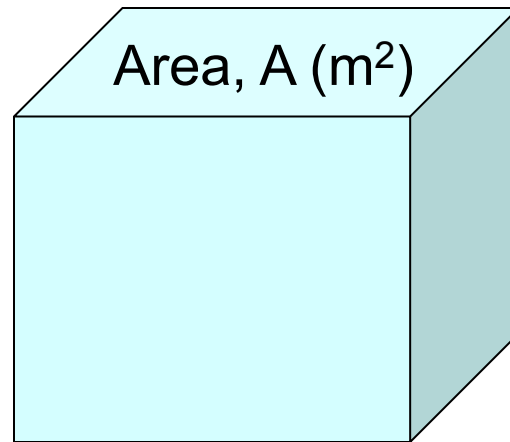
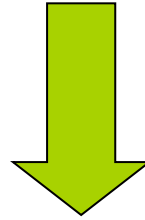
# **Le basi teoriche della reologia**

---



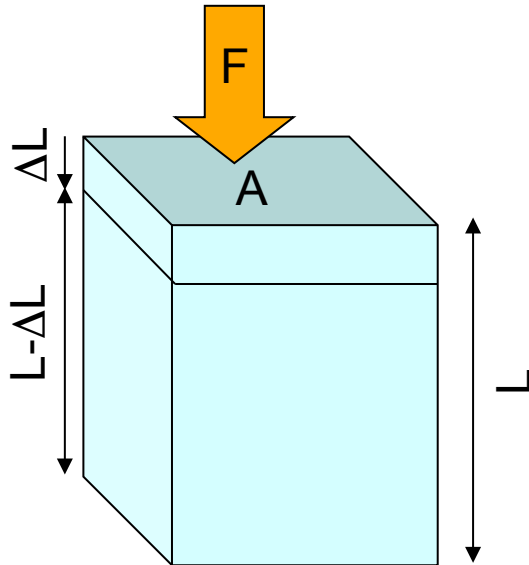
# Sforzo (*stress*): definizione

Forza,  $F$  (N)



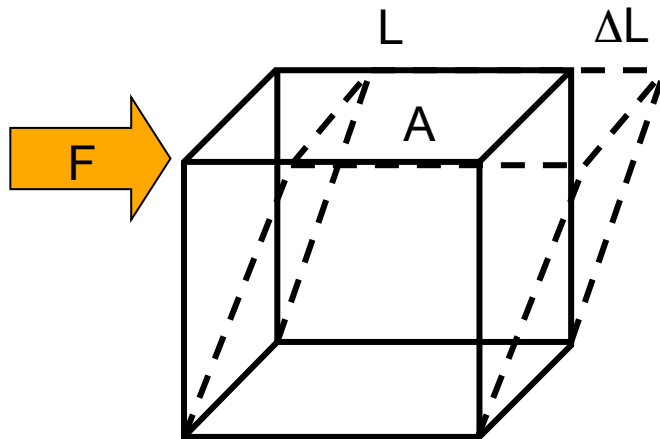
$$\text{Sforzo (Stress)} = \sigma = F/A \text{ (Pa, Nm}^{-2}\text{)}$$

# Sforzo (*stress*) e deformazione (*strain*): definizione



**Deformazione uniassiale**

**Sforzo normale  $F/A$   
( $N/m^2$ )**



**Deformazione al taglio**

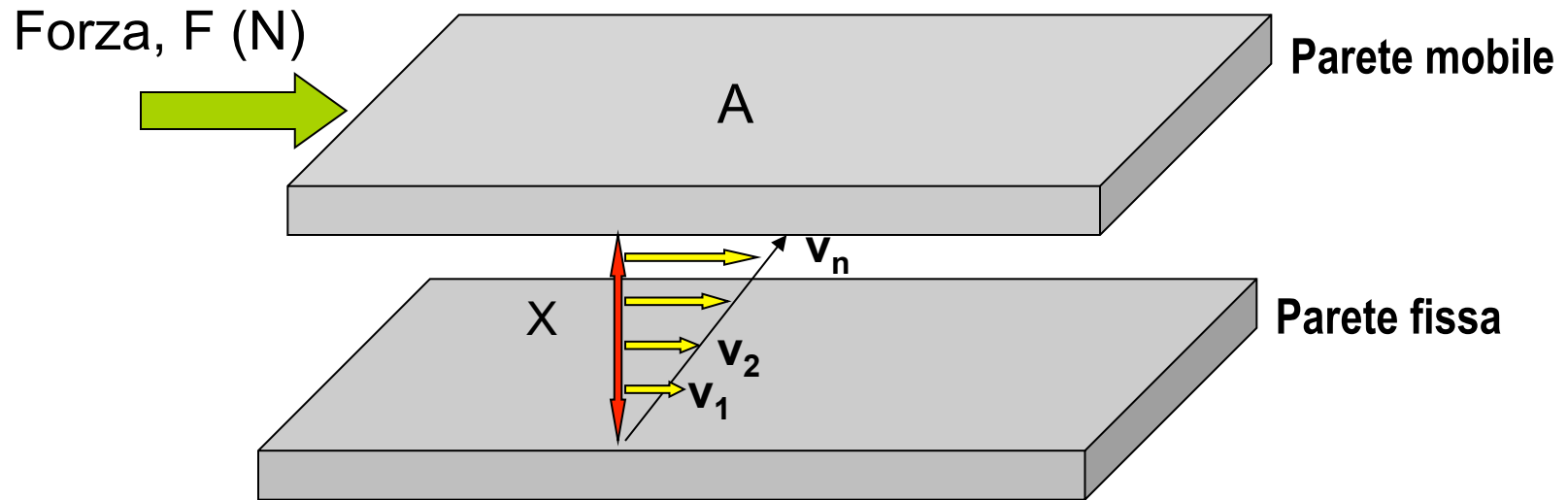
**Sforzo tangenziale o di taglio  
(*shear-stress*)  $F/A$  ( $N/m^2$ )**

**Deformazione (strain) =  $\varepsilon = \Delta L/L_0$  (adimensionale)**

# Deformazione controllata

- L'applicazione di una forza normale ad un solido genera una deformazione (cambiamento di dimensioni) corrispondente a  $\Delta L$  (m). Il cambiamento di dimensioni implica che  $L$  varia dopo l'applicazione di una forza (partendo da  $L$  fino a  $(L - \Delta L)$ ).
- Il rapporto  $\Delta L/L$ , definito 'deformazione', varia durante l'applicazione di una forza normale (deformazione non controllata).
- L'applicazione di una forza di taglio ad un solido genera una deformazione (cambiamento di forma)  $\Delta L$  (m) descrivibile come uno spostamento degli elementi di volume del solido.
- Quando una forza di taglio  $F$  viene applicata su una superficie  $A$  ( $m^2$ ), essa determina uno sforzo (Pa). Sotto questo sforzo, la superficie  $A$  si sposta per la lunghezza  $\Delta L$  (m).
- Il rapporto  $\Delta L/L$ , definito 'deformazione', non varia durante l'applicazione di una forza di taglio (deformazione controllata).

# Sforzo di taglio (*Shear stress*, $\sigma$ )



L'applicazione di una forza di taglio ad un liquido genera uno spostamento irreversibile degli elementi di volume definito flusso.

Quando una forza  $F$  viene applicata su una superficie mobile  $A$  ( $\text{m}^2$ ) a contatto con un fluido, a sua volta a contatto con una superficie fissa, essa determina uno sforzo (Pa). Sotto questo sforzo, lo strato di liquido a contatto con la parete mobile scorre con una velocità  $v_n$  ( $\text{m s}^{-1}$ ), mentre quello inferiore rimarrà fisso ( $v_0 = 0$ ).

**Ogni strato di liquido tra gli estremi si muove con una velocità maggiore quanto più è distante dalla parete ferma.**

# Lo sforzo di taglio (shear-stress)

L' applicazione di uno sforzo su di un corpo.

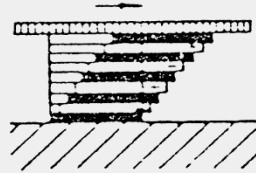
Su di un **corpo liquido** lo sforzo di taglio può essere esercitato secondo diverse modalità:

- Tra **cilindri coassiali** in modo relativo (flusso rotazionale)
- In un **tubo (capillare)**, esercitando una differenza di pressione alle sue estremità (flusso capillare)

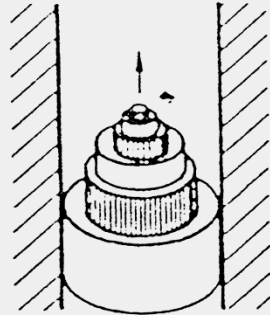
In caso di fluidi molto viscosi o **corpi viscoelastici** si può applicare sforzo:

- Tra due **piastre parallele** o tra una **piastra ed un cono** (una piastra è ferma, l'altro è in movimento rotatorio)
- Tra due **piani paralleli** (uno fermo, l'altro in rotazione) provocando uno scorrimento relativo e parallelo delle stesse (flusso laminare)

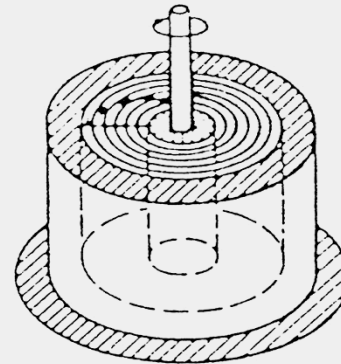
# Lo sforzo di taglio (shear stress)



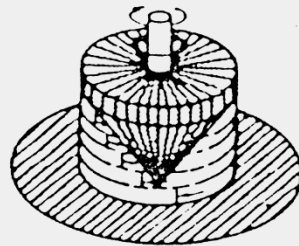
a) Flusso tra due piani paralleli



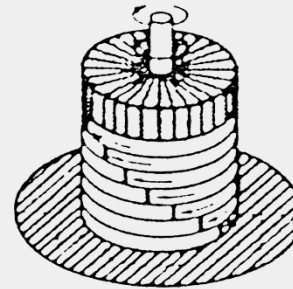
c) Flusso capillare



b) Flusso rotazionale tra cilindri coassiali



d) Flusso tra una piastra e un cono



o tra piastre parallele



## Le basi teoriche della reologia: la viscosimetria

**Viscosimetria:** parte della reologia che studia le relazioni tra forza e velocità di deformazione nei materiali fluidi o liquidi

---

# Fluidi e scorrimento

*'Pinguis liquor olivae'* (Cicerone, De Senectute)

Plinio il Vecchio differenziava olii di oliva in base a velocità di scorrimento.

Nell'ambito dei fenomeni di trasporto la resistenza di un fluido allo scorrimento è misurata da una grandezza fisica definita **viscosità**.

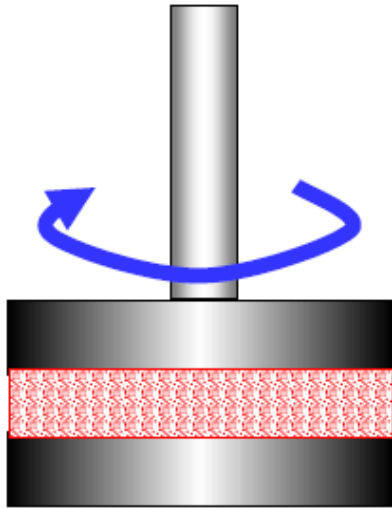
La viscosità è essenzialmente un coefficiente di scambio di quantità di moto.

Dal punto di vista molecolare la viscosità è legata al tipo di molecole del fluido ed alla loro interazione.

---



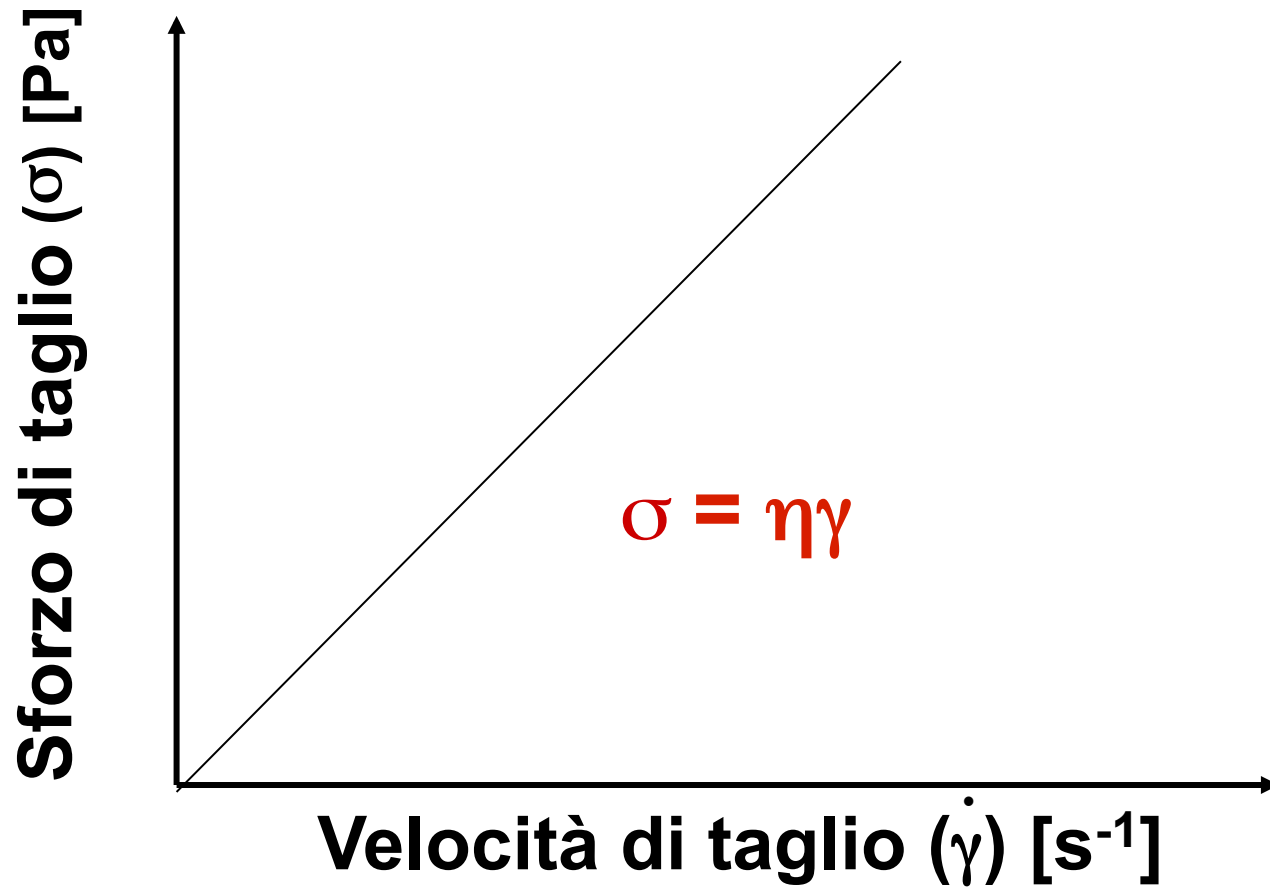
# Misura della viscosità



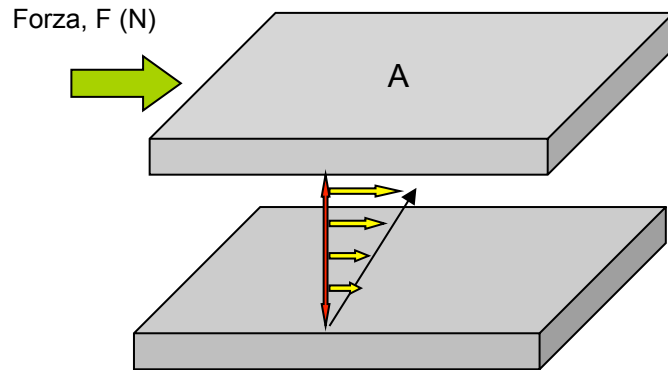
Viene posta in rotazione la parte mobile applicando una velocità di rotazione ( $\dot{\gamma}$ ) od un gradiente di velocità ( $\gamma$ ) e si misura la risposta del materiale a questa sollecitazione (si registra lo sforzo necessario per determinare il flusso del materiale)

**Test di flusso** (flow test): il prodotto è sottoposto ad un gradiente di velocità ( $\gamma$ ) in rotazione e tramite un dinamometro si misura (e si registra) lo sforzo necessario al mantenimento di ciascuna velocità ( $\dot{\gamma}$ )

# Curva di flusso (legge di Newton)



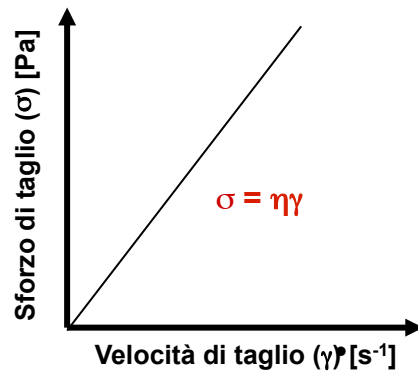
# Misura della viscosità



## Teoria

Lo sforzo di taglio genera il flusso.

Flusso (variabile dipendente) dipende da sforzo di taglio (variabile indipendente)



## Pratica

Si applica un gradiente di velocità ( $\gamma$ ) (variabile indipendente) e tramite un dinamometro si misura lo sforzo (variabile dipendente)

# Viscosità: interpretazione e misura

**Viscosità ( $\eta$ ):** resistenza opposta dal fluido al suo scorrimento (o flusso) inteso come variazione irreversibile della posizione dei suoi elementi di volume

## Unità di misura

$\eta$ : **Pa s**

Altre: centiPoise (cP)

milli-pascal x secondo (mPa s)

$$1 \text{ Pa s} = 10 \text{ Poise} = 1000 \text{ centiPoise (cP)} = 1000 \text{ mPa s}$$

# Viscosità

L'applicazione di una specifica velocità di taglio ad un fluido determina uno sforzo che dipende dalla sua viscosità

**Viscosità =  $\eta$  = sforzo/velocità di taglio ( $\sigma / \dot{\gamma}$ )**

Liquido	Viscosità (Pa s) (20°C)
Vetro	$10^{40}$
Vetro fuso (500 °C)	$10^{12}$
Bitume	$10^8$
Miele	$10^2$
Olio d'oliva	$10^{-1}$
Acqua (20 °C)	$10^{-3}$
Aria	$10^{-5}$

# Shear rate (velocità di taglio) e gradiente di velocità

Gradiente di velocità =  $\dot{\gamma} = \Delta v$  (v: velocità di taglio o deformazione)

Velocità di taglio =  $\dot{\gamma}$  = giri/secondo (**1/tempo = s<sup>-1</sup>**)

**L'ampiezza del gradiente di velocità applicabile  
dipende dalla natura del fluido**

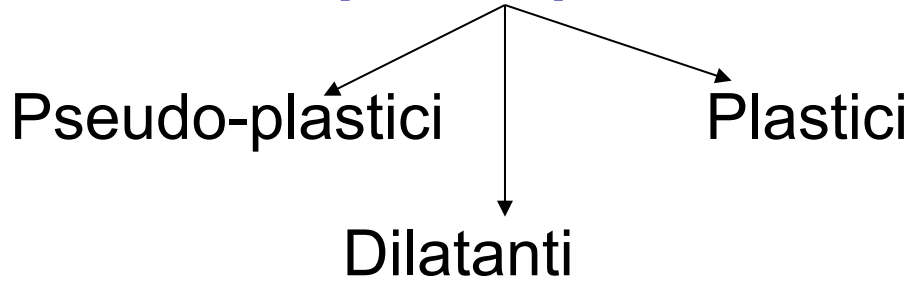
# Caratteristiche reologiche dei fluidi

In base alla variazione della *velocità di taglio* al variare dello *sforzo di taglio* (curva di flusso) i fluidi si distinguono in:

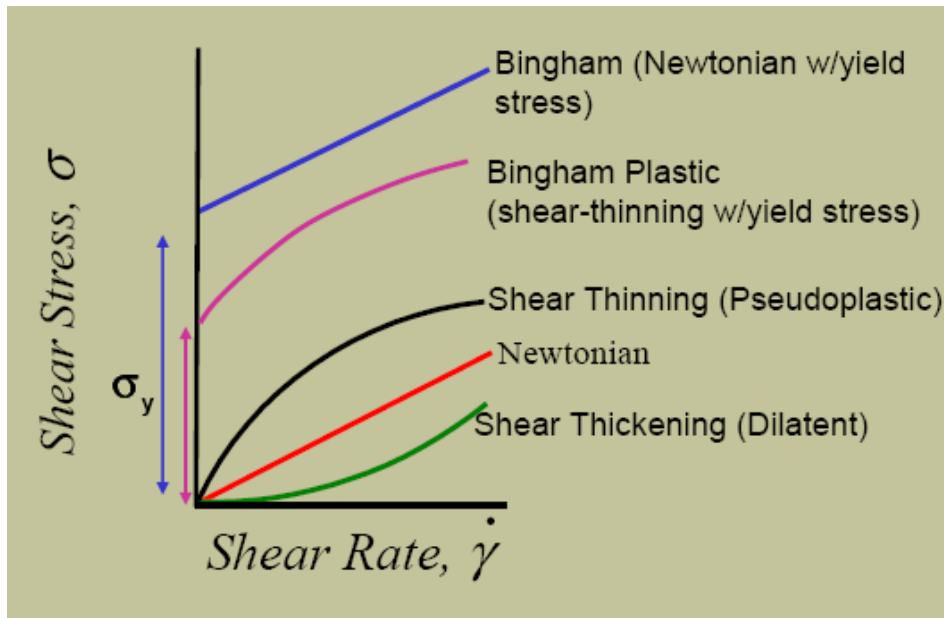
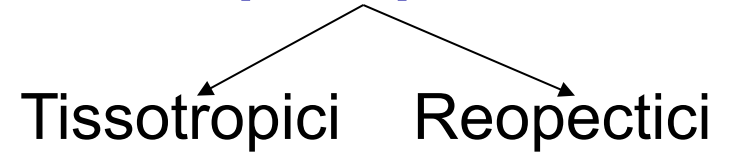
- **Newtoniani** (seguono la Legge di Newton)
- **Non newtoniani**: liquidi che non seguono la legge di Newton e variano il valore della viscosità al variare di:
  - - Forza applicata  
(fluidi puramente viscosi: pseudoplastici, plastici, dilatanti)
    - Tempo di applicazione della forza  
(fluidi tissotropici, reopectici)

# Fluidi non-newtoniani

## Tempo-indipendenti



## Tempo-dipendenti



Plastici (Newtoniani con soglia di scorrimento)

Pseudo-plastici con soglia di scorrimento

Pseudo-plastici

Newtoniani

Dilatanti



# Fluidi newtoniani

In base alla **Legge di Newton**, un fluido è detto “*newtoniano*” se la curva di flusso può essere descritta dalla seguente equazione

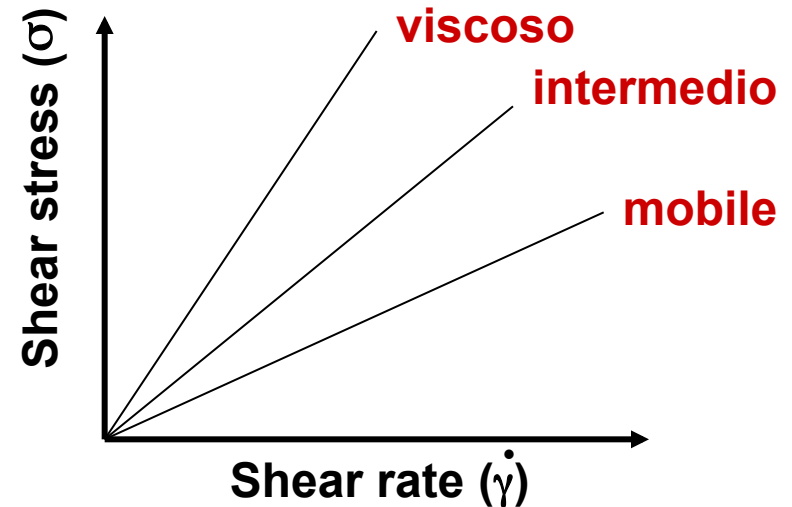
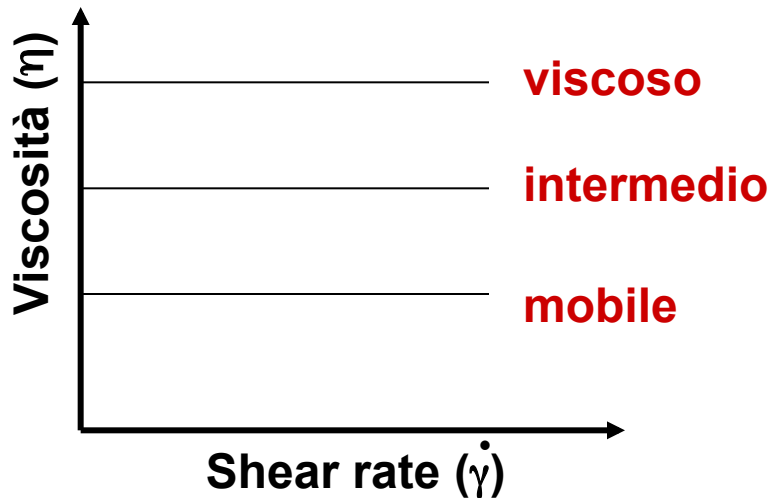
$$\sigma = \eta \dot{\gamma}$$

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}}$$

$\eta = \text{costante} = \text{viscosità}$

# Fluidi newtoniani

Viscosità indipendente dal gradiente di velocità (*shear rate*) applicato = viscosità costante a tutte le *shear rate*



La viscosità di un fluido newtoniano può essere misurata a qualsiasi velocità di taglio (purché in regime laminare)

→ è sufficiente una sola misura

# Fluidi newtoniani

Esempi di fluidi newtoniani: molti gas e liquidi di composizione semplice o molto diluiti

Fluido	Viscosità (Pa s)	Fluido	Viscosità (Pa s)
CO <sub>2</sub>	$1.48 \times 10^{-5}$	Sol. 20% p/p saccarosio	$2 \times 10^{-3}$
<b>Acqua</b>	<b><math>1.002 \times 10^{-3}</math></b>	Sol. 30% p/p saccarosio	$6.2 \times 10^{-3}$
Carbonio tetracloruro	$9.69 \times 10^{-4}$	Sol. 40% p/p saccarosio	$58.9 \times 10^{-3}$
Olio d'oliva	$84 \times 10^{-3}$	Miele	6
Olio di ricino	$986 \times 10^{-3}$	Latte	$2 \times 10^{-3}$
Glicerolo	1.49	Etanolo	$1.2 \times 10^{-3}$
		Afsalto	$1 \times 10^5$

Viscosità di alcuni liquidi di tipo alimentare e di solventi (20°C)

# Fluidi newtoniani

Molti alimenti hanno un comportamento newtoniano quando il gradiente di velocità è limitato (velocità basse:  $\dot{\gamma} < Q_L$ )

Superando un certo valore di *shear rate*, il flusso in regime laminare può passare a quello turbolento ed il fluido si comporta come non newtoniano

Al di sotto di un certo valore definito dal numero di Reynolds (2000-2200) il regime è laminare

$$Re = 2\rho Q / \pi r \eta$$

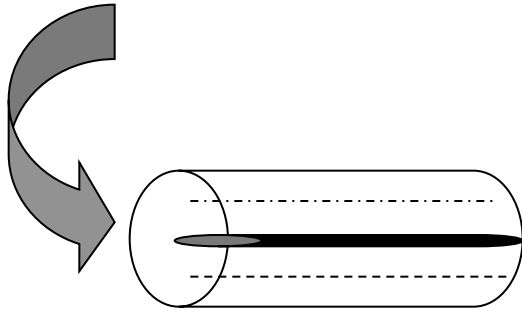
$\rho$  = densità liquido

$Q$  = velocità fluido

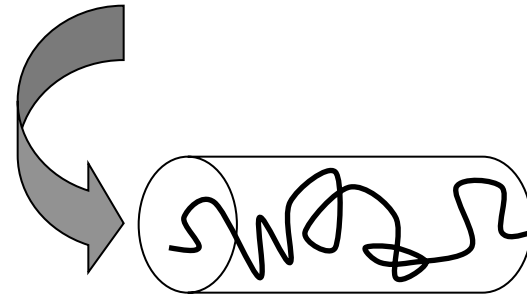
$r$  = raggio tubatura (misura condotta in viscosimetro a tubo)

$\eta$  = viscosità

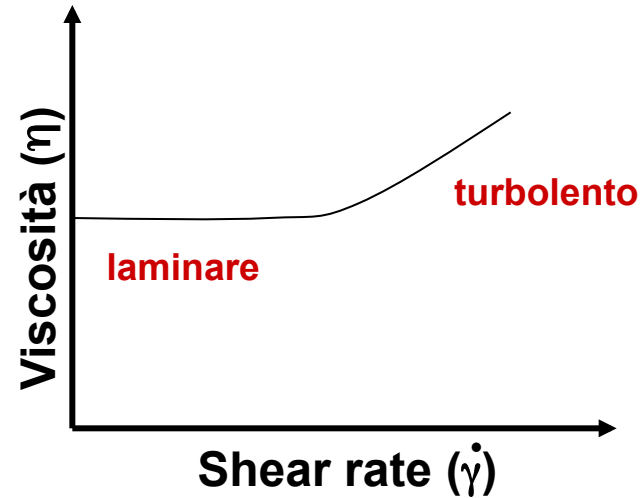
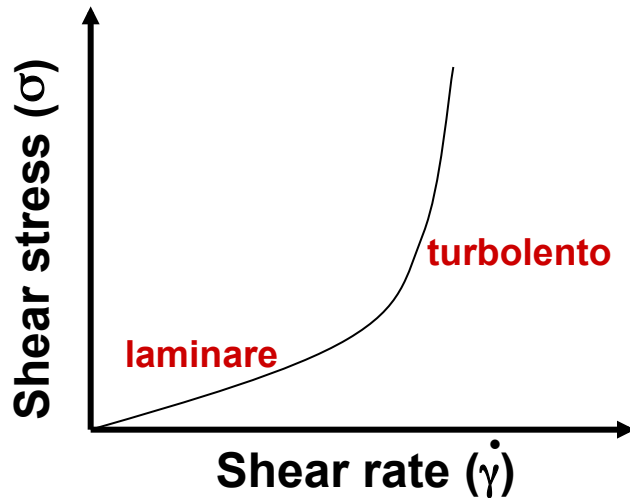
# Fluidi: regime laminare e turbolento



Regime laminare



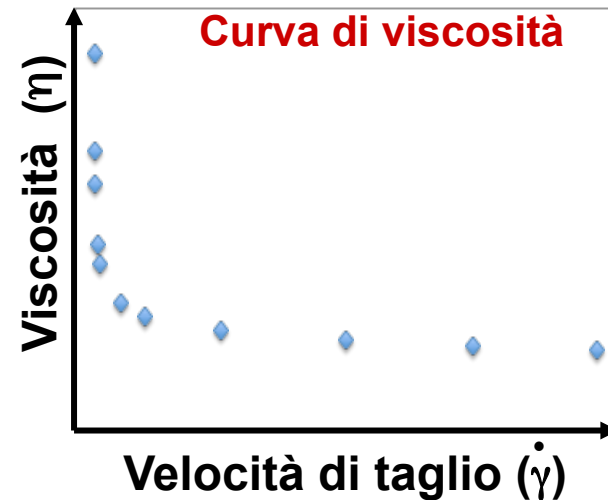
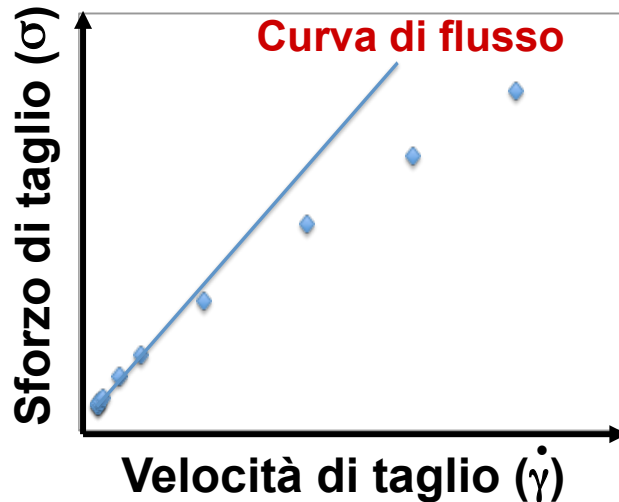
Regime turbolento



**N.B.** Vale per tutti i fluidi, sia Newtoniani che non non-Newtoniani!

# Fluidi non-newtoniani

**Pseudoplasticità:** la viscosità cala fortemente quando il gradiente aumenta (es. aumento di pompaggio di un fluido in un tubo, aumento velocità di impastamento)



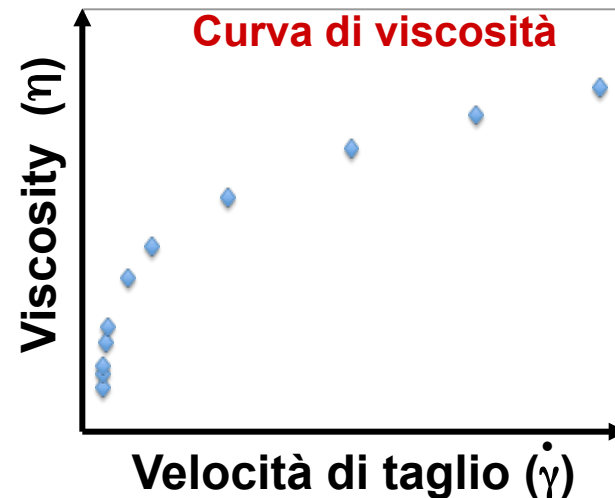
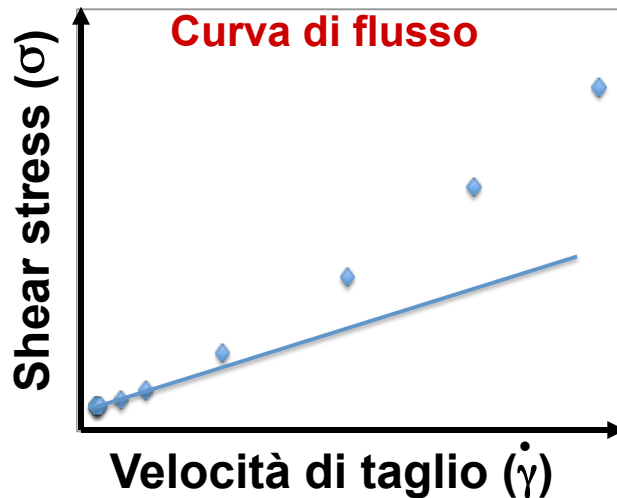
Andamento descrivibile attraverso la seguente equazione

$$\sigma = k\dot{\gamma}^n$$

**Legge di potenza (Power Law) ( $n < 1$ )**

# Fluidi non-newtoniani

**Dilatanza:** la viscosità aumenta fortemente quando il gradiente aumenta (es. sostanze plastificanti, PVC, sabbia bagnata)

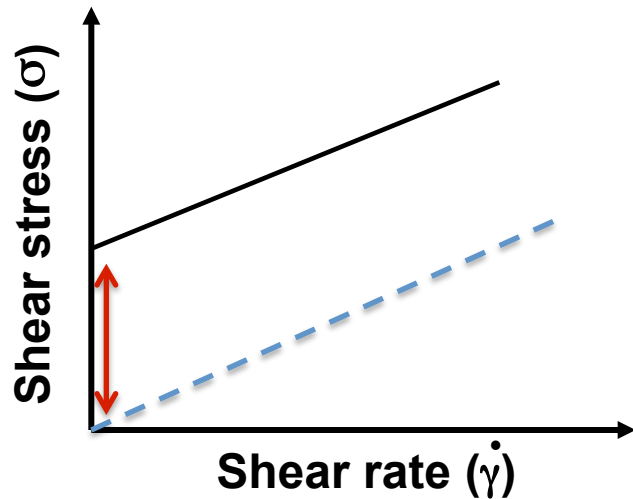


Andamento descrivibile attraverso la seguente equazione

$$\sigma = k \dot{\gamma}^n$$

**Legge di potenza (Power Law) ( $n > 1$ )**

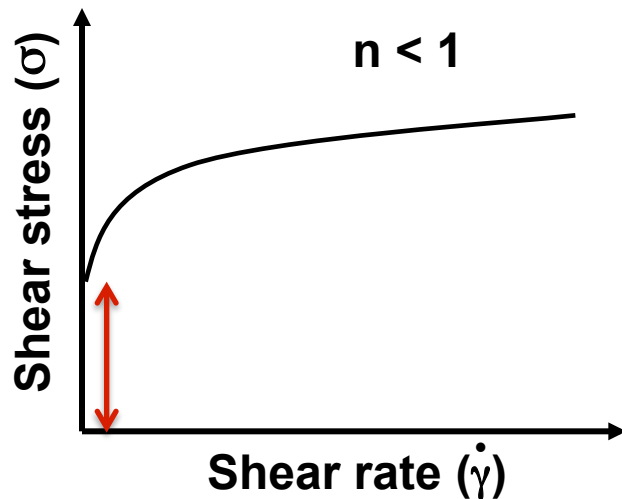
# Fluidi non- newtoniani



Fluido newtoniano con soglia di scorrimento (plastico)

$$\sigma = \sigma_0 + k \dot{\gamma}$$

(Legge di Bingham)



Fluido pseudoplastico con soglia di scorrimento

$$\sigma = \sigma_0 + k \dot{\gamma}^n$$

(Legge di Herschel-Bulkley)



# Fluidi non newtoniani

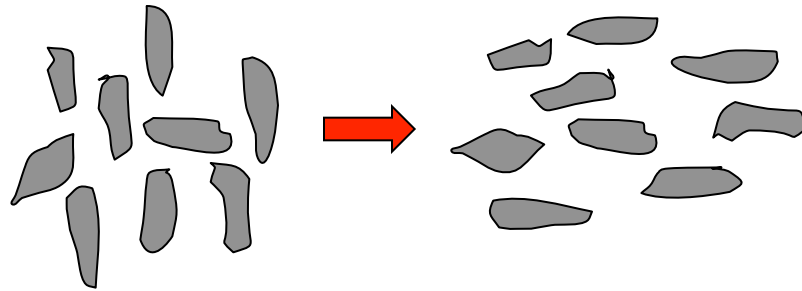
## Esempi:

- ❑ Soluzioni concentrate di macromolecole (gel: amido, proteine, gomme...)
- ❑ Materiali colloidali complessi: dispersioni (emulsioni, sospensioni, schiume) (salse, creme, passata di pomodoro, maionese, ketchup..)
- ❑ Impasti (gel + emulsione + sospensione + schiuma)

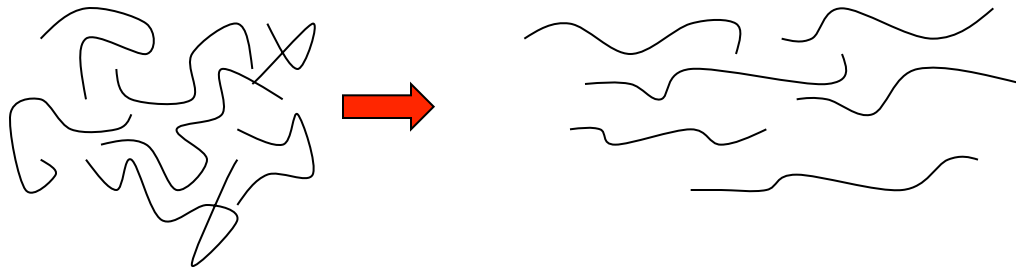
Il comportamento dipende da vari fattori quali:

- Natura della fase dispersa e continua (solvente)
- Interazioni particella-particella e particella-solvente
- Concentrazione forma e natura chimica delle particelle

# Fattori strutturali causa del comportamento pseudoplastico



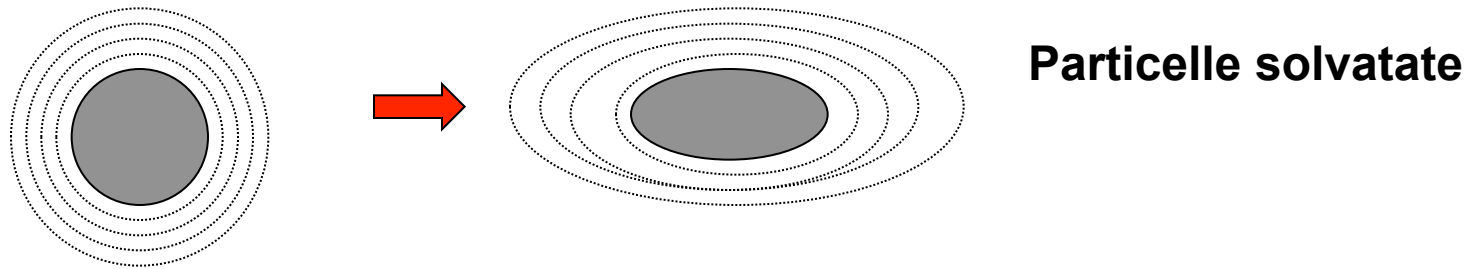
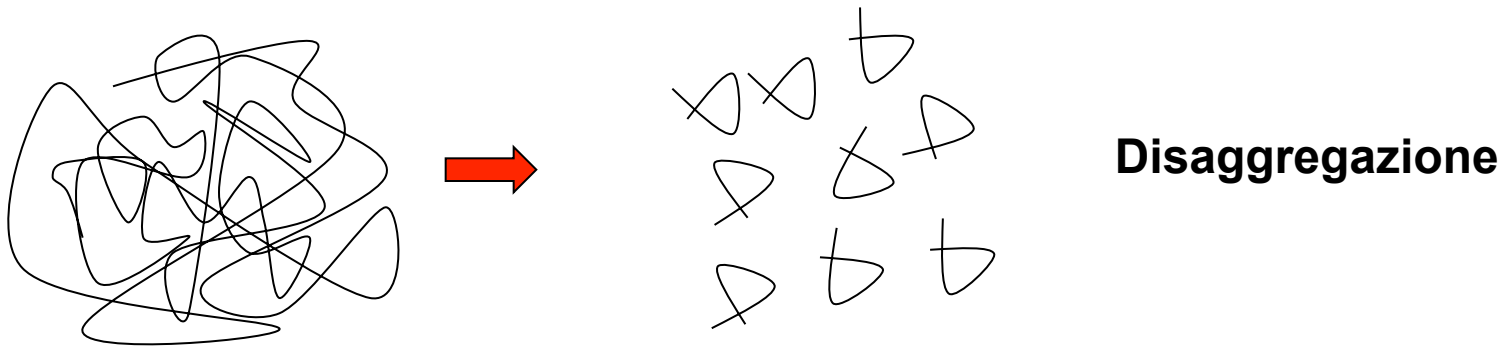
**Orientamento**



**Orientamento**

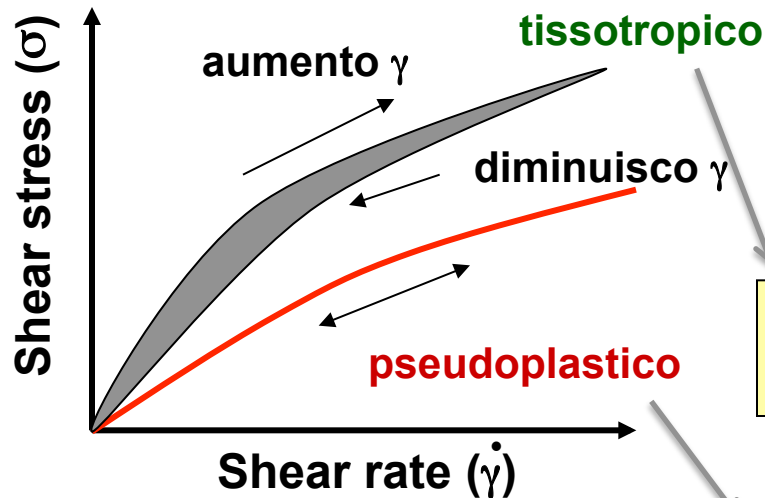
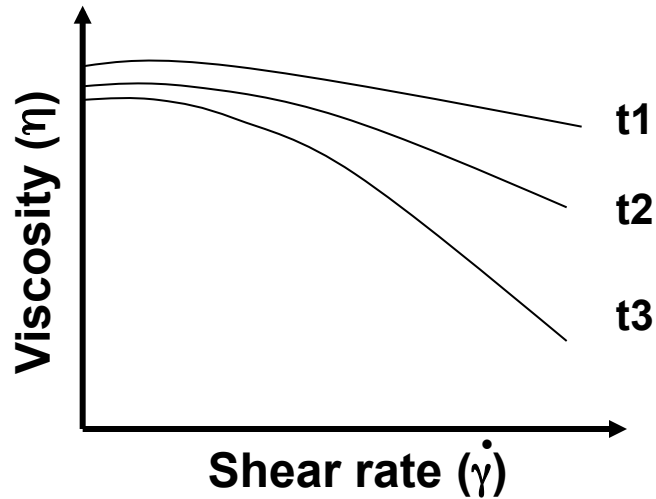
Lo sforzo di taglio provocato dal gradiente di velocità può provocare nel prodotto l'orientamento di particelle o macromolecole (es. componenti fibrosi di un succo di frutta).

# Fattori strutturali causa del comportamento pseudoplastico



Lo sforzo di taglio provocato dal gradiente di velocità può inoltre provocare nel prodotto la rottura di legami (labili) tra componenti, particelle o macromolecole (es. gel di pectine) oppure la deformazione di particelle solvate (es. gocce d'olio in emulsione).

# Fluidi tissotropici



La viscosità apparente di un fluido tissotropico valutata  $n$  volte nel tempo ( $t_1, t_2, \dots$ ), mostra una diminuzione

In stato di quiete la salsa mostra un'alta viscosità (gel) che a seguito di agitazione diminuisce. Ristabilito lo stato di quiete il gel tende a riformarsi (viscosità aumenta), ma necessita tempo

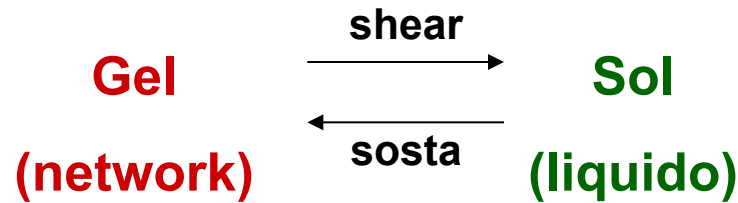
**Il fenomeno è reversibile**

Velocità di diminuzione viscosità > velocità di aumento viscosità (isteresi).

Velocità di diminuzione viscosità = velocità di aumento viscosità (no isteresi).

# Fluidi tissotropici

- Possiedono una 'struttura' interna.
- Durante la sollecitazione (scorrimento) la struttura interna si rompe, ma a riposo si riforma (effetto tempo)



## Meccanismo

***In presenza della sollecitazione:*** molecole/particelle si orientano sulla linea del flusso → diminuzione della viscosità

***Al cessare della sollecitazione:*** riassetamento delle molecole nella posizione originaria, riorganizzazione legami ma il processo richiede tempo.

**In genere:** velocità destrutturazione > velocità riorganizzazione poiché la riorganizzazione avviene per diffusione e mobilità interna, non per forze esterne

# Esempi di fluidi alimentari con comportamento non-newtoniano

<b>Fluidi plastici (o di Bingham)</b>	cioccolata fusa (fondente, al latte), tomato ketch-up, mostarda, concentrati proteici di soia, margarina, purè.
<b>Fluidi pseudoplastici</b>	succhi e puree di frutta, vegetali concentrati, concentrati di pomodoro, crema di latte, uova e derivati surgelati, gomme alimentari e concentrati proteici di caseina e di sieroproteine
<b>Fluidi tissotropici</b>	Maionese, ketchup, margarina Gel, colloidi idrofili

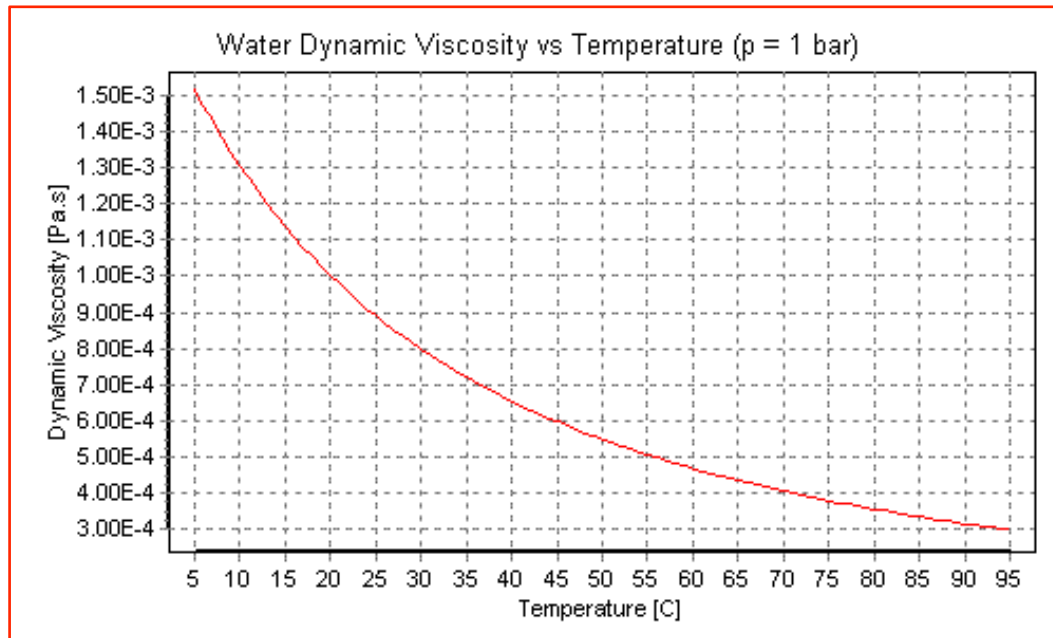
# Parametri che influenzano la viscosità

$$\eta = f(S, C, T, P, \Delta v, t)$$

- S:** struttura e natura chimica dei soluti (caratteristica specifica del fluido)
- C:** concentrazione dei soluti
- T:** Temperatura (aumentando la T, la viscosità diminuisce)
- P:** Pressione. Un aumento di P aumenta la resistenza allo scorrimento viscoso
- $\Delta v$ :** gradiente di velocità (solo per fluidi non-newtoniani)
- t:** tempo. Per alcune matrici il comportamento reologico dipende anche dalla storia reologica pregressa (es. agitazione). Importante per i fluidi **tissotropici**

# Viscosità e temperatura

I risultati di ogni misura viscosimetrica devono essere sempre accompagnati dall'indicazione della temperatura a cui sono stati condotti (ed eventualmente della pressione, se si discosta dalla pressione ambientale).



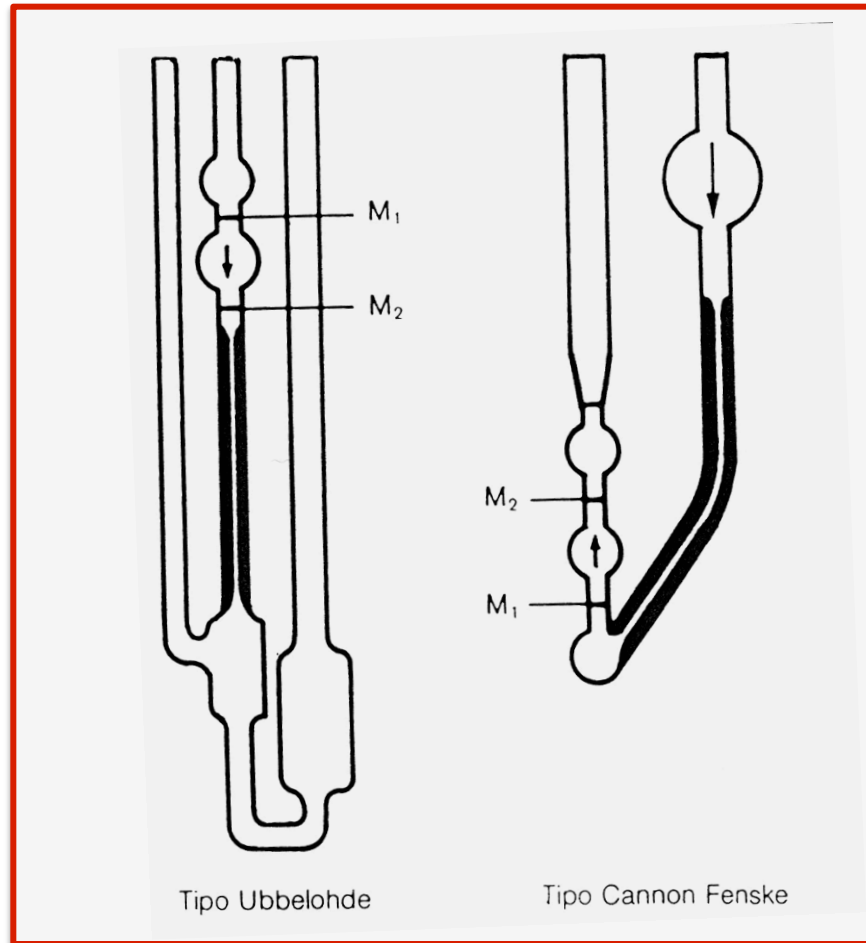


# Strumenti per analisi reologiche

- Viscosimetri capillari
  - Viscosimetri a caduta
    - a caduta di sfera
    - su piano inclinato (consistometro Bostwick)
  - Viscosimetri rotazionali
  - Reometri rotazionali
-

# Viscosimetri capillari

- Tipologia varia



# Viscosimetri capillari

## Viscosimetri capillari a caduta libera

Il flusso del campione è dovuto solo alla forza di gravità.  
Il campione riempie una riserva, da cui entra nel capillare sottostante, sotto la spinta del proprio peso.

---

# Viscosimetri capillari

## ■ Valutazione della viscosità:

- Si misura il tempo  $\Delta t$  perché un certo volume di liquido (in genere compreso tra  $M_1$  e  $M_2$ ) passi attraverso il capillare
- Dalla misura del  $\Delta t$  si ottiene la viscosità “cinematica”  $\nu$ , che è il rapporto tra viscosità e densità

$$\nu = C4 \cdot \Delta t \text{ (C4 = costante strumentale)}$$

Come riferimento l'analisi deve essere effettuata anche sull'acqua (a pari temperatura)

Il tempo di flusso dipende da densità ed è direttamente proporzionale alla viscosità del fluido.

$$\text{Viscosità fluido} = t \text{ (s) flusso fluido} / t \text{ (s) flusso acqua}$$

---

# Viscosità cinematica

$$\nu = \eta / \delta = \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \eta &= \text{Pa} \cdot \text{s} = \text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2 = \\ &= \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} / \text{m} \end{aligned}$$

$$\delta = \text{kg} / \text{m}^3$$

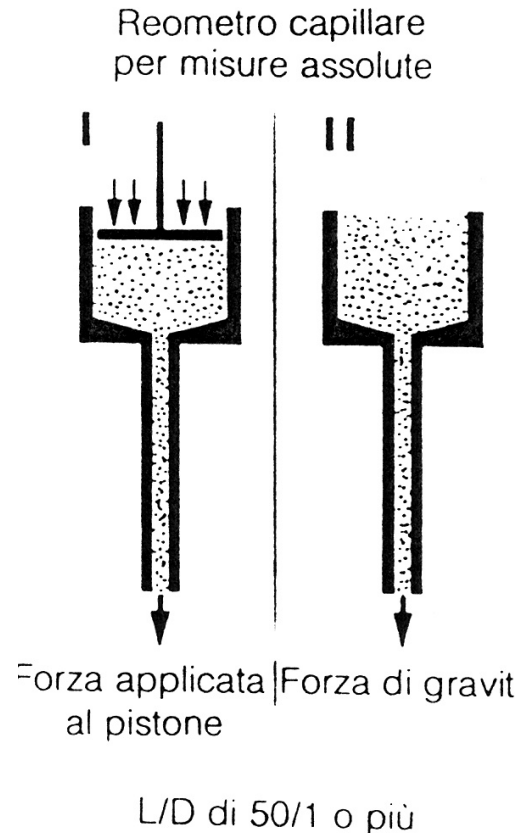
# Viscosimetri capillari

- Esistono viscosimetri con diverso diametro del capillare per l'applicazione a fluidi con diversa viscosità (in ogni caso, diametro capillare  $\ll$  altezza capillare  $\varnothing/L \leq 50:1$ ). È importante che il tempo di flusso sia compreso tra 100 s e 500 s.
  - Caratteristiche:
    - **Economico**
    - **Utile per valutare viscosità di liquidi poco concentrati**
    - **Utile per valutare cambiamenti di viscosità di liquidi per effetto di processi (omogeneizzazione, .....**)
    - **Non forniscono indicazioni sul comportamento newtoniano e non-newtoniano (flusso a shear force costante =  $m \times g$ )**
-

# Viscosimetri capillari

- **Viscosimetri capillari a pressione variabile**
    - Un pistone (o un estrusore) forza il campione a scorrere attraverso il capillare ad una velocità maggiore
    - Per valutare le proprietà reologiche (es. curva di flusso) occorre effettuare test a diverse velocità (diversi  $\Delta P$ )
    - Utilizzati nel settore dei polimeri
-

# Viscosimetri capillari



Forza applicata al pistone può essere convertita in shear force e velocità di caduta può essere convertita in shear rate.



# Viscosimetri a caduta di sfera

- Utilizzabile per liquidi trasparenti di viscosità media e bassa
- Applicato in industria e per ricerca

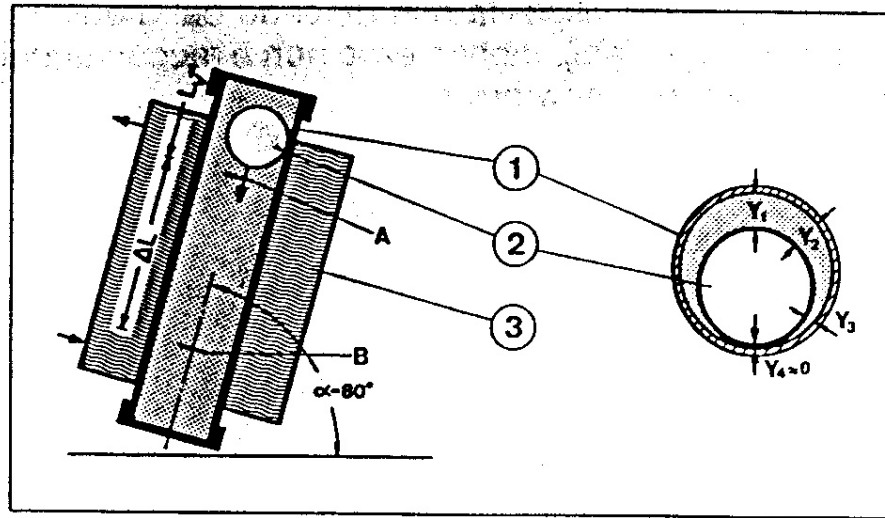


fig. 27 Spaccato di un reometro a sfera cadente

# Viscosimetri a caduta di sfera

- Funzionamento

La camera interna (inclinata di  $10^\circ$  rispetto alla verticale e termostata) è riempita del fluido.

Si valuta il tempo di percorrenza della sfera per percorrere il tratto  $\Delta L$  (10 cm).

Richiede una preliminare taratura con liquidi newtoniani (acqua)

---

# Viscosimetri a caduta di sfera

Misurano la viscosità dinamica:

$$\eta = k \cdot (\rho_S - \rho_L) \cdot t \text{ (mPa} \cdot \text{s)}$$

$\rho_S$  = densità sfera

$\rho_L$  = densità fluido

k = costante che dipende dal raggio della sfera

$$v = \frac{\eta}{\rho_L}$$

---

# Viscosimetri a caduta

## Consistometro Bostwick

**(derivati vegetali, pomodoro, yogurt)**



Costituito da una vaschetta in acciaio inox di 2 mm di spessore e 100 ml di capacità, con piedini di regolazione e bolla di livello.

Una paratia mobile separa lo spazio per il campione (5 x 5 cm) da una corsia inclinata di scorrimento, larga 5 cm e lunga 25 cm ca. La corsia di scorrimento è graduata fino a 23 cm (graduazione primaria 1 cm, secondaria 0,5 cm).

Il campione viene collocato nella vaschetta, chiusa da una paratia, avendo cura di pareggiarne il livello con una spatola. Dopo aver rilasciato la paratia agendo sul sistema a scatto, il campione scorre a caduta lungo il piano inclinato e si legge la corsa del campione nel tempo ( $t$  previsto dal metodo).

Il risultato della prova ( $\text{mm}^2/\text{s}$ ) è una stima della viscosità cinematica.

La diluizione del campione, il tempo di scorrimento e il risultato della prova dipendono dalla metodica seguita.

# Viscosimetri-Reometri rotazionali

- **Diversa geometria**

- Ad immersione (cilindro, disco o sfera rotante)
- Cilindri coassiali
- Piatto/piatto, Piatto/cono

## **Viscosimetro:**

Misura la viscosità di fluidi, dotato di cilindri o cilindri coassiali

## **Reometro:**

misura reologia di corpi viscosi e viscoelastici, dotato di cilindri coassiali, piatto-piatto e piatto cono.

---

# Viscosimetri-Reometri rotazionali

- **Diverse modalità di funzionamento**

- Stress controlled (sforzo controllato):

Alla parte mobile applicano uno sforzo di taglio controllato e misurano poi la deformazione o la velocità.

- Strain controlled (deformazione controllata)

Alla parte mobile applicano una deformazione o velocità, controllata e misurano la coppia e quindi lo sforzo.

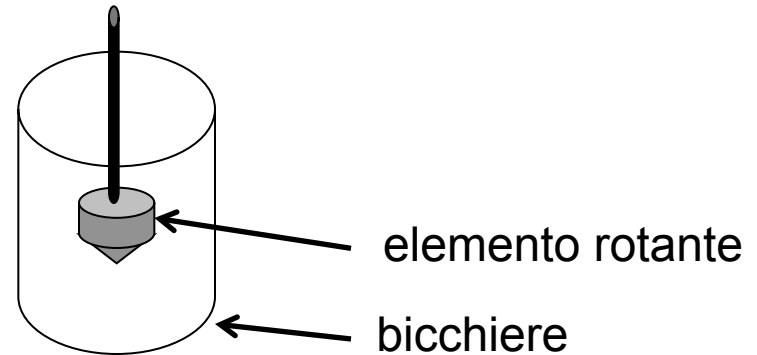
Sono i più utilizzati!!!!

- Stress/strain controlled

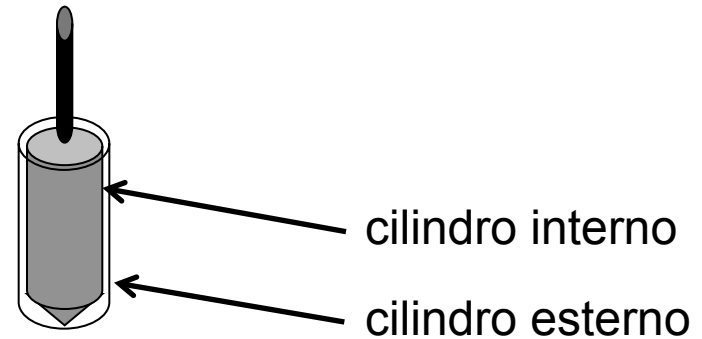
---

# Viscosimetri rotazionali: geometrie

Rotazionale  
ad immersione



Cilindri coassiali



# Viscosimetri rotazionali: esempi

**Tipo Fungilab**

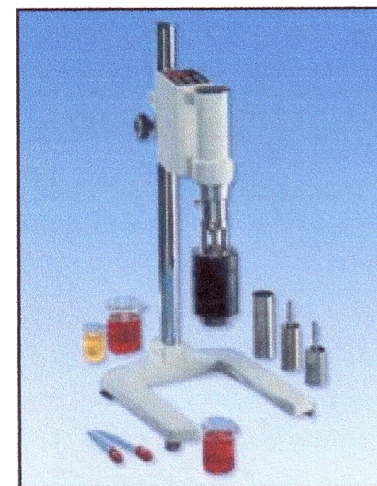


**Tipo Brookfield**



**Viscotester VT6/7 plus**

**Cilindri coassiali**



**Viscotester VT550**



# Viscosimetri rotazionali a cilindri coassiali

## Sistema *Searle*

Il cilindro interno ruota ad una certa velocità mentre quello esterno è fermo. Permette la termostatazione del campione. Tra il motore e il cilindro rotante (o “rotore”) è inserito un elemento di misura della coppia stessa che valuta lo sforzo di taglio applicato dalla parete del rotore al liquido in moto.

Limiti per liquidi ad alta viscosità o per le alte shear-rate (moti turbolenti)

---

# Viscosimetri rotazionali a cilindri coassiali

## Sistema *Couette*

Opposto a quello Searle: il cilindro esterno ruota ad una certa velocità mentre quello interno è fermo.

Migliore stabilità nei confronti delle forze centrifughe

Risultati uguali a quelli ottenibili con il sistema Searle

**N.B. Talora i due sistemi sono definiti allo stesso modo (Couette) seppure le norme DIN li differenzino**

---

# Reometri rotazionali

*Reometri:*

permettono di misurare lo sforzo sia a velocità che a deformazioni note.

Sono adatti a espletare misure reologiche sia su corpi viscosi che viscoelastici.

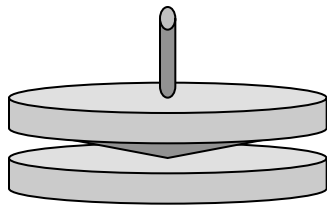
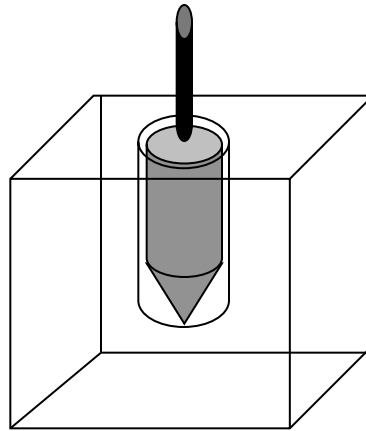
Sono termostatati.

Sono dotati di diversi accessori con diverse geometrie a seconda del tipo di alimento da analizzare (liquido o viscoelastico).

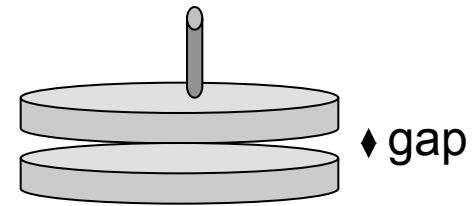
---

# Reometri rotazionali: geometrie

Cilindri coassiali



Piatto-cono



Piatto-piatto

# La valutazione della viscosità di alimenti durante il processo produttivo

## ■ Installazione

- Nell'impianto in cui fluisce il prodotto
    - In-line: nel flusso del prodotto
    - On-line: in un anfratto dell'impianto nel quale viene convogliato il prodotto
  - Fuori dall'impianto in cui fluisce il prodotto
    - In area processo per valutare la viscosità di prodotti in tank o serbatoi.
-

# Criteri di scelta per viscosimetri da inserire nel processo produttivo

- Conformità agli standards
- Modalità di installazione (in-line, on-line, immersione)
- Tipologia di segnale di risposta (intermittente, continuo, ...)
- Parametri di controllo (viscosità, altri parametri correlati, es. yield point,  $G'$  )
- Caratteristiche del fluido (soluzione, multifase, ....)
- Caratteristiche reologiche (newtoniano, non-newtoniano, ...)
- Condizioni di processo (temperatura, pressione, flusso laminare, ...)
- Caratteristiche del viscosimetro (precisione richiesta, ripetibilità, affidabilità, materiale di costruzione, facilità di pulizia, ermeticità, ....)

# Viscosimetria nei processi ed applicazioni

## ■ Rotazionali:

- Funzionamento: un elemento (a forma cilindrica, disco o sfera) ruota continuamente nel liquido e si misura la coppia (torque) da cui si valuta lo sforzo di taglio necessario per ruotare il perno alla velocità applicata.
  - Applicabile in-line, on-line ed in immersione
  - Sensibili, lavorano a basse shear rate
  - Svantaggi: rischi di insudiciamento (tra perno in movimento e fase stazionaria); non applicabile in impianti ad alta pressione (es. spray-drying) e in liquidi con bolle.
-

# Viscosimetria nei processi ed applicazioni

## ■ Vibrazionali:

- Funzionamento: registra il segnale in oscillazione fornito dal sottile strato di fluido che circonda la sonda.
- Applicabile in-line
- Semplice geometria, buona ripetibilità dei risultati, applicabile in impianti ad alta pressione (es. spray-drying) e su fluidi particolati
- Non permette di definire il gradiente di velocità, perché complessivamente dipende dalle caratteristiche della sonda (geometria, frequenza ed ampiezza della vibrazione) e del fluido (densità e viscosità)



# Viscosimetria nei processi ed applicazioni

## ■ A tubo:

- Funzionamento: si basa sul flusso (indotto da una differenza di pressione) del fluido attraverso un cilindro. Registra dati di caduta di pressione e di velocità di flusso volumetrico
  - Semplice geometria, flusso continuo, tempo di caricamento campione breve.
  - Ideale per liquidi alimentari particolati
  - Se la velocità di flusso è costante, i dati di viscosità ottenuti possono essere correlati con quelli ottenuti off-line.
-

---

**Le basi teoriche della reologia:  
la reologia dei corpi elastici e viscoelastici**

---

# Elasticità

- Un corpo è perfettamente elastico (*hookeiano*) quando la deformazione subita è proporzionale allo sforzo che la produce (Legge di Hooke)
- Per una compressione UNIASSIALE

$$\tau = E \varepsilon$$

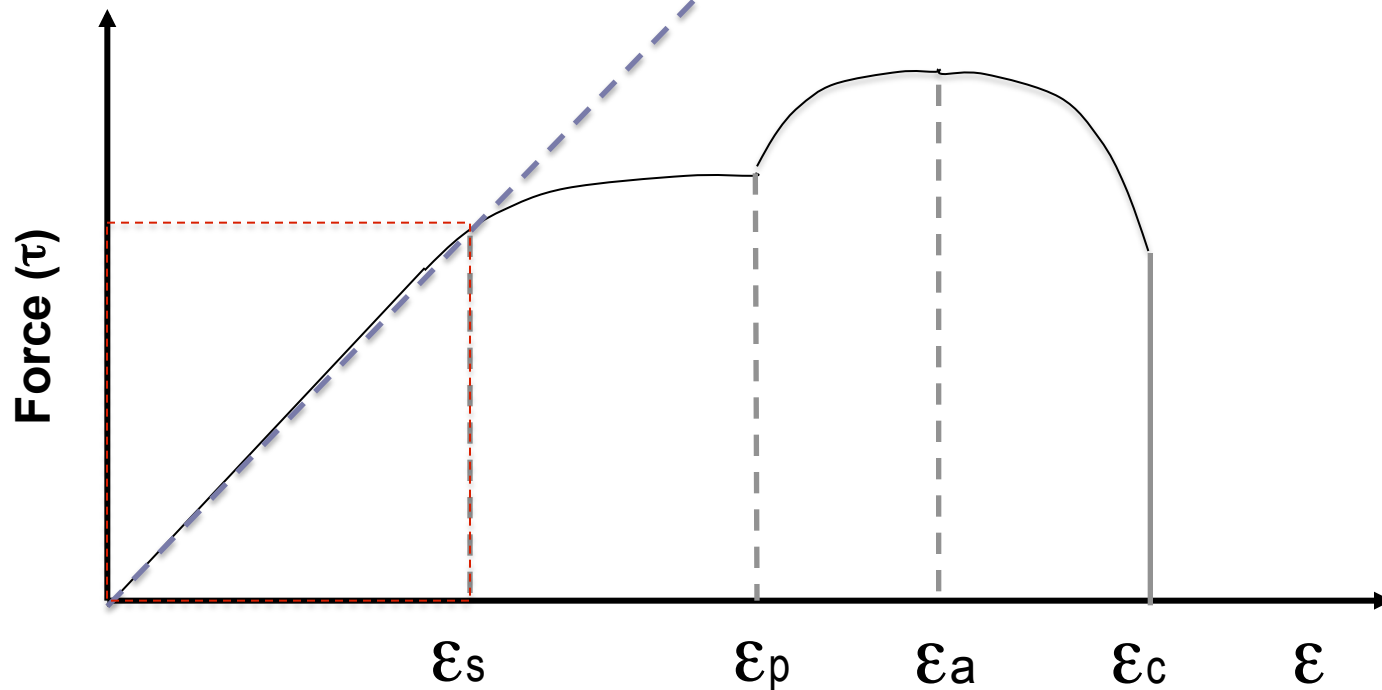
$\tau$  = sforzo (Pa)

$\varepsilon$  = deformazione longitudinale relativa ( $\Delta L/L$ )  
adimensionale

E = modulo di Young (Pa)

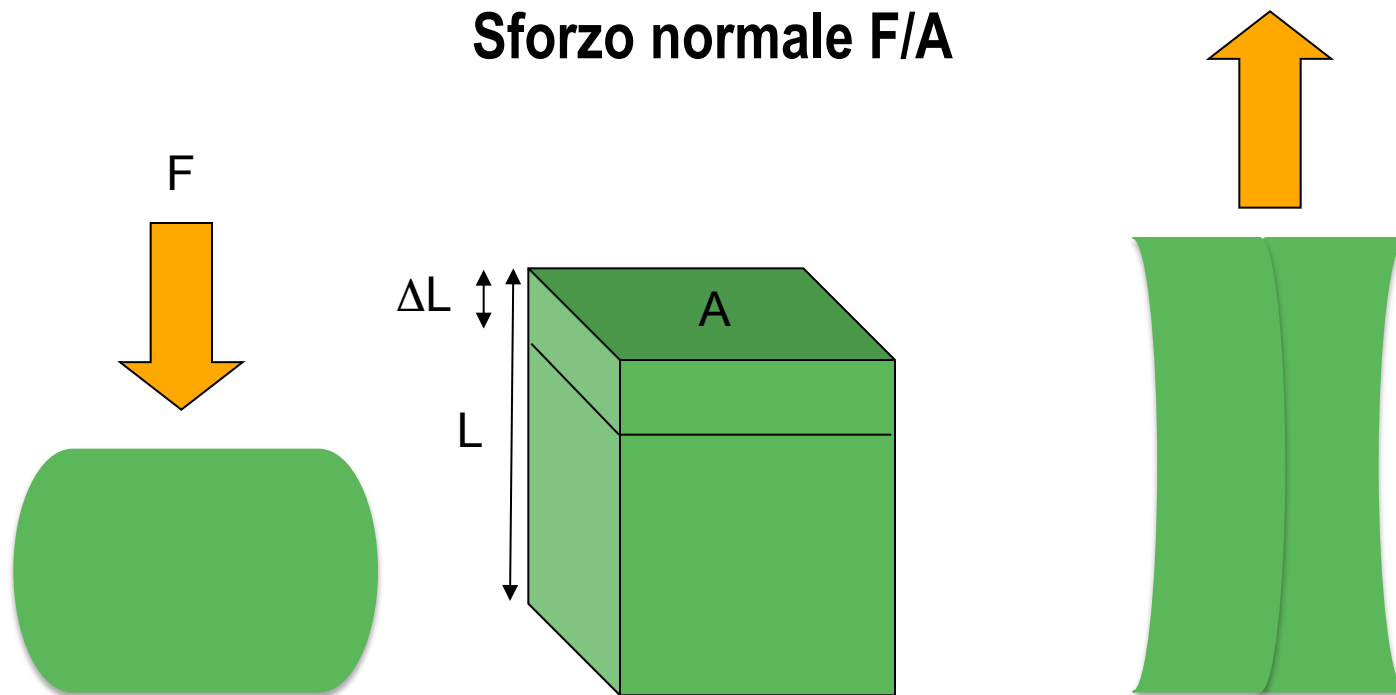
- Il coefficiente di proporzionalità E è detto anche modulo elastico

# Sforzo uniassiale (trazione o compressione)



Curva lineare fino a  $\epsilon_s$  punto di snervamento (***zona di elasticità lineare***), poi, ulteriormente, la deformazione diminuisce il modulo elastico fino al raggiungimento di  $\epsilon_p$ , dopo di cui si può avere un comportamento plastico (deformazione non recuperabile) fino ad  $\epsilon_a$ , dopo di cui si determina **assottigliamento del materiale** con riduzione del modulo elastico fino a  $\epsilon_c$  in cui si ha il cedimento strutturale.

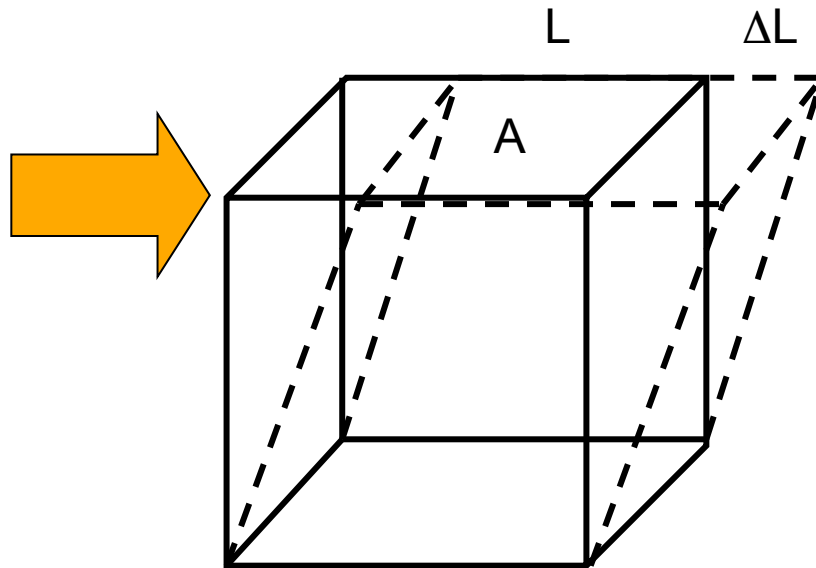
# Sforzo uniassiale: deformazione e assottigliamento



**A non costante per tutta l'estensione di L (altezza del campione)  
durante il test: deformazione non controllata**

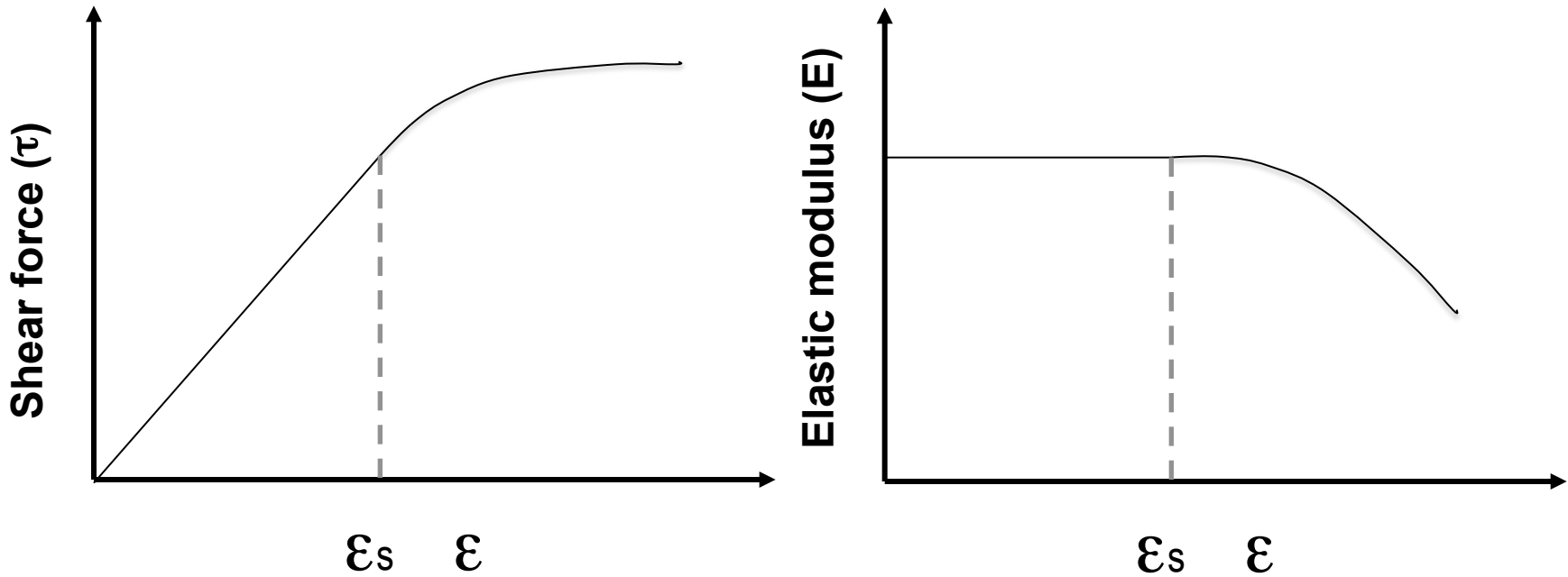
# Sforzo di taglio: deformazione tangenziale

Sforzo tangenziale o di taglio  
(*shear-stress*)  $F/A$



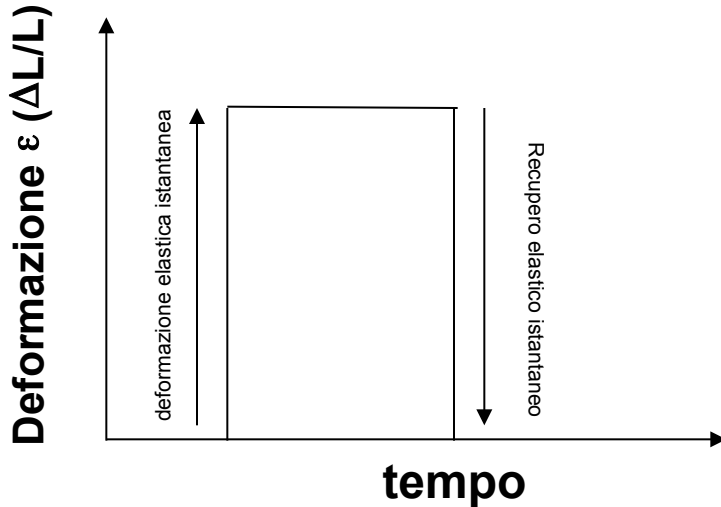
A costante per tutta l'estensione di L durante il test:  
deformazione controllata

# Test reologico: curva di Hooke



Curva lineare fino a  $\Delta L/L = \epsilon_s$  che corrisponde al punto di snervamento o di flusso ( $0-\epsilon_s =$  **zona di elasticità lineare**), poi se il materiale viene ulteriormente deformato diminuirà il suo modulo elastico  $E$  fino al raggiungimento di  $\Delta L/L = \epsilon_s$ , dopo il quale si assiste a deformazioni irreversibili

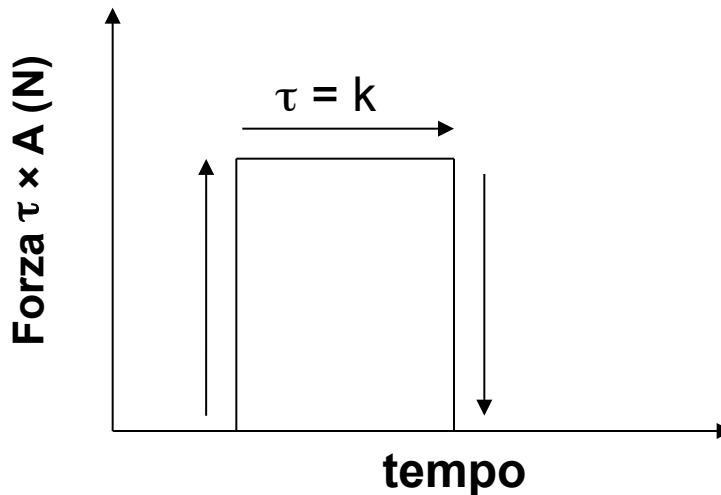
# Aspetti temporali della deformazione



## Solido di Hooke

Sotto l'azione di una forza costante applicata *'istantaneamente'* (es. un peso sulla faccia superiore del solido) i solidi si deformano istantaneamente, accumulano energia e recuperano immediatamente la deformazione applicata quando la forza viene rimossa.

(N.B. solo nella zona di elasticità lineare)



## Solido di Hooke

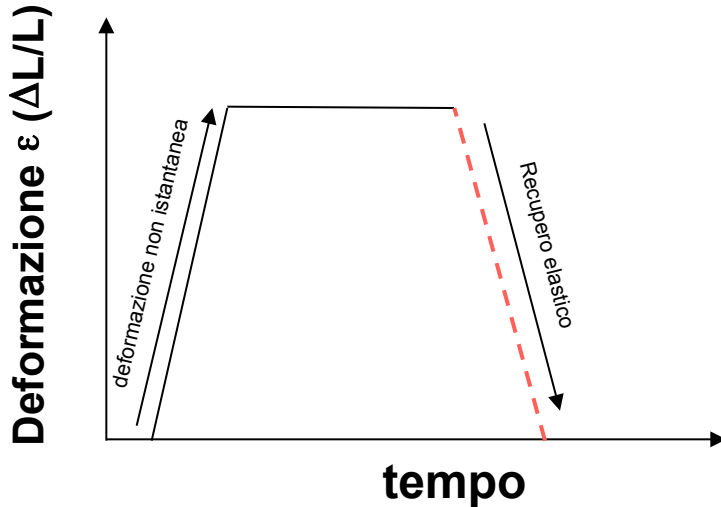
Sotto l'azione di una forza costante applicata *'istantaneamente'* i solidi accumulano energia ( $\tau \times \Delta L$ ) e non si rilassano  $\tau = k$  (conservano energia), o meglio si rilassano in tempo infinito. Se la forza viene rimossa rilasciano subito l'energia accumulata recuperando la forma.

(N.B. solo nella zona di elasticità lineare)

**N.B.** Condizione ideale: non è possibile applicare *istantaneamente* una forza

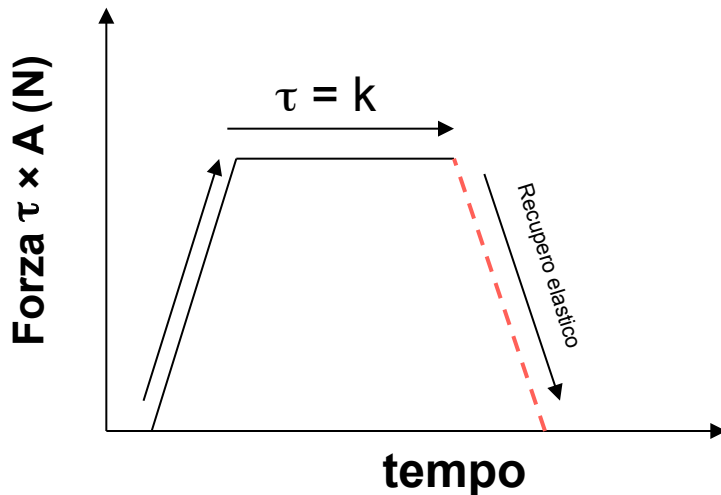


# Aspetti temporali della deformazione



## Solido di Hooke

Se deformato un solido sotto l'azione di un pistone fino a raggiungere una deformazione  $\varepsilon$ , la deformazione non è istantanea, il solido accumula progressivamente energia. Recupera la deformazione applicata in tempi molto brevi se la forza viene rimossa in tempi ugualmente brevi.

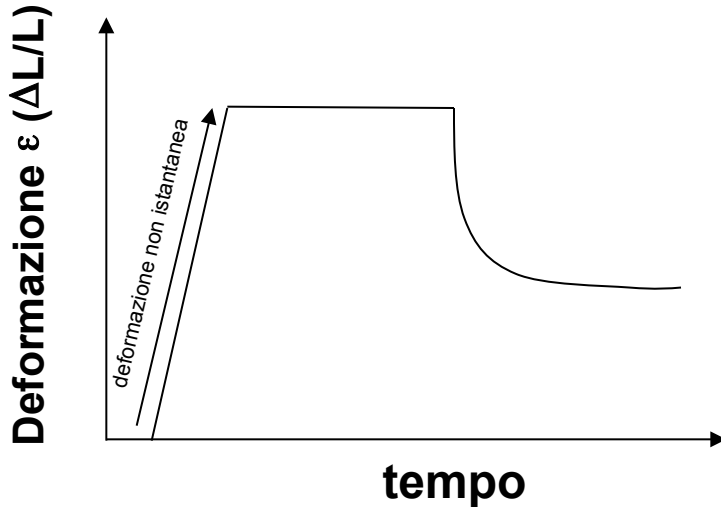


## Solido di Hooke

Sotto l'azione di una deformazione crescente i solidi rispondono con forza crescente ed accumulano energia ( $\tau \times \Delta L$ ). Se la forza viene rimossa molto velocemente, essi rilasciano l'energia accumulata altrettanto velocemente la forza si riduce a zero in tempi brevissimi.

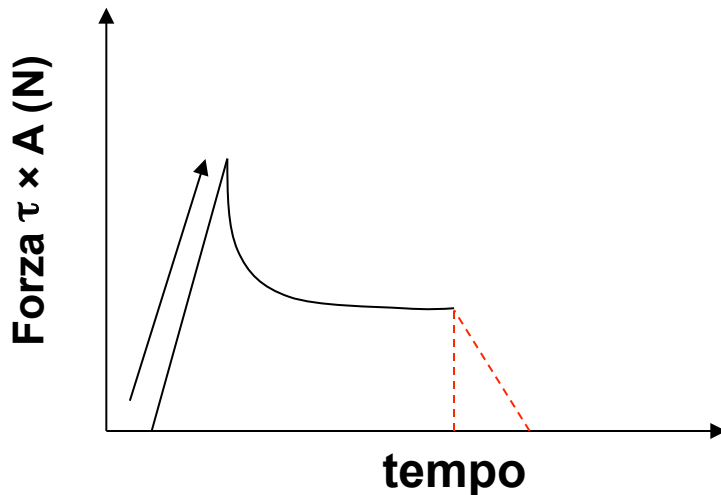
Se la forza viene rimossa progressivamente la riduzione della forza è progressiva.

# Corpi non hookeiani (non elastico)



## Non recuperano la deformazione

Sotto l'azione di una forza il solido accumula progressivamente energia fino a raggiungere una deformazione  $\varepsilon$  ma non recupera la deformazione applicata **in tempi brevi** anche se la forza è rimossa molto velocemente.



## Rilassano le forze interne

Sotto l'azione di una deformazione crescente i solidi rispondono con forza crescente ed accumulano energia ( $\tau \times \Delta L$ ). Se la deformazione viene mantenuta costante, essi comunque dissipano l'energia accumulata attraverso scorrimento.

# Tempo di rilassamento

Tempo che un campione impiega per ridurre di circa la metà ( $1/e \sim 63\%$ ) lo sforzo interno indotto dalla deformazione

Per un liquido: tende a zero

Per un solido elastico: tende all'infinito

I materiali possono essere classificati secondo il loro tempo di rilassamento

	Tempo di rilassamento (s)
Liquidi	$10^{-5} - 10^{-3}$
Viscoelastici (gel)	$10^{-3} - 10^2$
Solidi elastici	$10^2 - 10^5$

# Tempo di rilassamento

*Le montagne scorrono di fronte al Signore .....*

(Deborah, Antico Testamento, Salmi)

Ogni sistema può esibire comportamenti di tipo solido o liquido in funzione di:

- Tempo di rilassamento del materiale (acqua:  $10^{-12}$  s; vetro  $10^n$  s)
- Scala temporale dell'osservazione o della deformazione ( $\Lambda$ )

Numero di Deborah,  $De = \lambda/\Lambda$

Se la deformazione è veloce ( $\Lambda$  molto piccolo),  $De$  è grande: il materiale si comporta come solido

Se la deformazione è lenta ( $\Lambda$  grande),  $De$  è piccolo: il materiale si comporta come liquido

# Tempo di rilassamento

Liquido  
viscoso

Acqua che scorre in un canale

Una vetrata, nei secoli

Solido  
elastico

Goccia d'acqua che impatta  
una superficie

Una vetrata, in un giorno

Quando  $De = 1$  (velocità di deformazione materiale = tempo di rilassamento caratteristico) il materiale si comporta come

**viscoelastico**

In questo caso l'analisi del suo comportamento reologico è più complessa poiché devono essere definite le componenti elastiche e viscose, in funzione della velocità di deformazione

# Comportamento della materia

LIQUIDO IDEALE  
(Newtoniano)

SOLIDO IDEALE  
(Hookeiano)

Sotto l'azione di  
uno SFORZO

“scorre” con una  
velocità di deformazione ( $\dot{\gamma}$ )  
che dipende dalla sua  
viscosità

subisce una  
deformazione ( $\epsilon$ )  
che dipende dal suo  
modulo elastico (Pa)

---

# Alimenti e viscoelasticità

- **In alimenti solidi esiste una componente viscosa:**  
sforzi sufficientemente elevati determinano deformazioni irreversibili. Il recupero non è completo, né istantaneo
  - **In alimenti liquidi esiste una componente elastica:**  
quando lo sforzo viene rimosso si osserva, in tempi discreti, un parziale recupero delle deformazioni
-

# Comportamento della materia

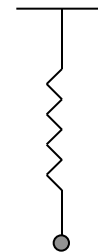
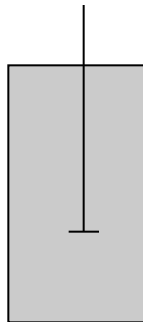
LIQUIDO IDEALE  
(Newtoniano)

SOLIDO IDEALE  
(Hookeiano)

Al cessare dello  
SFORZO

Non recupera la deformazione  
“irreversibilità”

Recupera la deformazione  
“reversibilità”



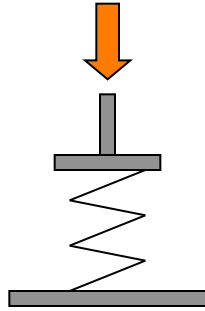
Rappresentazione grafica  
“*ammortizzatore*”

Rappresentazione grafica  
“*molla*”

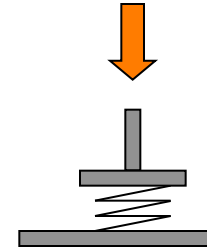


# Viscoelasticità: modello di Maxwell

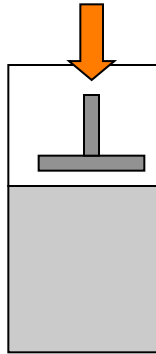
Solido  
elastico



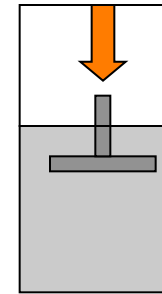
Si deforma -  
recupera la  
deformazione  
(reversibile)



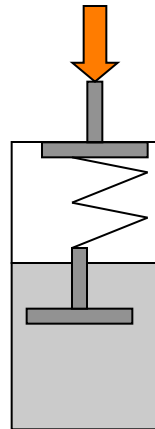
Liquido  
viscoso



Scorre -  
non recupera la  
deformazione  
(irreversibile)



Corpi reali  
viscoelastici



Modello di  
Maxwell

# Reometri rotazionali

*Reometri:*

permettono di misurare lo sforzo sia a velocità che a deformazioni note.

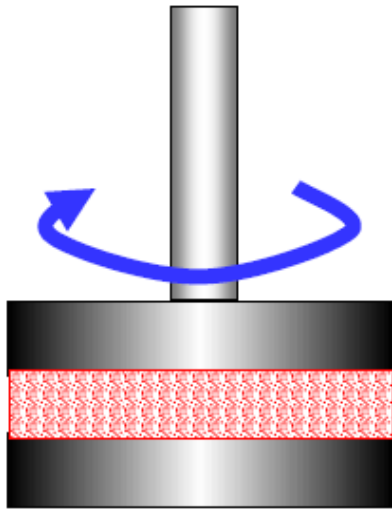
Sono adatti a espletare misure reologiche sia su corpi viscosi che viscoelastici.

Sono termostatati.

Sono dotati di diversi accessori con diverse geometrie a seconda del tipo di alimento da analizzare (liquido o viscoelastico).

---

# Creep test



**Viene posta in rotazione la parte mobile di un reometro applicando uno sforzo di taglio costante e si misura la deformazione del materiale a questa sollecitazione in funzione del tempo**

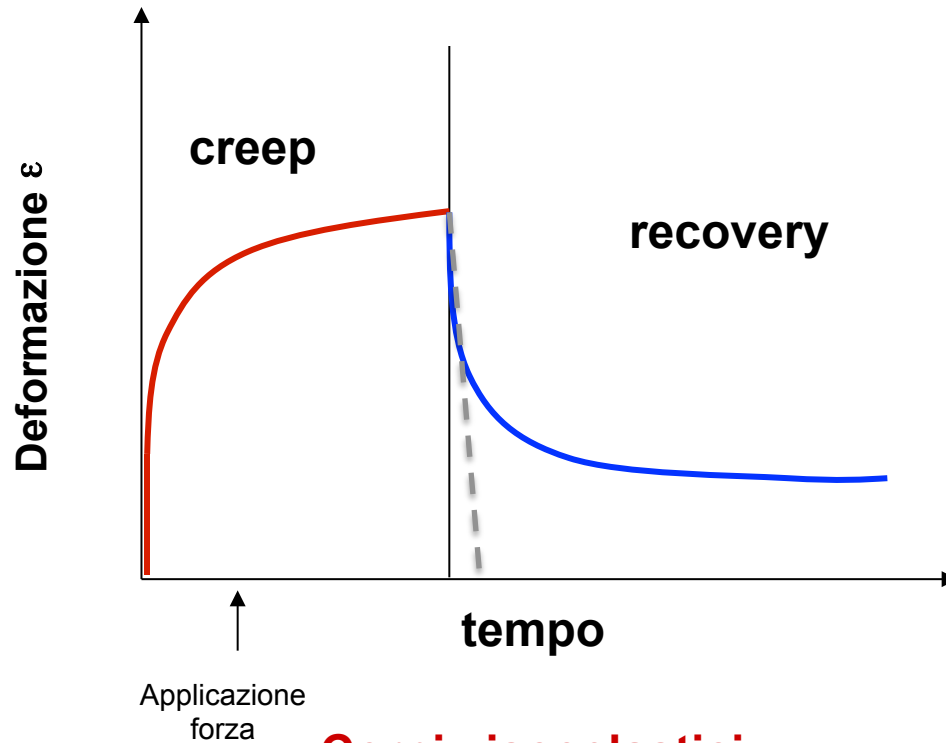
Creep test: il prodotto è sottoposto ad uno sforzo (in rotazione) determinato per un certo tempo e si misura la deformazione determinata

---

# Test di creep recovery

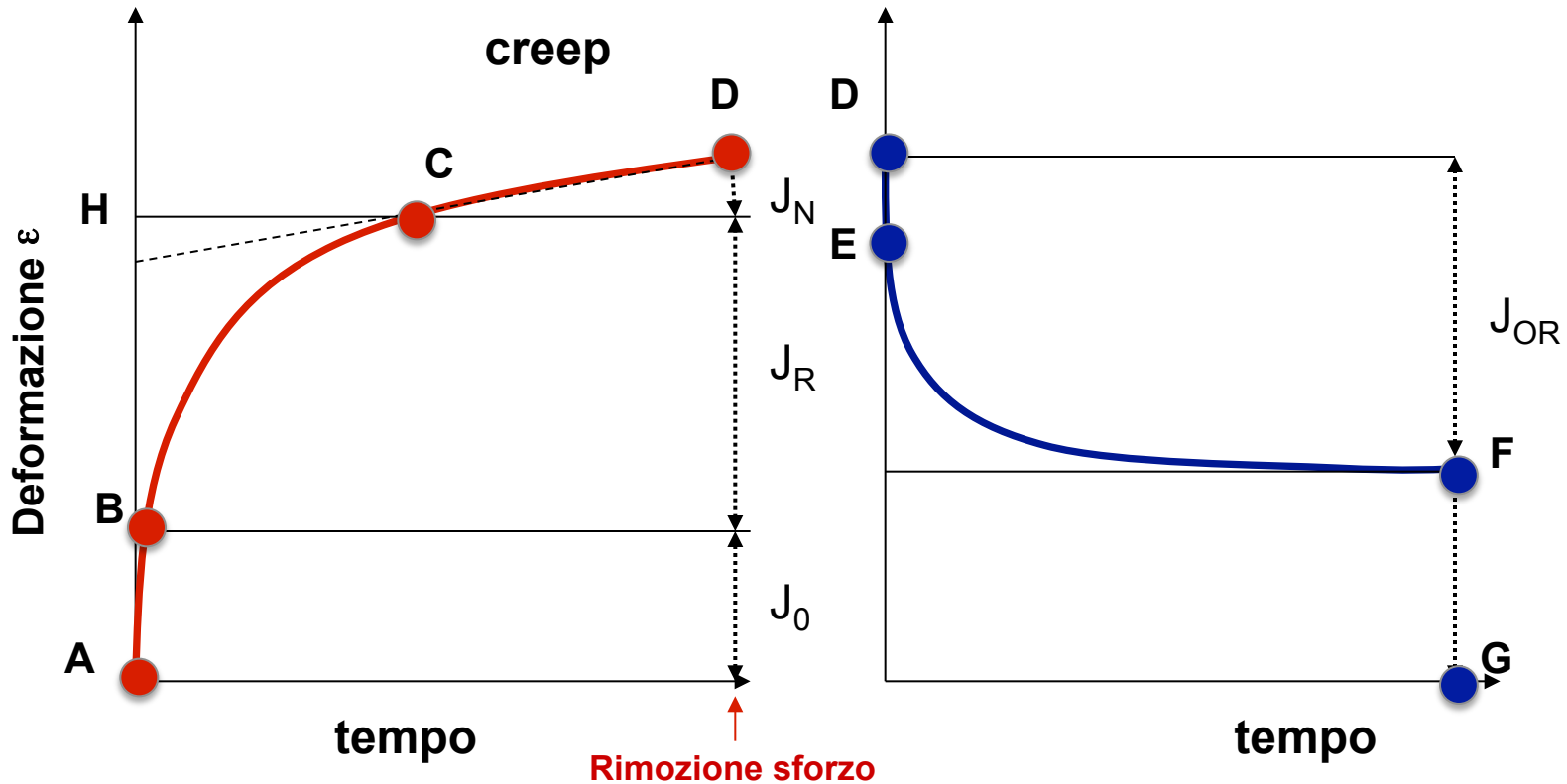
- **Metodologia**
  - I° fase (creep): si applica uno sforzo (di taglio) di limitata entità per un certo tempo e si misura la deformazione determinata sul campione
  - II° fase (recovery): si rimuove lo sforzo e si registra il comportamento del campione nel suo tentativo di recuperare la sua forma iniziale in funzione dell'energia accumulata nei suoi legami interni
-

# Test di creep recovery



gli alimenti in parte recuperano, in parte dissipano in funzione del contenuto di componente viscosa (acqua, oli, etc.)

# Test di creep recovery (A-G)



$J_0 = AB =$  deformazione elastica istantanea. No rottura legami

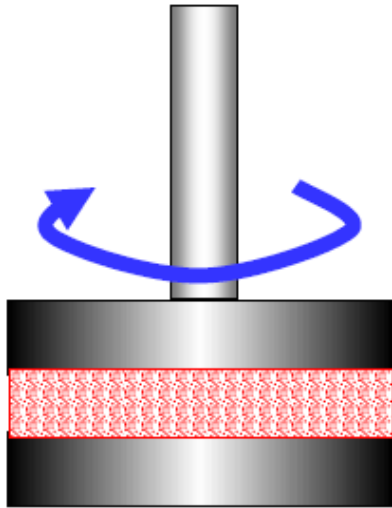
$J_R = BC =$  deformazione elastica ritardata. Rottura legami e loro ricreazione (sempre minore)

$J_N = CD =$  comportamento viscoso newtoniano. Il materiale fluisce

$J_{OR} = DF =$  Recupero elastico (DE) + recupero ritardato (EF)

$FG =$  deformazione permanente

# Stress test



## Stress - strain

Viene posta in rotazione la parte mobile di un reometro applicando una deformazione  $\varepsilon$  definita e si misura lo sforzo necessario a raggiungere la deformazione

**Stress - relaxation**: il prodotto è sottoposto ad una deformazione (in rotazione) determinata che viene mantenuta per un certo tempo e si misura lo sforzo determinato dalla rotazione nel tempo

---

# Test di stress - relaxation

## rilassamento o scorrimento viscoso

### Metodologia

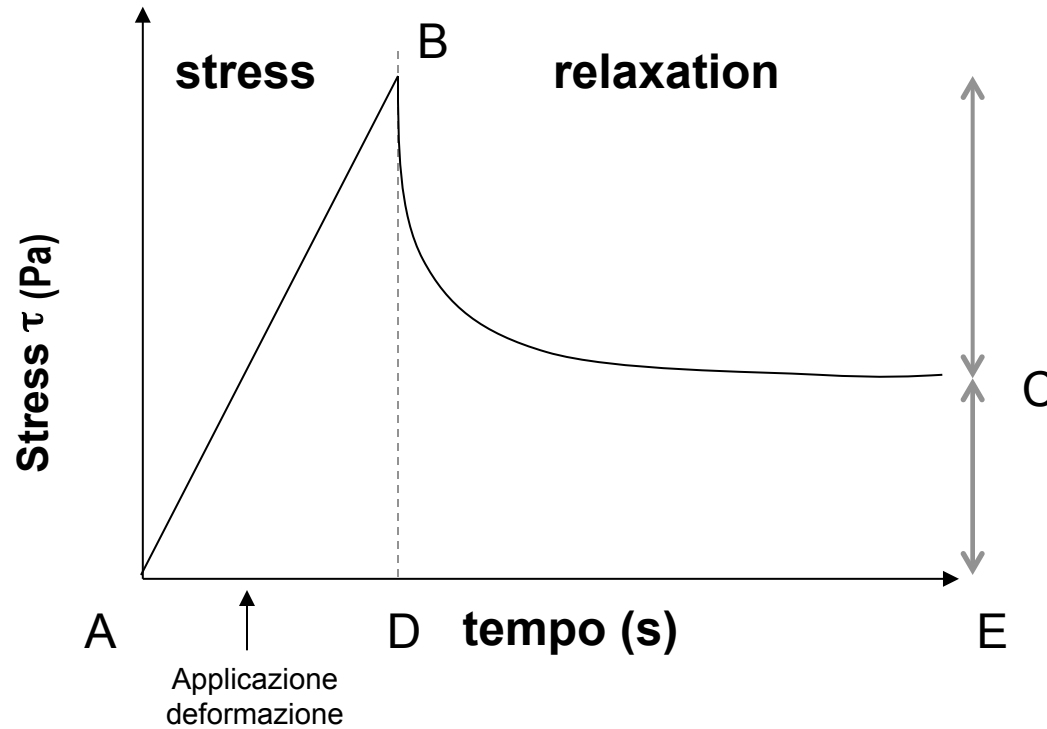
- I° fase (stress): si impone una deformazione (di taglio, di compressione) di limitata entità e si misura lo sforzo fino al raggiungimento della deformazione
- II° fase (relaxation): si mantiene la deformazione (sforzo costante) e si registra la forza esercitata dal campione sulla parte mobile dello strumento nel suo tentativo di recuperare la sua forma iniziale

La forza esercitata dal campione è funzione dell'energia accumulata nei suoi legami interni  $F = E/\Delta L$

---



# Test di stress - relaxation



**AB = deformazione entro il limite di elasticità  $\epsilon_s$ . No rottura legami**

**BC = dissipazione dello sforzo a causa di scorrimento viscoso (relaxation stress)**

**CE = sforzo residuo**

**DE = tempo di rilassamento**

---

# Test di stress - relaxation

## Corpi viscoelastici

**Dissipano parte dello sforzo  $\tau$  attraverso lo scorrimento viscoso. Lo scorrimento viscoso dipende dal contenuto di componenti viscosi (acqua, grassi, alcoli).**

**Integrando lo sforzo in funzione del tempo è possibile stimare l'energia di rilassamento.**

---

# Test di stress - relaxation

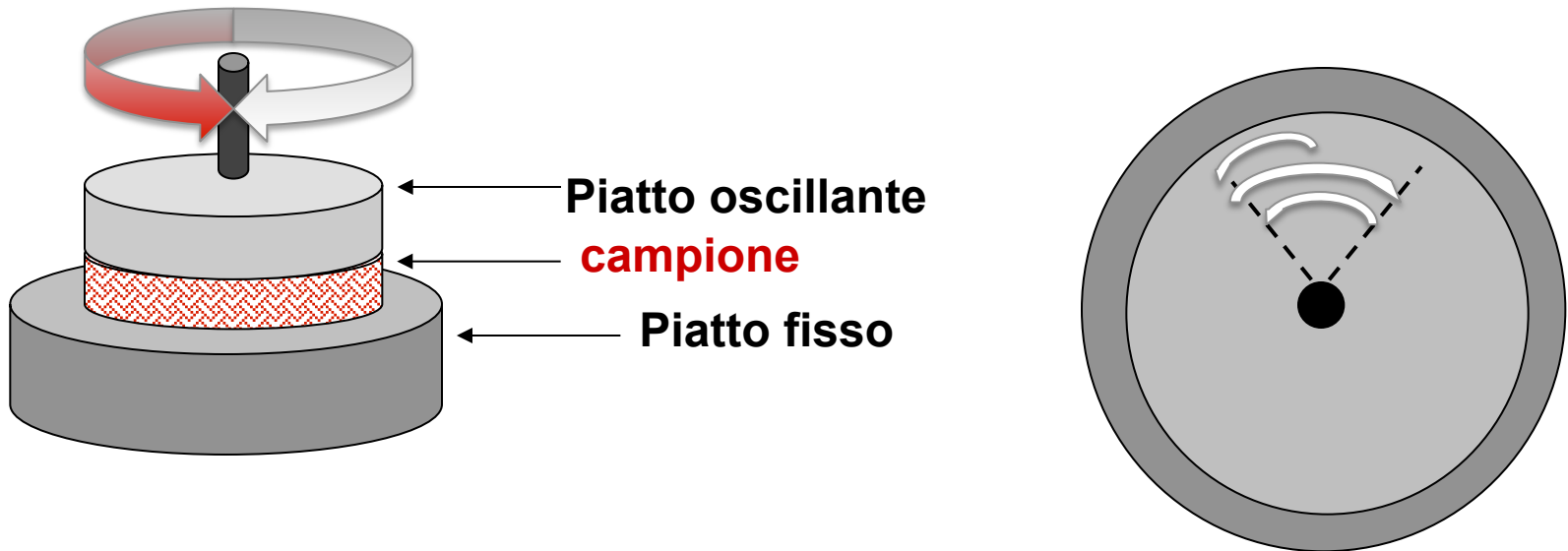
Permette di calcolare il tempo di rilassamento di un campione: tempo che un campione impiega per ridurre di circa la metà ( $1-1/e \sim 63\%$ ) lo sforzo interno  $\tau$  indotto dalla deformazione

Per un liquido:  $< 10^{-3}$  s

Per un solido:  $> 10^2$  s

Per calcolare il tempo di rilassamento  $t_R$  la fase a deformazione costante deve essere mantenuta per almeno  $10^2$  s, se tale tempo non è sufficiente si ricorre a modelli predittivi per la stima di  $t_R$  (funzioni asintotiche)

# Misure in oscillatorio



**Viene posta in rotazione la parte mobile (piatto o cono) di un reometro partendo da un punto zero ed applicando una deformazione angolare di  $-\alpha$  definita, dopo di cui si applicano alternativamente deformazioni cicliche di  $\pm 2\alpha$  che si ripetono  $n$  volte**

# Misure in oscillatorio

Si impone un'oscillazione armonica del piatto (o cono) superiore

Si impone oscillazione e si misura lo stress

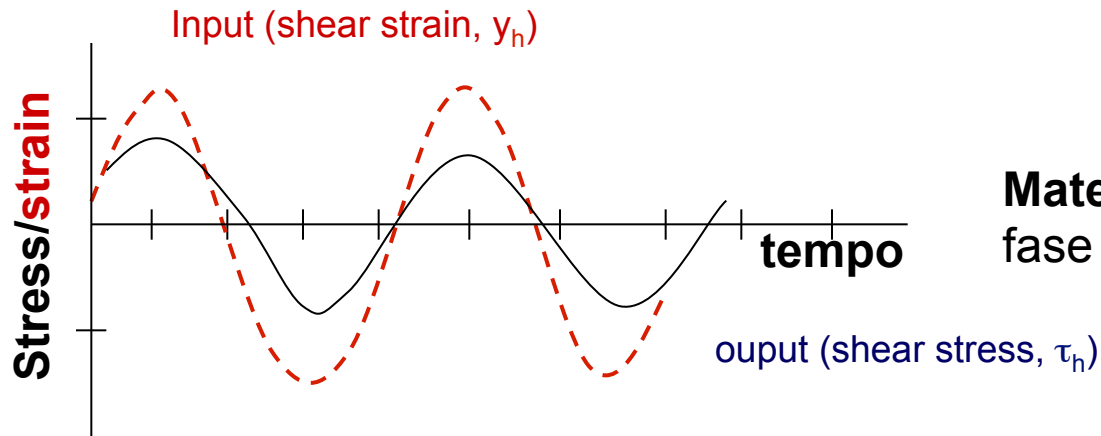
- Ampiezza oscillazione: piccola per non alterare la struttura nativa (test non distruttivo)

Per definire l'ampiezza dell'oscillazione bisogna preliminarmente definire la **zona di viscoelasticità lineare** o ampiezza superata la quale il campione si altera a sotto uno stress troppo elevato

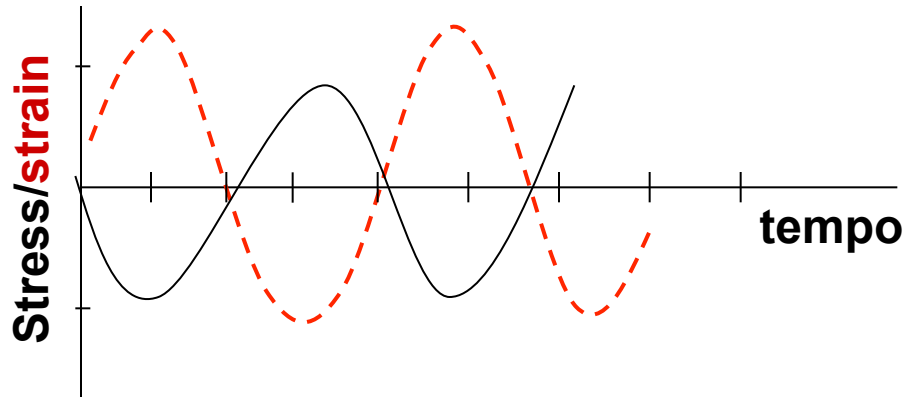
- Il numero delle oscillazioni nell'unità di tempo si esprime come frequenza in Hz (1 Hz = 1 oscillazione/s)

Il campo di frequenza applicato: 0.1-100 Hz (0.1-10 Hz)

# Misure in oscillatorio

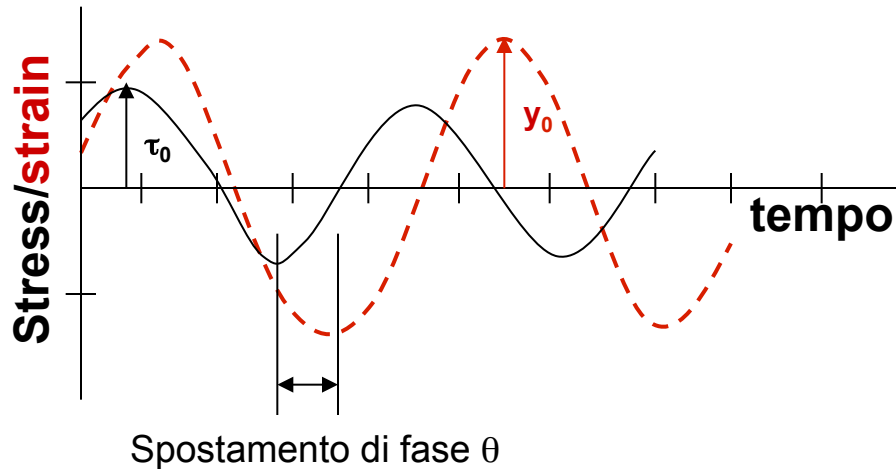


**Materiale elastico:** sforzo in fase con deformazione



**Materiale viscoso:** sforzo sfalsato di  $90^\circ$  rispetto deformazione

## Misure in oscillatorio:



### Materiale viscoelastico:

sforzo sfalsato di  $\theta$  rispetto alla deformazione

#### Fase ( $\theta$ ):

=  $90^\circ$ : liquido viscoso ideale

=  $0$ : solido elastico ideale

$0 < \theta < 90^\circ$ : materiale viscoelastico

# Misure in oscillatorio: parametri

## ■ Definizione di:

- **Modulo elastico** (storage modulus,  $G'$ ): modulo in fase con la deformazione (energia conservata)

$$G' = \frac{\tau_0 \cos\theta}{y_0} \quad \theta = \arccos \frac{y_0}{\tau_0 G'} = 0^\circ \text{ per corpo elastico}$$

- **Modulo viscoso** (loss modulus,  $G''$ ): modulo non in fase con la deformazione (energia dissipata in scorrimento viscoso)

$$G'' = \frac{\tau_0 \sin\theta}{y_0} \quad \theta = \arcsin \frac{y_0}{\tau_0 G''} = 90^\circ \text{ per corpo viscoso}$$



# Misure in oscillatorio: parametri

## ■ Definizione di:

- **Modulo complesso** (complex modulus,  $G^*$ ):  
somma vettoriale  $(G' + G'') = \sqrt{(G'^2 + G''^2)}$
- Tangente di perdita ( $G''/G'$ )
- Viscosità dinamica ( $\eta^*$ , Pa s)
- Fase (angolo di sfasamento tra 0 e  $90^\circ$ )

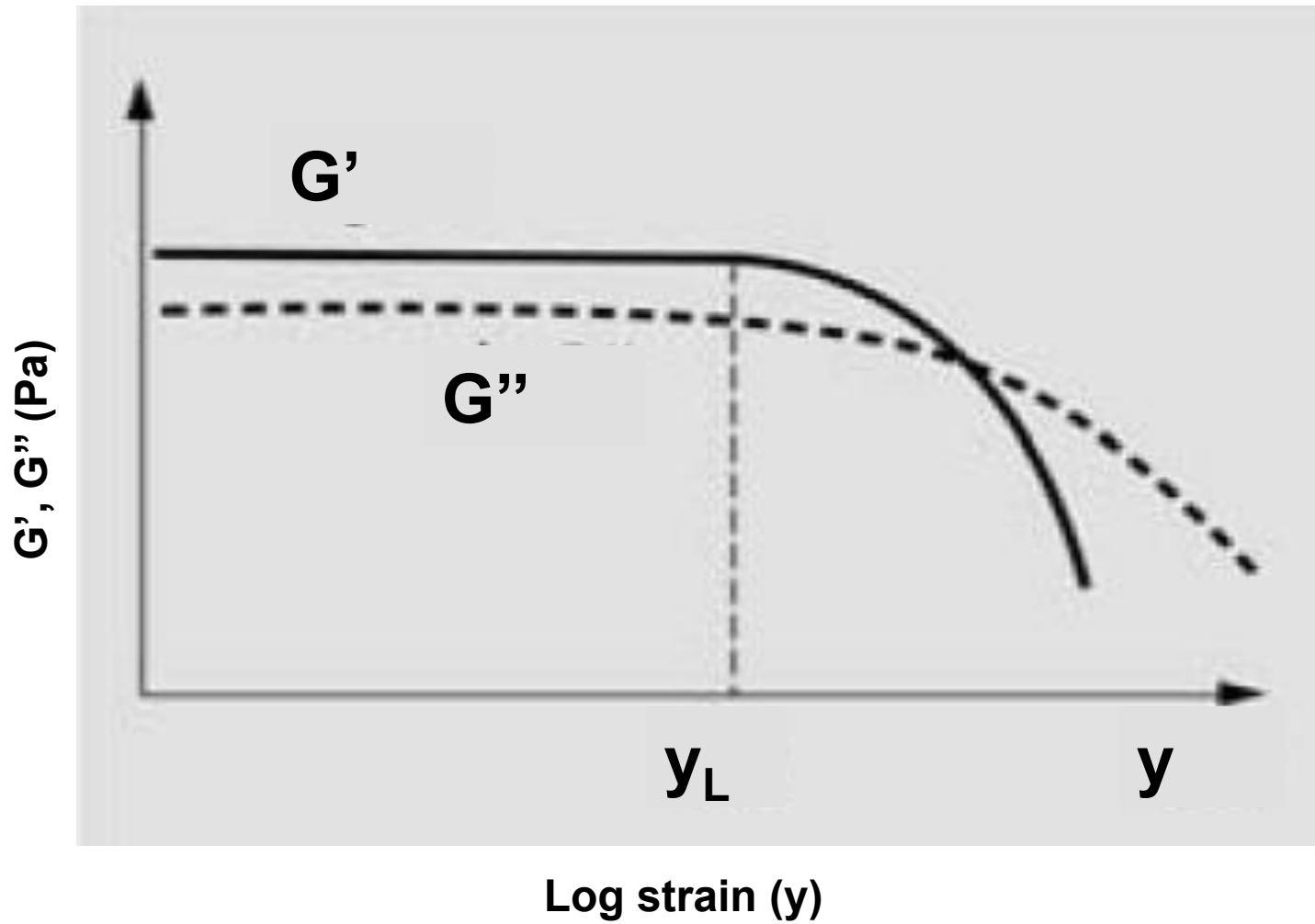
---

# Misure in oscillatorio

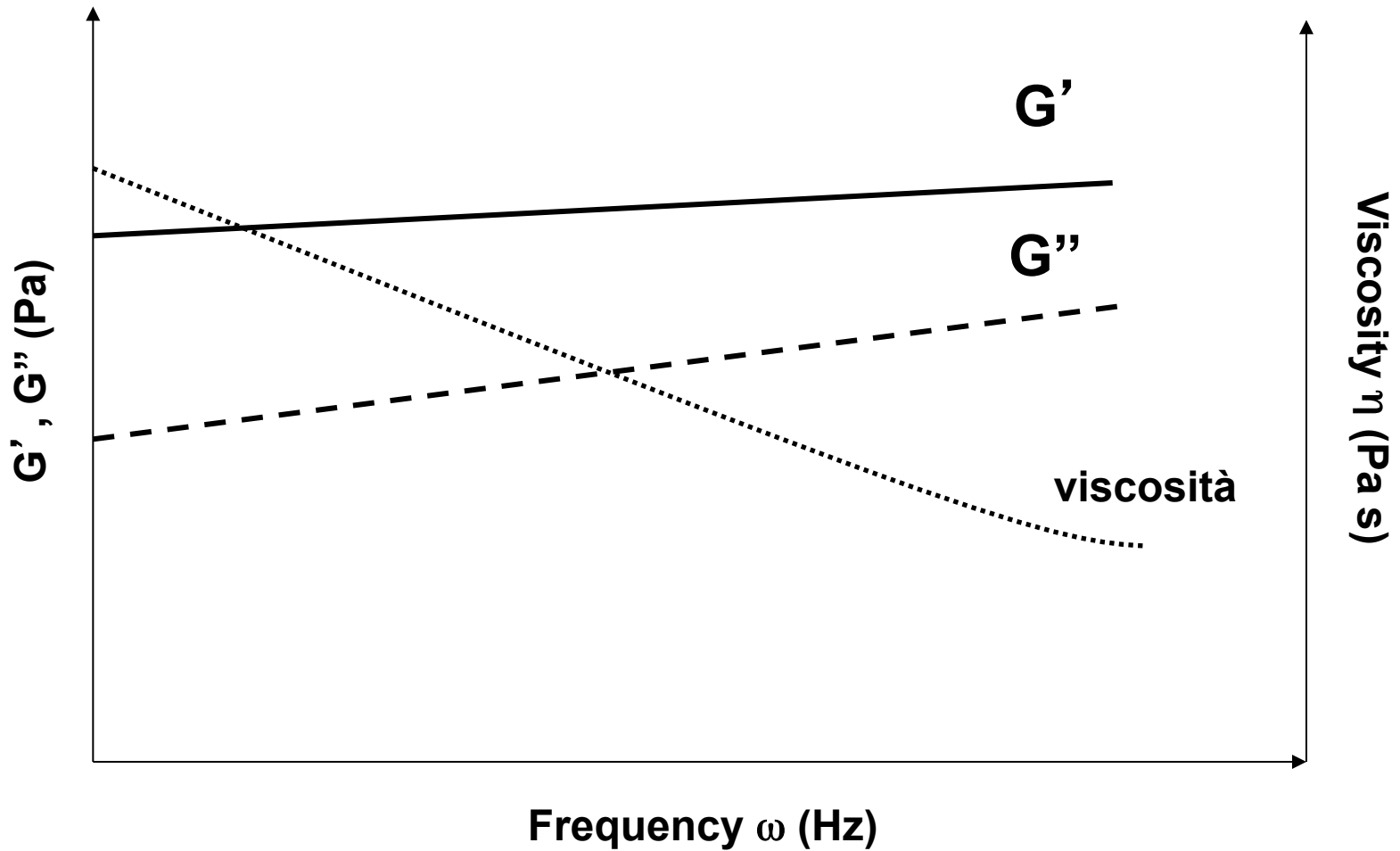
## *Metodologia di analisi*

1. Test a frequenza costante e shear strain (e shear stress di conseguenza) crescente (*amplitude sweep test*): permette l'individuazione della zona di visco-elasticità lineare (massima deformazione tollerabile senza determinare modificazioni strutturali irreversibili,  $G' = \text{costante}$ )
  2. Definizione deformazione, e quindi massimo sforzo, da applicare ( $< y_L$ )
  3. Test a shear strain (o stress costante) e frequenza crescente (*frequency sweep test*): valutazione proprietà meccaniche a frequenza crescente (tempo di applicazione della forza decrescente) in modo da studiare il comportamento viscoelastico
-

# Misure in oscillatorio: amplitude sweep



# Misure in oscillatorio: frequency sweep



# Strumenti per analisi reologiche

## Reometri rotazionali



# Reometri rotazionali

*Reometri:*

permettono di misurare lo sforzo sia a velocità che a deformazioni note.

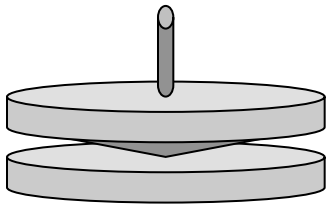
Sono adatti a espletare misure reologiche sia su corpi viscosi che viscoelastici.

Sono termostatati.

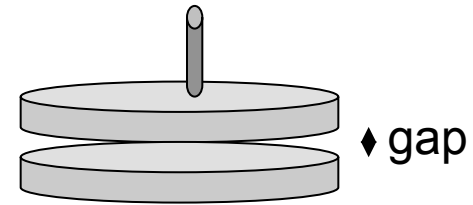
Sono dotati di diversi accessori con diverse geometrie a seconda del tipo di alimento da analizzare (liquido o viscoelastico).

---

# Reometri rotazionali: geometrie



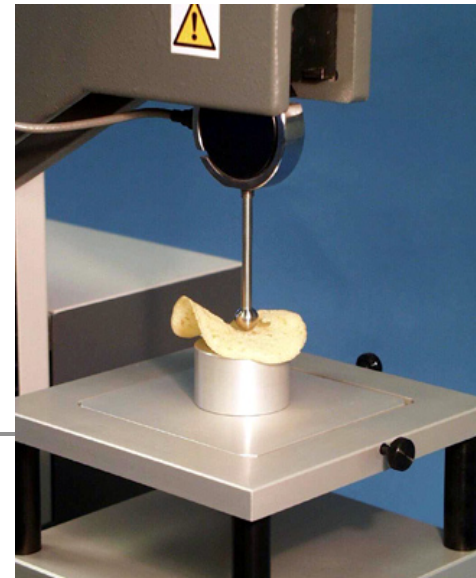
Piatto-cono



Piatto-piatto



## La consistenza degli alimenti solidi: le proprietà fisico meccaniche





# La consistenza degli alimenti solidi

- Alimenti solidi: anisotropi (la deformazione dipende dalla direzione lungo la quale la forza viene applicata)
- Alimenti solidi: corpi polifasici costituiti da una fase solida ed una liquida (in alcuni casi anche da fase gassosa).  
Comportamento intermedio tra solido elastico e liquido viscoso determinato dalla presenza di una matrice solida e di liquidi con capacità plasticizzante (acqua, grassi), in caso di presenza di gas il comportamento è più complesso per presenza di fase gassosa comprimibile.
- Alimenti solidi: corpi non omogenei o macroscopicamente omogenei ma comunque costituiti da micro o macro compartimentazioni che determinano disomogeneità a livello locale

---

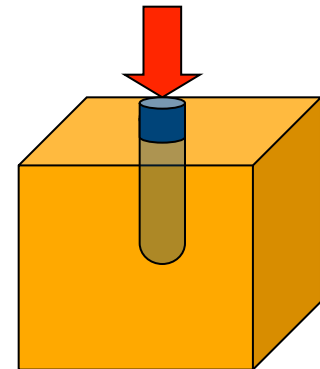
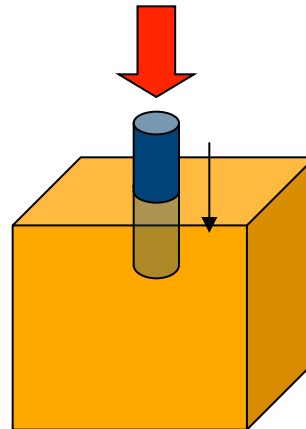
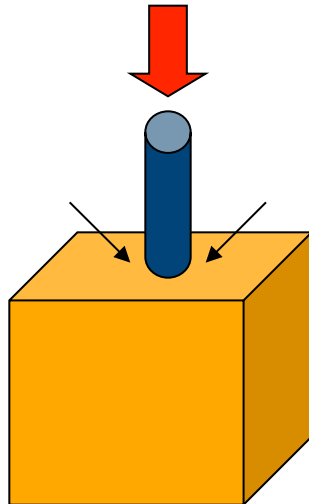
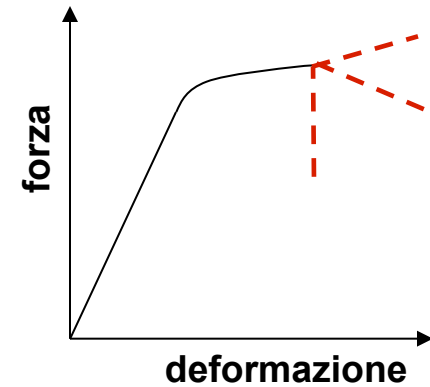
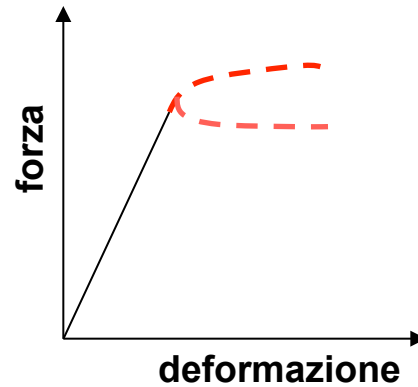
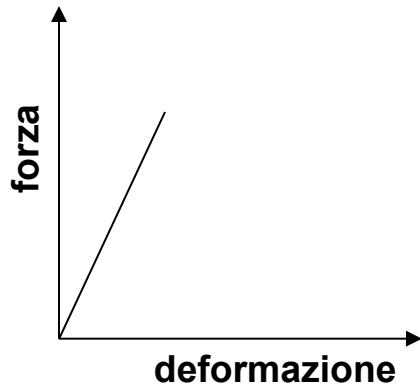
# La misura della consistenza degli alimenti solidi

- **Test fondamentali** (reologia): valutazione modulo, elasticità (test in oscillazione, creep-recovery, stress relaxation). Non sempre applicabili ad alimenti solidi.
  - **Test empirici/imitativi**: test specifici che riproducono meccanicamente le condizioni a cui il prodotto viene sottoposto durante la trasformazione, preparazione o il consumo (es. compressione, taglio, masticazione, etc.). I risultati possono essere correlati alle proprietà sensoriali.
-

# Test di penetrazione

- Si basano sulla penetrazione del materiale attraverso una sonda cilindrica con una testa piatta, convessa, conica o a stella.
  - Il diametro della sonda deve essere inferiore alle dimensioni del prodotti.
  - Misurano la forza necessaria alla penetrazione (deformazione) per un certo tratto.
  - Problematiche di standardizzazione della misura: velocità di penetrazione (per penetrometri elettronici) manualità operatore (per penetrometri manuali)
-

# Test di penetrazione

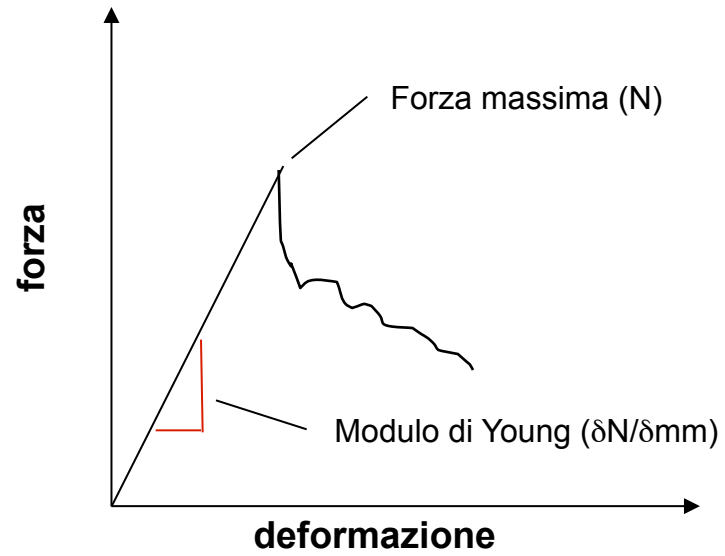


Sforzo penetrazione e cedimento superficie

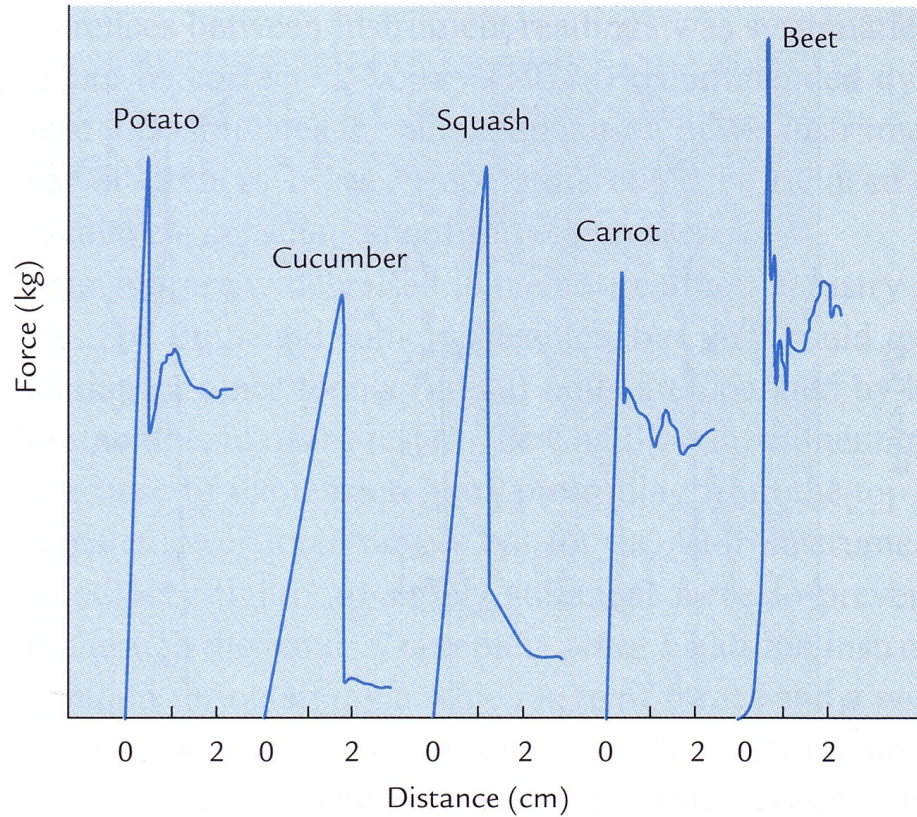
Sforzo penetrazione prodotto

Sforzo penetrazione prodotto

# Test di penetrazione



# Test di penetrazione: vegetali



# Test di compressione

- Si basano sulla compressione uniassiale del materiale attraverso una sonda cilindrica con una testa piatta o sferica
- Forniscono la forza per comprimere (deformare) un materiale per una certa estensione.
- Normalmente non deve essere raggiunto il cedimento strutturale

$$\tau = E \varepsilon$$

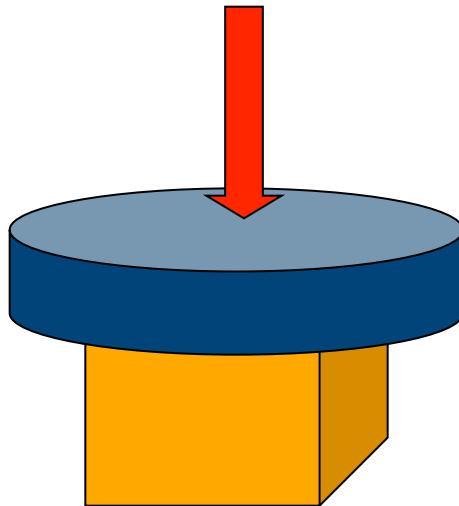
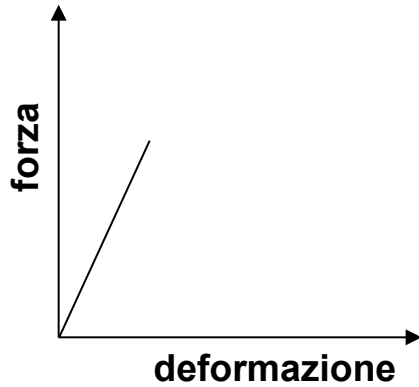
$\tau$  = sforzo (Pa)

$\varepsilon$  = deformazione longitudinale relativa ( $\Delta L/L$ )

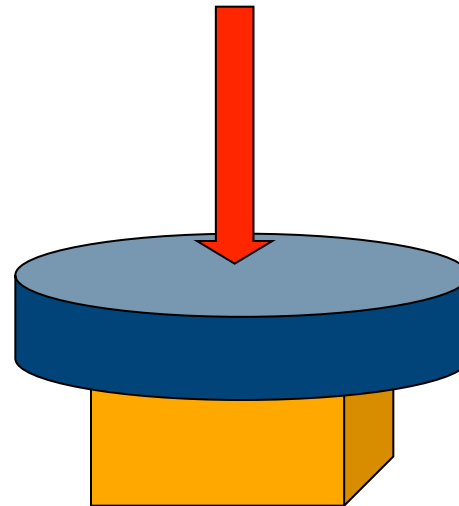
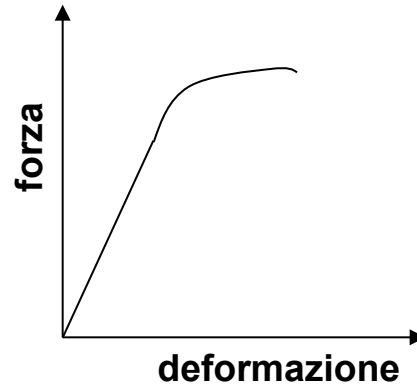
$E$  = modulo di Young

---

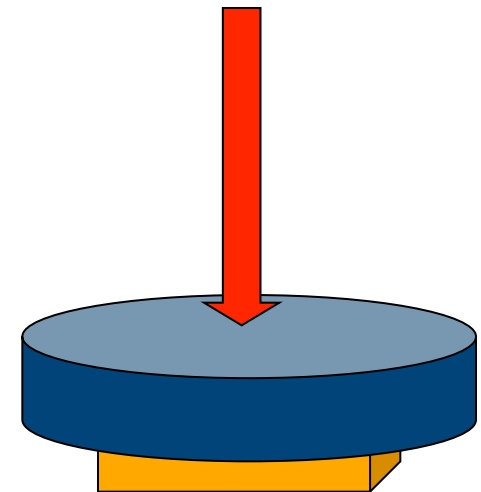
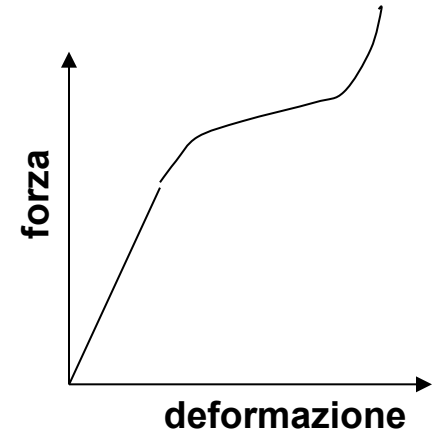
# Test di compressione



**Sforzo penetrazione e cedimento superficie**



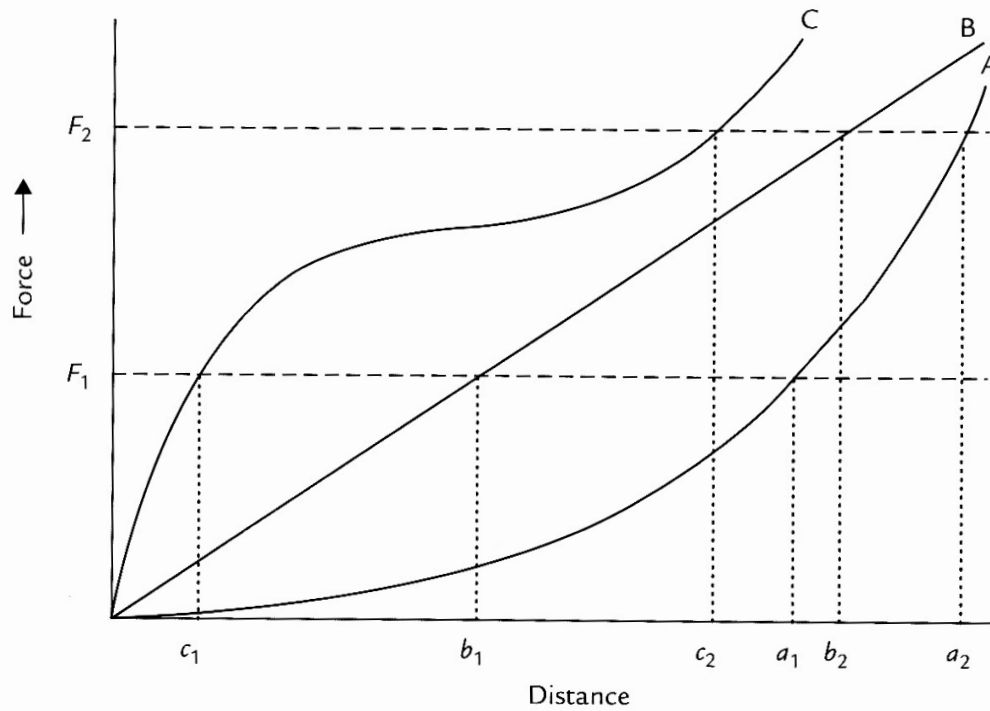
**Sforzo penetrazione prodotto**



**Sforzo penetrazione prodotto**



# Test di compressione

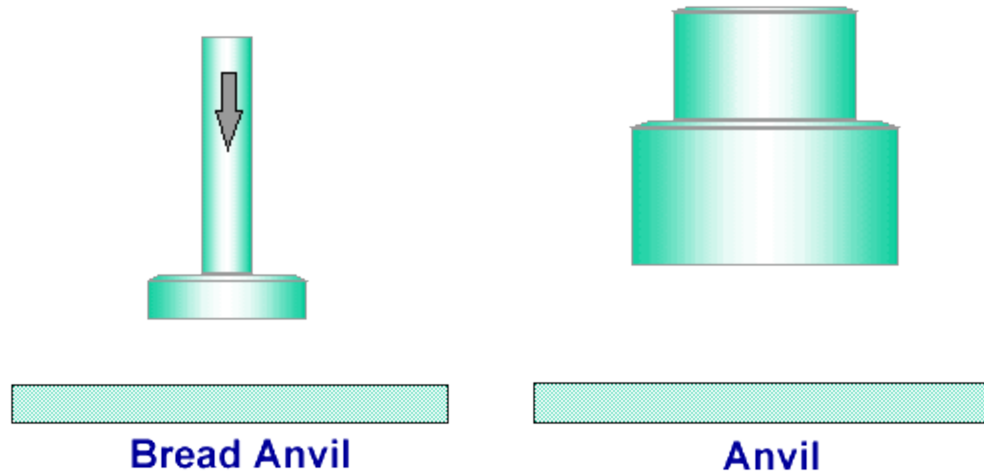


**Figure 4.32** Three characteristic types of force–deformation behavior.

# Test di compressione

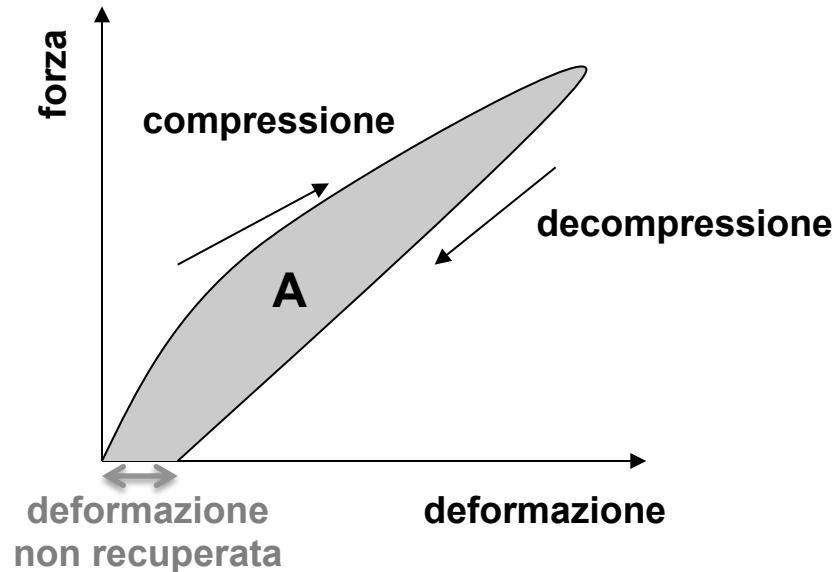
- Sonde: genericamente piatte.
  - Il rapporto superficie sonda/superficie campione deve essere definito per ottenere risultati confrontabili
  - La sonda non deve penetrare il campione con eventuale azione di taglio
  - Campione se possibile alto e basse deformazioni uniassiali ( $\Delta L/L \leq 0.3$ ) per evitare deformazioni laterali
  - Velocità di discesa della sonda: definita, in funzione dell'obiettivo
-

# Test di compressione: sonda



# Test di compressione-decompressione

## Curva di isteresi



**Elasticità:** deformazione recuperata/deformazione indotta

A = differenza tra energia (lavoro) speso per la compressione e energia (lavoro) recuperato durante la fase di recupero della deformazione

A = **energia non recuperata, dissipata in scorrimento viscoso**

Materiale elastico recupera deformazione e presenta  $A = 0$

# Test di compressione-rilassamento

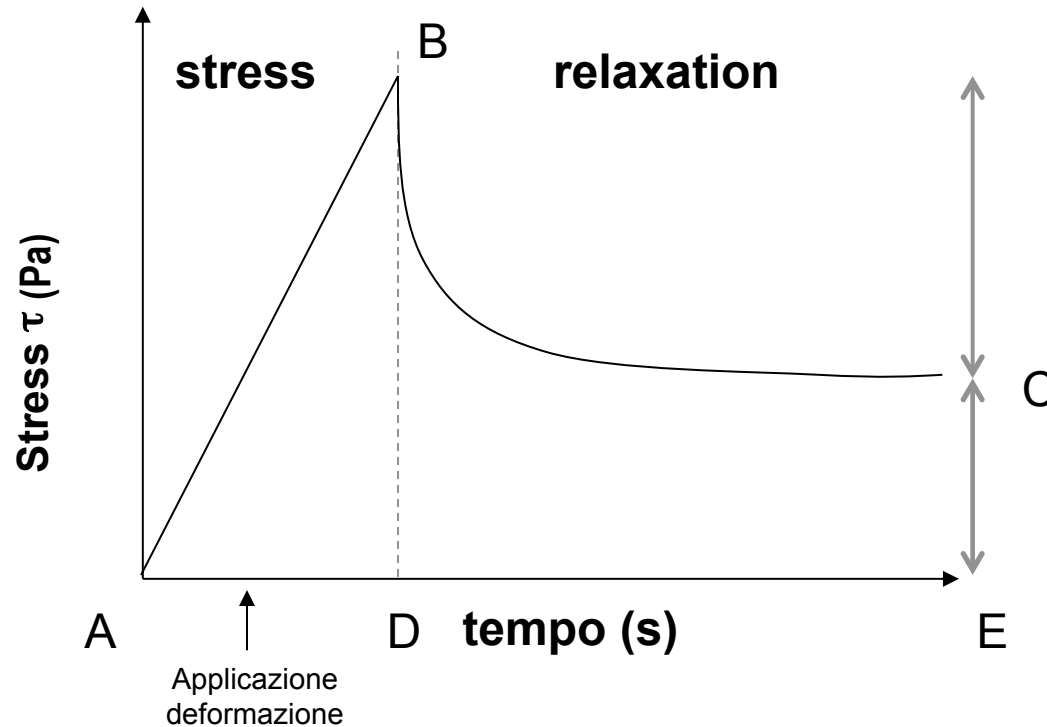
## Metodologia

- I° fase (stress): si impone una deformazione di compressione (di limitata entità) e si misura lo sforzo fino al raggiungimento della deformazione
- II° fase (relaxation): si mantiene la deformazione (sforzo costante) e si registra la forza esercitata dal campione sulla parte mobile dello strumento nel suo tentativo di recuperare la sua forma iniziale

La forza esercitata dal campione è funzione dell'energia accumulata nei suoi legami interni  $F = E/\Delta L$

---

# Test di stress - relaxation



**AD = deformazione entro il limite di elasticità  $\varepsilon_s$  (senza rottura legami) = tempo/velocità**

**BD = sforzo massimo di deformazione**

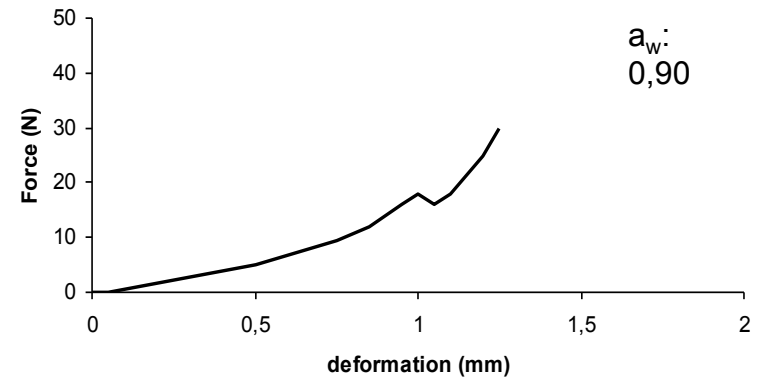
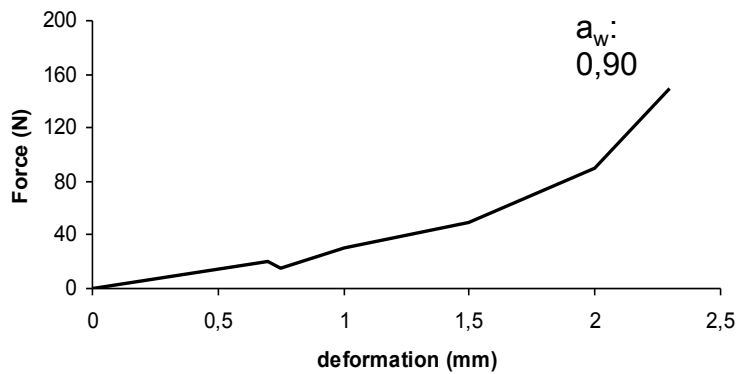
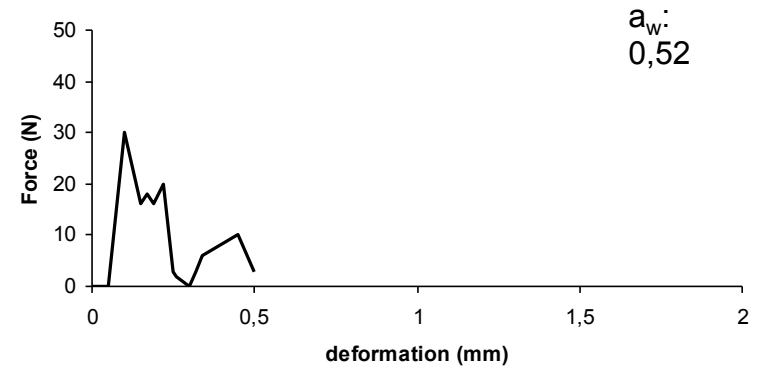
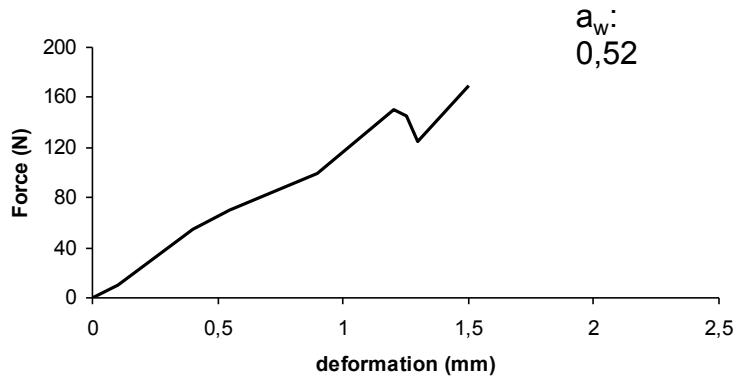
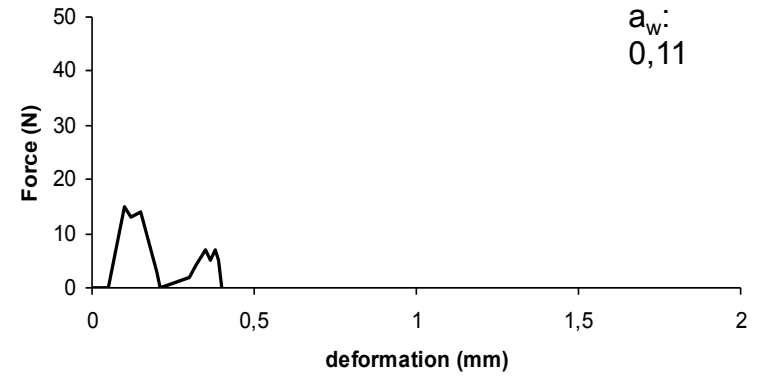
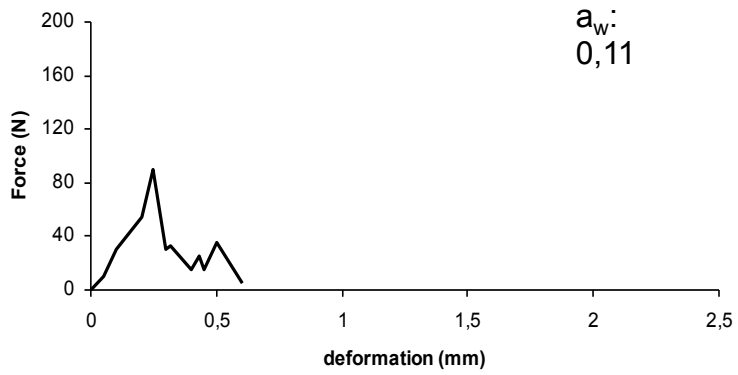
**BC = dissipazione dello sforzo a causa di scorrimento viscoso (relaxation stress)**

**CE = sforzo residuo**

**DE = tempo di rilassamento**

# Test di compressione distruttivo

- Materiali che cambiano comportamento reologico in base alle condizioni di processo: le condizioni del test rimangono costanti ma nel materiale si può ridurre la zona di viscoelasticità naturale (es. alimento si disidrata).
  - Il campione è molto piccolo ed il test di compressione viene utilizzato in alternativa al test di penetrazione.
-



**Caffè verde**

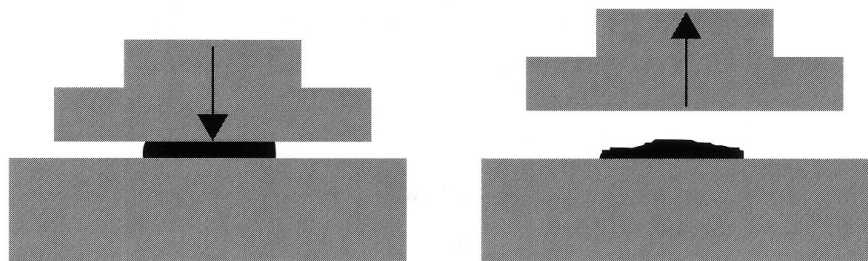
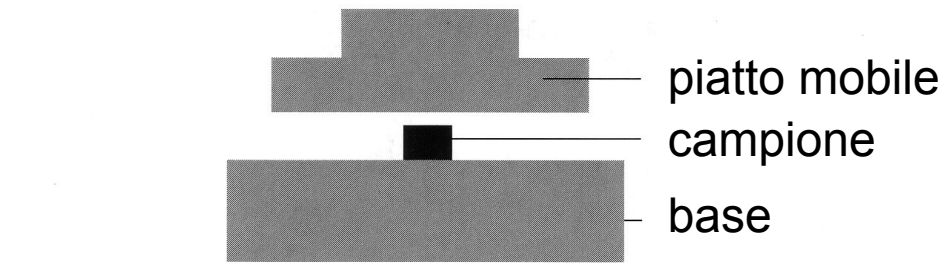
**Caffè tostato**



# Test ciclico di doppia compressione: Texture Profile Analysis (TPA)

- Doppia compressione/decompressione in successione del campione (test ciclico)
  - Il test riproduce le condizioni applicate durante una masticazione (test imitativo)
-

# Test ciclico di doppia compressione: Texture Profile Analysis (TPA)

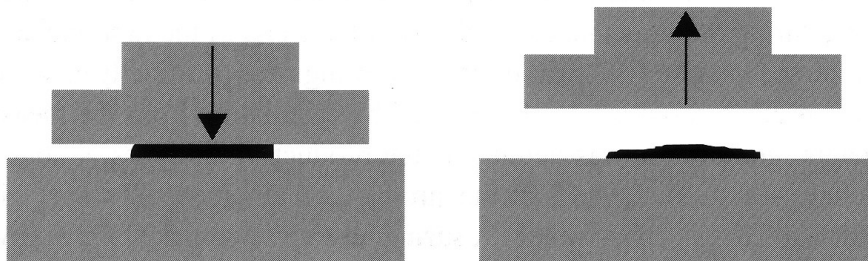


a primo ciclo

b

a: compressione

b: decompressione



a

secondo ciclo

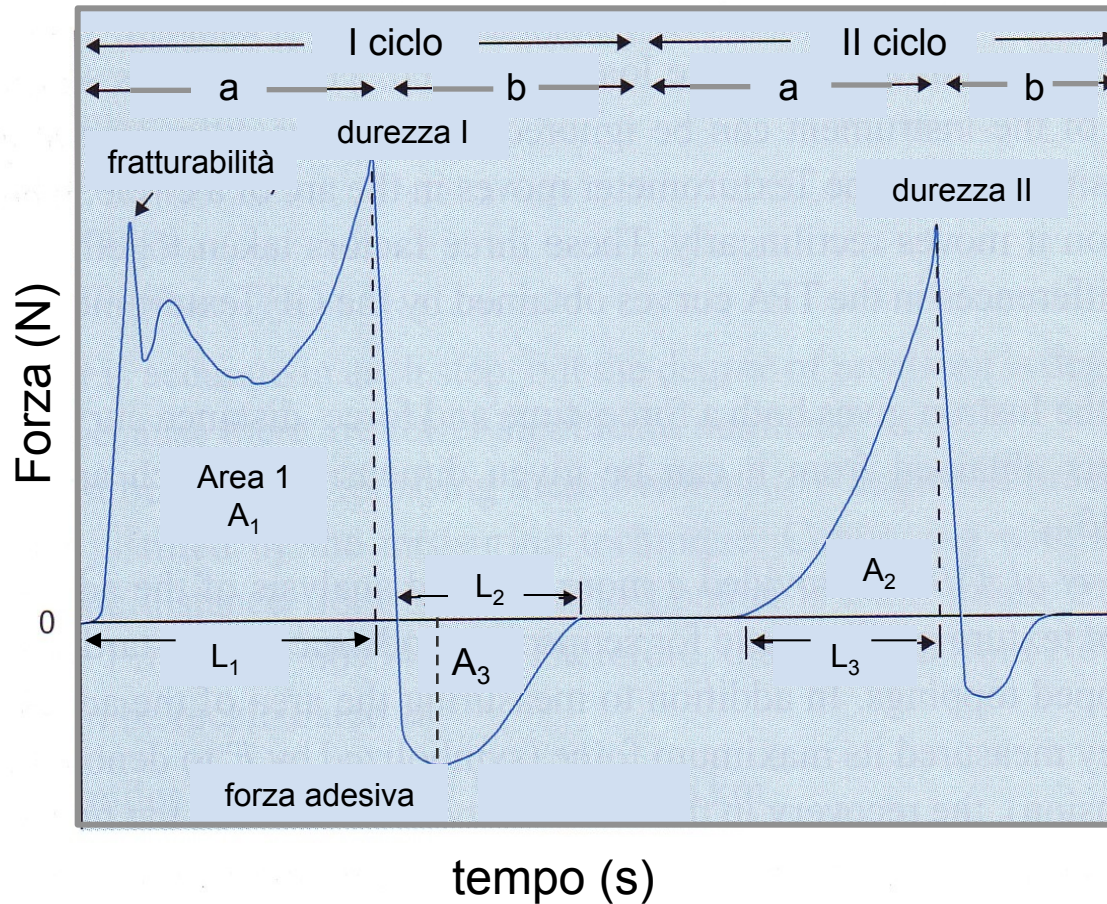
b

# Test di compressione

- Test non distruttivo
  - La sonda non deve penetrare il campione con eventuale azione di taglio
  - Campione se possibile alto e basse deformazioni uniassiali ( $\Delta L/L \leq 0.3$ ) per evitare deformazioni laterali
  - Velocità di discesa della sonda: definita, in funzione dell'obiettivo
-

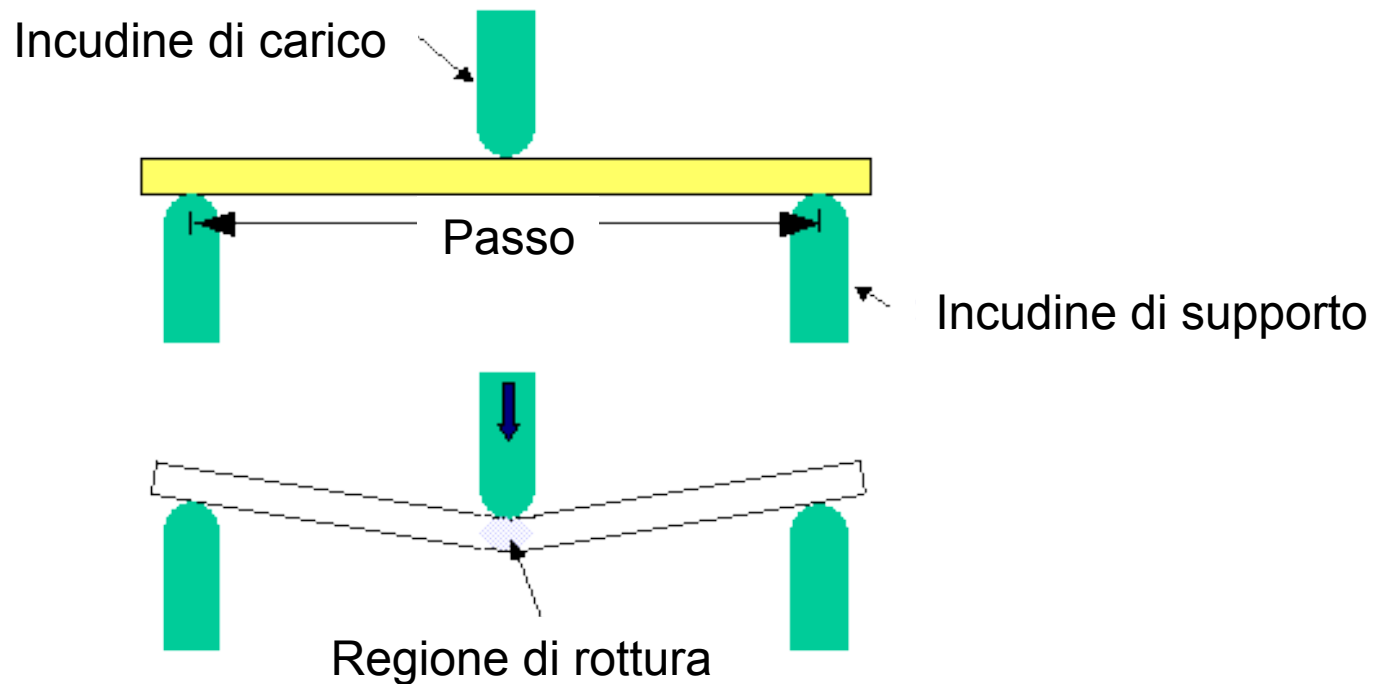
# Texture Profile Analysis (TPA)

## risultati

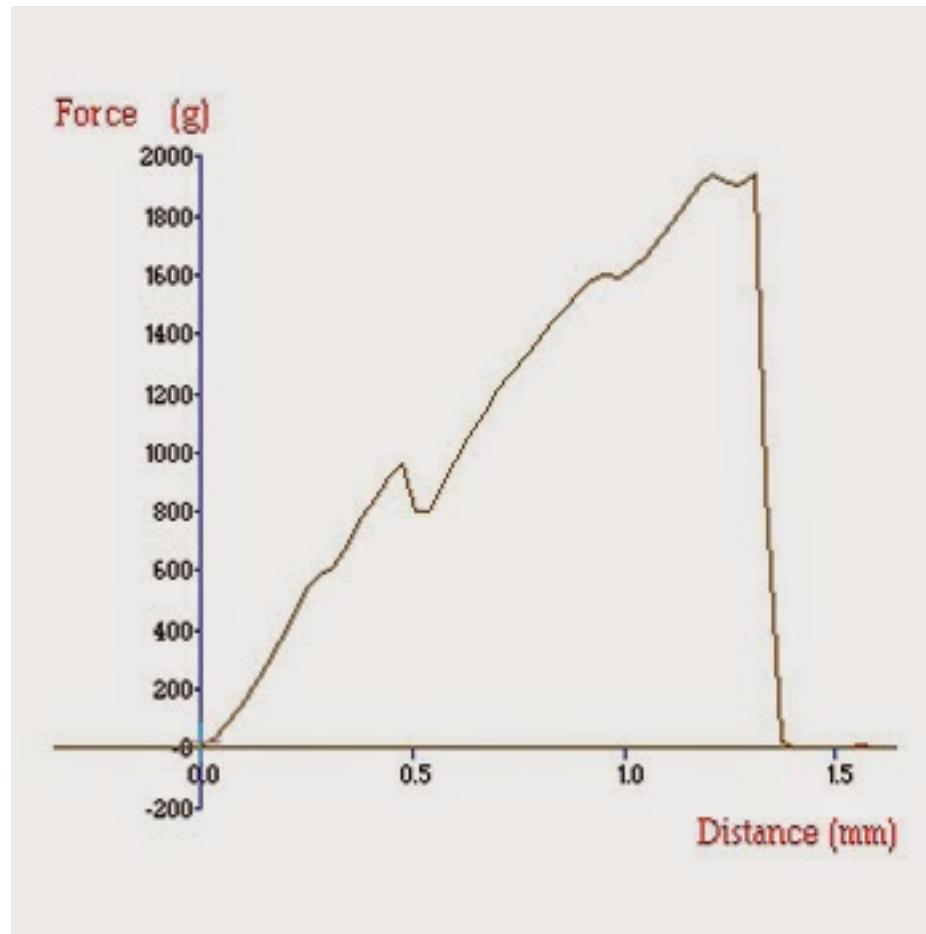


- $A_2/A_1$ : coesività
- $A_3$ : adesività
- $L_2$ : filamentosità
- $L_3$ : elasticità
- $L_3/L_1$ : elasticità (%)

# Test di flessione (three point bending)



# Test di flessione

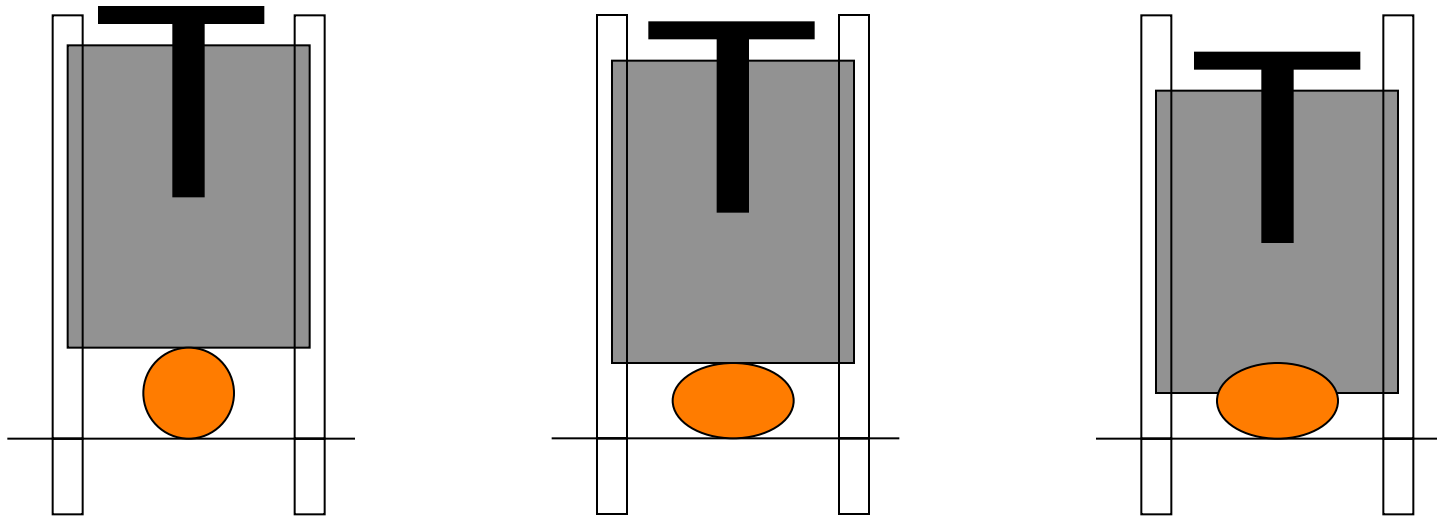


# Test di flessione

- Alimenti solidi che si sotto l'azione di uno sforzo di flessione si flettono rispondendo prima come solidi elastici e poi, raggiunto il limite di elasticità lineare, si snervano o subiscono un certo numero di microfratture fino al punto di rottura, oltre il quale si spezzano in due o più frammenti.
  - Richiede una velocità di discesa della sonda molto lenta per studiare i processi di microrotture e di rottura in un lasso di tempo abbastanza prolungato.
  - Alimenti friabili: biscotti, crackers, wafer, barrette nutrizionali, etc.
-

# Test di taglio

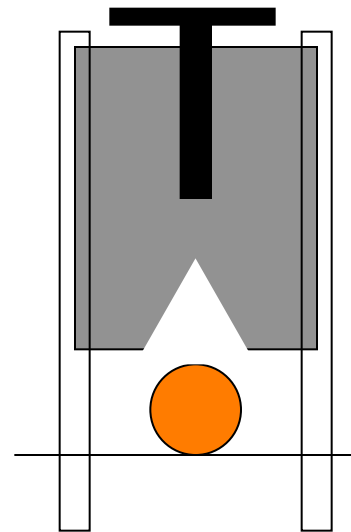
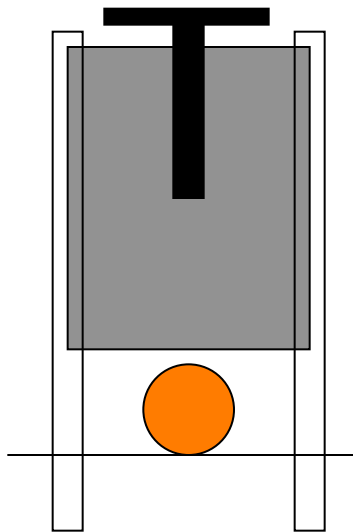
- Test distruttivo mirato a valutare lo sforzo necessario a tagliare un campione di sezione (area) nota
- Nel test si applica inevitabilmente non solo uno sforzo di taglio ma anche di compressione uniassiale che risulta in una deformazione del campione



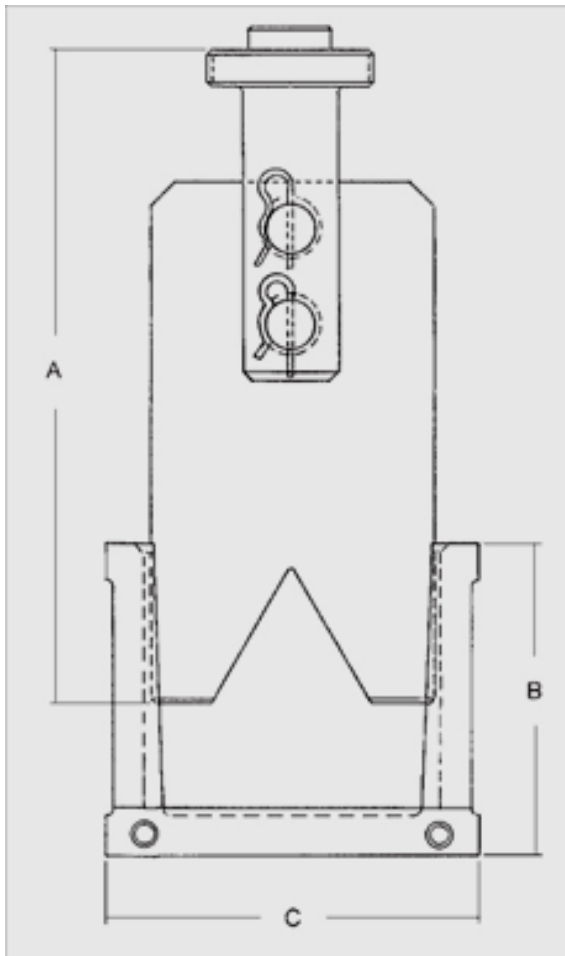


# Test di taglio

- Sonda: lama piatta o di forma varia (es. Warner-Bratzler, lama a punta, etc.).



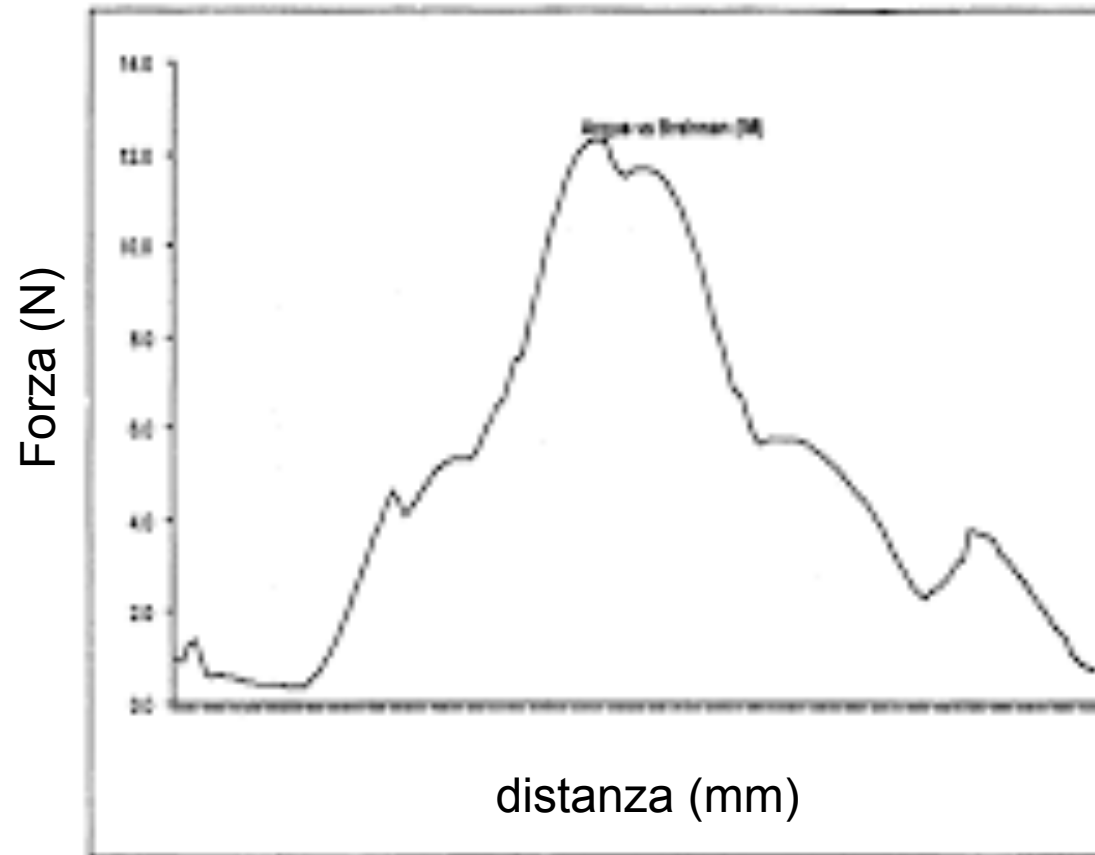
**Cella Warner-Bratzler**



## Cella Warner-Bratzler

La tipica forma a ghigliottina limita la deformazione laterale del campione durante la fase di compressione

# Test di taglio



# Test di estrusione

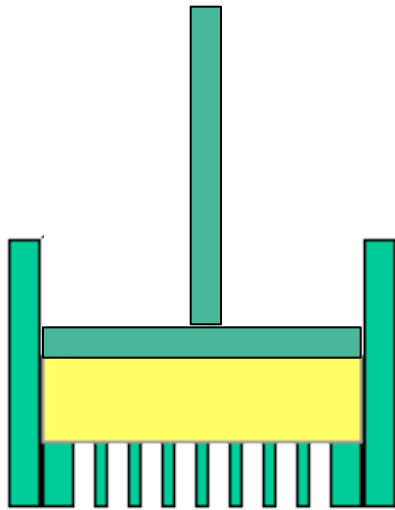
Un alimento (generalmente viscoso) viene compresso per mezzo di un pistone all'interno di un contenitore che comunica con l'esterno attraverso delle aperture:

- Una griglia con fori cilindrici o aperture lineari (estrusione dal basso)
- Lo spazio di tolleranza che si crea tra il pistone ed il contenitore
- Una grigliatura nel pistone

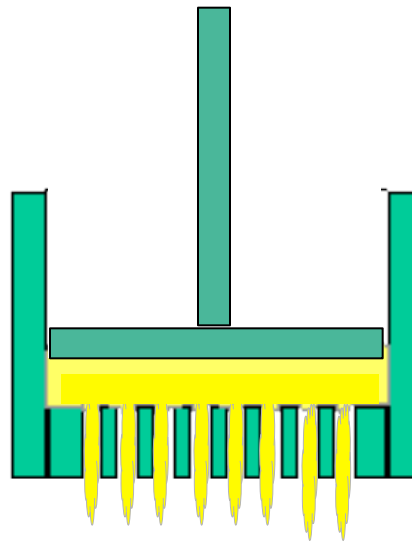
L'alimento viene forzato ad uscire (o fluire) dalla forza di compressione.

---

# Test di estrusione diretto

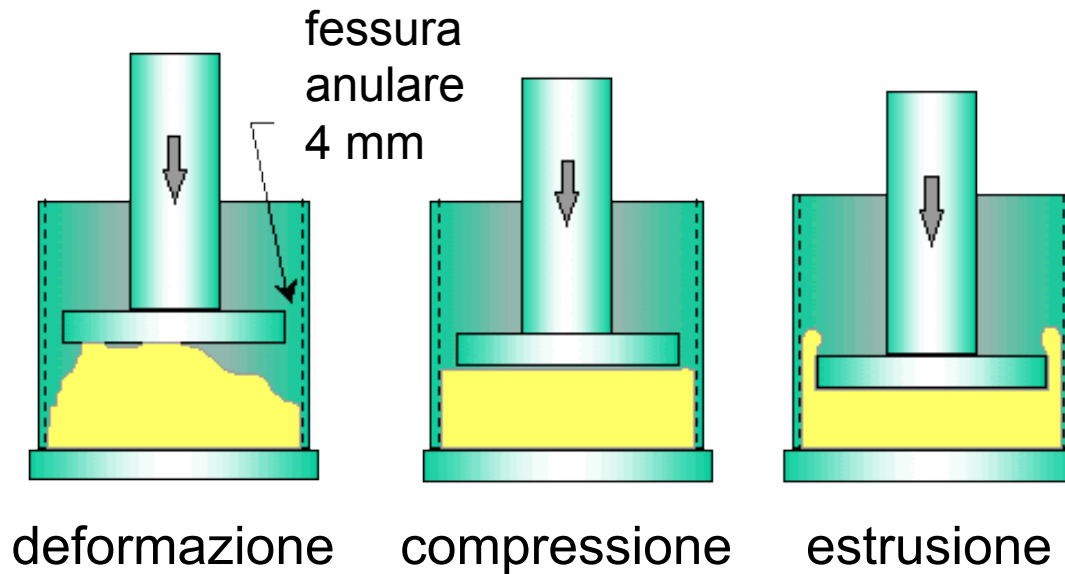


compressione



estrusione

# Test di retro-estrazione (back-extrusion)



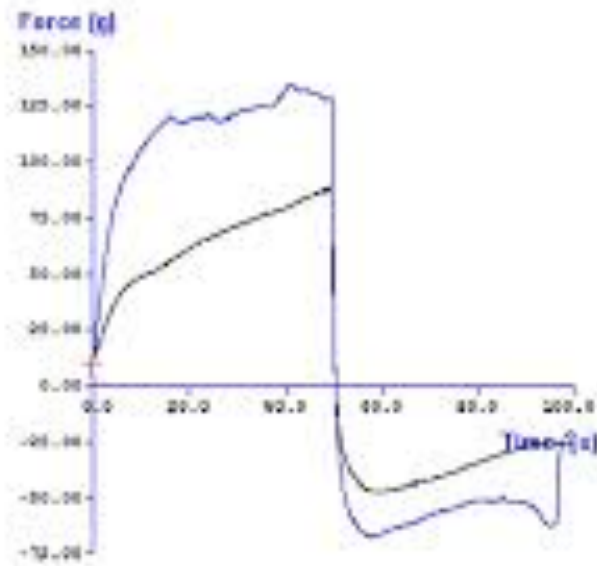
## Back-extrusion test

# Test di retro-estrusione (back-extrusion)

YOGHURT



Back Extrusion Cell



# Test di estrusione tramite cella Kramer

Cella cubica con scanalature sul fondo e sonda multilama (8 o 10 lame) a pettine di forma rettangolare e profilo adatto alle scanalature.

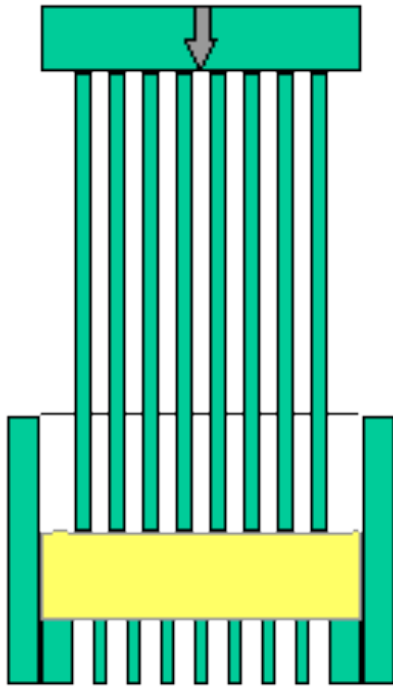
Il campione viene inserito nella cella ed attraversato dalla sonda.

Sul campione vengono applicate in sequenza un'azione di compressione, taglio ed estrusione.

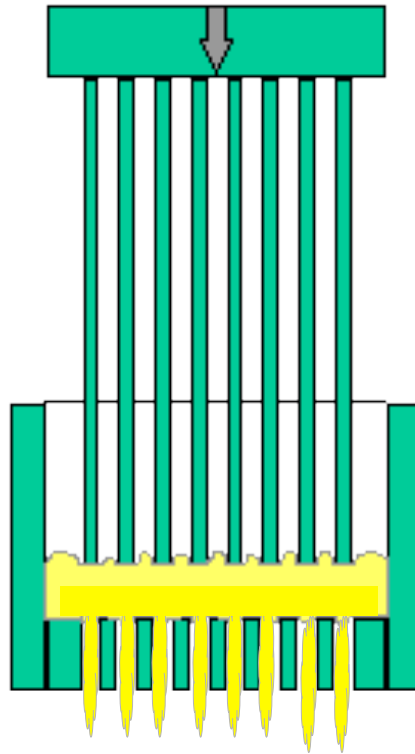
---



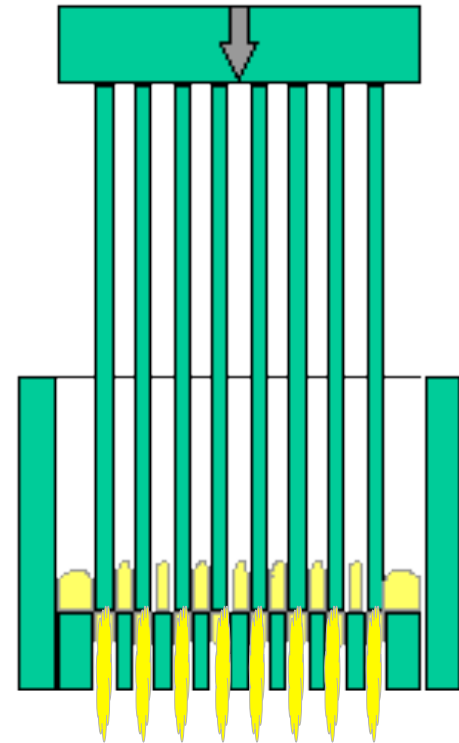
# Test di estrusione: cella Kramer



compressione

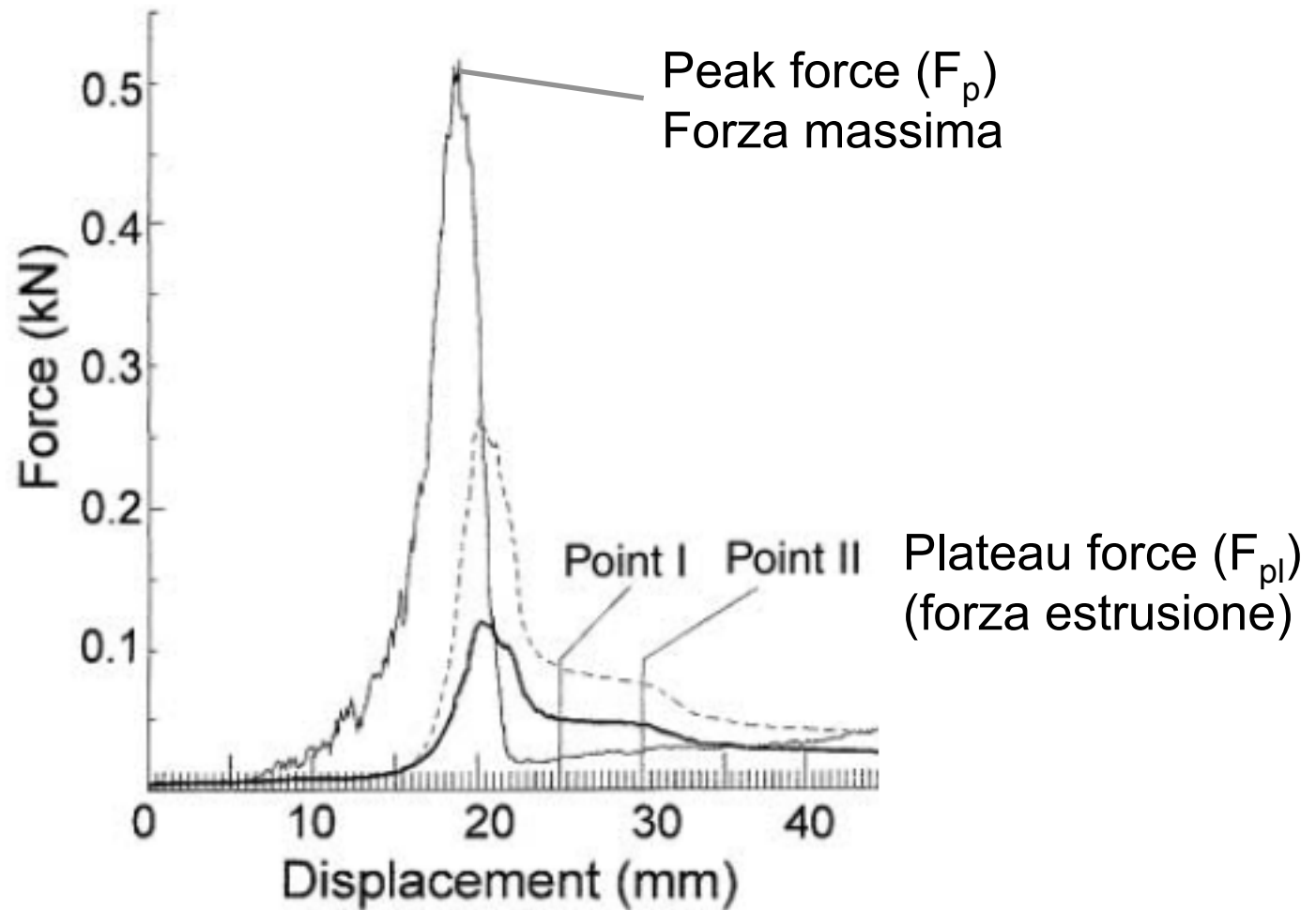


estrusione



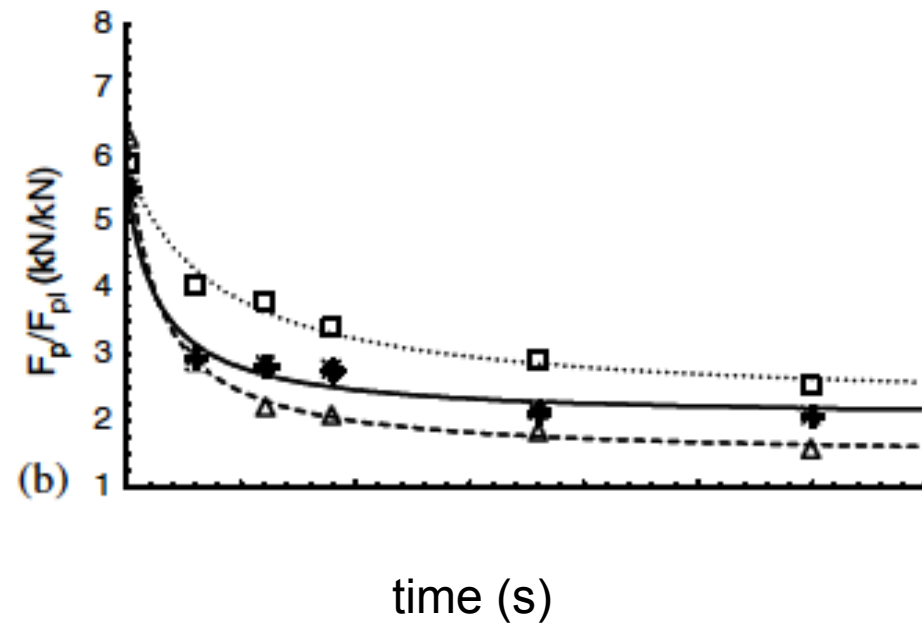
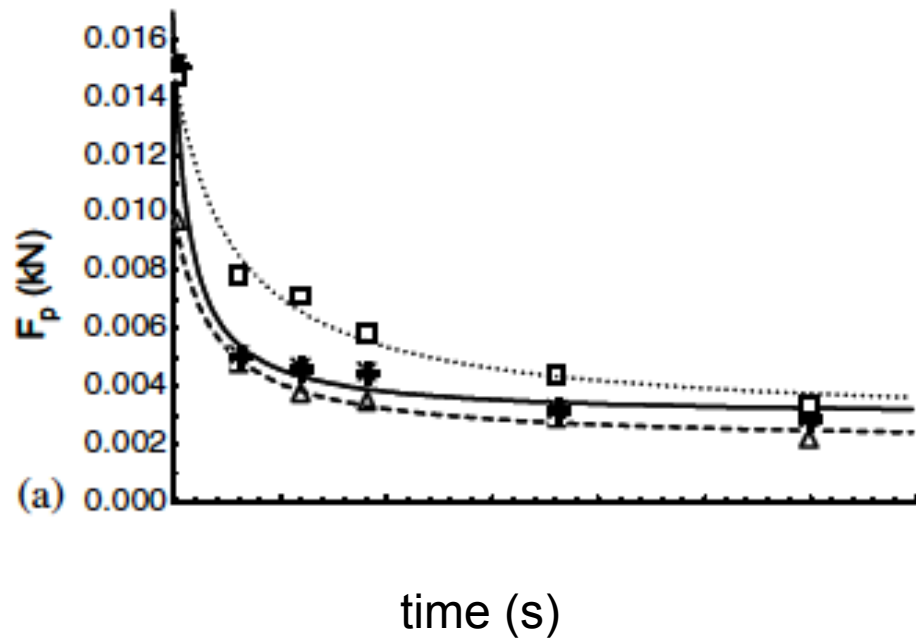
taglio

# Test di estrusione: cella Kramer



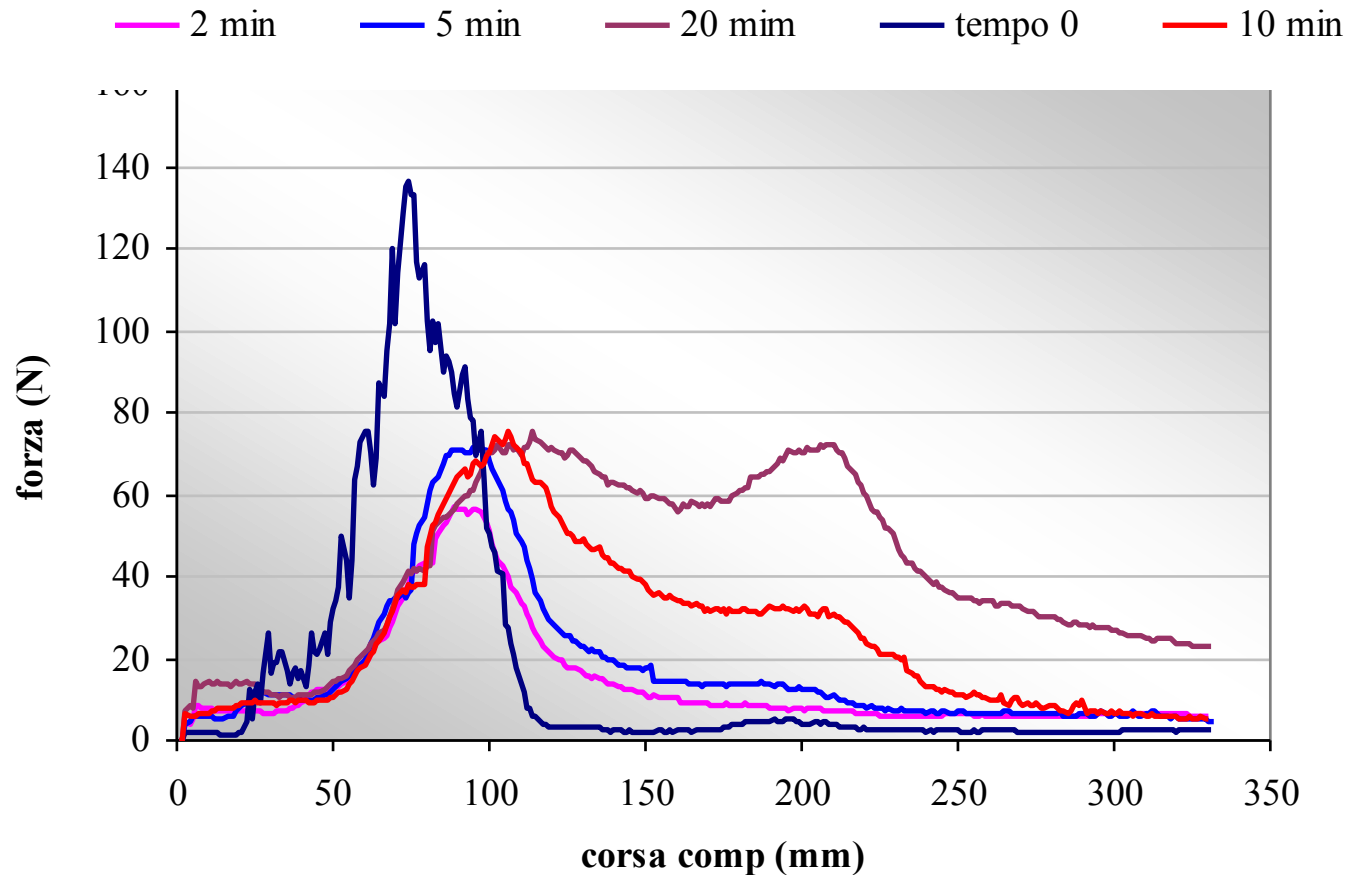
Tracciato forza-spostamento di corn-flakes prima e dopo idratazione in latte.

# Test di estrusione: cella Kramer



Cinetiche di rammollimento di corn flakes durante idratazione in latte.

# Test di estrusione: cella Kramer



Tracciati forza-spostamento di amaretti immersi in soluzioni zuccherine per diversi tempi.

---

# Strumenti per la valutazione della consistenza

- **Dinamometri manuali**

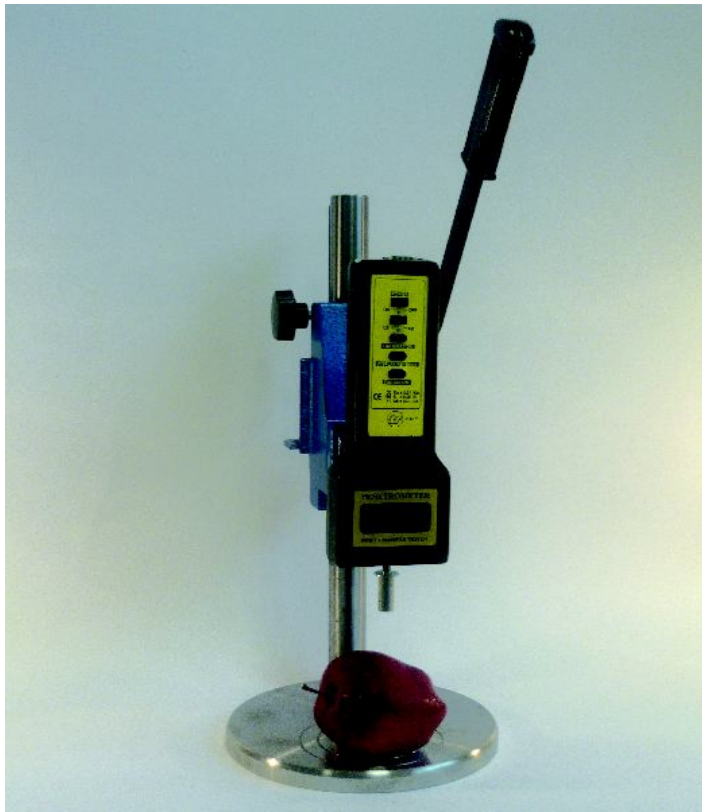
- Misurano la forza necessaria ad indurre una certa deformazione nell'alimento.

- **Dinamometri elettronici**

- Sono in grado di misurare automaticamente forza, tempo e spostamento durante la deformazione di un alimento e di esprimere la forza in funzione del tempo e dello spostamento tramite l'ausilio di strumenti elettronici.
-

# Strumenti per la valutazione della consistenza: dinamometri manuali

- Fruit tester



---

# Strumenti per la valutazione della consistenza

## ■ **Dinamometri specifici**

- Penetrometri (per test di penetrazione). Es. fruit tester.
- Compressimetri (per test di compressione)

## ■ **Dinamometri ad uso universale**

- Macchine ad uso universale (universal testing machine o UTM) costituite da un corpo di base su cui possono essere applicate diverse sonde per consentire di effettuare vari test. Es. U.T.M. (*Instron*), *Texture Analyser* (*Stable microsystems*), etc.
-

# Strumenti per la valutazione della consistenza ad uso universale

Esempi:

- Kramer Shear-Press,
- Instron Universal Testing Machine
- Texture Analyser

Costituiti da un telaio (con 1 o 2 montanti) su cui un braccio o una traversa, a cui è applicata la cella di misura, scorrono verso la base mossi da una pressa idraulica.

È possibile applicare alla cella di misura qualsiasi tipo di sonda (punzoni, piatti, lame, celle di estrusione, etc.)

---



# Strumenti per la valutazione della consistenza ad uso universale



A due montanti  
(con traversa mobile)

Ad un montante  
(con braccio mobile)

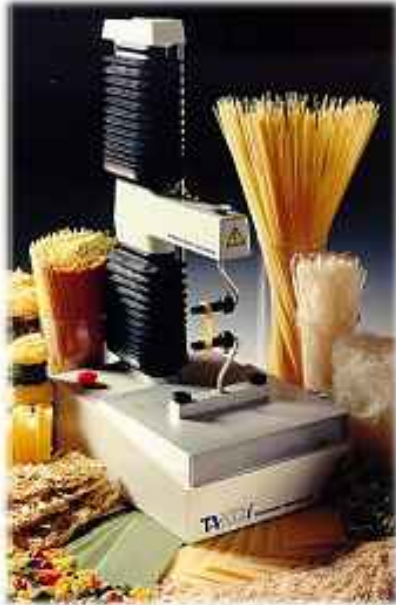
---

# Strumenti per la valutazione della consistenza ad uso universale

Strumenti nei quali, attraverso la sostituzione delle celle di misura è possibile effettuare test di varia tipologia

- ❑ Versatilità
  - ❑ Possibilità di valutare l'influenza di diversi tipi di sonde, di condizioni e cicli
  - ❑ Utilizzabile per ricerca di base
  - ❑ Utilizzabile per ricerca applicata e controllo Qualità
-

# Strumenti per la valutazione della consistenza ad uso universale: Texture Analyser (TA, Stable Micro Systems)



**TA-XT2i**



**TA-XT plus**



**TA-HD plus**

# Strumenti per la valutazione della consistenza ad uso universale: Texture Analyser (TA, Stable Micro Systems)

## Accessori per valutazione caratteristiche meccaniche pasta



lama



Sistema tensile per valutazione consistenza spaghetti cotti



Piastra per valutazione adesività



Sistema valutazione caratteristiche di flessibilità spaghetti

# Strumenti per la valutazione della consistenza ad uso universale: Texture Analyser (TA, Stable Micro Systems)

Accessori per valutazione caratteristiche meccaniche prodotti da forno



Puntale per valutazione ammorbidimento o crosta



Ottawa cell (prodotti friabili, estrusi)



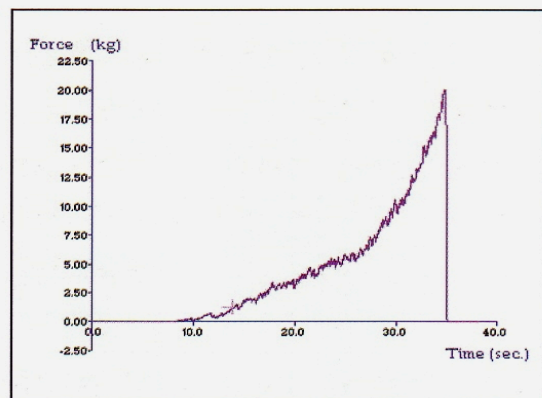
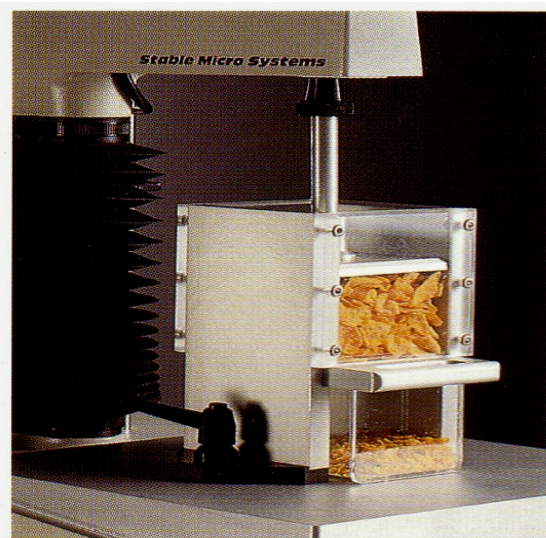
Piastra per valutazione proprietà meccaniche



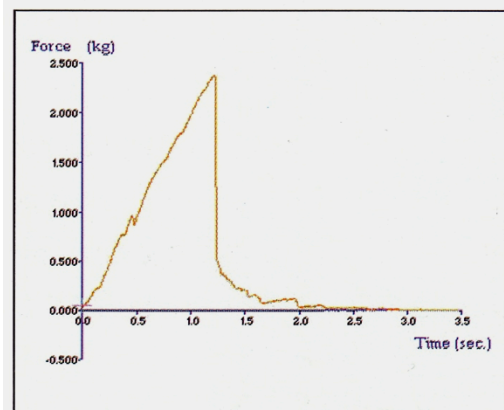
Kramer cell (5 lame)



# Strumenti per la valutazione della consistenza ad uso universale: Texture Analyser (TA, Stable Micro Systems)

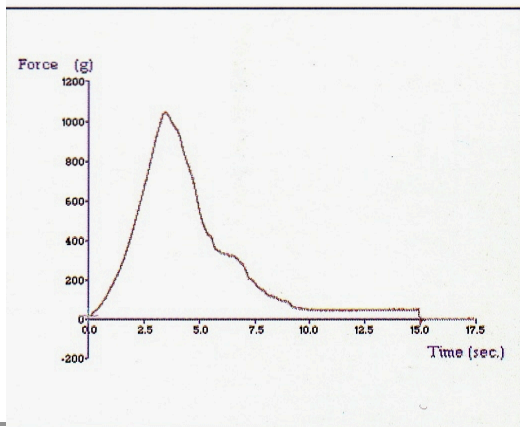


*Misura della friabilità di cereali mediante compressione con cella Ottawa.*

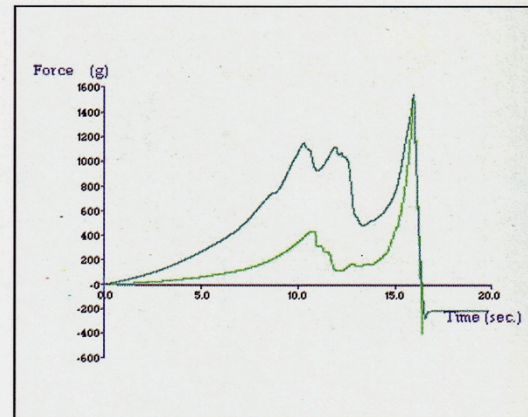
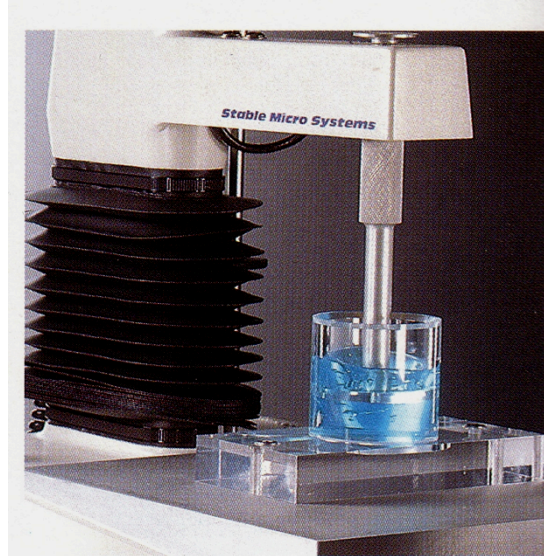


*Resistenza alla piegatura di un biscotto con il sistema a Tre Punti di Piegatura.*

# Strumenti per la valutazione della consistenza ad uso universale: Texture Analyser (TA, Stable Micro Systems)



*Resistenza al taglio della carne di pollo mediante coltello.*



*Confronto di gel sottoposti a estrusione in ritorno*



# Strumenti per la valutazione della consistenza ad uso universale: Texture Analyser (TA, Stable Micro Systems)



**Analizzatore di flusso  
per polveri  
(movimento  
rotazionale)**





# Strumenti per la valutazione della consistenza ad uso universale: Texture Analyser (TA, Stable Micro Systems)

## Strumento per valutazione caratteristiche meccaniche-acustiche



Valutazione contemporanea delle proprietà meccaniche ed acustiche (es. prodotti croccanti)