

Reometri-Principi di funzionamento, geometrie e tipi di flusso

Stefano Guido

Università di Napoli Federico II

Introduzione

I metodi di misura delle proprietà reologiche, come la viscosità, dipendono dal tipo di fluido

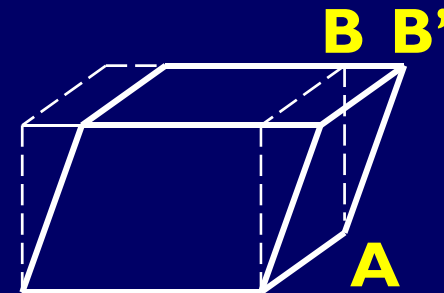
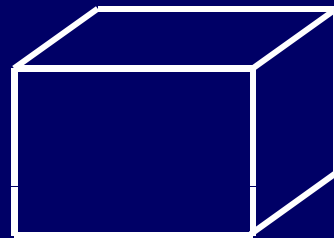
- **Per un fluido Newtoniano la viscosità η non dipende dalle condizioni di flusso del reometro**
- **Nel caso di fluidi non-Newtoniani le misure sono rese più complesse dalla dipendenza della viscosità dal tipo e dall'intensità del flusso imposto**

 **In alcuni casi non è possibile ottenere un valore di η e le misure sono di tipo empirico**

Principali tipologie di flusso in reometria

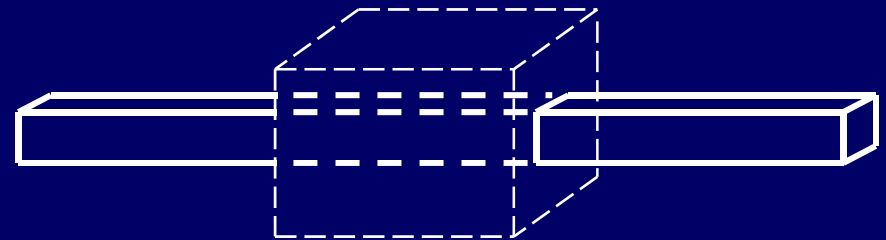
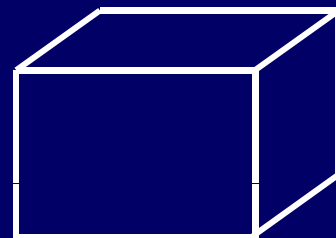
Data la dipendenza di η dal tipo di flusso, in reometria vengono considerati 2 flussi fondamentali

scorrimento (shear)



$$\gamma = \frac{BB'}{AB}$$

elongazionale



Equazione del reometro

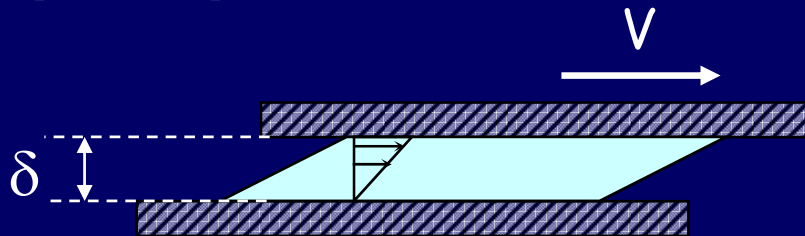
La misura della viscosità viene fatta mediante l'equazione del reometro, che ne descrive il funzionamento

L'equazione viene ricavata da un bilancio di forze (o di coppie nel caso di reometro rotazionale) contenente

- grandezze dinamiche (es., forza, coppia)
- grandezze cinematiche (es., portata, velocità)
- grandezze geometriche
- viscosità (incognita della misura)

Esempio: piatti paralleli

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{\delta}$$



$$F = \frac{\eta VA}{\delta}$$

Classificazione dei reometri

I reometri possono essere raggruppati in 4 categorie in base al tipo di flusso

A) Flusso viscometrico uniforme

La shear rate è uniforme in tutto il campo di moto

B) Flusso viscometrico non uniforme

La shear rate è costante lungo una traiettoria, ma cambia da una traiettoria all'altra

C) Flusso non viscometrico analizzabile

- La shear rate varia anche lungo una traiettoria
- Il flusso presenta anche componenti elongazionali

D) Flusso non analizzabile

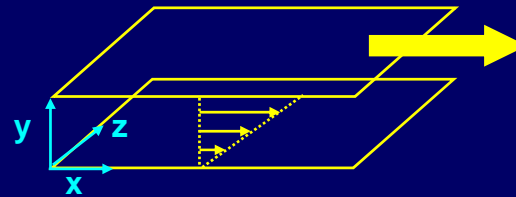
- Non è possibile risolvere in modo esplicito l'eq. del reometro
- Misure di tipo empirico per fluidi non-Newtoniani

Reometri a traiettorie aperte e chiuse – pro e contro

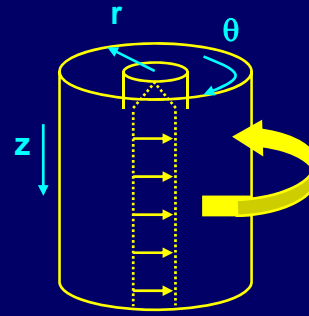
	Traiettorie aperte	Traiettorie chiuse
Esempi	Capillare	Piatto-cono
Effetti inerziali (forze centrifughe)	+	-
Possibilità di raggiungere stazionario	-	+
Controllo transitori	-	+
Effetti di bordo	+	-
Quantità di campione	-	+
Valori elevati di shear rate	+	-

Reometri a flusso viscometrico uniforme

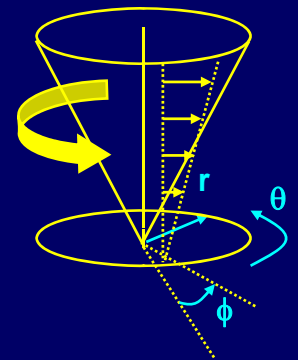
Piatti paralleli traslatori



**Cilindri concentrici
(reometro di Couette)
nell'ipotesi di intercapedine
piccola rispetto al raggio**



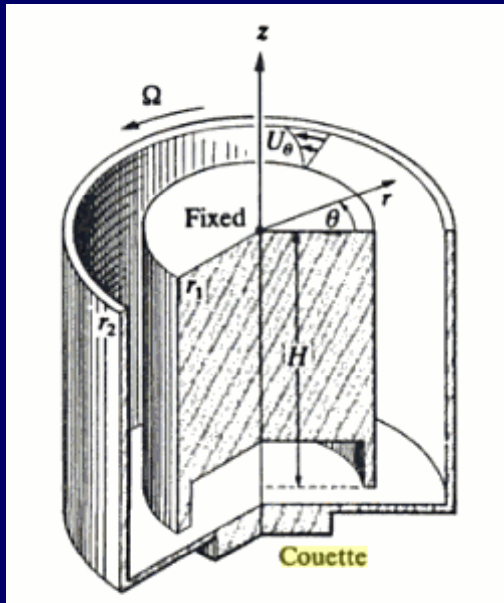
Piatto-cono



**Flusso
rotazionale**

Il flusso è generato dallo scorrimento relativo di due superfici

Reometri rotazionali



- Viene applicata (o misurata) una **COPPIA M**, riconducibile allo sforzo di taglio
- Viene misurata (o applicata) una velocità angolare Ω , riconducibile alla shear rate



Inserendo i valori di **M** e Ω nell'equazione del viscosimetro si ottiene la viscosità

Reometro a stress controllato

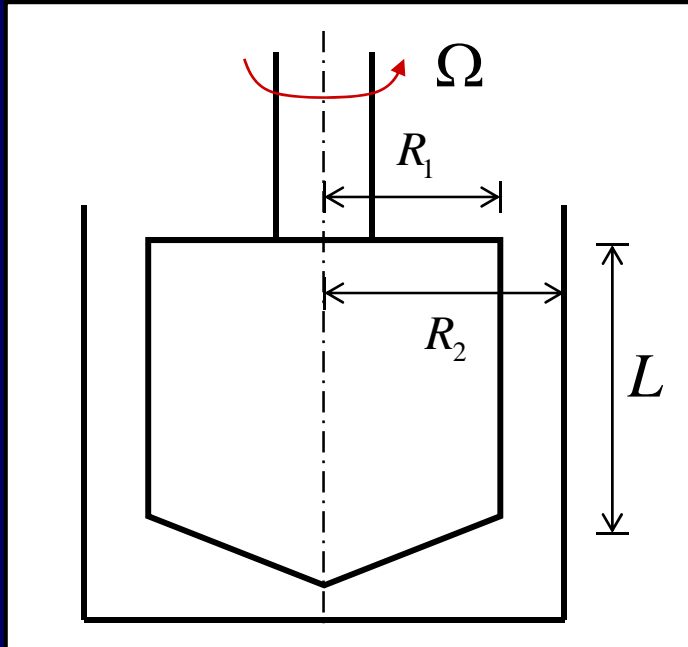
Si impone **M**, si misura Ω

Reometro a deformazione controllata

Si impone Ω , si misura **M**

Reometro di Couette

Nell'ipotesi di intercapedine piccola rispetto al raggio



$$\delta = R_2 - R_1 \ll R_1, R_2$$

$$R_1 \approx R_2 = R$$

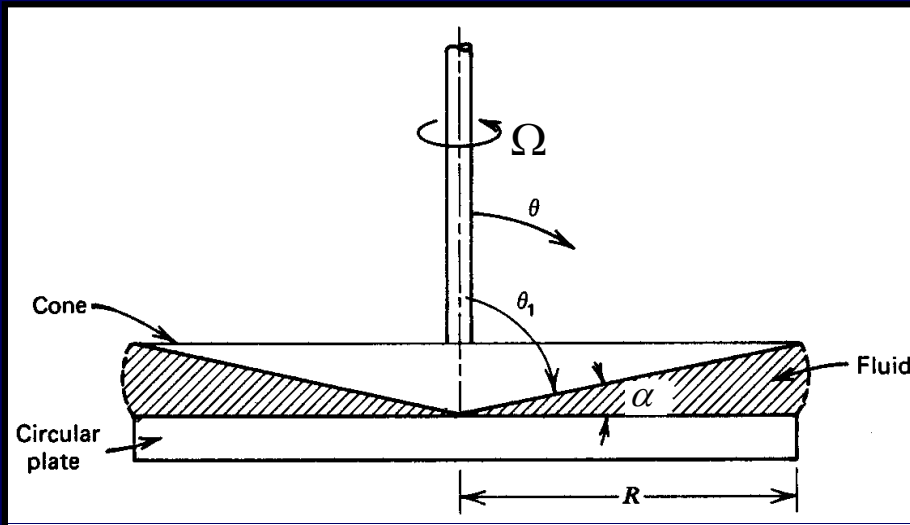
$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega R}{\delta} = \text{costante}$$

Equazione del viscosimetro

$$M = \text{sforzo} \cdot \text{area} \cdot \text{braccio} = \frac{2\pi R^3 L \Omega \eta}{\delta}$$

$$\eta = \frac{M \delta}{2\pi R^3 L \Omega}$$

Reometro piatto-cono



$$\dot{\gamma} \cong \frac{\Omega}{\alpha}$$

per α piccolo

Equazione del viscosimetro

$$M = \int_0^R \tau r 2\pi r dr = \frac{2\pi R^2 \eta \dot{\gamma}}{3}$$

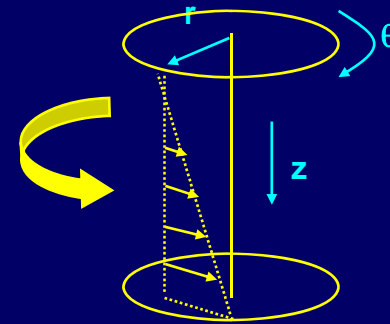
Sforzi normali

$$\eta = \frac{3M\alpha}{2\pi R^3 \Omega}$$

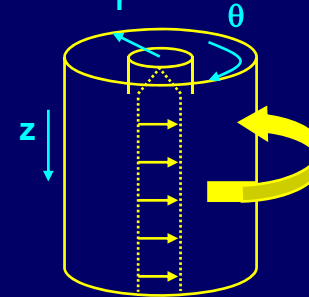
$$N_1 = \frac{2}{\pi R^2} F$$

Reometri a flusso viscometrico non uniforme

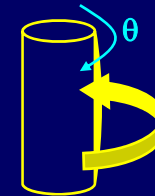
Geometria piatto-piatto



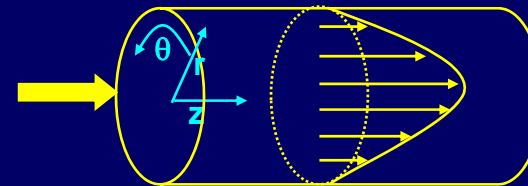
**Cilindri concentrici
(reometro di Couette)
caso generale**



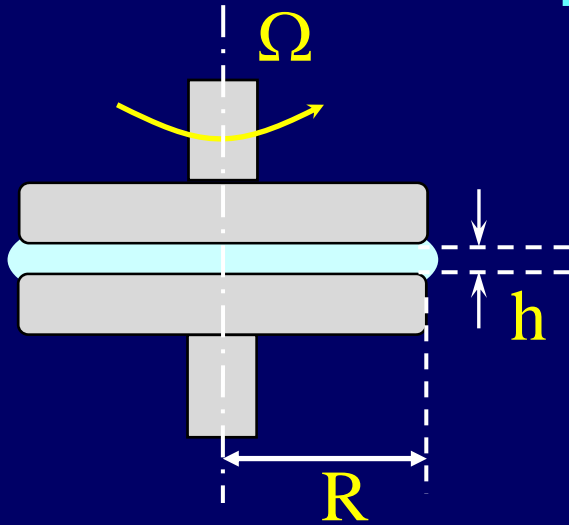
Reometro di Brookfield



Reometro a capillare



Reometro piatto-piatto



$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} = \frac{\Omega r}{h} = \dot{\gamma}(r)$$

Equazione del viscosimetro

Fluidi Newtoniani

$$\eta = \frac{2Mh}{\pi R^4 \Omega}$$

Fluidi non-Newtoniani

$$\eta = \frac{2Mh}{\pi R^4 \Omega} \left[\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d \ln M}{d \ln \dot{\gamma}_R} \right], \quad \dot{\gamma}_R = \frac{\Omega R}{h}$$

Moduli

$$G' = \frac{2M_0 h}{\pi R^4 \gamma_0} \cos \delta$$

$$G'' = \frac{2M_0 h}{\pi R^4 \gamma_0} \sin \delta$$

Viscosimetro di Brookfield

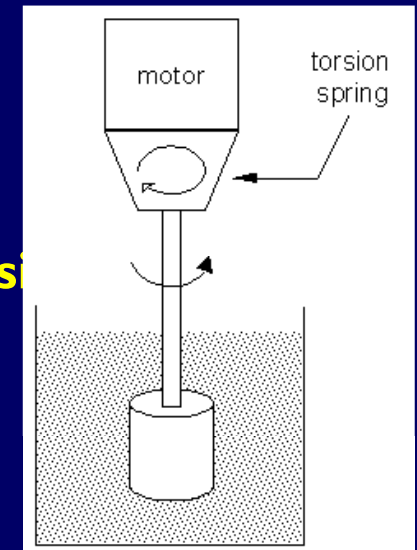


Il rotore è immerso nel fluido da analizzare

Si impone una velocità angolare e si misura la coppia

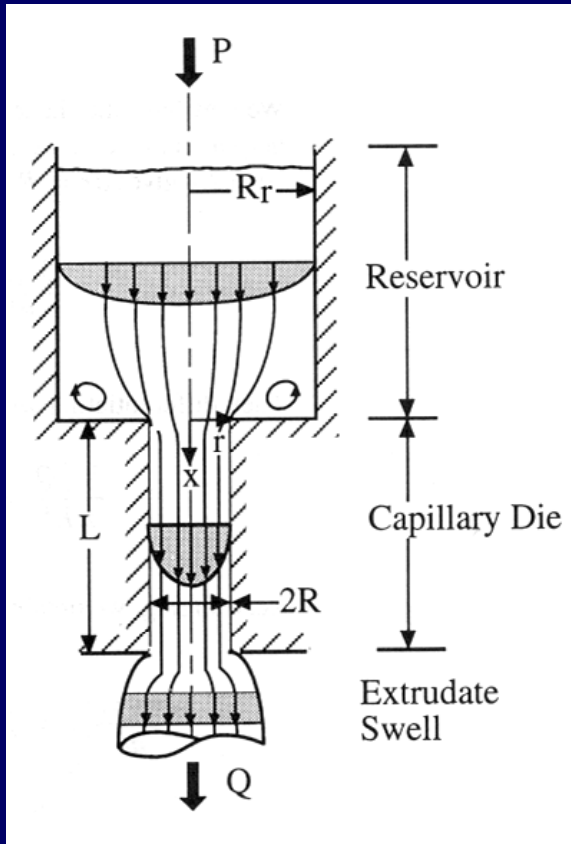


**La viscosità si ricava come
(coppia/velocità angolare)*costante
di calibrazione**



- **Misura rigorosa solo per fluidi Newtoniani**
- **Solo valori indicativi per fluidi non-Newtoniani**
- **Semplicità di utilizzo**
- **Cambiando rotore è possibile misurare un ampio range di viscosità**

Reometro a capillare



$$\dot{\gamma} = -\frac{dv_z}{dr}$$

$$\tau = \frac{\Delta P}{L} r$$

Bilancio di forze

Equazione del viscosimetro

Fluidi Newtoniani (eq. di Poiseuille)

$$Q = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 L \eta}$$



$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 Q L}$$

Fluidi non-Newtoniani (eq. di Mooney-Rabinowitsch)

$$\dot{\gamma}_w = \dot{\gamma}_{app} \left(\frac{3n+1}{4n} \right)$$

$$n = \frac{d \ln(\tau_w)}{d \ln(\dot{\gamma}_{app})}$$

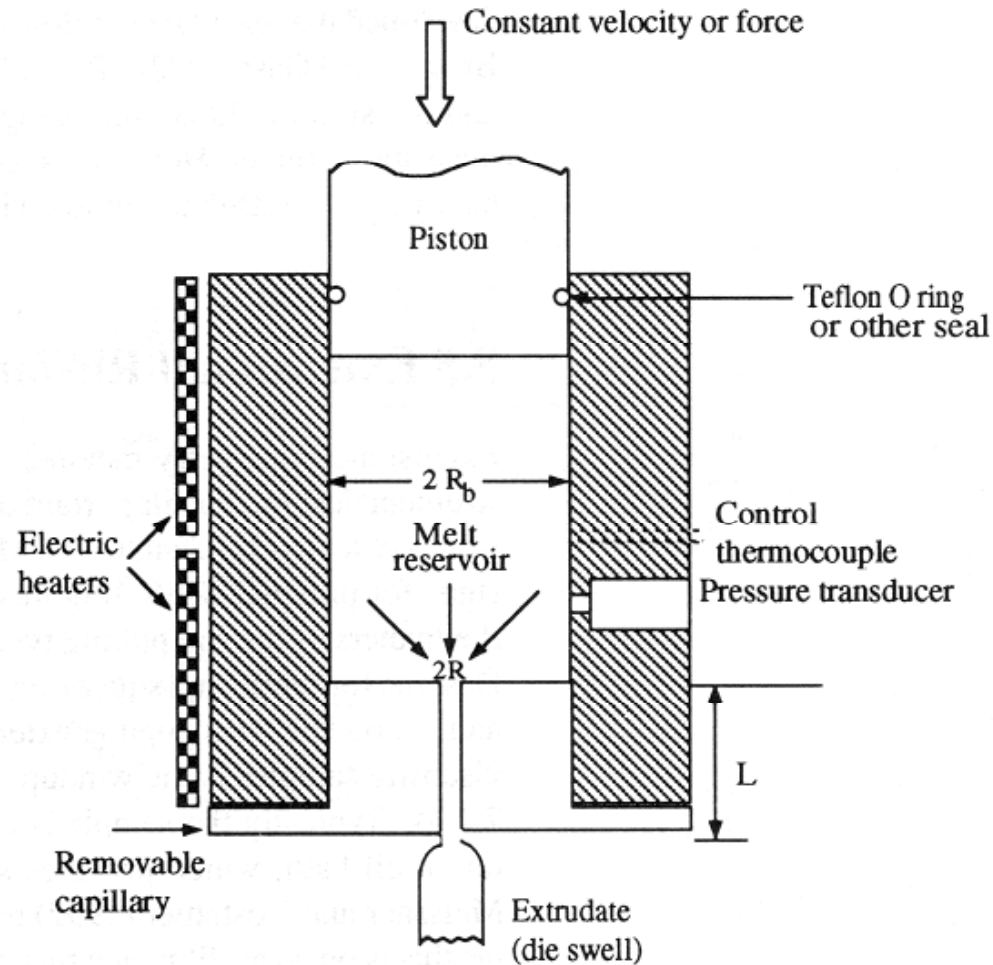


$$\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w}$$

Reometro a capillare

Figure 8.4.3.

Typical melt capillary rheometer (similar to commercial designs of Göttfert, Instron; Kayeness, Monsanto; Rosand, Seiko).



Viscosimetri a capillare di vetro

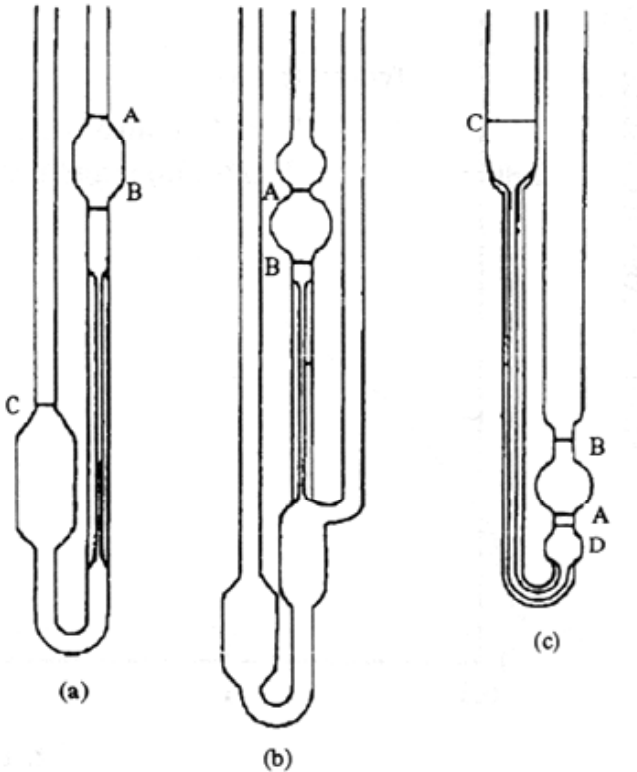
Il flusso attraverso il capillare è generato dalla forza peso

Si misura il tempo di efflusso

$$t = \int_0^{V_t} \frac{dV}{Q(V)} = \frac{8L\eta}{\pi\rho gR^4} \int_0^{V_t} \frac{dV}{h(V)}$$

La costante di proporzionalità tra viscosità cinematica η/ρ e tempo di efflusso viene determinata mediante taratura

$$\frac{\eta}{\rho} = \nu = Kt$$



- a) Ostwald
- b) Ubbelohde
- c) Cannon-Fenske

Viscosità intrinseca

Definizione

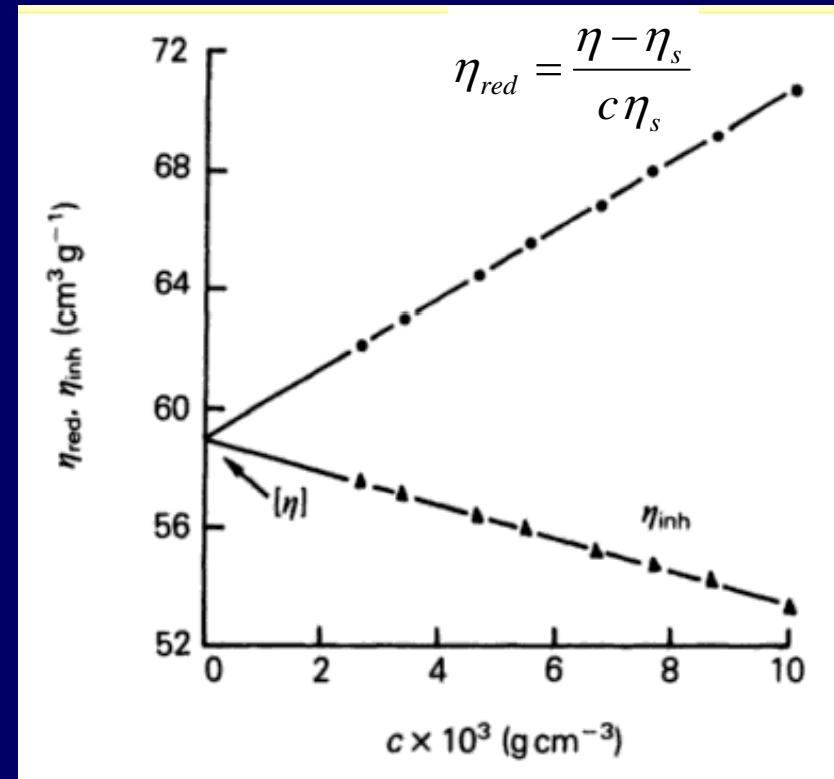
$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta - \eta_s}{\eta_s c}$$

(in cm^3/g)

La viscosità intrinseca è utilizzata per la determinazione del peso molecolare di un polimero

Relazione di Mark-Houwink

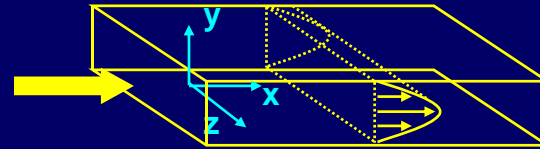
$$[\eta] = KM^a$$



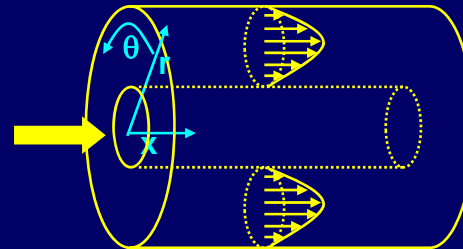
Poly-(tert-butyl acrylate) in toluene

Altre geometrie di flusso a caduta di pressione

Slit flow



Axial annulus flow



**Il moto avviene per differenza di pressione tra l'imbocco e l'uscita
(pressure-driven flow)**

Flusso non viscometrico analizzabile

Viscosimetro a caduta di sfera

L'equazione del viscosimetro si ricava da un bilancio di forze

forza peso

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_s g$$

spinta di Archimede

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \rho g$$

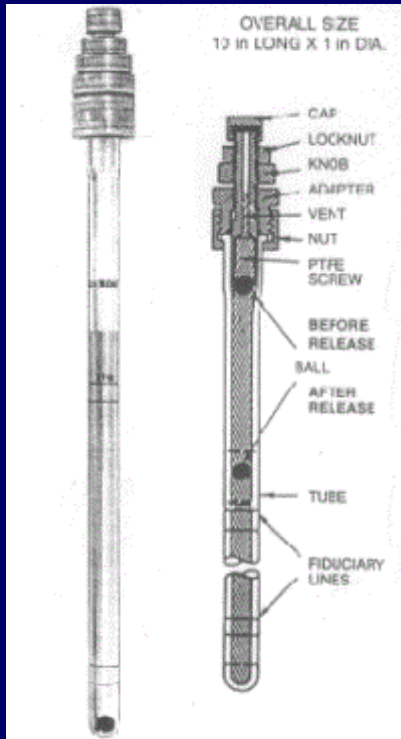
attrito viscoso

$$6\pi R \eta V_\infty$$

$$\frac{4}{3} \pi R^3 (\rho_s - \rho) g - 6\pi \eta R V_\infty = 0$$

$$\eta = \frac{2gR^2(\rho_s - \rho)}{V_\infty}$$

La velocità V_∞ viene misurata con un cronometro



Viscosimetro di Hoesppler
(liquidi opachi)

Flusso non viscometrico analizzabile

Flusso estensionale uniassiale

Strain rate:

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{l} \frac{dl}{dt}$$

Sforzo di trazione:

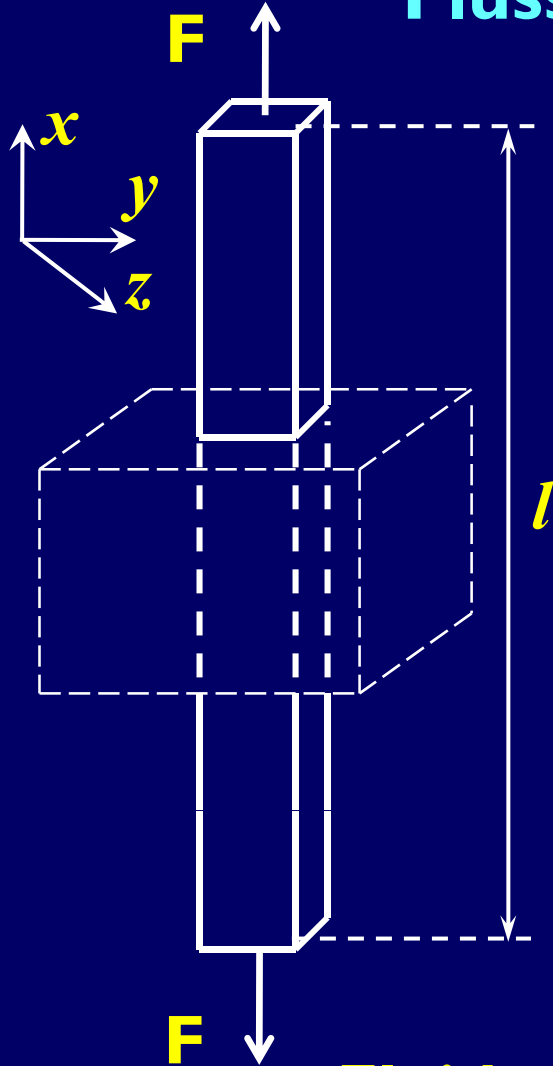
$$\sigma = T_{xx} - T_{yy} = \frac{F}{S}$$

Viscosità elongazionale:

$$\eta_{el}^+(\dot{\epsilon}, t) = \frac{T_{xx} - T_{yy}}{\dot{\epsilon}}$$

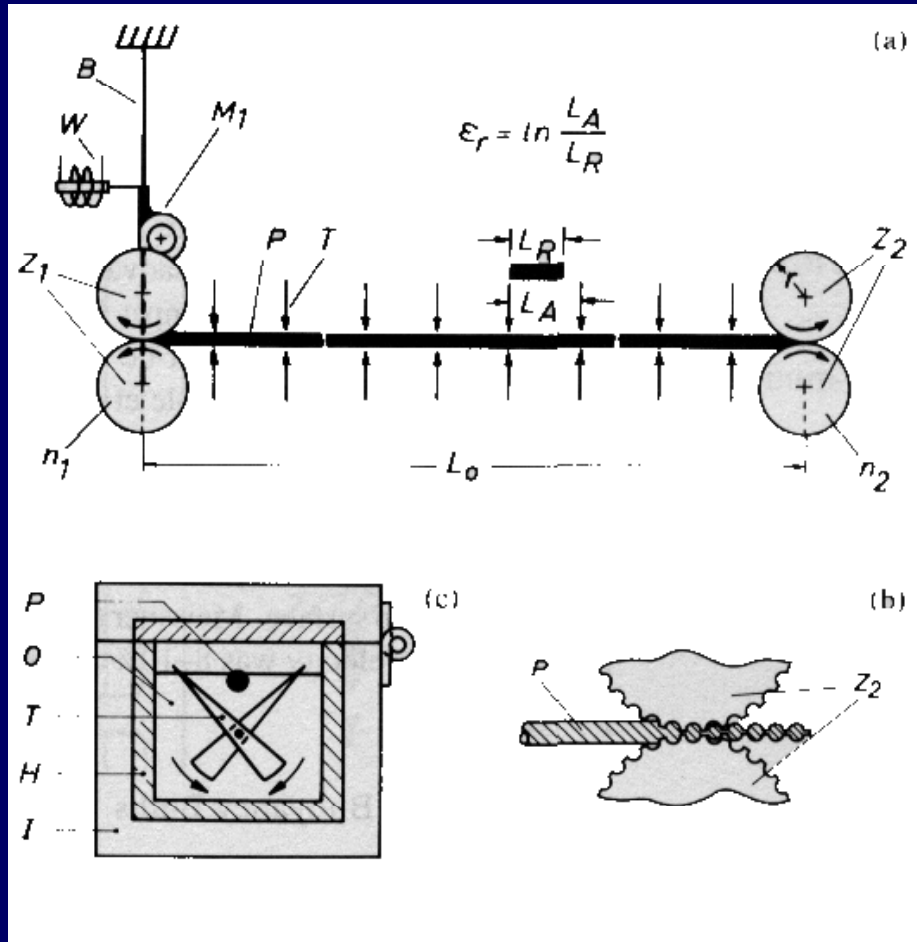
Fluido Newtoniano

$$\eta_{el}^+(\dot{\epsilon}, t) = 3\eta^+(\dot{\gamma}, t) \quad \text{(Trouton ratio)}$$



Reometri a flusso elongazionale uniassiale

Flusso estensionale “constant length”



Adatto per fluidi ad elevata viscosità, che vengono sottoposti a flusso estensionale ad opera di due coppie di ruote dentate con velocità variabile

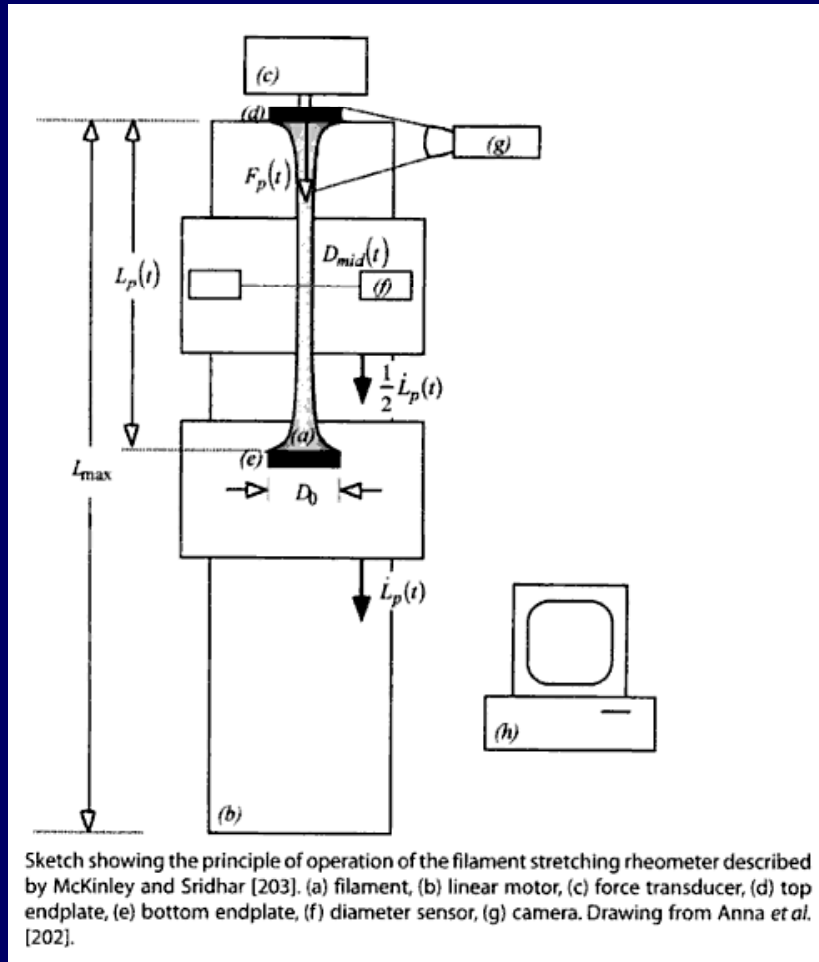
$$\dot{\epsilon} = \frac{(\Omega_1 + \Omega_2)R}{L_0}$$

$$\eta_{el}(t) = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}} = \frac{F(t)}{S_0 \exp(-\dot{\epsilon}t) \dot{\epsilon}}$$



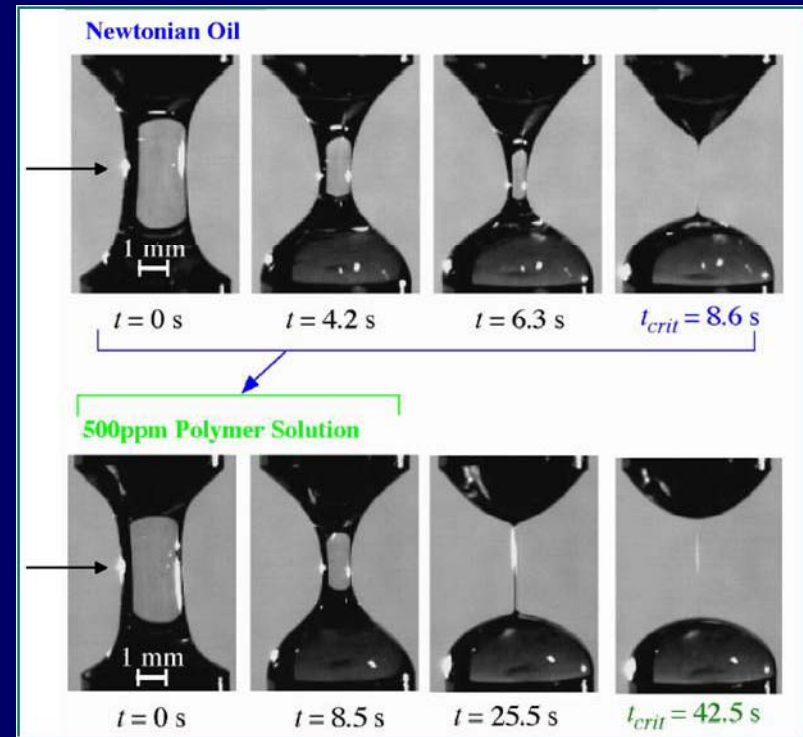
Reometri a flusso elongazionale uniassiale

Filament stretching



G. H. McKinley & T. Sridhar, Annu. Rev. Fluid Mech. 2002, 34:375–415

The Capillary Breakup Extensional Rheometer (CABER™)



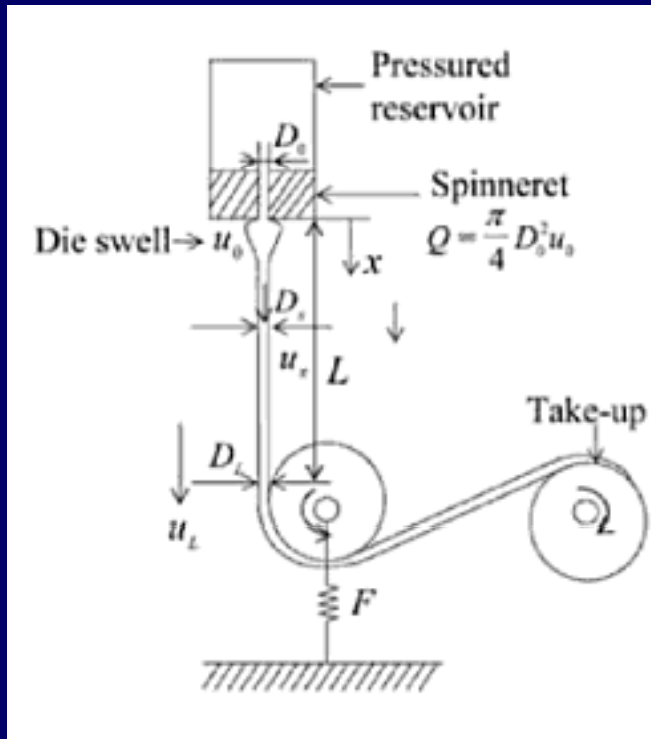
$$D_{mid}(t) = 0.142(\sigma_{int} / \eta_{el})(t_c - t)$$

**Equazione del diametro alla
mezzera per un fluido Newtoniano**

Reometri a flusso elongazionale uniassiale

Fiber spinning

Il fluido in uscita dal serbatoio è esteso mediante una puleggia



$$\sigma_{el} = \frac{F}{\frac{\pi}{4} D_L^2}$$

$$\dot{\epsilon} \cong \frac{u_L}{L}$$


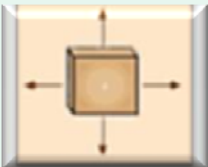
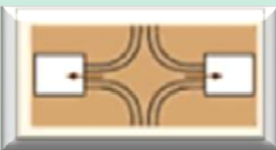
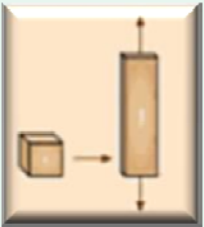

$$\eta_{el} = \frac{\sigma_{el}}{\dot{\epsilon}} \cong \frac{4FL}{\pi D_L^2 u_L}$$



Rheotens

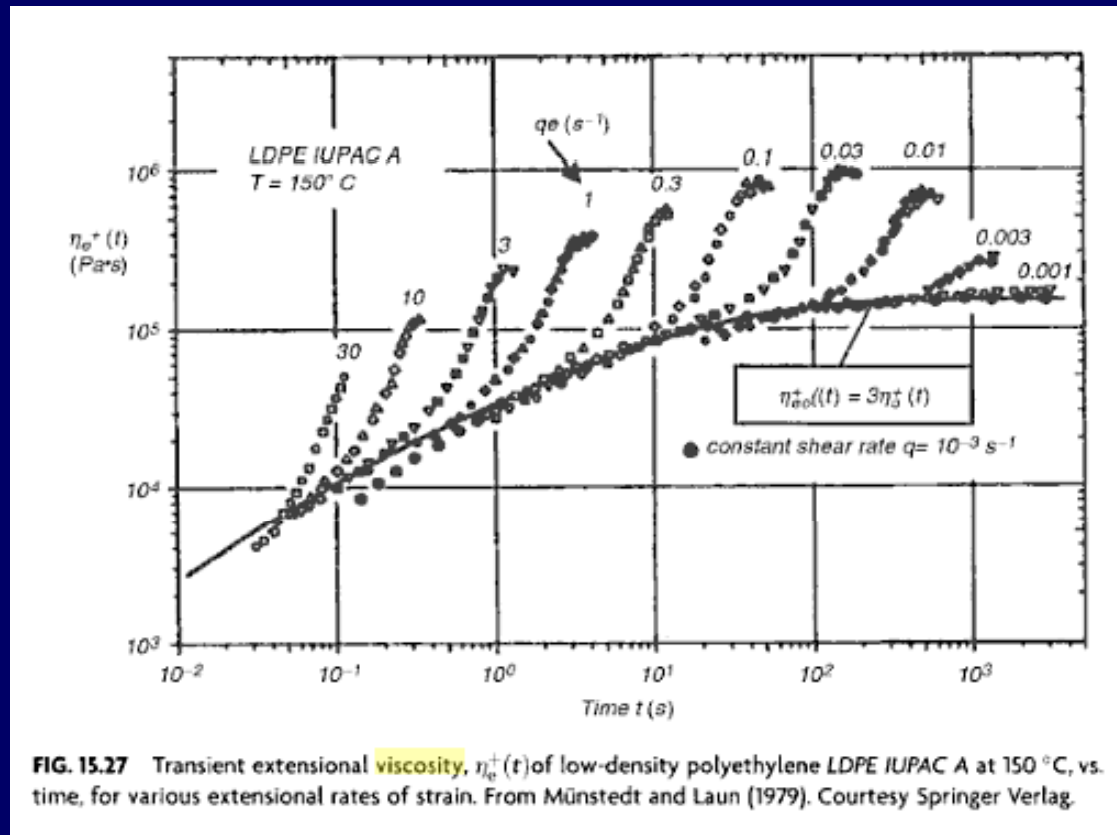
Engineering Fluid Mechanics, Hiroshi Yamaguchi ,
Springer, 2008

Altre geometrie di flusso estensionale

Tipo di strumento	Geometria	Flusso	Shear viscosity range (Pa·s)	Limiti
Entrance flows		Elongazionale uniassiale	> 1	Strain rate variabile, componenti di shear
Sheet stretching		Elongazionale biassiale	> 1000	Sample gripping, disuniformità di flusso
Opposed jet		Elongazionale uniassiale	$0.01 - 1$	Strain rate e storia della deformazione variabili, componenti di shear
Planar elongation		Elongazionale planare, strain rate costante	> 1000	Preparazione del campione. Elongazione planare limitata a piccole estensioni
Four-roll mill		Elongazionale uniassiale	$1 - 1000$	Strain rate e storia della deformazione variabili

Adattato da "Springer handbook of experimental fluid mechanics, Cameron Tropea, Alexander L. Yarin, John F. Foss , Springer, 2007"

Viscosità elongazionale in transitorio



Extensional thickening

Properties of Polymers: Their Correlation with Chemical Structure; Their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions, D.W. van Krevelen, Klaas te Nijenhuis, Elsevier, 2009