

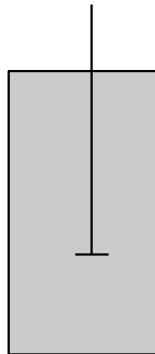
Comportamento della materia

LIQUIDO IDEALE
(Newtoniano)

SOLIDO IDEALE
(Hookeiano)

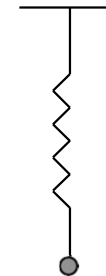
Al cessare dello
SFORZO

Non recupera la deformazione
“irreversibilità”



Rappresentazione grafica
“ammortizzatore”

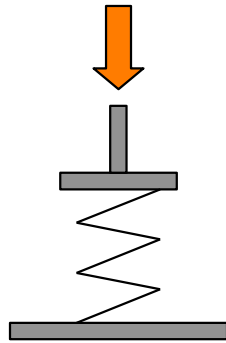
Recupera la deformazione
“reversibilità”



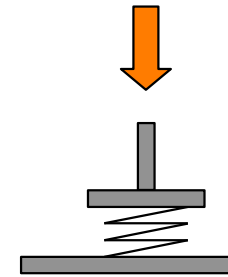
Rappresentazione grafica
“molla”

Viscoelasticità: modello di Maxwell

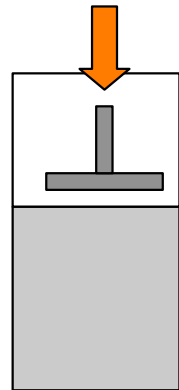
Solido
elastico



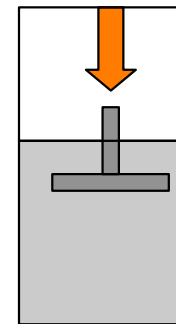
Si deforma -
recupera la
deformazione
(reversibile)



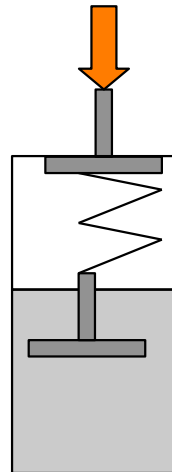
Liquido
viscoso



Scorre –
non recupera la
deformazione
(irreversibile)



Corpi reali
viscoelastici

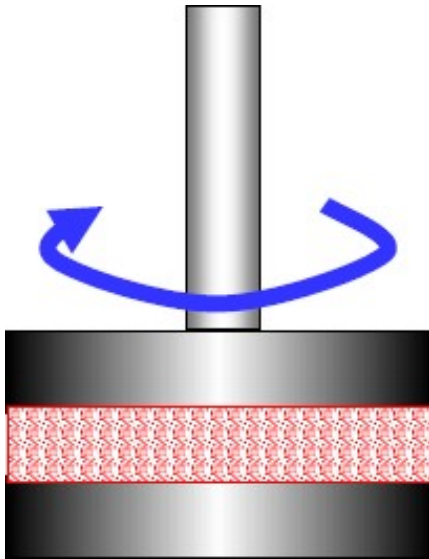


**Modello di
Maxwell**

Rappresentazione in serie di
una molla ed un dissipatore

Creep test

L'aumento di una deformazione in funzione del tempo è chiamata «Creep»



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

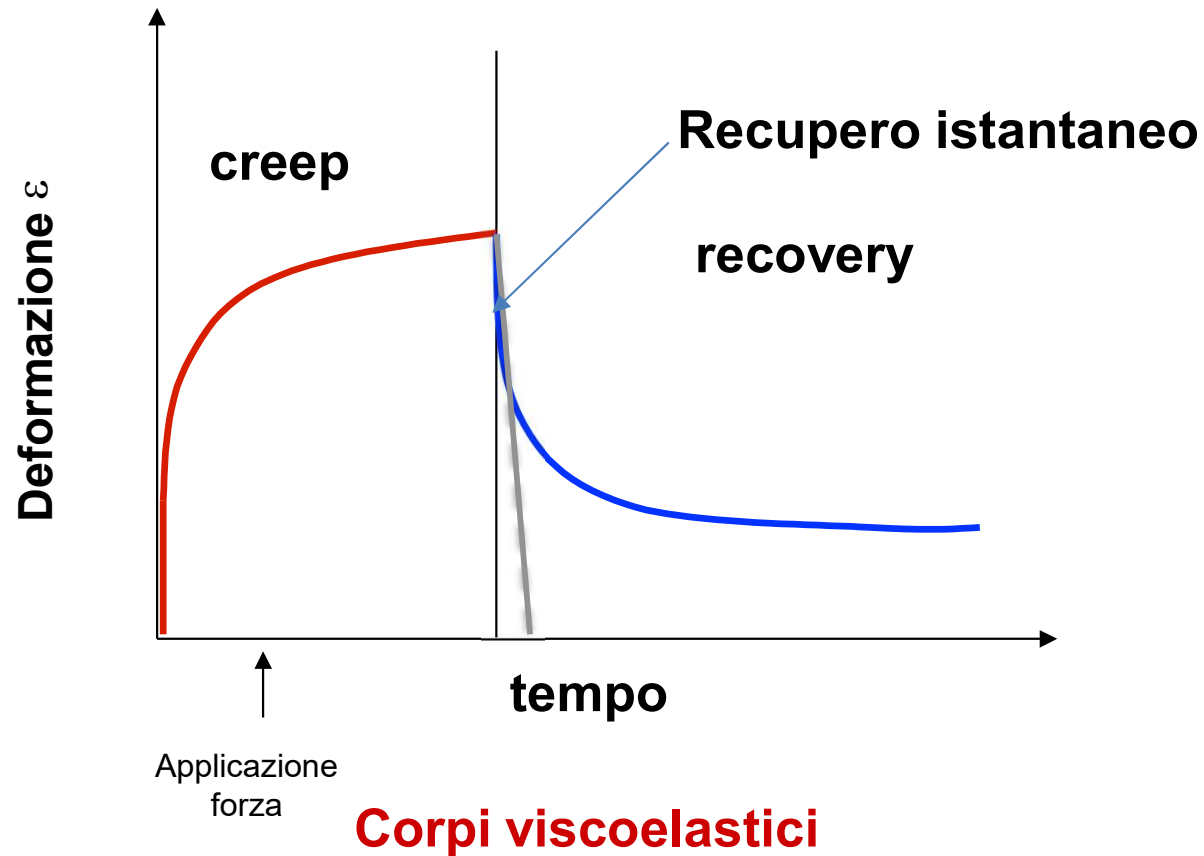
Creep test: il prodotto è sottoposto ad uno sforzo (in rotazione) determinato per un certo tempo e si misura la deformazione determinata

Test di creep recovery

■ Metodologia

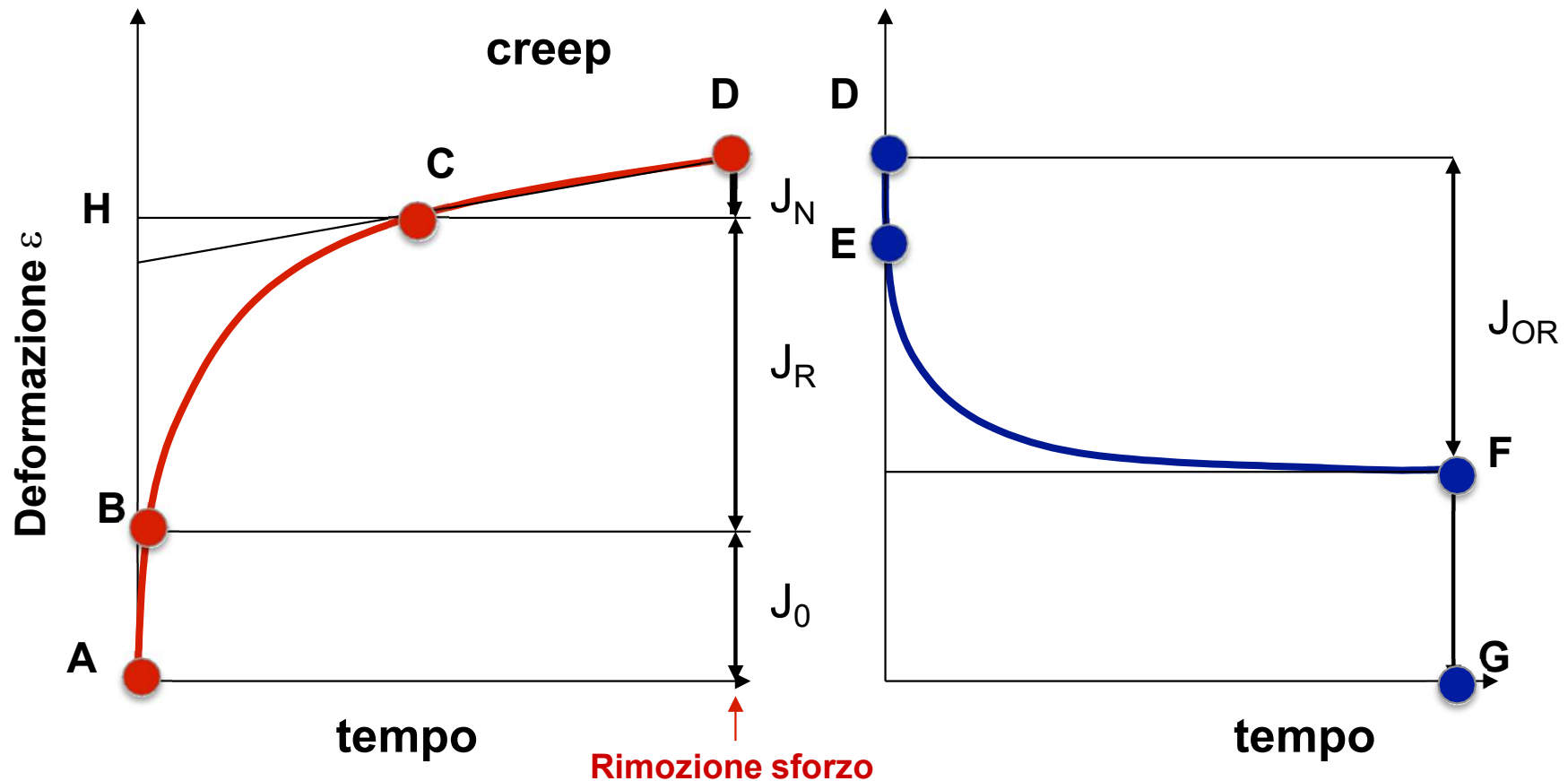
- I° fase (creep): si applica uno sforzo (di taglio) di limitata entità per un certo tempo e si misura la deformazione determinata sul campione
- II° fase (recovery): si rimuove lo sforzo e si registra il comportamento del campione nel suo tentativo di recuperare la sua forma iniziale in funzione dell'energia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

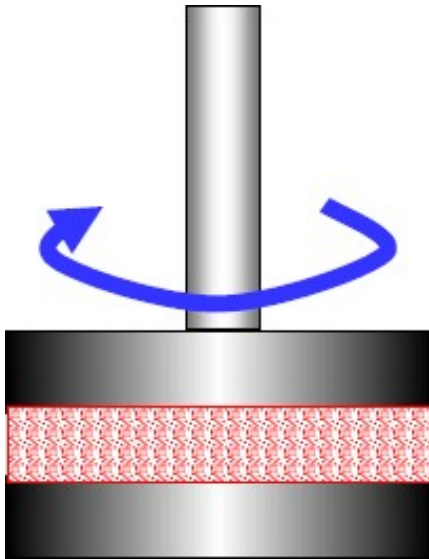
$J_R = BC$ = deformazione elastica ritardata. Rottura legami e loro ricreazione (sempre minore)

$J_N = CD$ = 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 ε 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

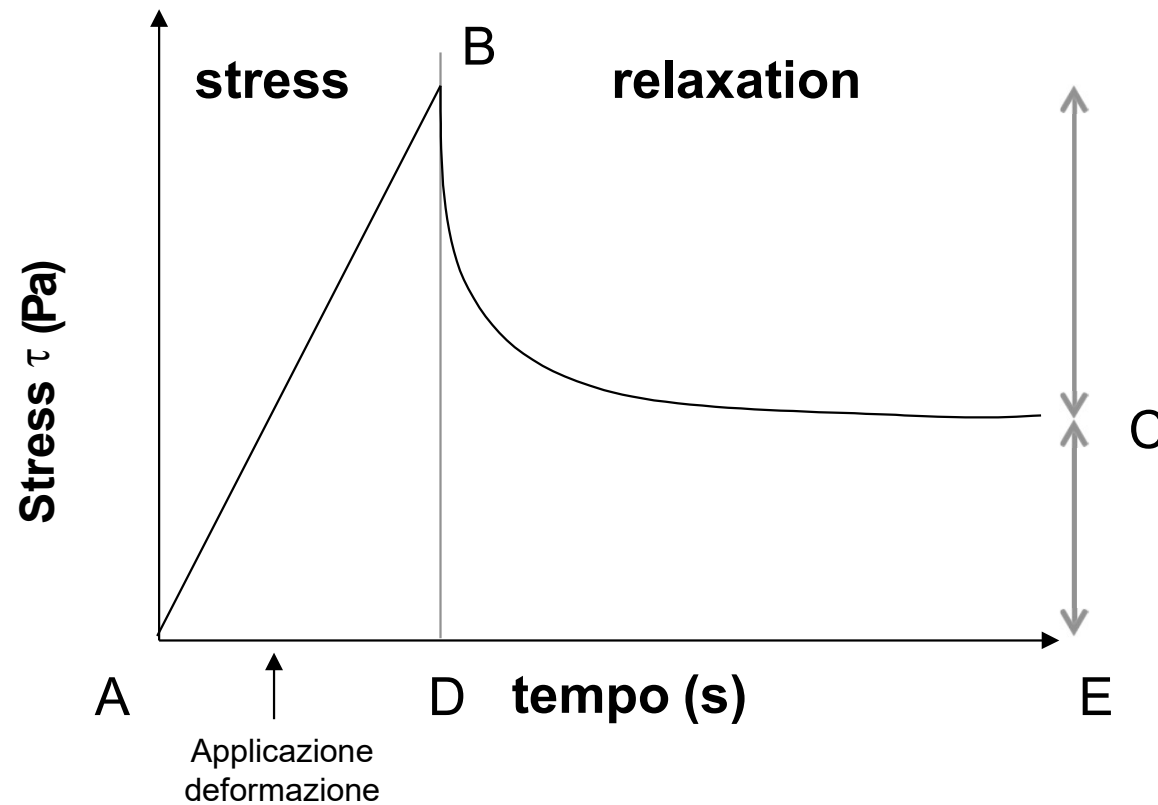
rilassamento o scorrimento viscoso

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 ε_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 τ 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

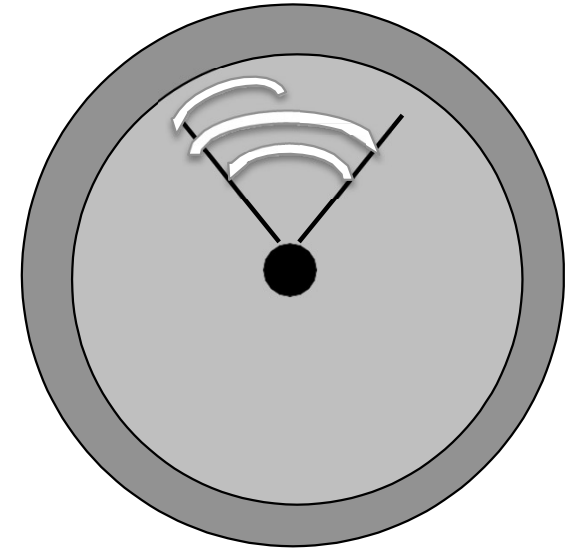
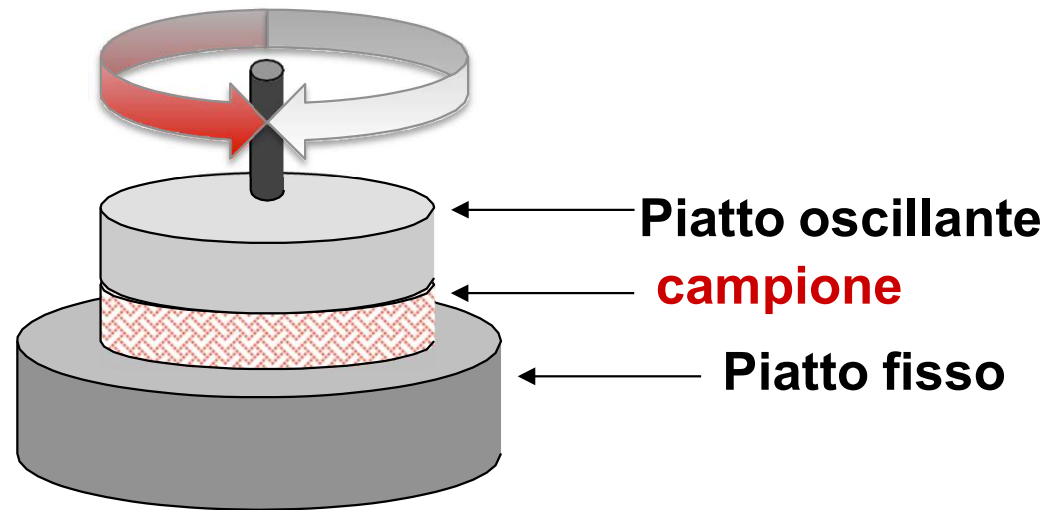
Permette di calcolare il tempo di rilassamento di un campione: tempo che un campione impiega per ridurre di circa la metà ($1-1/e \sim 63\%$) lo sforzo interno τ indotto dalla deformazione

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

Per un solido: $> 10^2 \text{ s}$

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

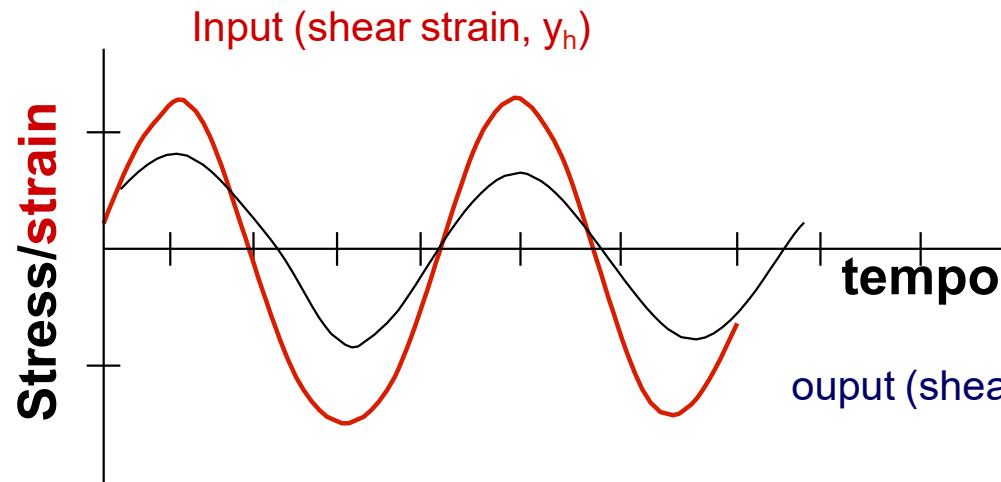
- Ampiezza oscillazione: piccola per non alterare la struttura nativa (test non distruttivo)

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

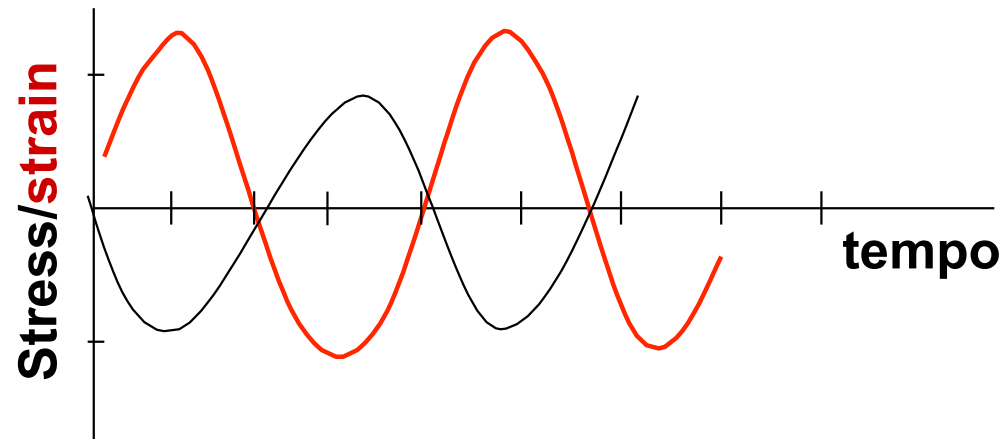
- Il numero delle oscillazioni nell'unità di tempo si esprime come frequenza in Hz (1 Hz = 1 oscillazione/s)

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

Misure in oscillatorio

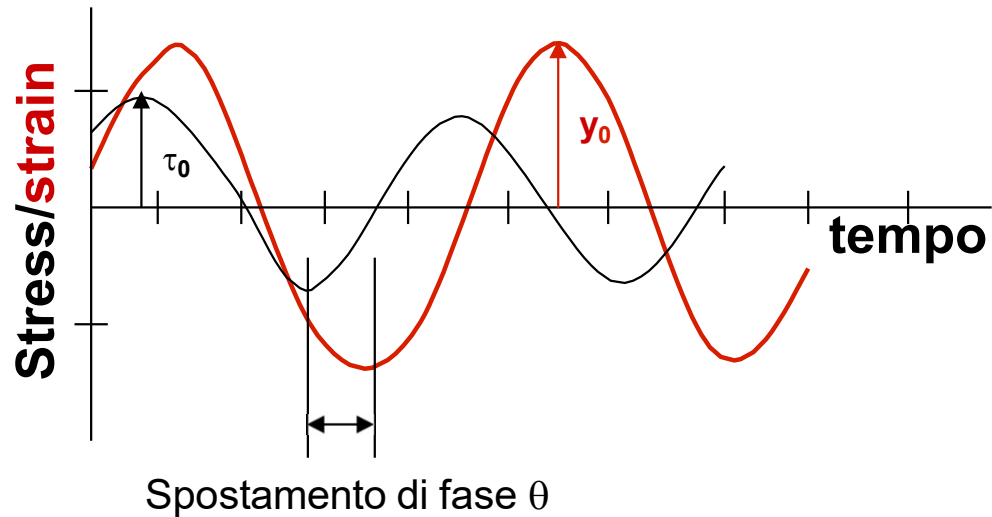


Materiale elastico: sforzo in fase con deformazione



Materiale viscoso: sforzo sfalsato di 90° rispetto deformazione

Misure in oscillatorio:



Materiale viscoelastico:

sforzo sfalsato di θ rispetto alla deformazione

Fase (θ):

= 90° : 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)

$$G' = \frac{\tau_0 \cos\theta}{\gamma_0} \quad \theta = \arccos \frac{\tau_0 G'}{\tau_0 G'} = 0^\circ \text{ per corpo elastico}$$

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

$$G'' = \frac{\tau_0 \sin\theta}{\gamma_0} \quad \theta = \arcsin \frac{\tau_0 G''}{\tau_0 G''} = 90^\circ \text{ per corpo viscoso}$$

Misure in oscillatorio: parametri

■ Definizione di:

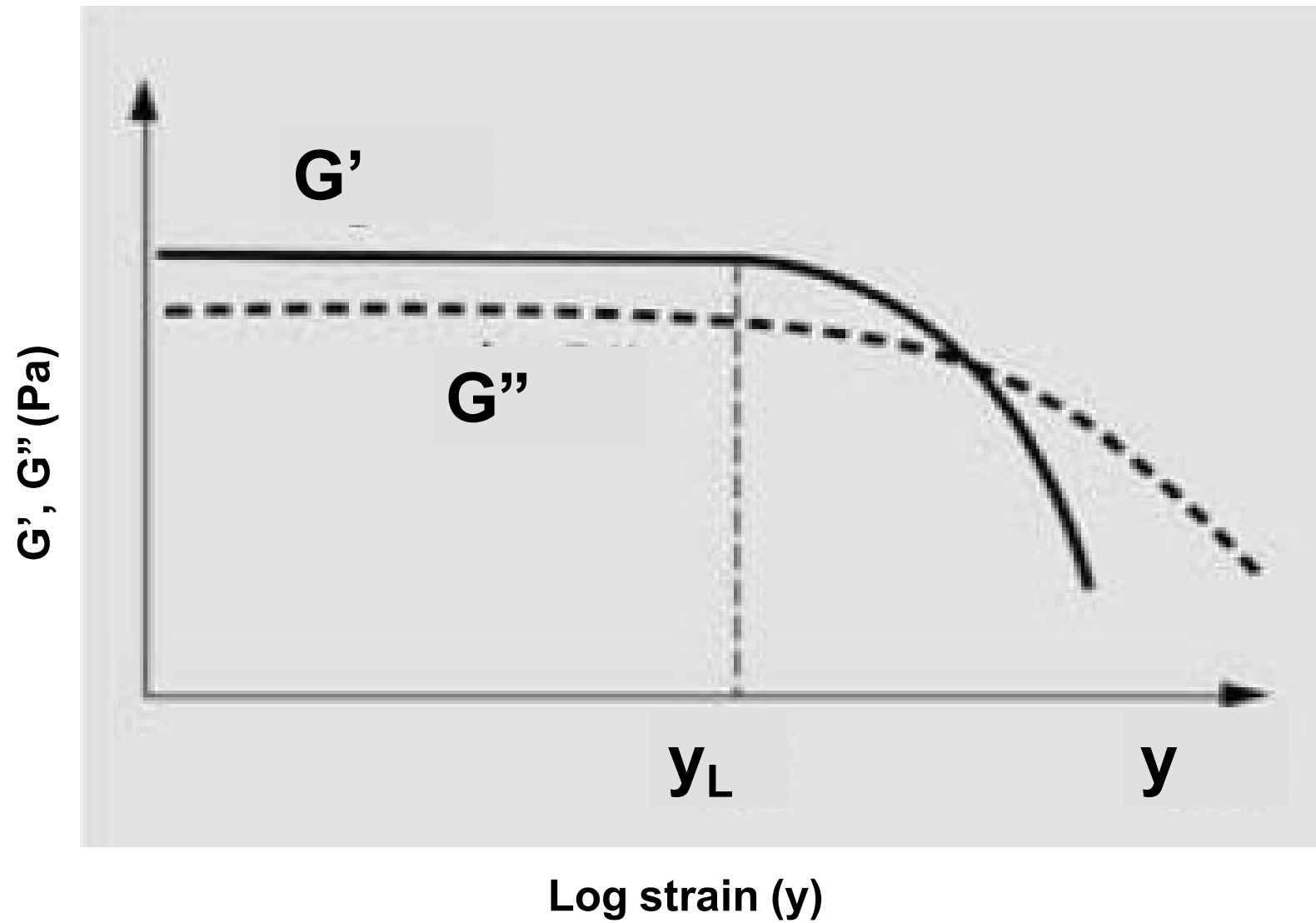
- ❑ **Modulo complesso** (complex modulus, G^*): somma vettoriale ($G' + G''$) = $\sqrt{(G'^2 + G''^2)}$
- ❑ Tangente di perdita (G''/G')
- ❑ Viscosità dinamica (η^* , Pa s)
- ❑ Fase (angolo di sfasamento tra 0 e 90°)

Misure in oscillatorio

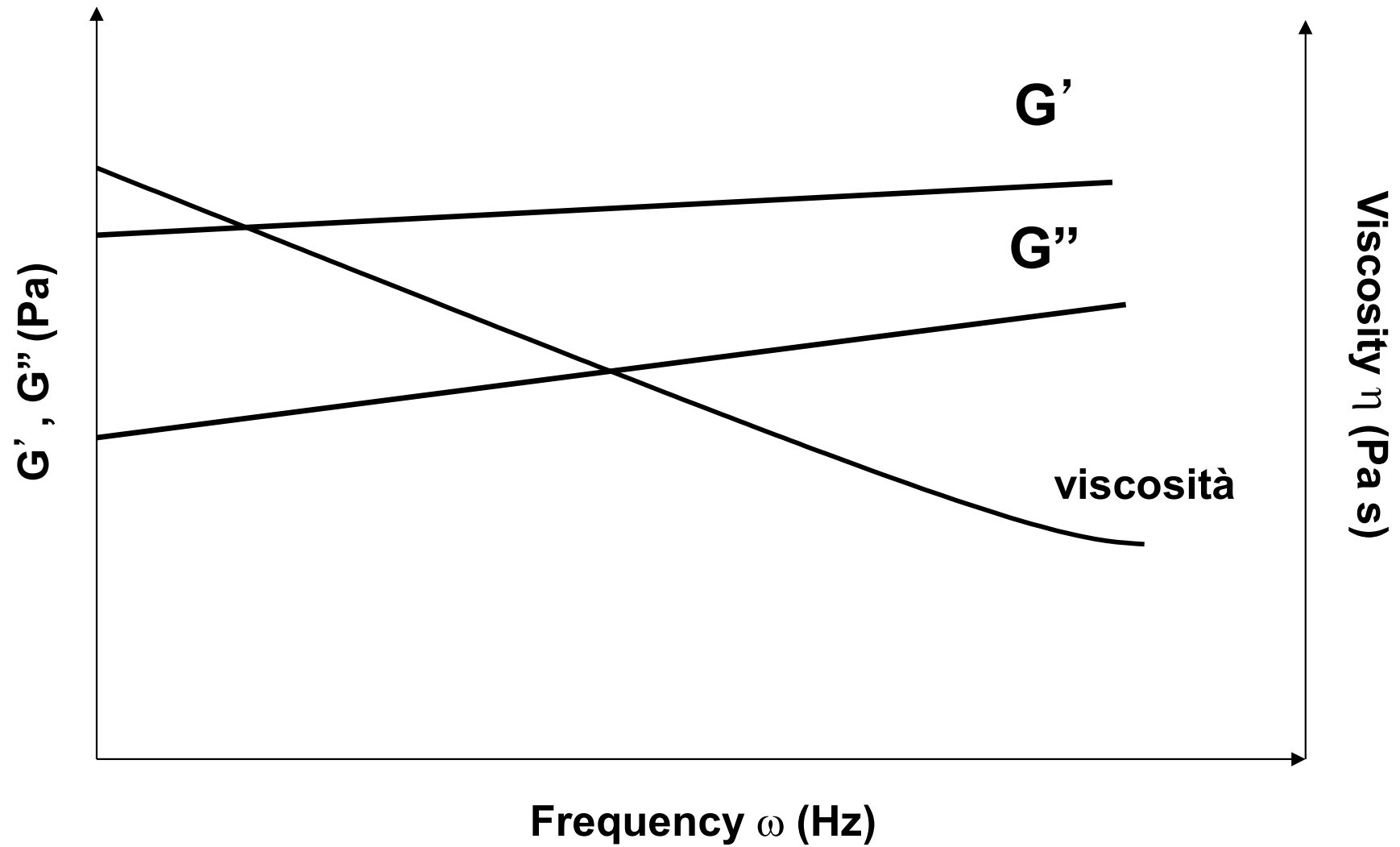
Metodologia di analisi

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:

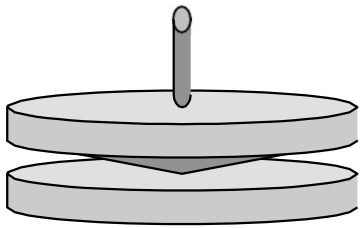
permettono di misurare lo sforzo sia a velocità che a deformazioni note.

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

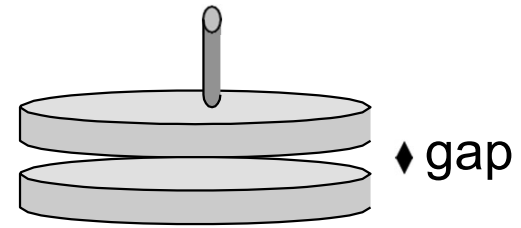
Sono termostatati.

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

Reometri rotazionali: geometrie



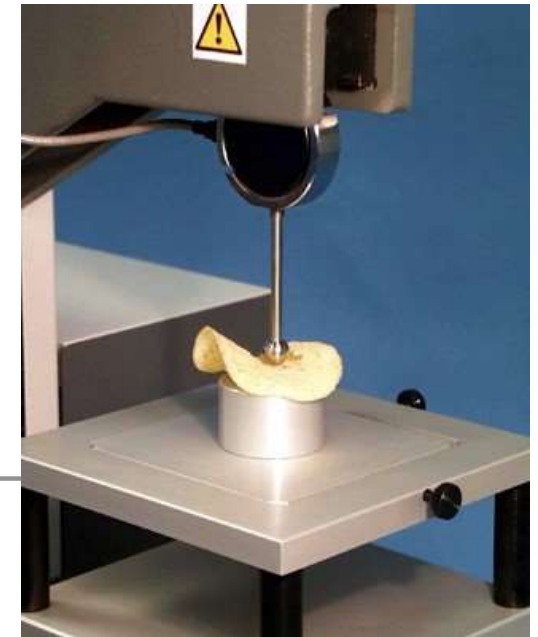
Piatto-cono



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

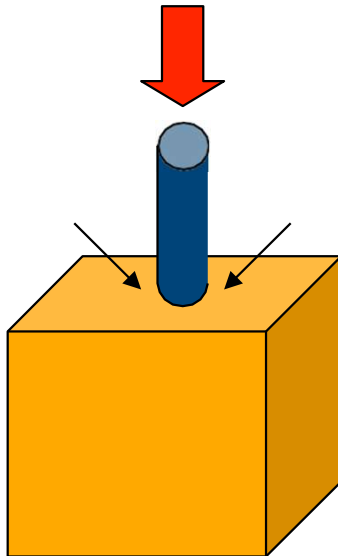
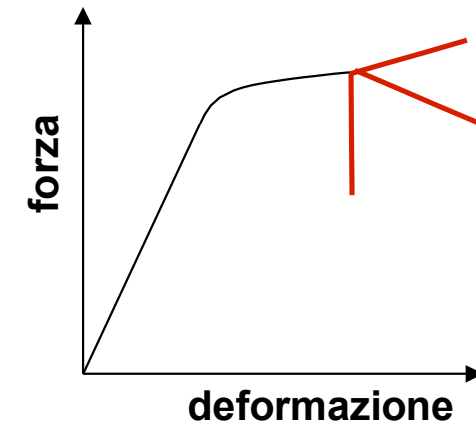
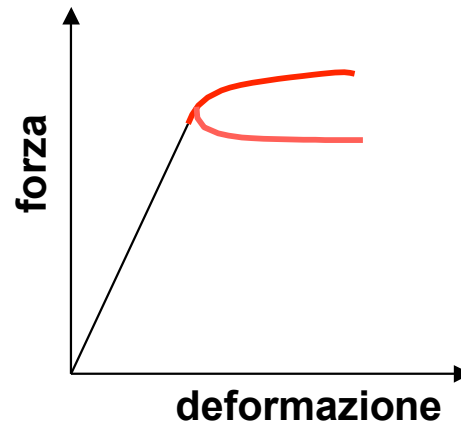
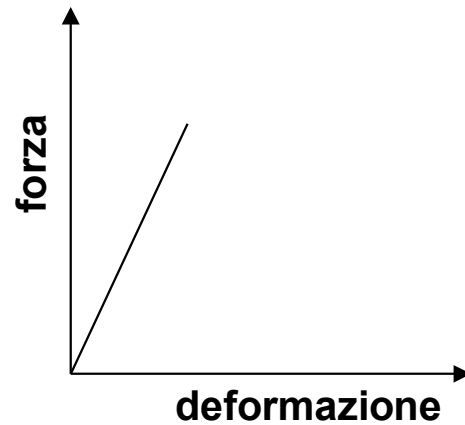
La misura della consistenza degli alimenti solidi

- **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.
-

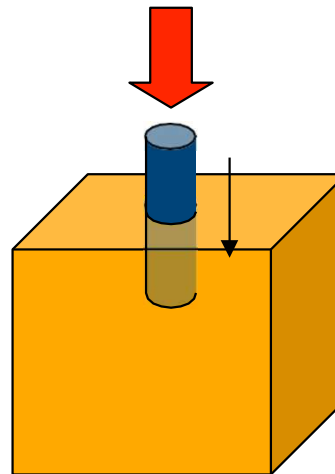
Test di penetrazione

- 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)
-

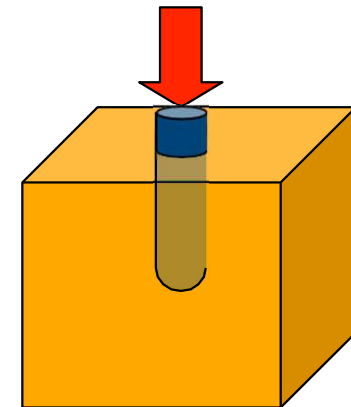
Test di penetrazione



Sforzo penetrazione e
cedimento superficie

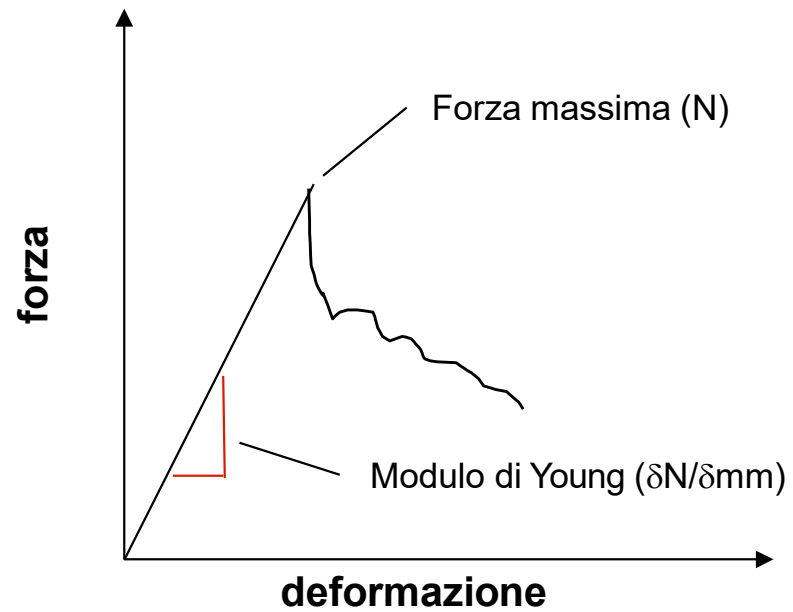


Sforzo
penetrazione
prodotto

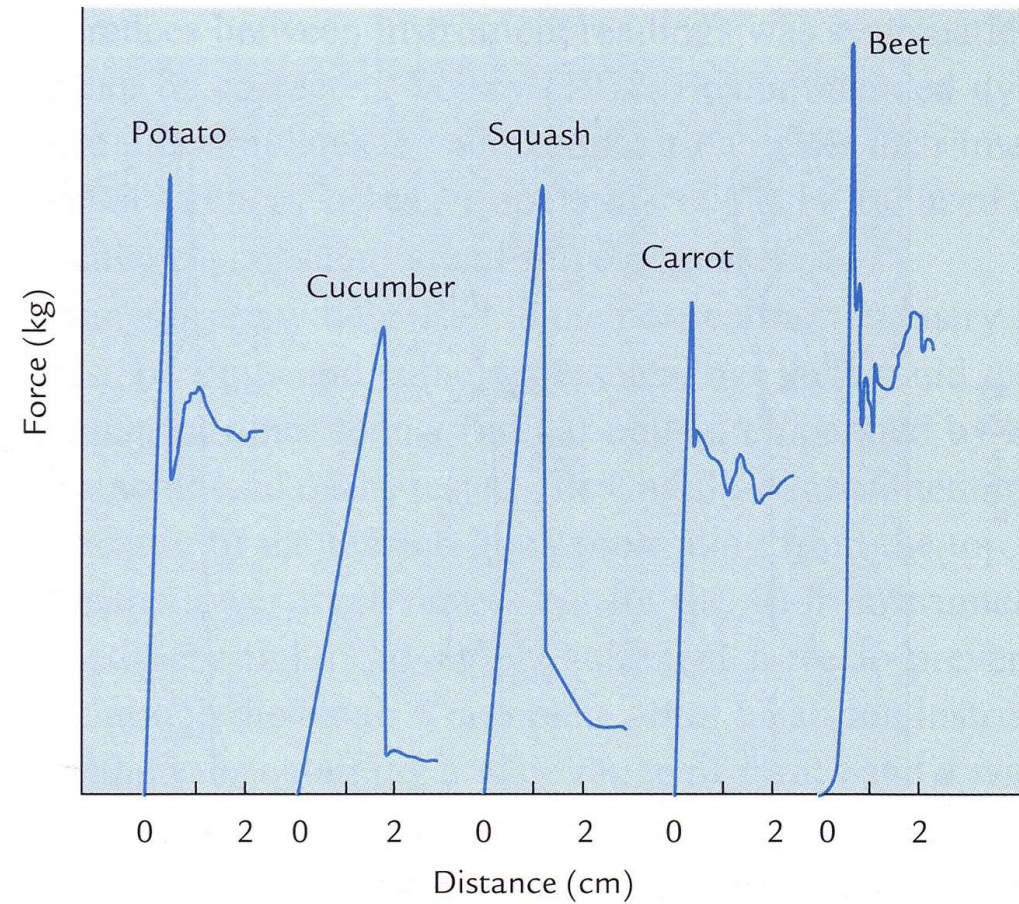


Sforzo
penetrazione
prodotto

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

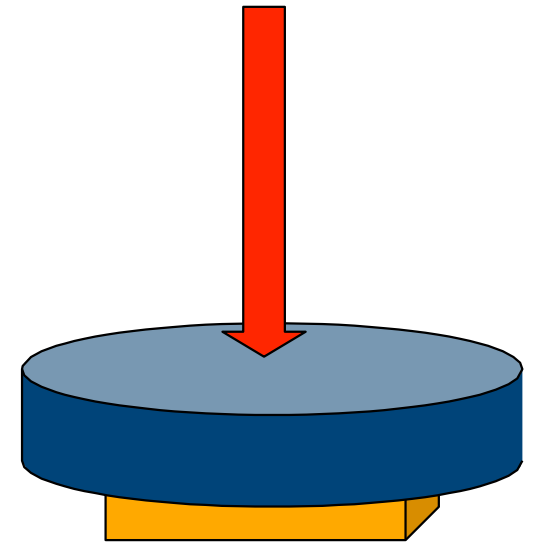
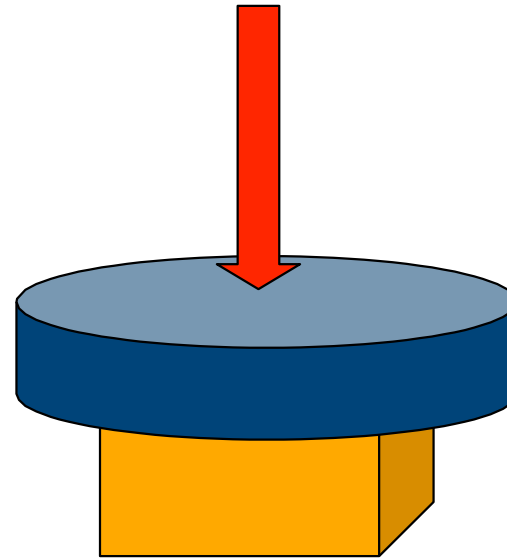
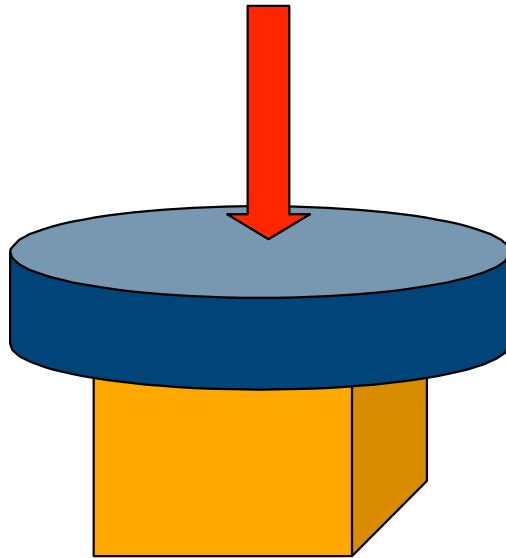
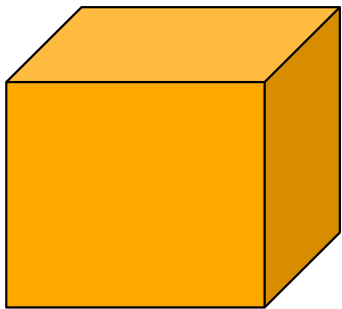
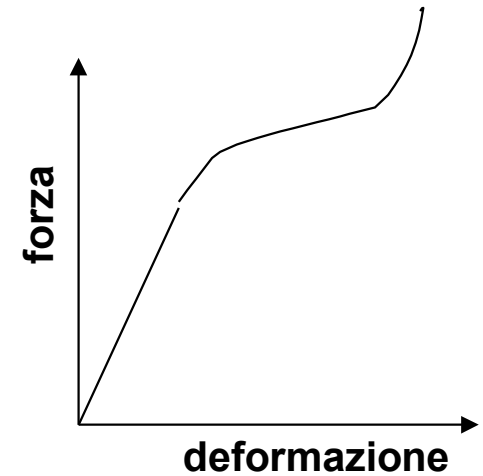
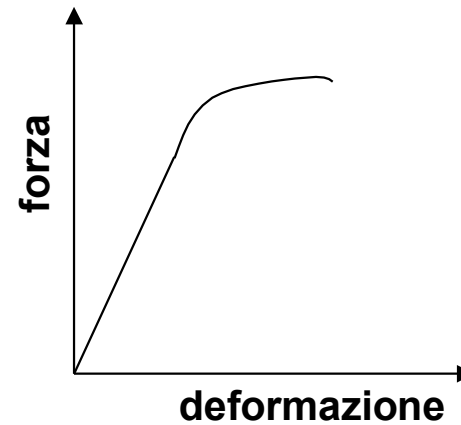
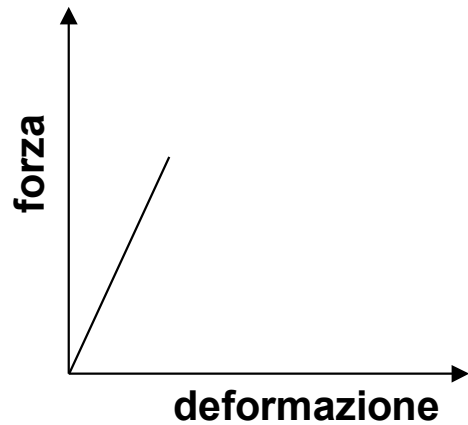
$$\tau = E \varepsilon$$

τ = sforzo (Pa)

ε = 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

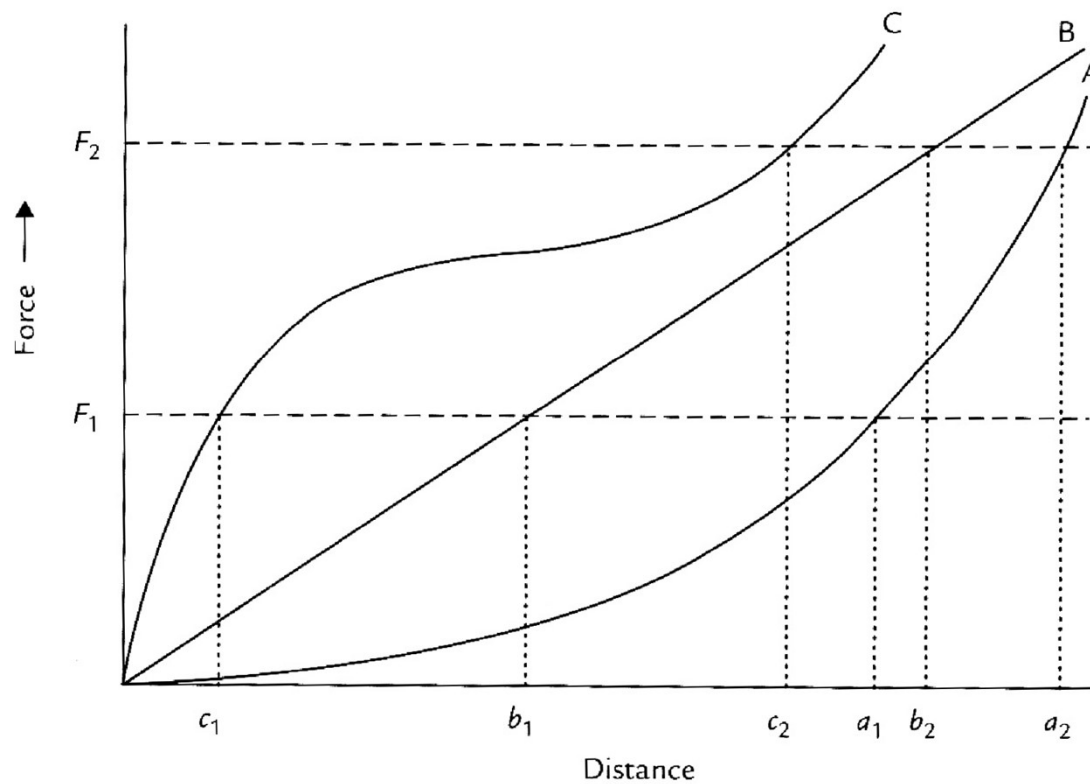
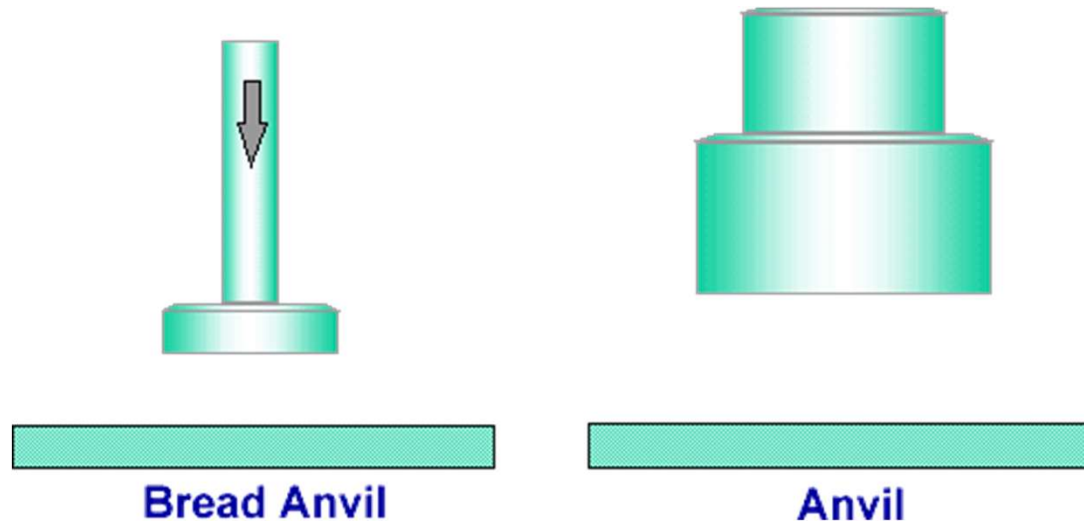


Figure 4.32 Three characteristic types of force-deformation behavior.

Test di compressione

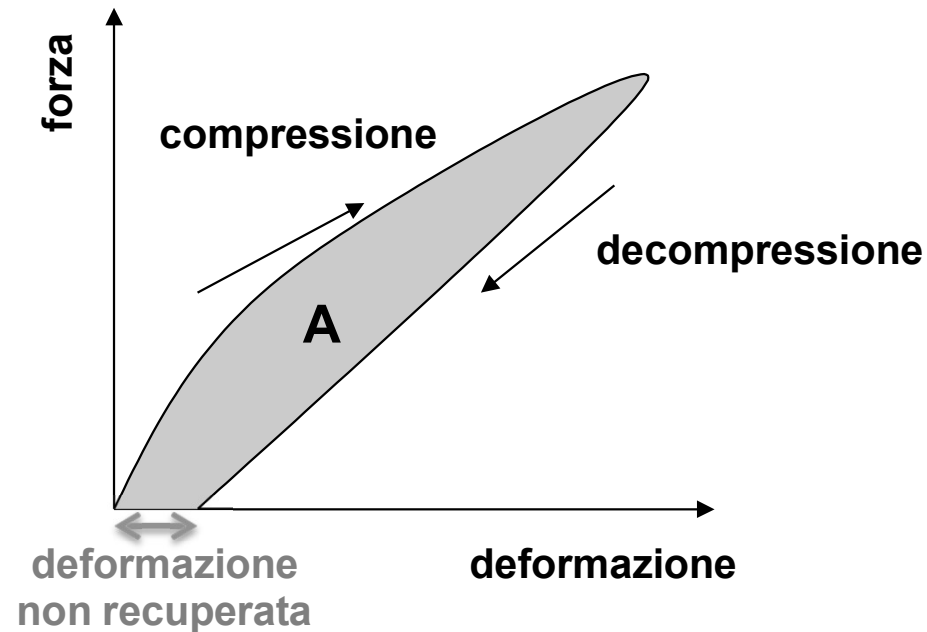
- Sonde: genericamente piatte.
 - Il rapporto superficie sonda/superficie campione deve essere definito per ottenere risultati confrontabili
 - La sonda non deve penetrare il campione con eventuale azione di taglio
 - Campione se possibile alto e basse deformazioni uniassiali ($\Delta L/L \leq 0.3$)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

Test di compressione: sonde



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 $A = 0$

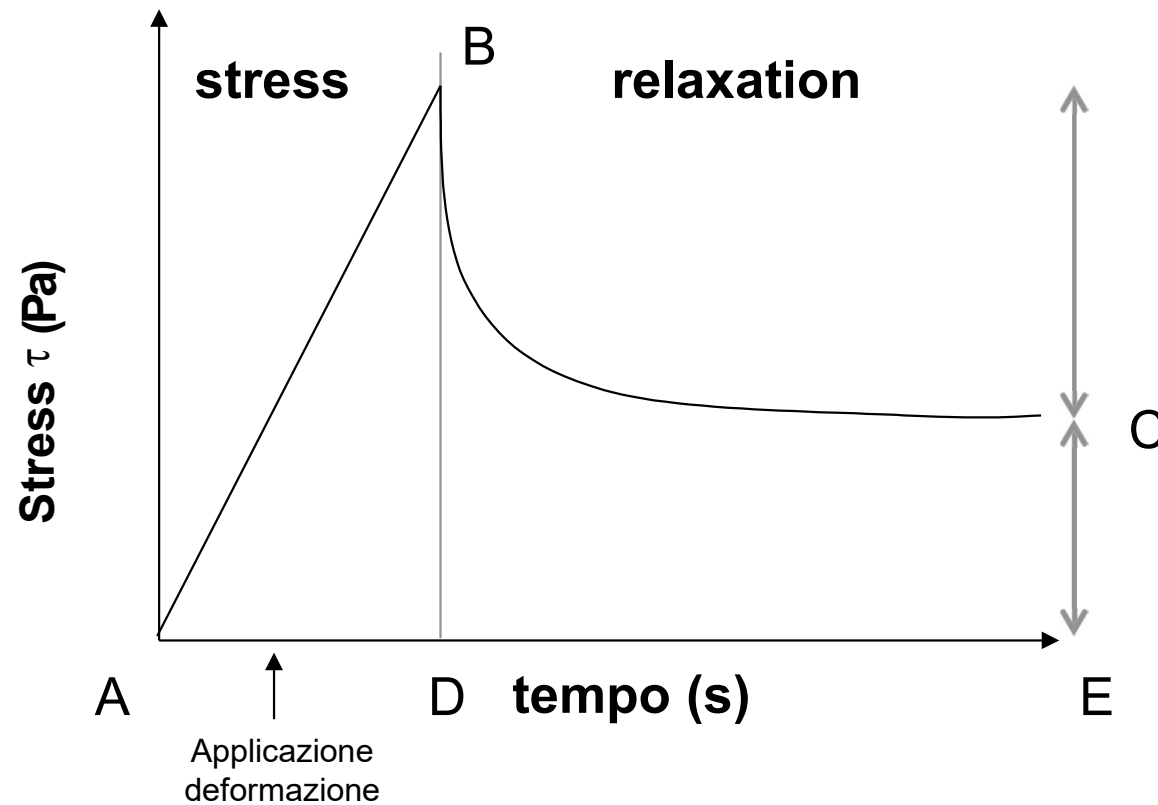
Test di compressione-rilassamento

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 ε_s (senza rottura legami) = tempo/velocità

BD = sforzo massimo di deformazione

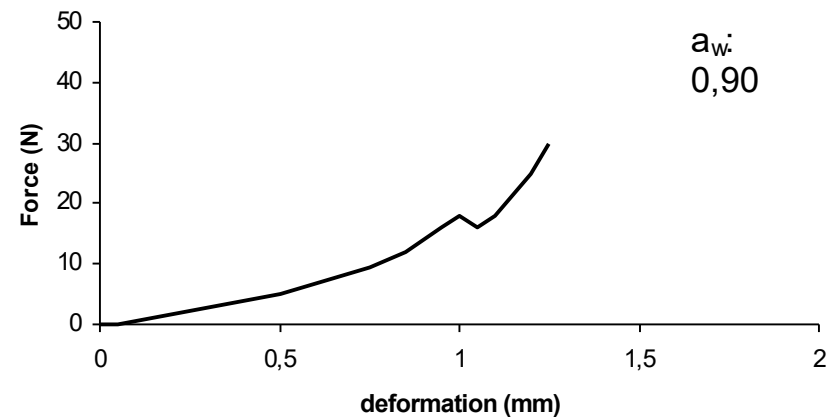
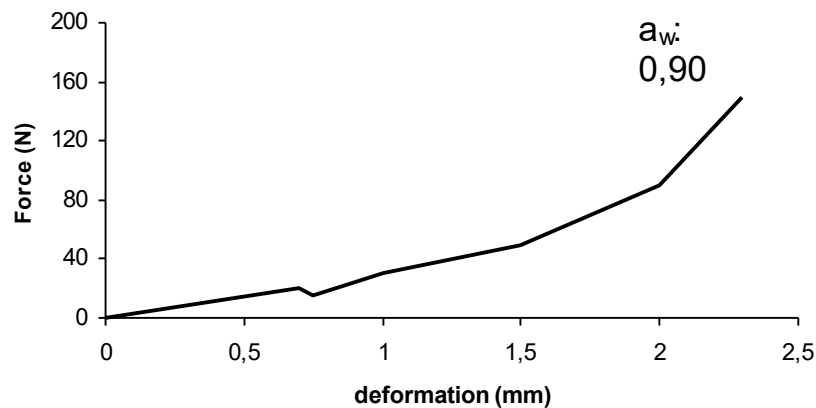
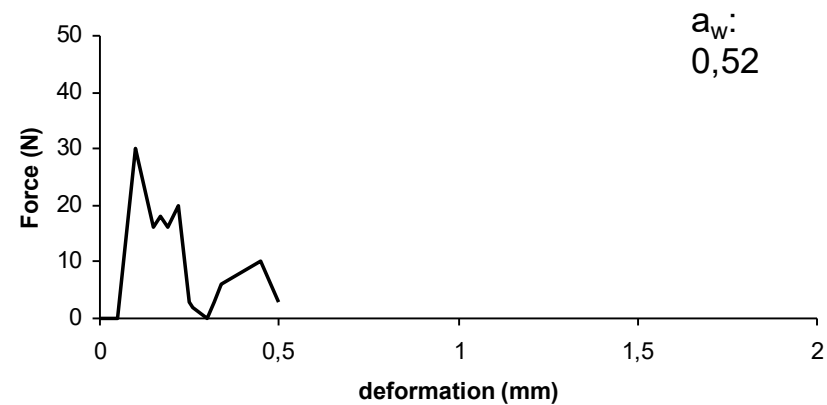
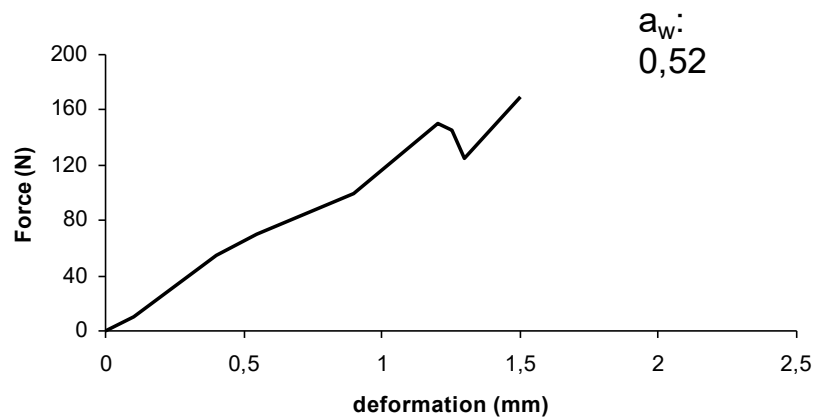
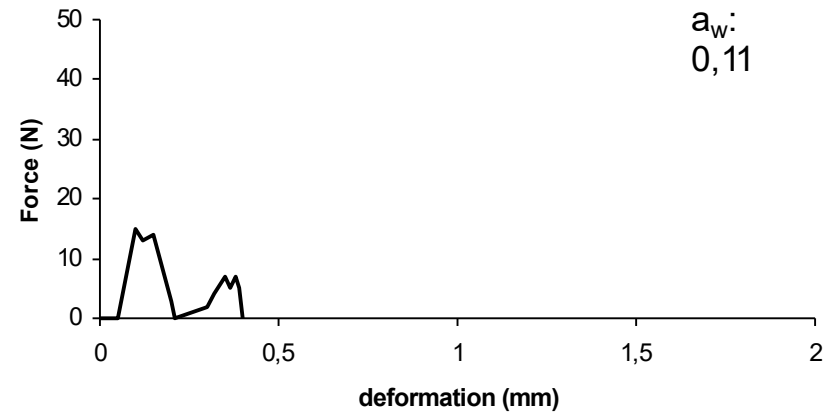
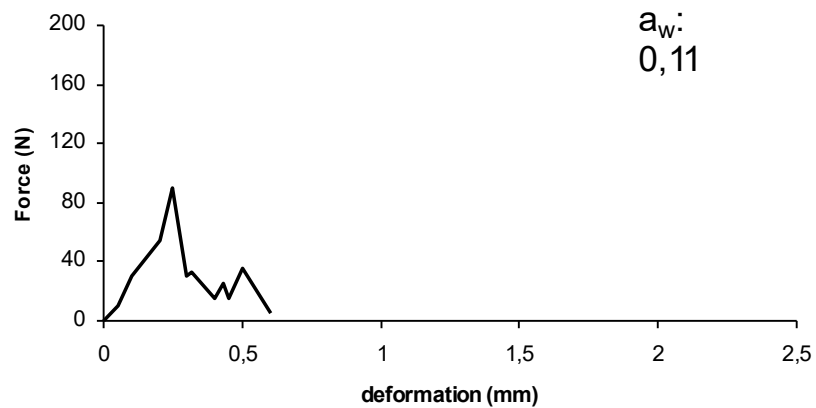
BC = dissipazione dello sforzo a causa di scorrimento viscoso (relaxation stress)

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.
-



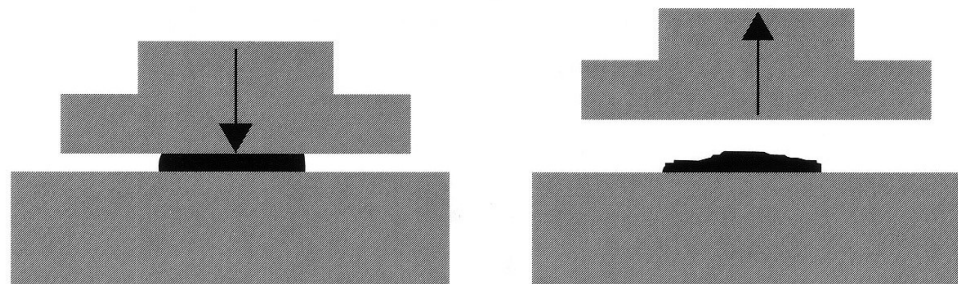
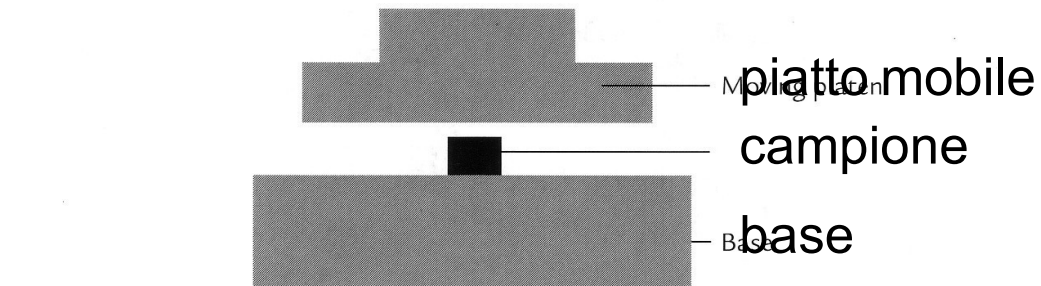
Caffè verde

Caffè tostato

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

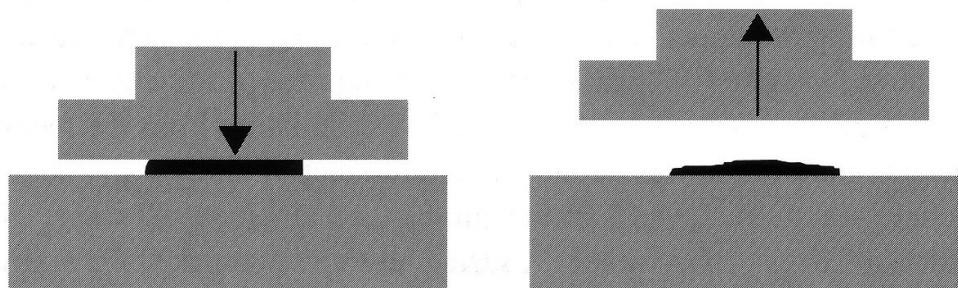
- Doppia compressione/decompressione in successione del campione (test ciclico)
 - Il test riproduce le condizioni applicate durante una masticazione (test imitativo)
-

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



a: compressione

b: decompressione



secondo ciclo

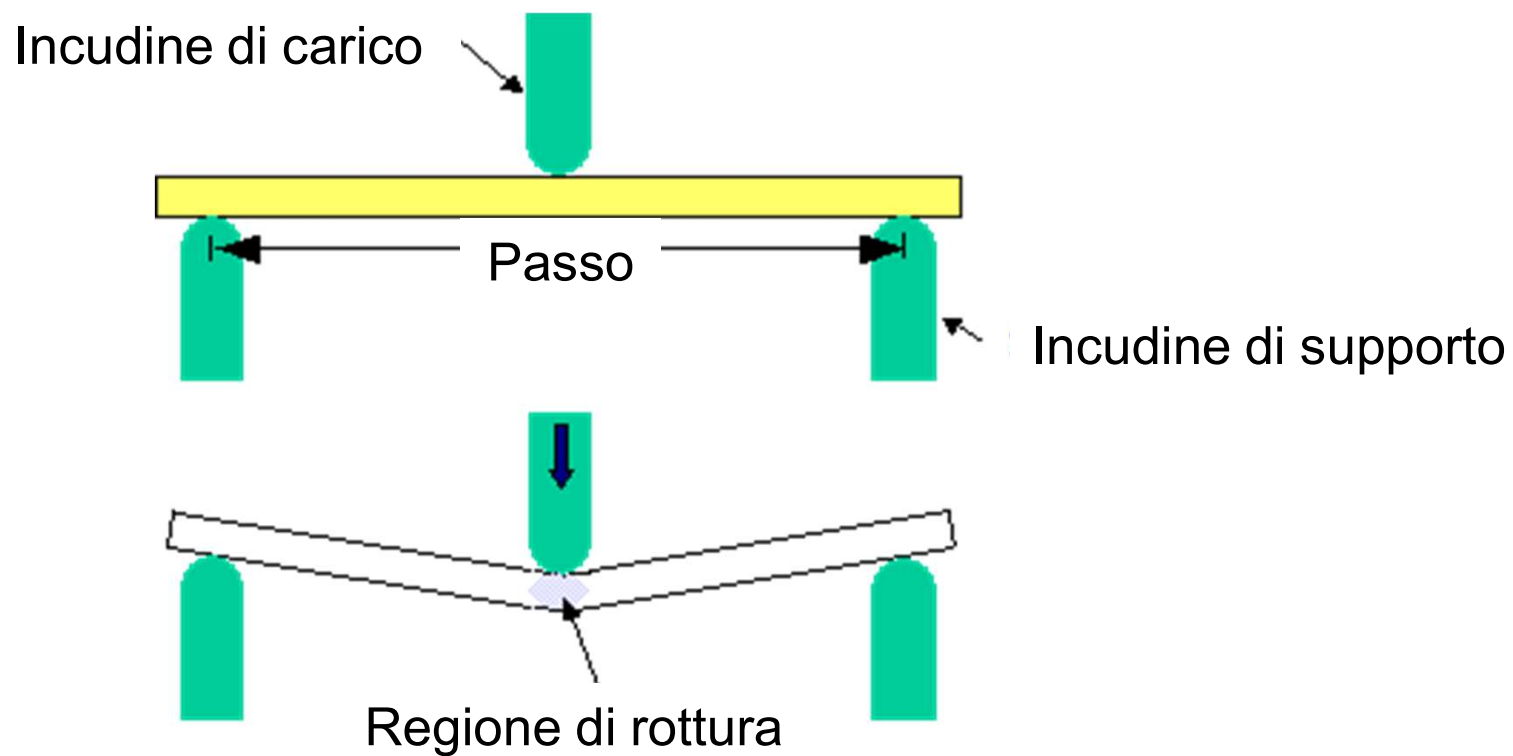
Test di compressione

- 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
-

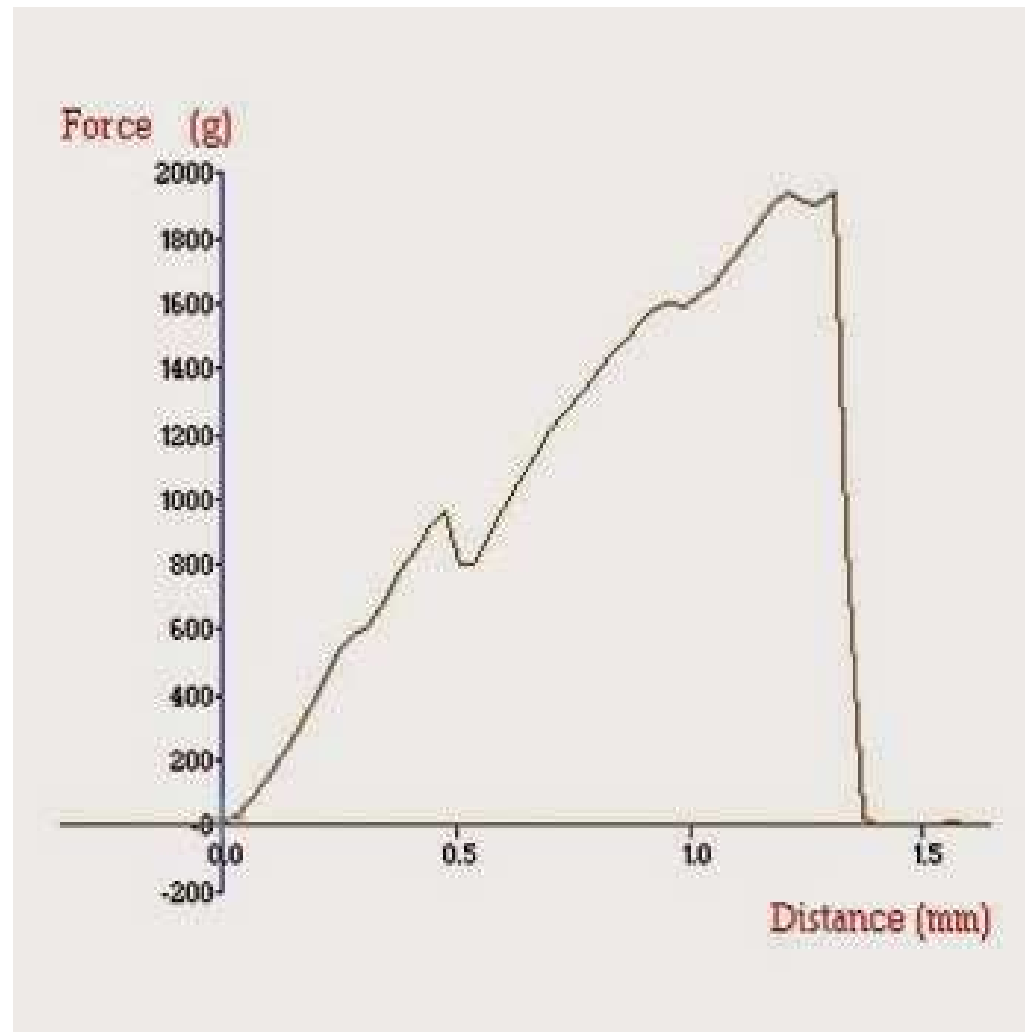
The graph illustrates the mechanical behavior of a material under two cycles of loading and unloading. The vertical axis represents Force (N) and the horizontal axis represents time (s). The first cycle (I ciclo) shows a loading phase (L1) and an unloading phase (L2). The second cycle (II ciclo) shows a loading phase (L3) and an unloading phase (L4). The area under the first loading curve is labeled Area 1 (A1). The area under the first unloading curve is labeled A3. The area under the second loading curve is labeled A2. The horizontal axis is labeled 'tempo (s)' and the vertical axis is labeled 'Forza (N)'.

L_3/L_1 : elasticità (%)

Test di flessione (three point bending)



Test di flessione

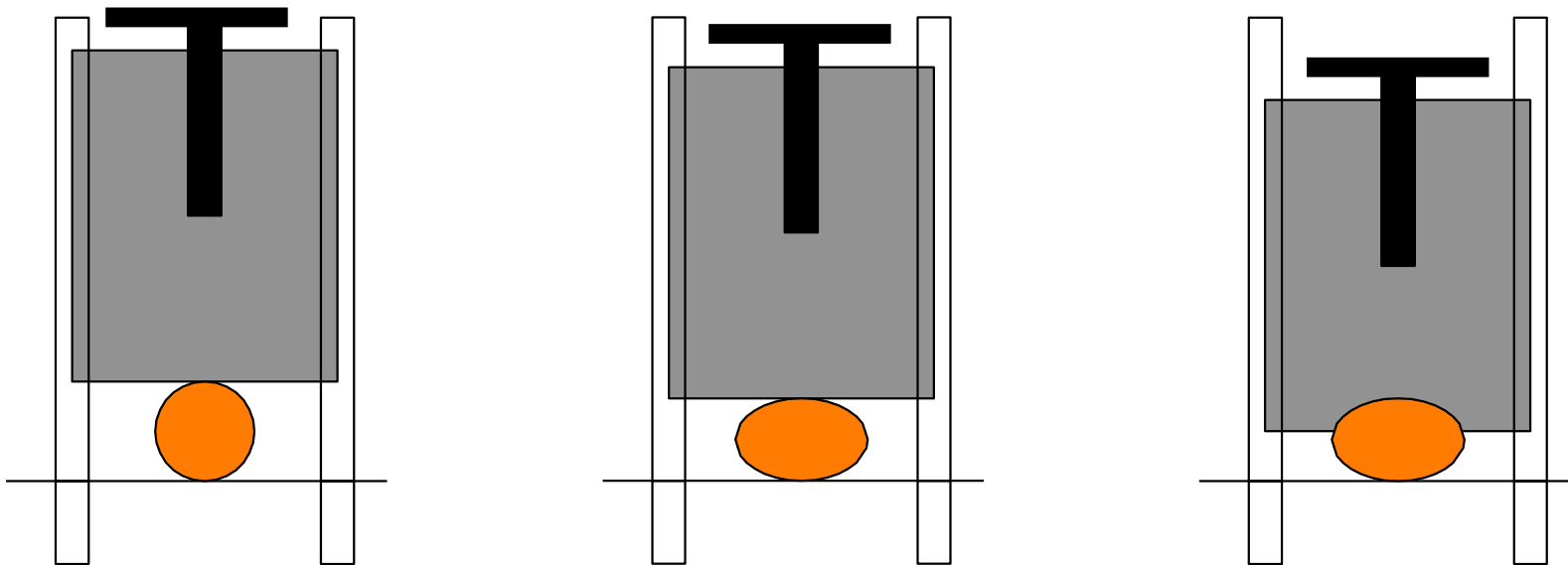


Test di flessione

- 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.
-

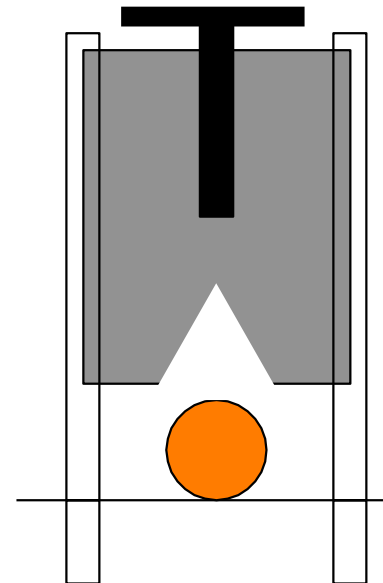
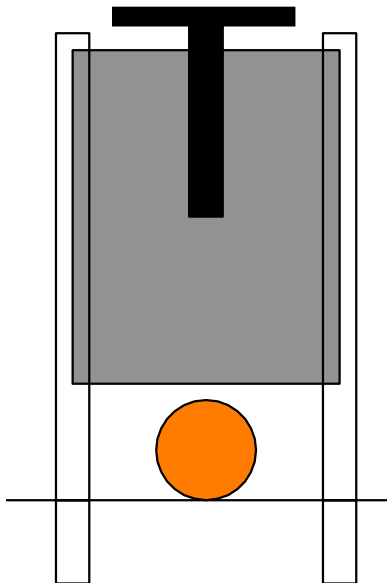
Test di taglio

- 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

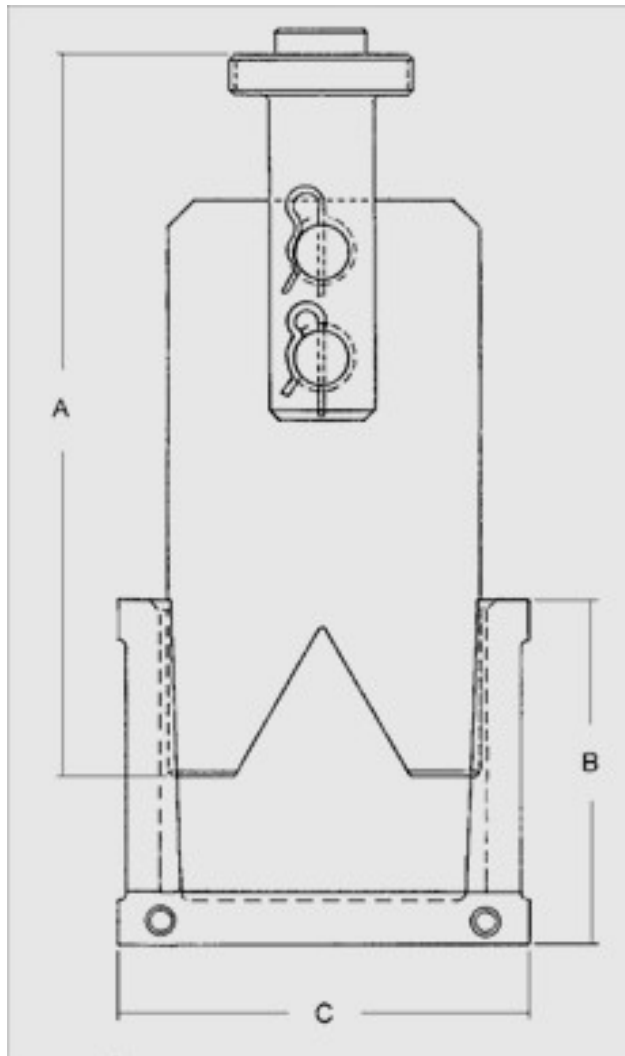


Test di taglio

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



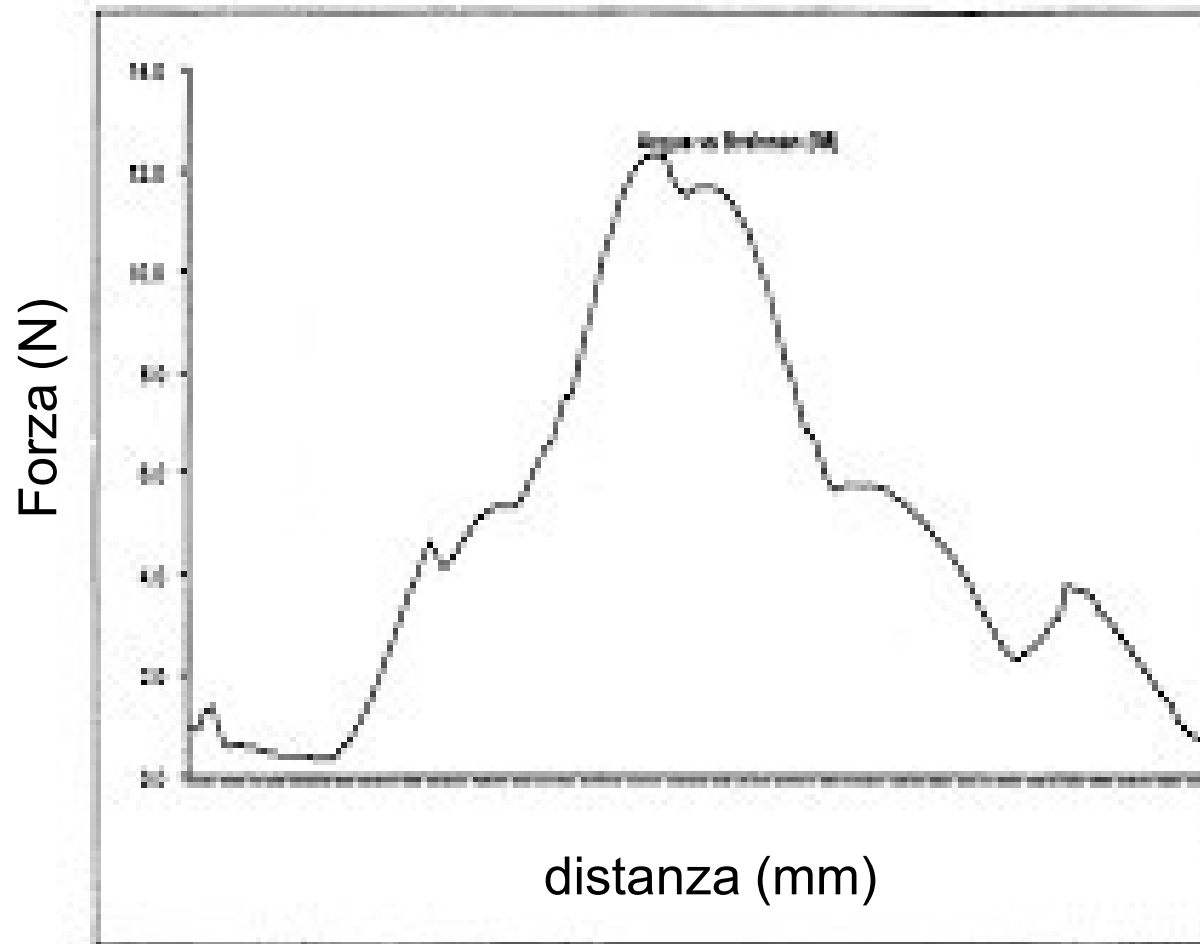
Cella Warner-Bratzler



Cella Warner-Bratzler

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

Test di taglio



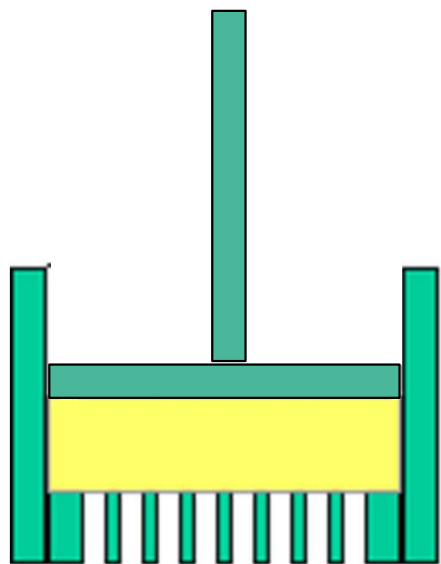
Test di estrusione

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

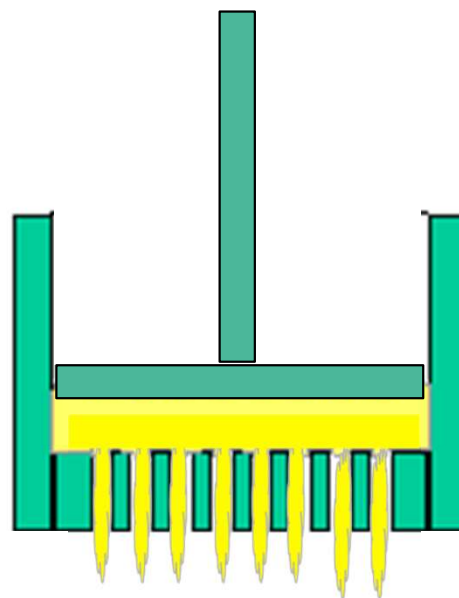
- ❑ Una griglia con fori cilindrici o aperture lineari (estrusione dal basso)
- ❑ Lo spazio di tolleranza che si crea tra il pistone ed il contenitore
- ❑ Una grigliatura nel pistone

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

Test di estrusione diretto

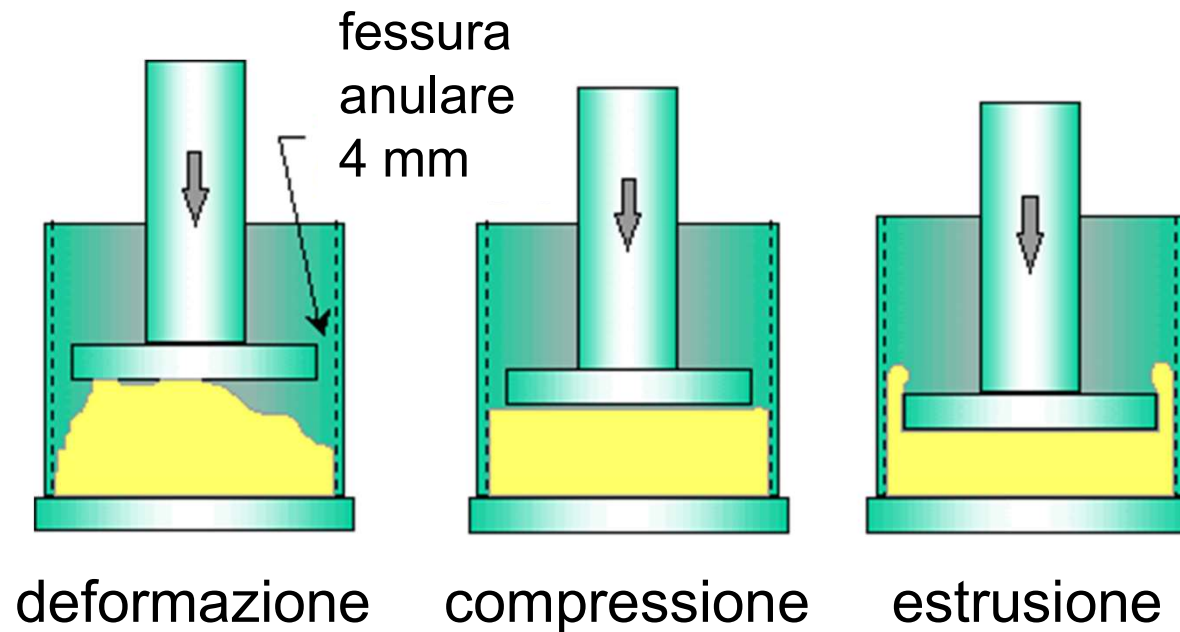


compressione



estrusione

Test di retro-estrazione (back-extrusion)



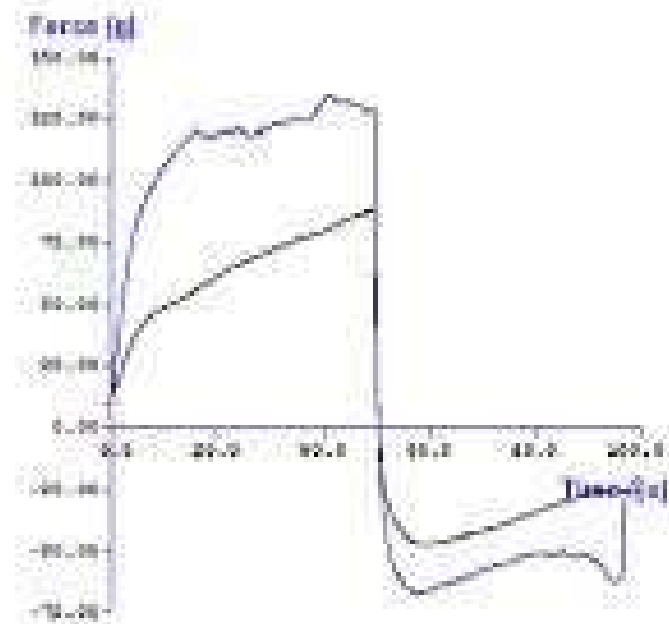
Back-extrusion test

Test di retro-estrazione (back-extrusion)

YOGHURT



Back Extrusion Cell



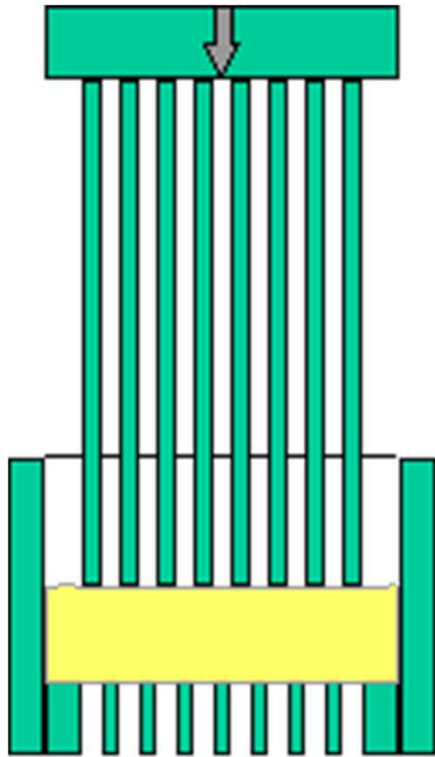
Test di estrusione tramite cella Kramer

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

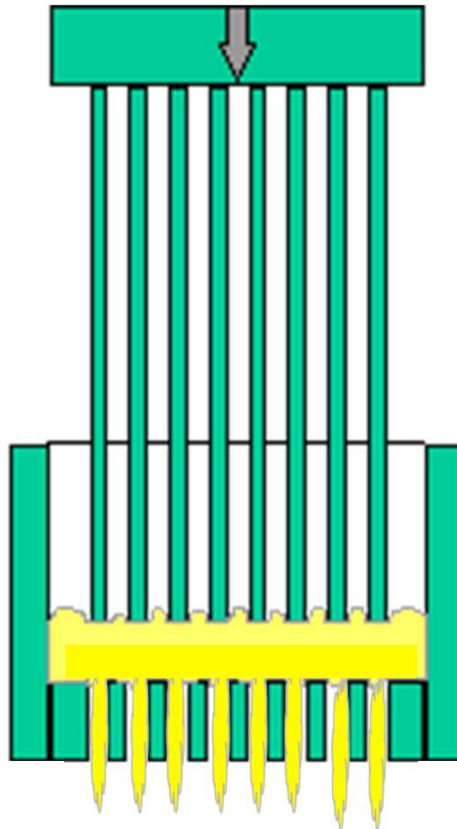
Il campione viene inserito nella cella ed attraversato dalla sonda.

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

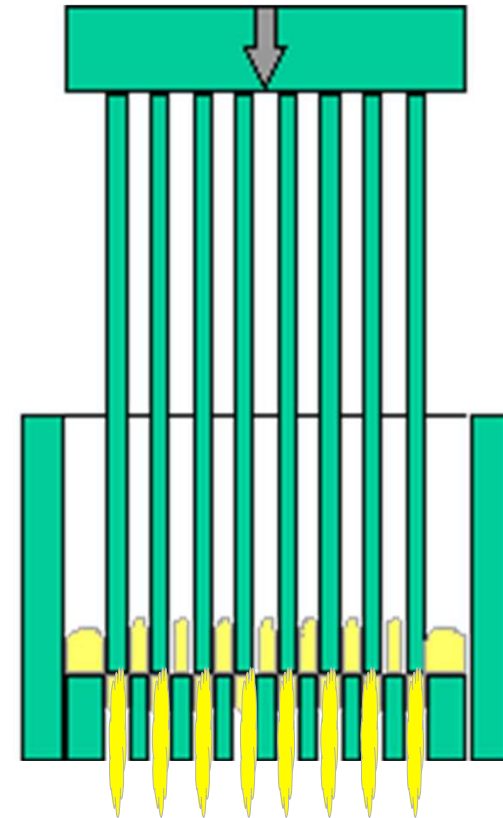
Test di estrusione: cella Kramer



compressione

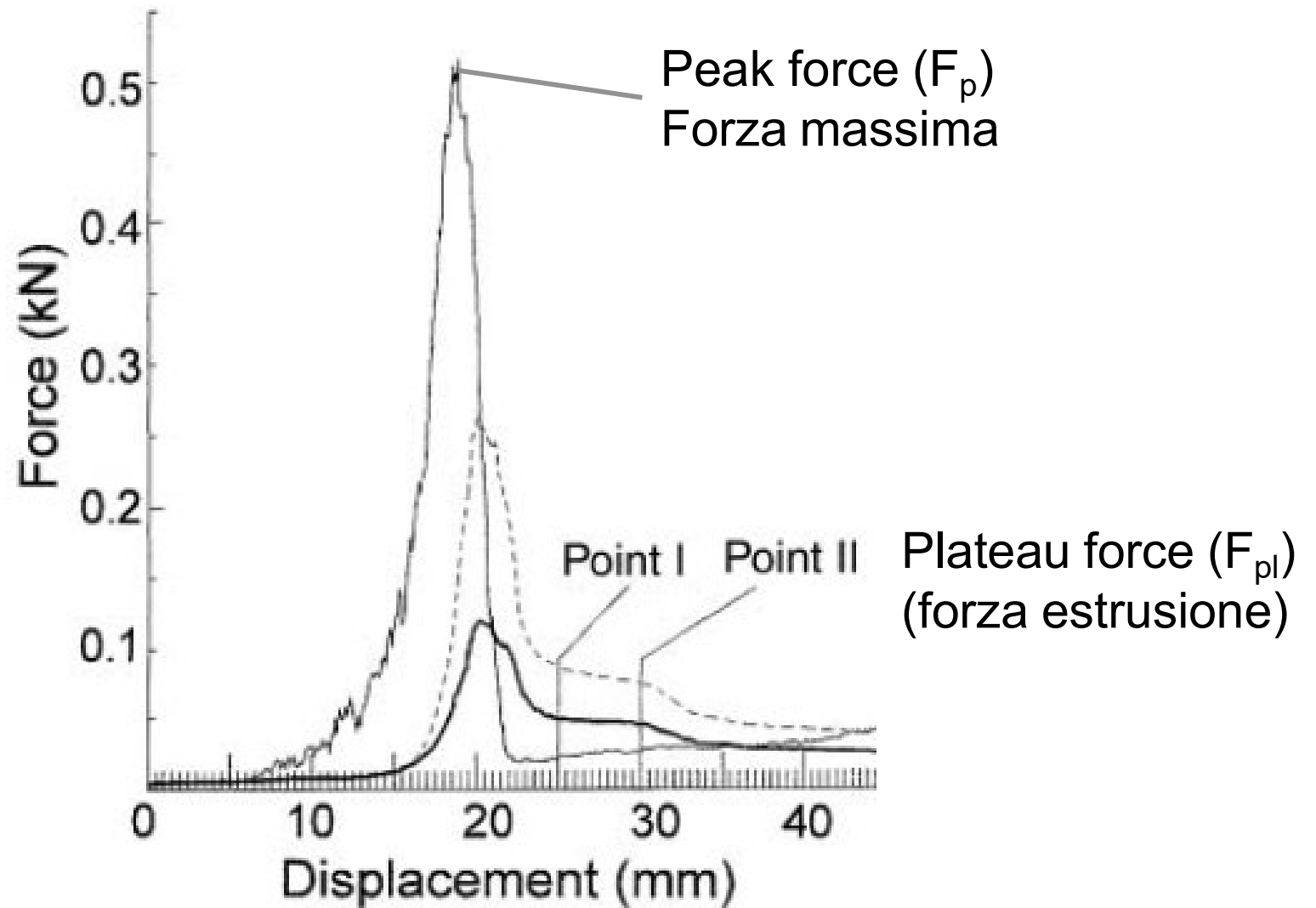


estrusione



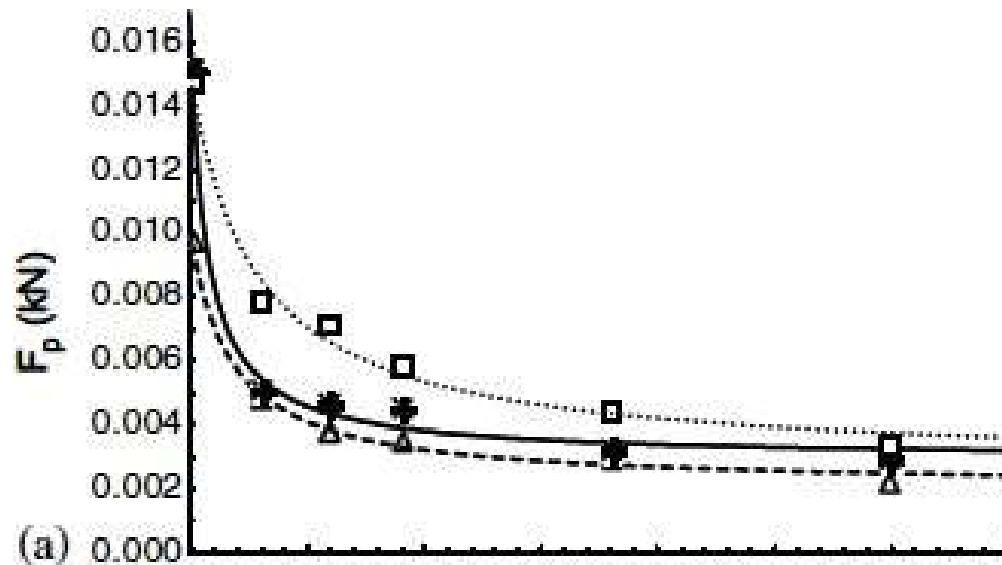
taglio

Test di estrusione: cella Kramer

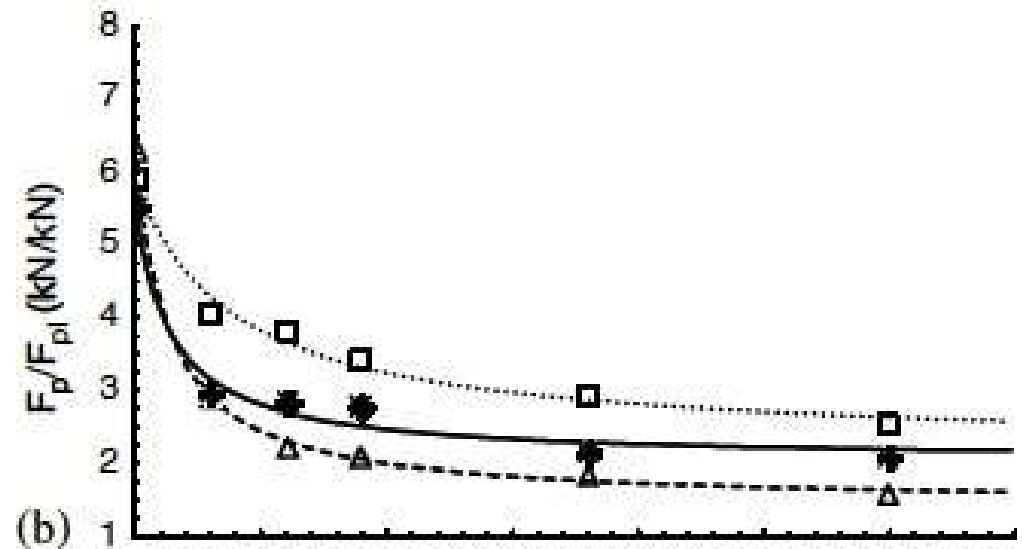


Tracciato forza-spostamento di corn-flakes prima e dopo idratazione in latte.

Test di estrusione: cella Kramer



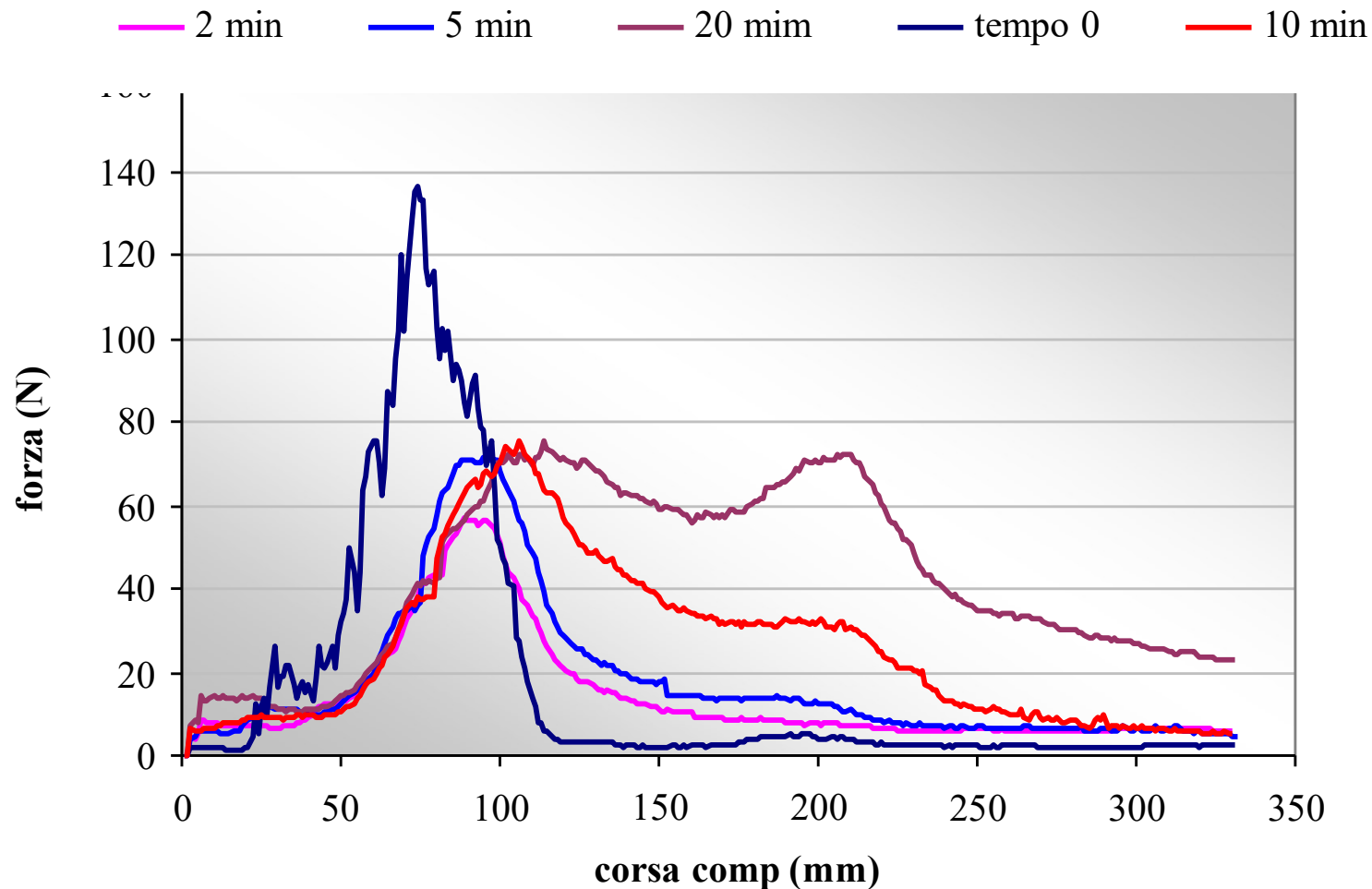
time (s)



time (s)

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**

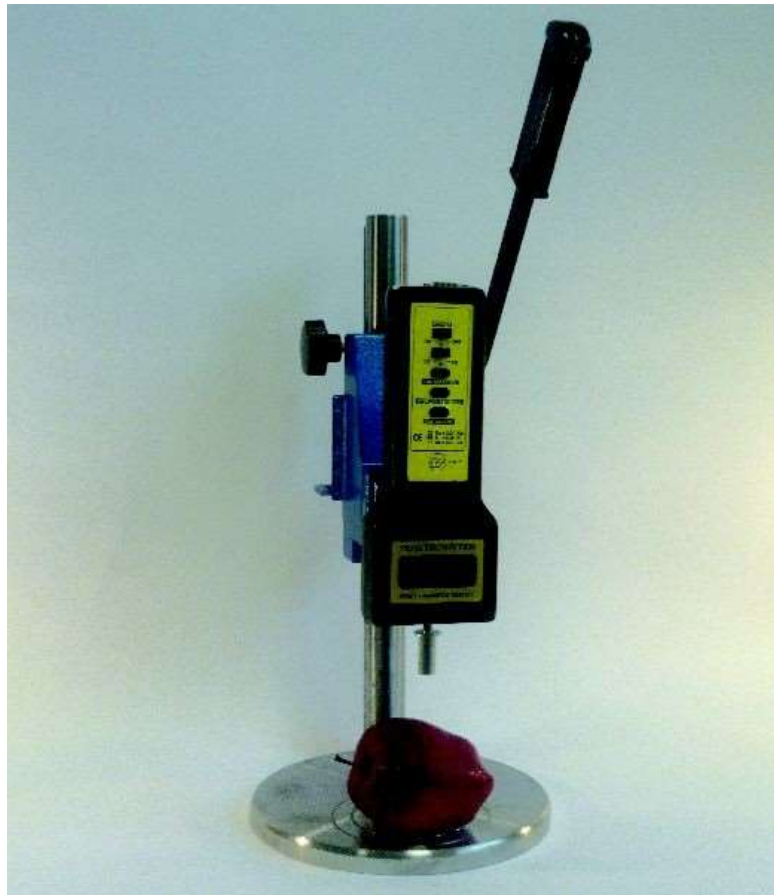
- Misurano la forza necessaria ad indurre una certa deformazione nell'alimento.

■ **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)

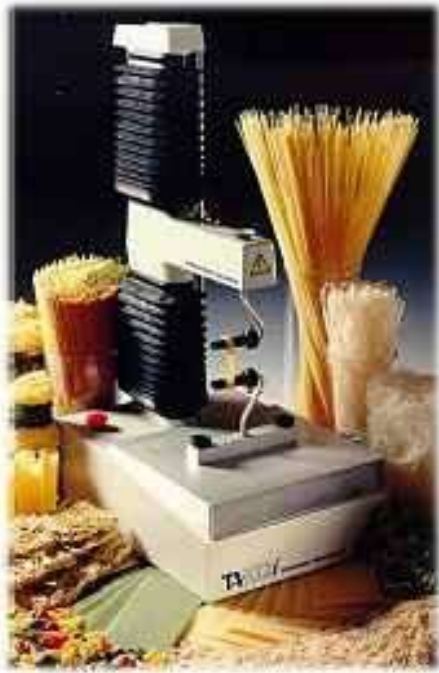
Ad un montante
(con braccio mobile)

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



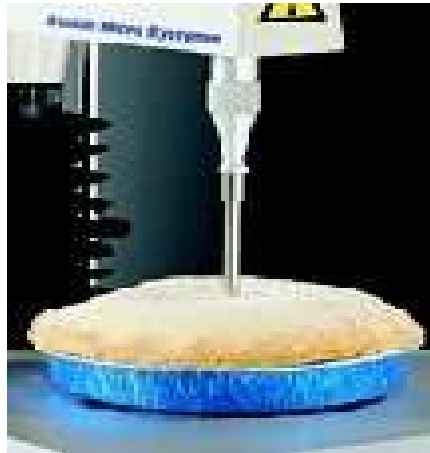
Piastra per
valutazione
adesività



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
ammorbidiment
o crosta



Ottawa cell (prodotti friabili,
estrusi)

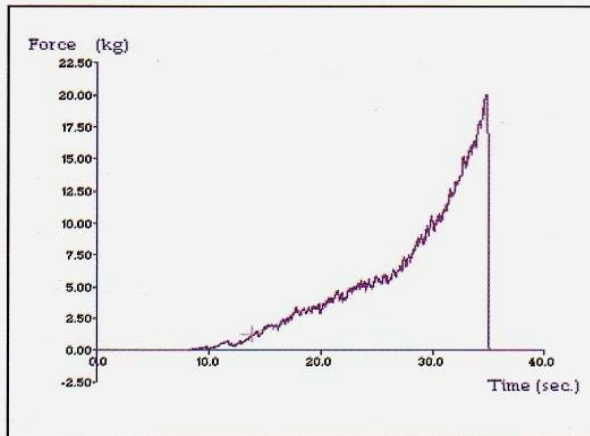
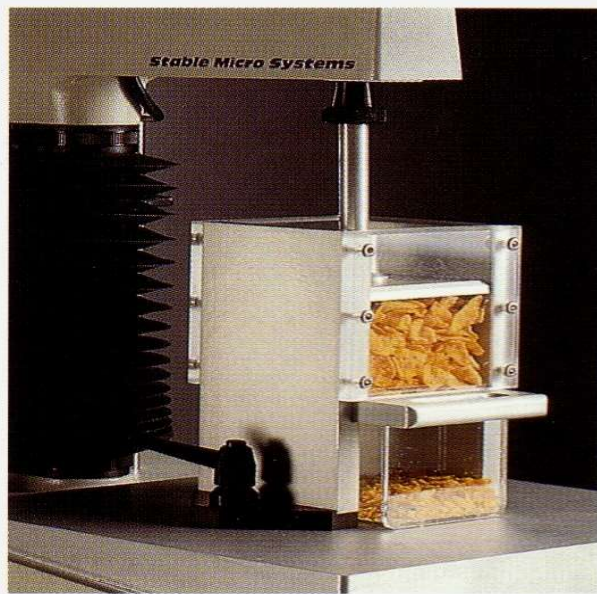


Piastra per
valutazione
proprietà
meccaniche

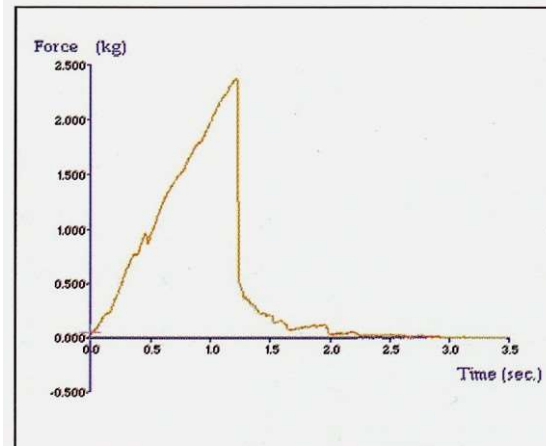


Kramer cell (5 lame)

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

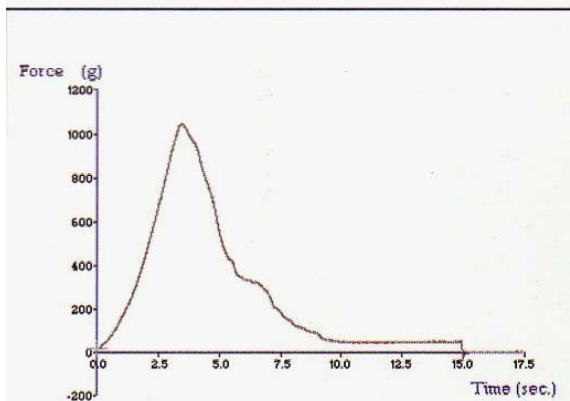


Misura della friabilità di cereali mediante compressione con cella Ottawa.

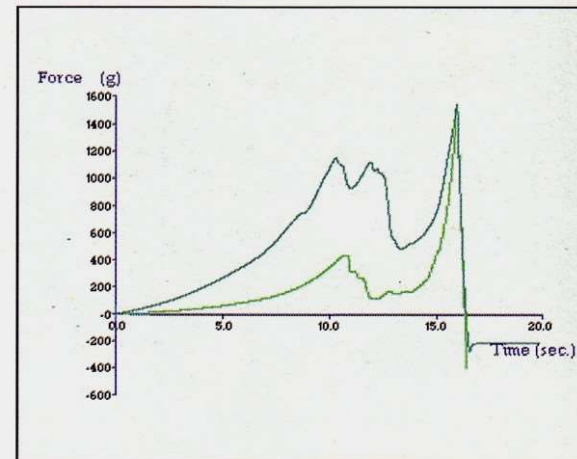


Resistenza alla piegatura di un biscotto con il sistema a Tre Punti di Piegatura.

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)