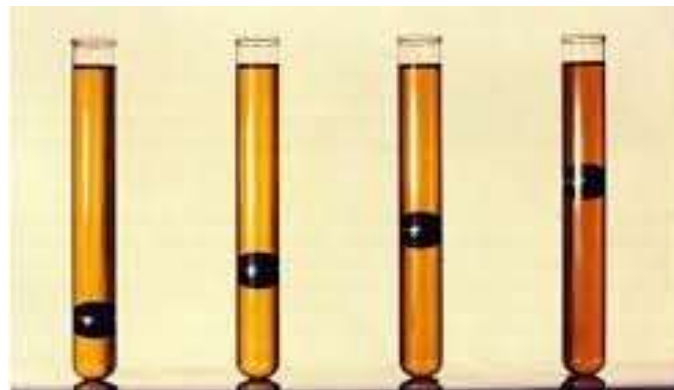


Proprietà reologiche e meccaniche degli alimenti

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



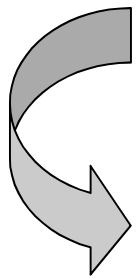
Consistenza degli alimenti

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

- 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:

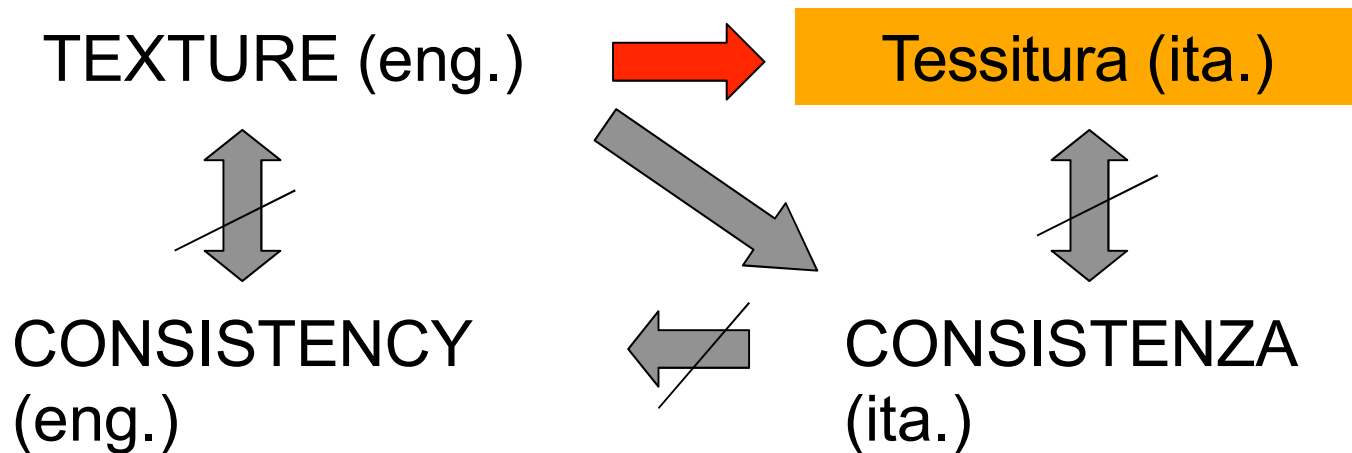
- Forma
 - Grandezza
 - Struttura (organizzazione delle sue molecole in elementi micro- e macrostrutturali)
-

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
-

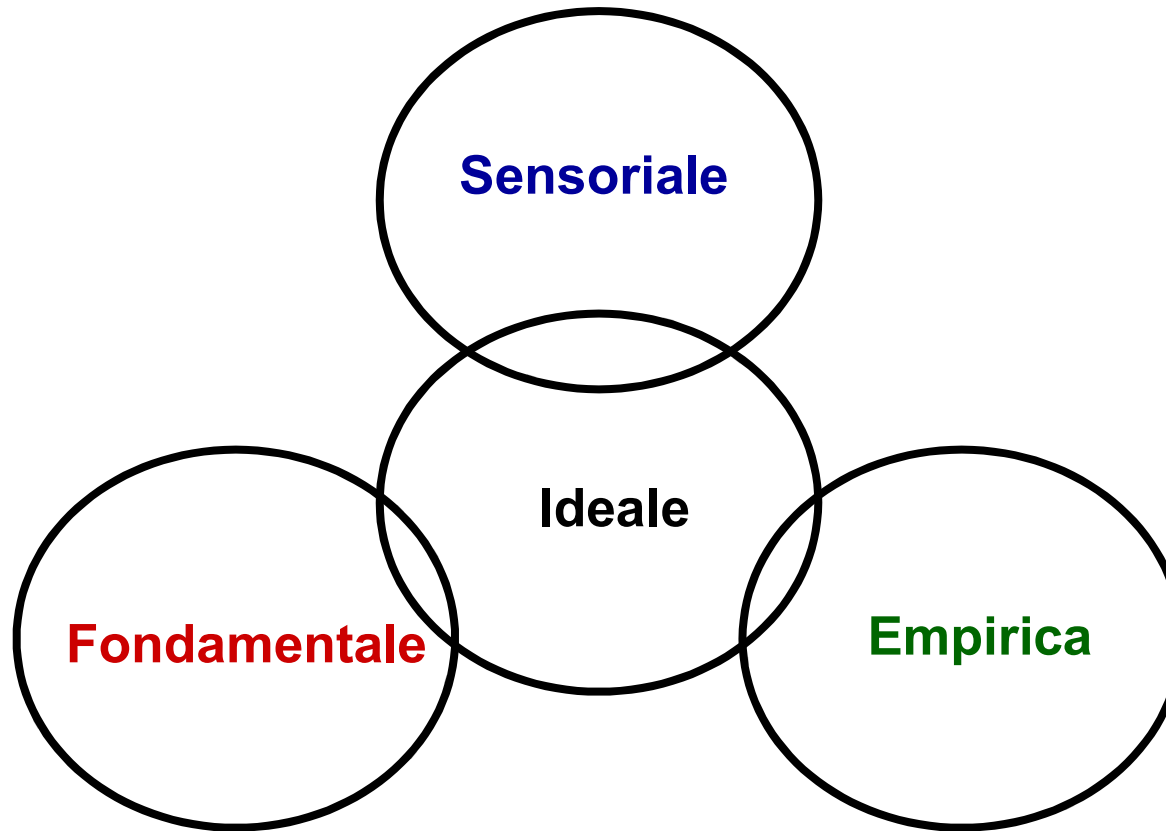
Analisi della texture degli alimenti

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).

•**Sensoriale (texture):** *analisi sensoriali* basate su valutazioni soggettive oggettivabili attraverso strumenti appositi

Misure reologiche dei prodotti alimentari



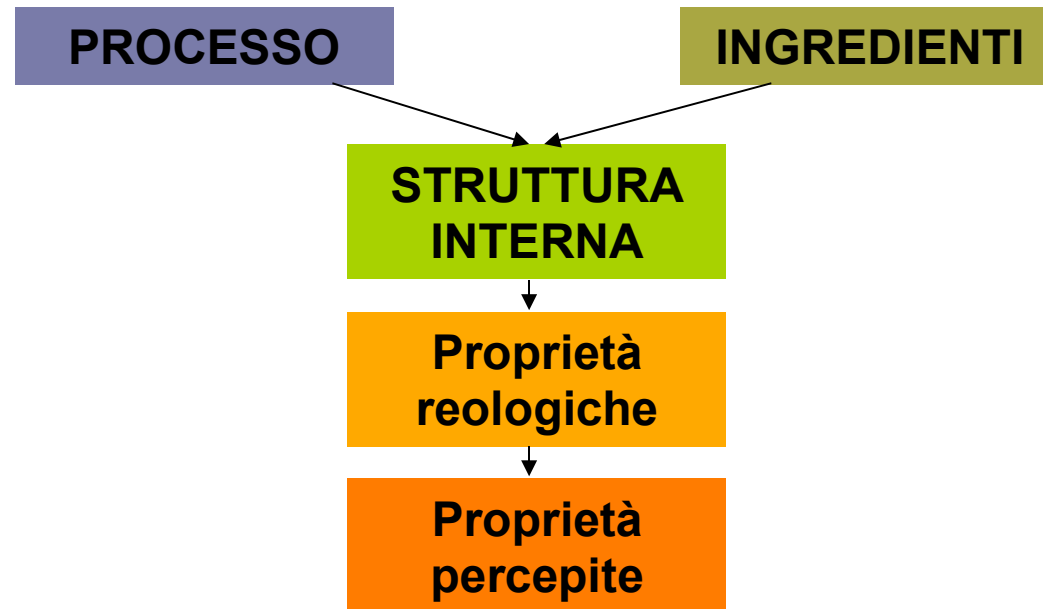
La misura reologica ideale deve essere vista come un insieme ottenibile dalla sovrapposizione di misure sensoriali, empiriche e fondamentali

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

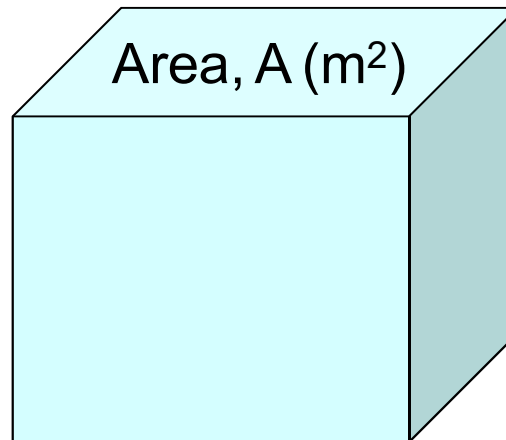
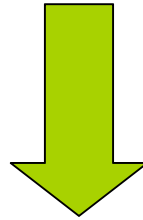
- Controllo qualità dei prodotti alimentari alla fine del processo produttivo
- Progettazione processi e impianti di processo
- Progettazione e sviluppo prodotti alimentari
- Definizione shelf-life
- Definizione proprietà reologiche fondamentali



Le basi teoriche della reologia

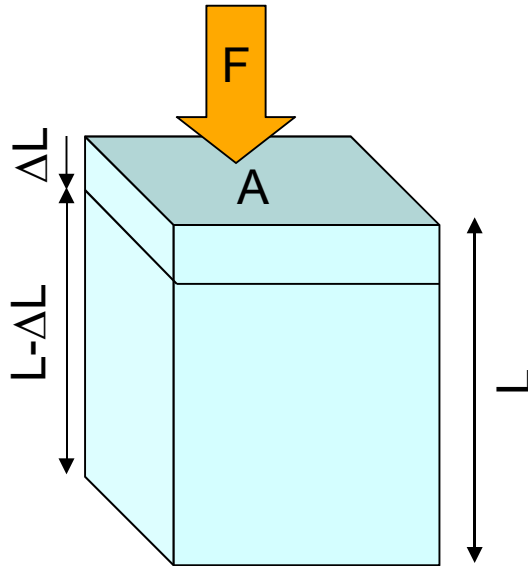
Sforzo (*stress*): definizione

Forza, F (N)



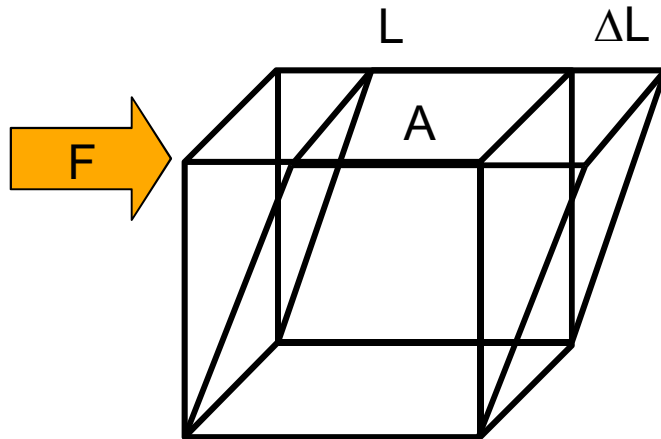
$$\text{Sforzo (Stress)} = \sigma = F/A \text{ (Pa, Nm}^2\text{)}$$

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



Deformazione uniassiale

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



Deformazione al taglio

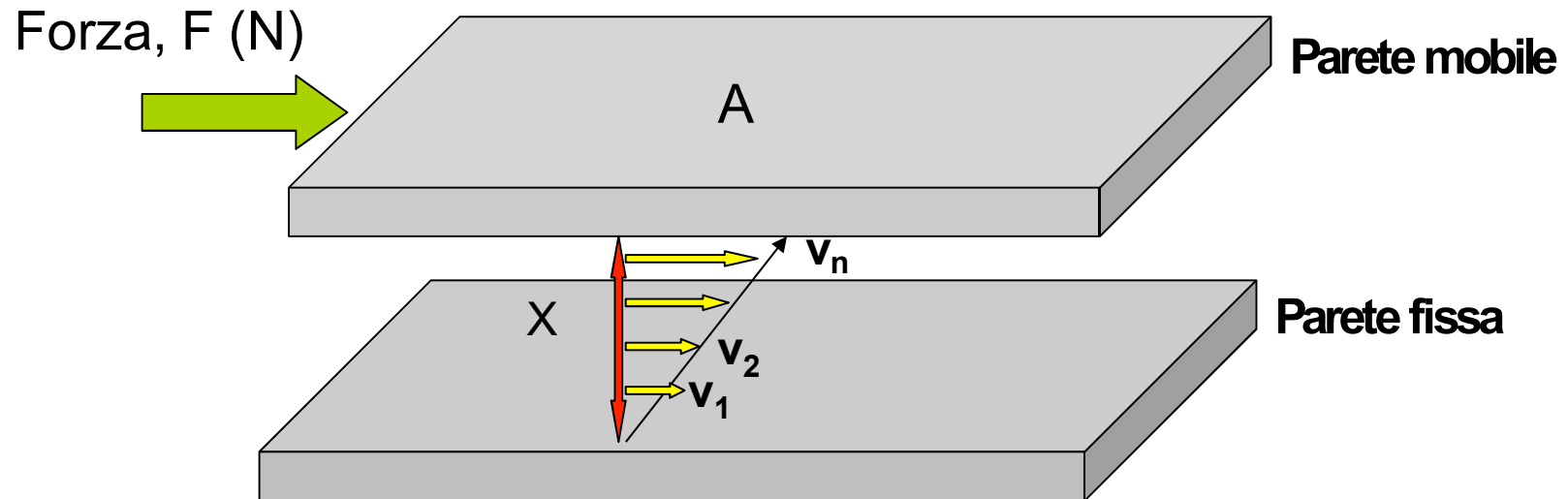
**Sforzo tangenziale o di taglio
(*shear-stress*) F/A (N/m^2)**

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 ΔL (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) ΔL (m) descrivibile come uno spostamento degli elementi di volume del solido.
- Quando una forza di taglio F viene applicata su una superficie A (m²), essa determina uno sforzo (Pa). Sotto questo sforzo, la superficie A si sposta per la lunghezza ΔL (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*, τ)



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 (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 (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.

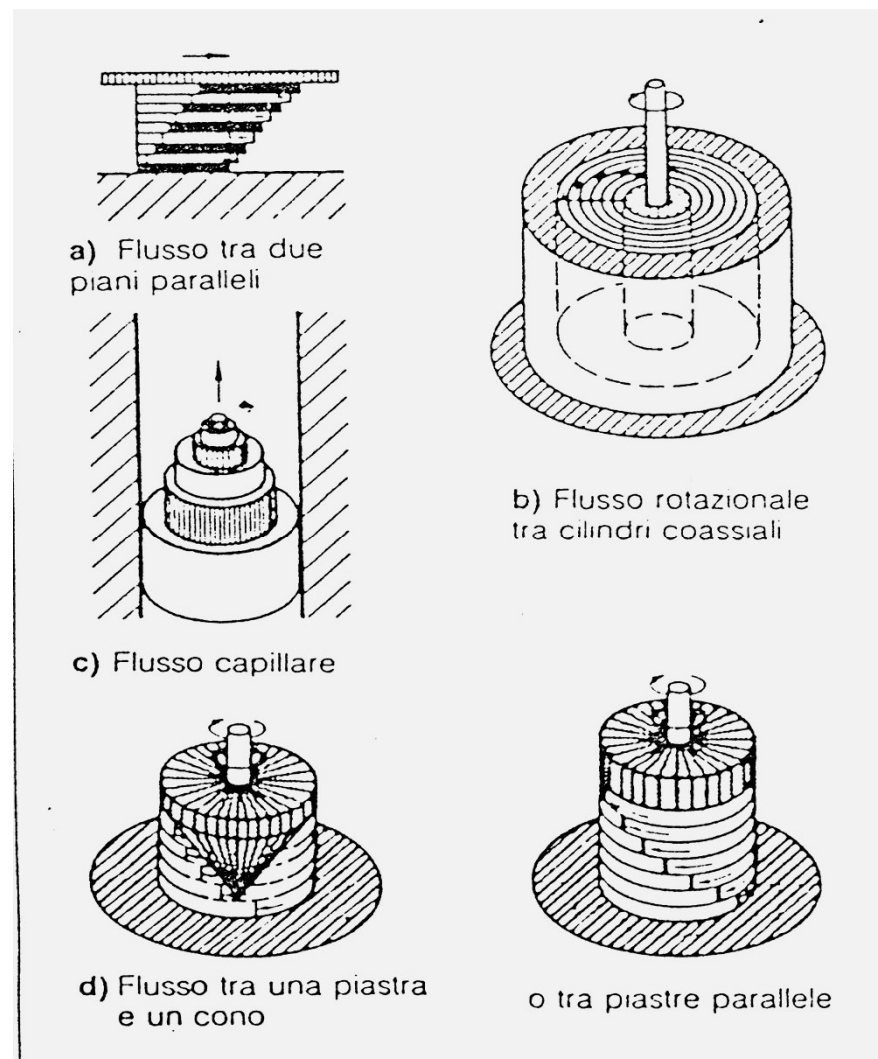
Su di un **corpo liquido** lo sforzo di taglio può essere esercitato secondo diverse modalità:

- 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** provocando uno scorrimento relativo e parallelo delle stesse (flusso laminare)

Lo sforzo di taglio (shear stress)





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)

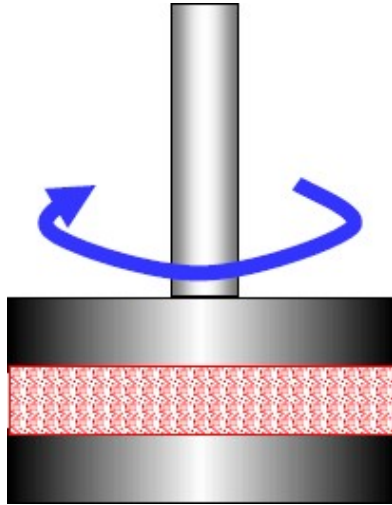
Plinio il Vecchio differenziava olii di oliva in base a velocità di scorrimento.

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.

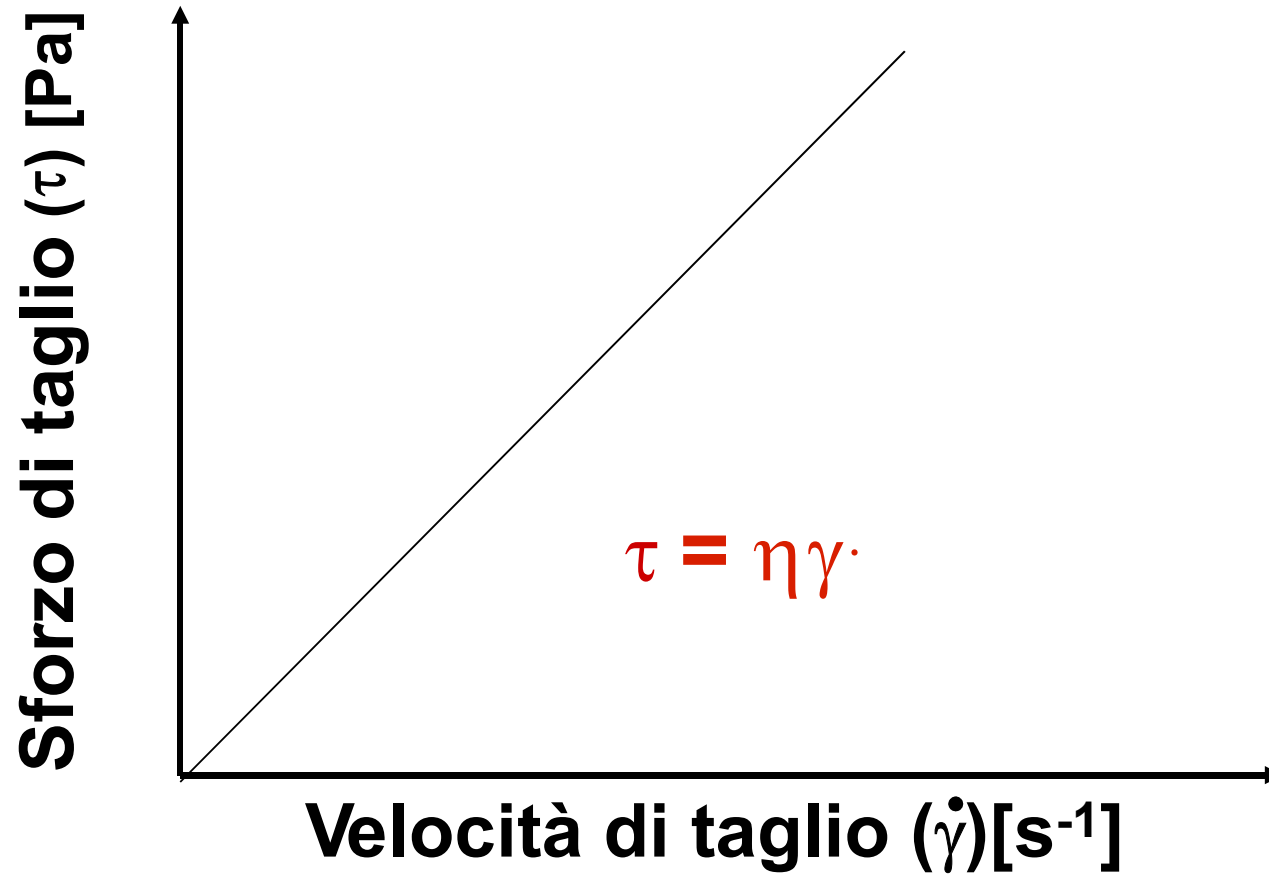
Misura della viscosità



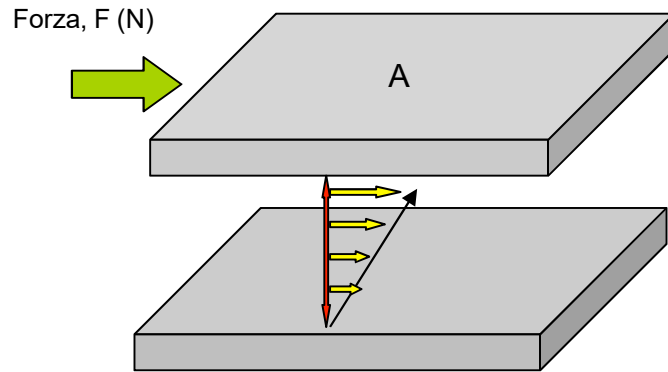
Viene posta in rotazione la parte mobile applicando una velocità di rotazione ($\dot{\gamma}$) o un gradiente di velocità (γ) e si misura la risposta del materiale a questa sollecitazione (si registra lo sforzo necessario per determinare il flusso del materiale)

Test di flusso (flow test): il prodotto è sottoposto ad un gradiente di velocità (γ) 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)

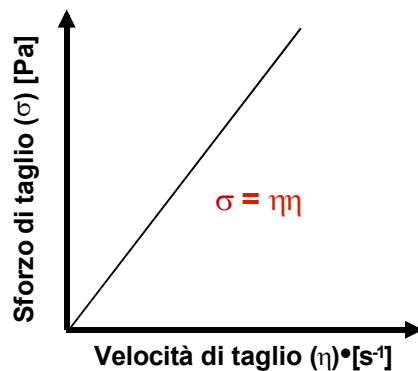


Misura della viscosità



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 ($\dot{\gamma}$) (variabile indipendente) e tramite un dinamometro si misura lo sforzo (variabile dipendente)

Viscosità: interpretazione e misura

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

Unità di misura

η : **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

$$\text{Viscosità} = \eta = \text{sforzo/velocità di taglio } (\tau / \gamma)$$

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⁻¹**)

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

Pseudo-plastici

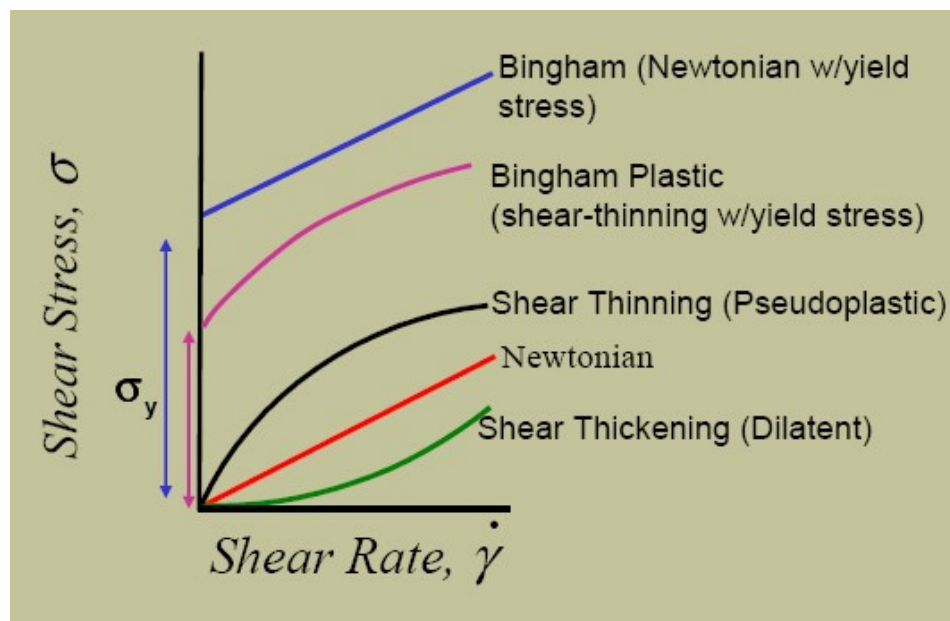
Plastici

Dilatanti

Tempo-dipendenti

Tissotropici

Reopectici



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

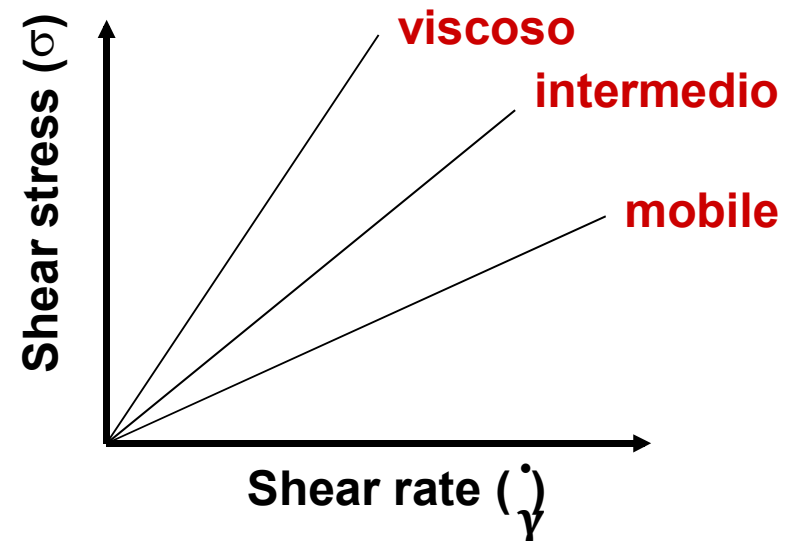
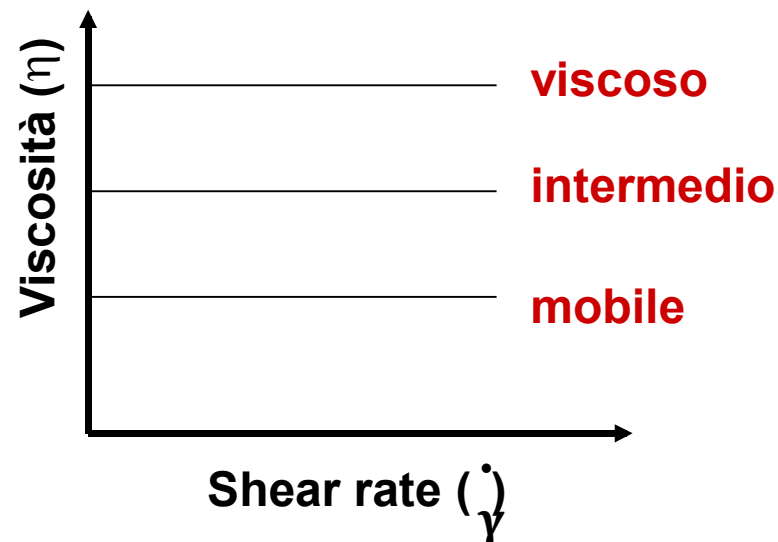
$$\sigma = \eta \dot{\gamma}$$

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

η = costante = **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 ₂	1.48×10^{-5}	Sol. 20% p/p saccarosio	2×10^{-3}
Acqua	1.002×10^{-3}	Sol. 30% p/p saccarosio	6.2×10^{-3}
Carbonio	9.69×10^{-4}	Sol. 40% p/p saccarosio	58.9×10^{-3}
tetracloruro		Miele	6
Olio d'oliva	84×10^{-3}	Latte	2×10^{-3}
Olio di ricino	986×10^{-3}	Etanolo	1.2×10^{-3}
Glicerolo	1.49	Afsalto	1×10^5

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

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

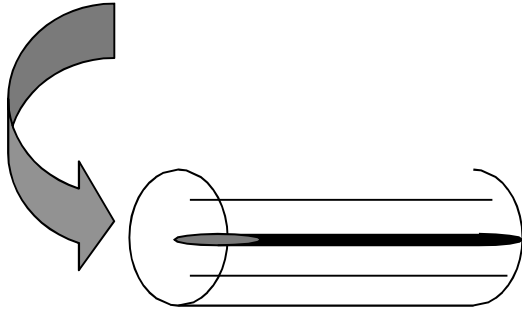
ρ = densità liquido

Q = velocità fluido

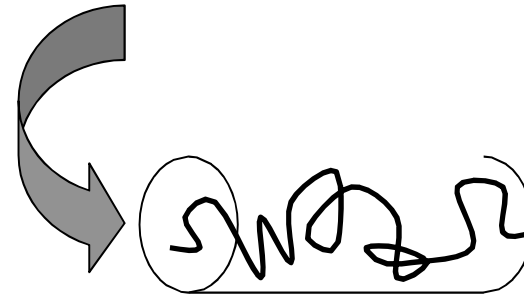
r = raggio tubatura (misura condotta in viscosimetro a tubo)

η = viscosità

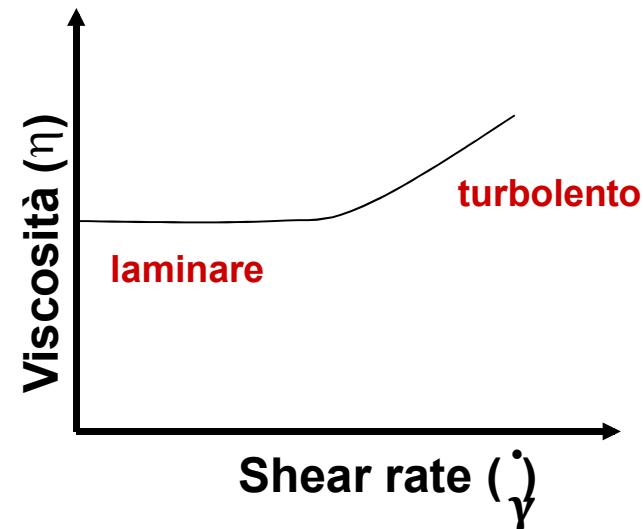
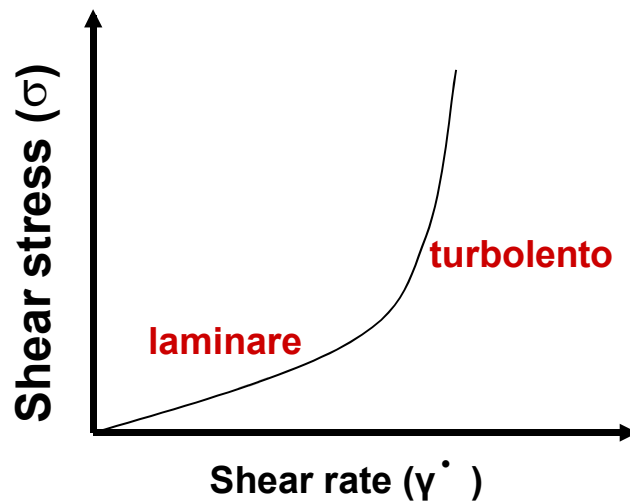
Fluidi: regime laminare e turbolento



Regime laminare



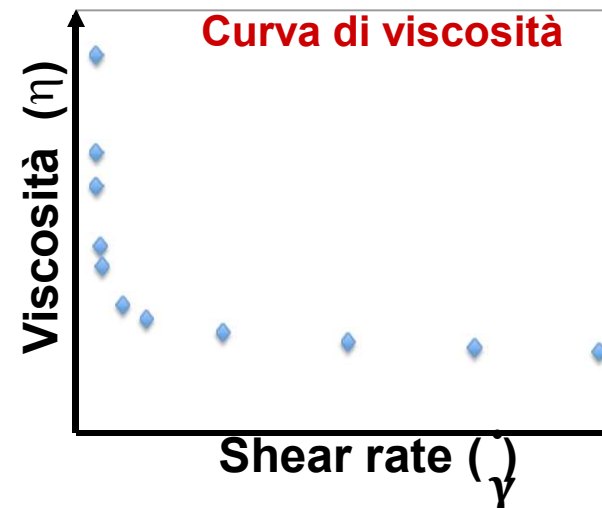
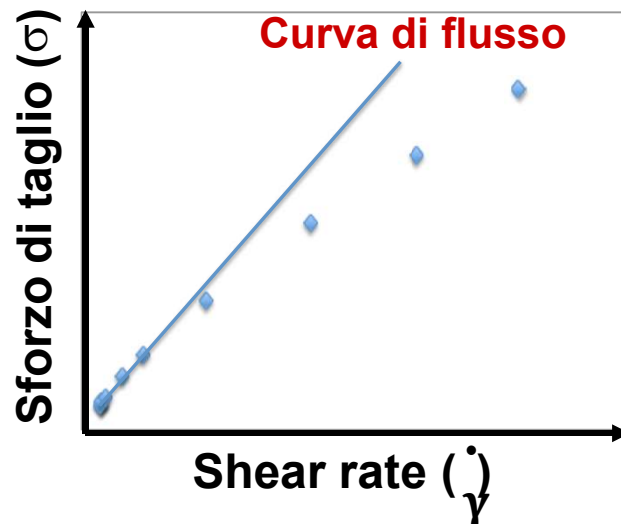
Regime turbolento



N.B. Vale per tutti i fluidi, sia Newtoniani che 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)



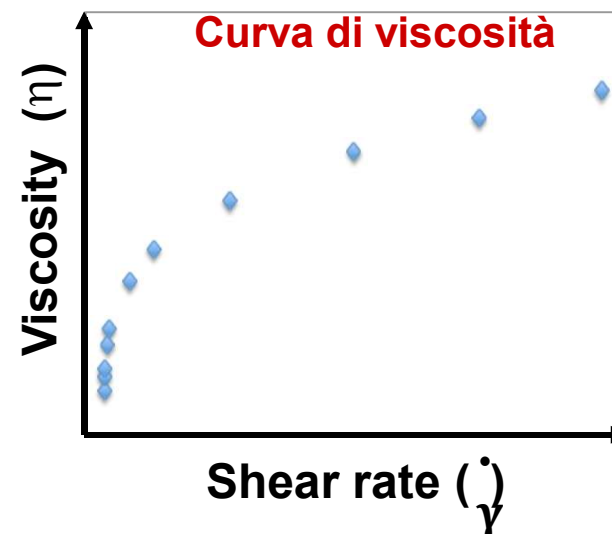
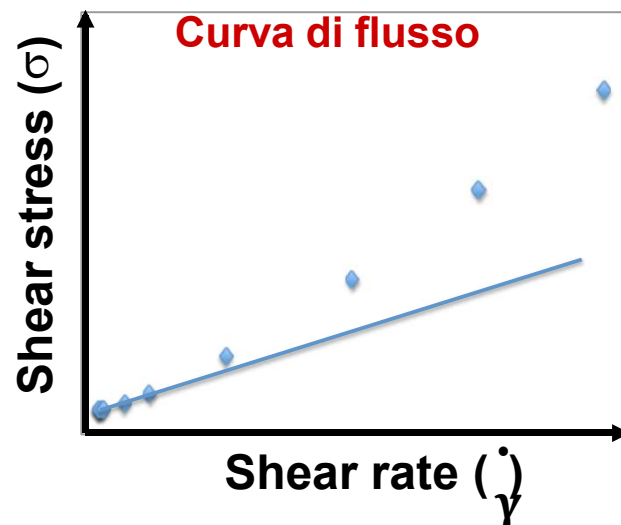
Andamento descrivibile attraverso la seguente equazione

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

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)

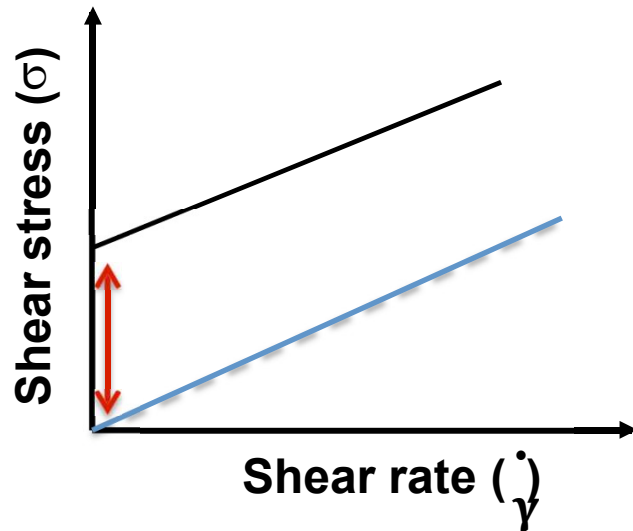


Andamento descrivibile attraverso la seguente equazione

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

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

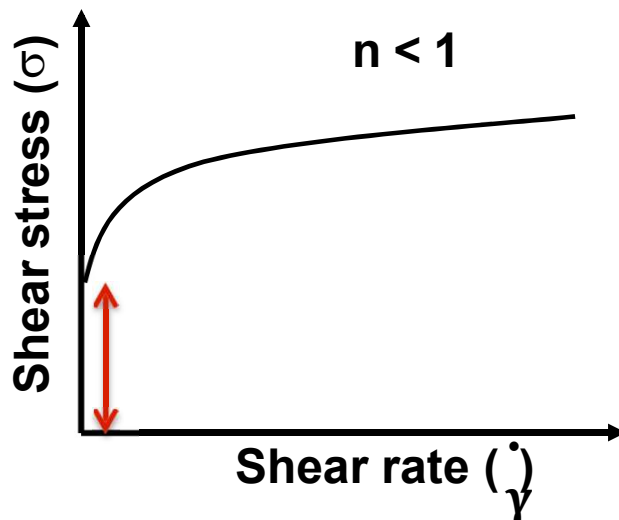
Fluidi non- newtoniani



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

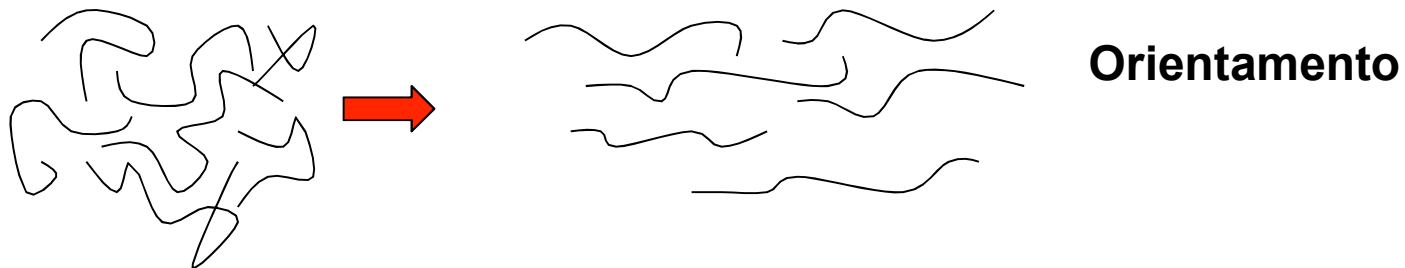
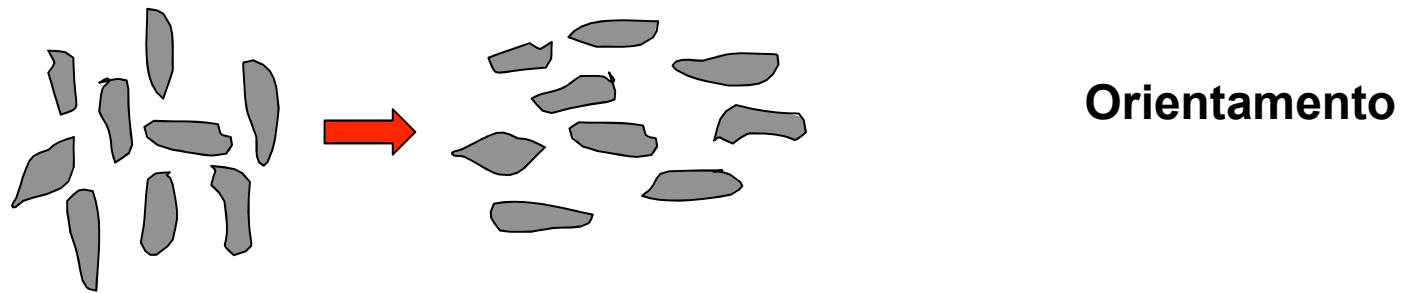
Esempi:

- ❑ 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:

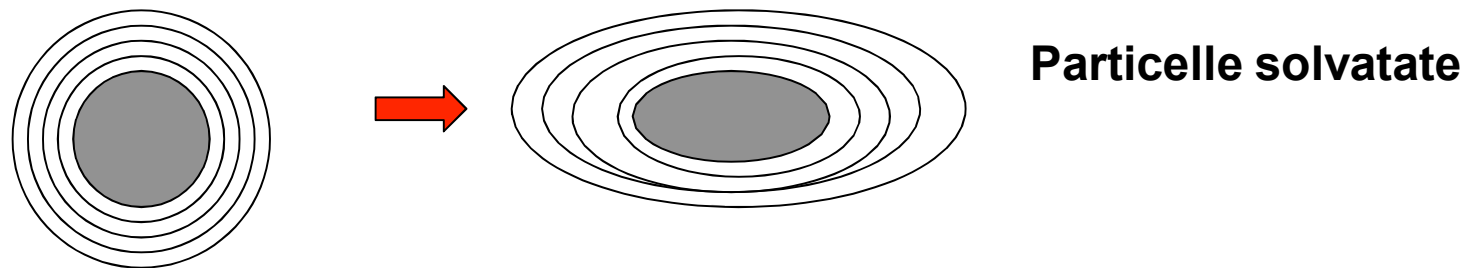
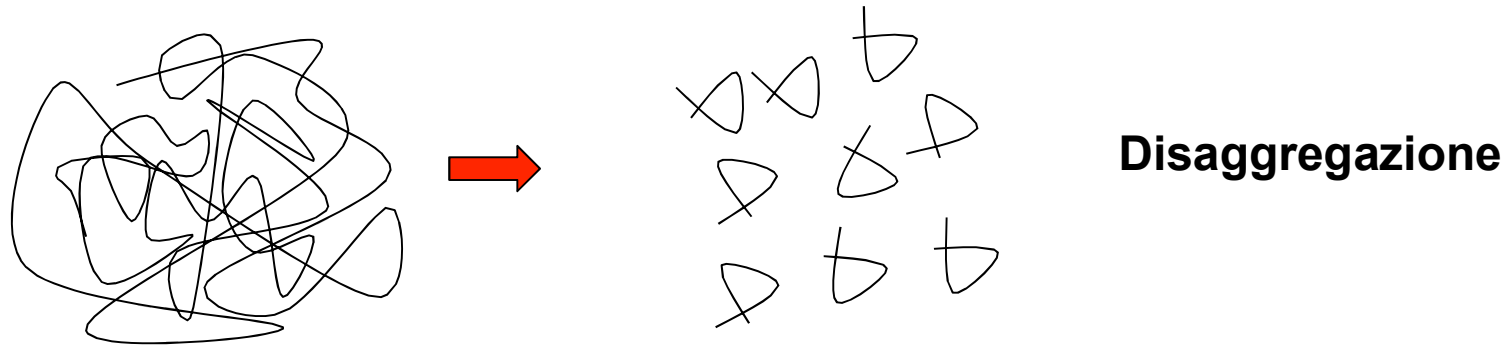
- Natura della fase dispersa e continua (solvente)
 - Interazioni particella-particella e particella-solvente
 - Concentrazione forma e natura chimica delle particelle
-

Fattori strutturali causa del comportamento pseudoplastico



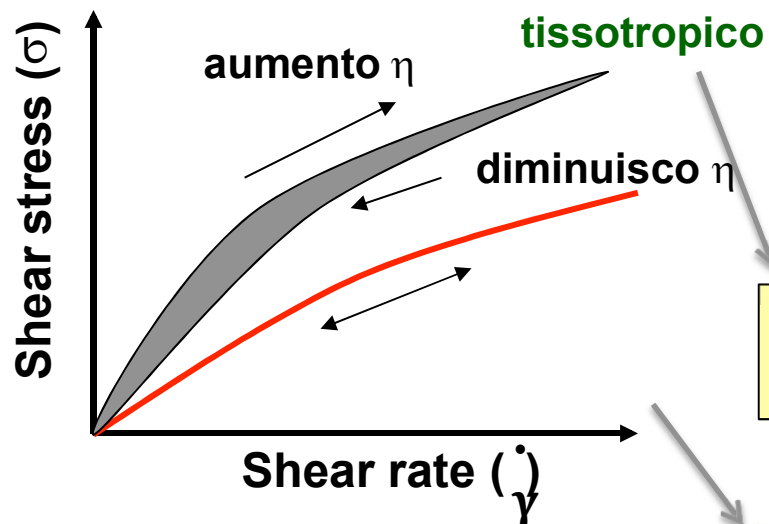
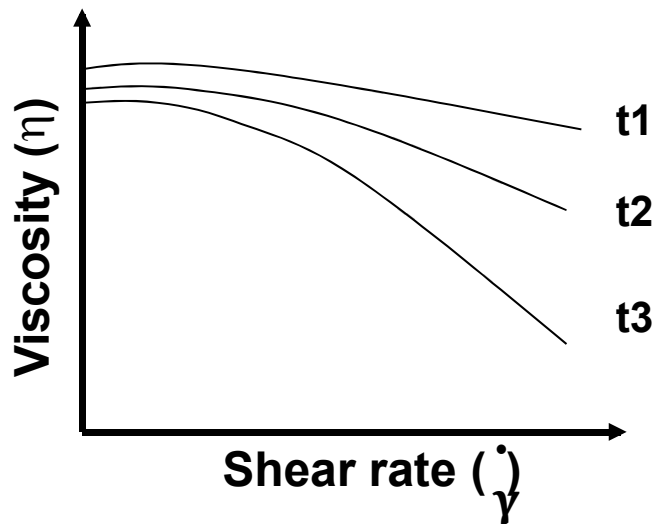
Lo sforzo di taglio provocato dal gradiente di velocità può provocare nel prodotto l'orientamento di particelle o macromolecole (es. componenti fibrosi di un succo di frutta).

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

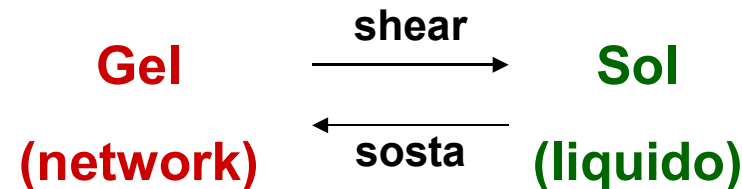
Il fenomeno è reversibile

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

Fluidi plastici (o di Bingham)	cioccolata fusa (fondente, al latte), tomato ketch-up, mostarda, concentrati proteici di soia, margarina, purè.
Fluidi pseudoplastici	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
Fluidi tissotropici	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
- Δv :** 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).

