

# **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  $\eta$  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**

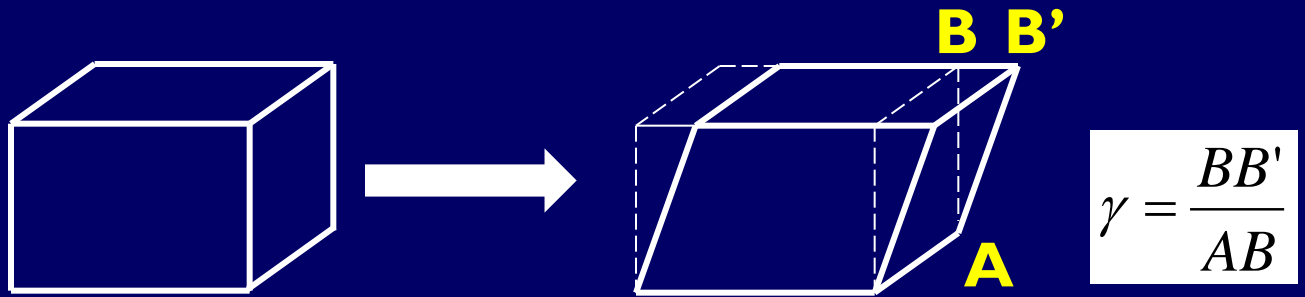


**In alcuni casi non è possibile ottenere un valore di  $\eta$  e le misure sono di tipo empirico**

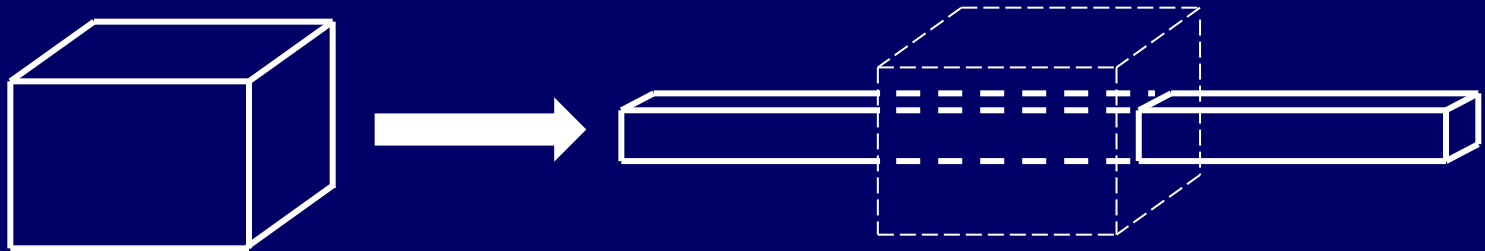
# Principali tipologie di flusso in reometria

Data la dipendenza di  $\eta$  dal tipo di flusso, in reometria vengono considerati 2 flussi fondamentali

scorrimento (shear)



elongazionale



# Equazione del reometro

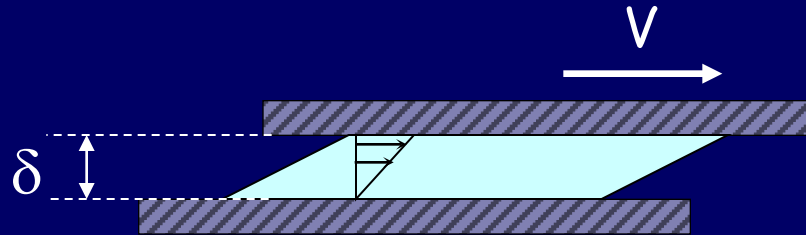
La misura della viscosità viene fatta mediante l'equazione del reometro, che ne descrive il funzionamento

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

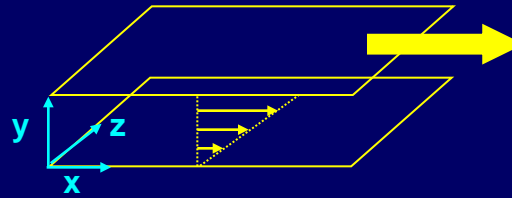
- Non è possibile risolvere in modo esplicito l'eq. del reometro
- Misure di tipo empirico per fluidi non-Newtoniani

# Reometri a traiettorie aperte e chiuse – pro e contro

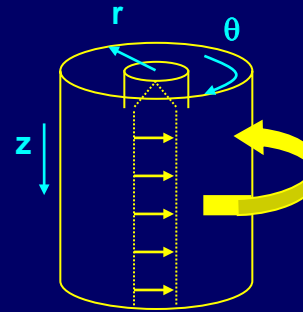
	Traiettorie aperte	Traiettorie chiuse
Esempi	Capillare	Piatto-cono
Effetti inerziali (forze centrifughe)	+	-
Possibilità di raggiungere stazionario	-	+
Controllo transitori	-	+
Effetti di bordo	+	-
Quantità di campione	-	+
Valori elevati di shear rate	+	-

# Reometri a flusso viscometrico uniforme

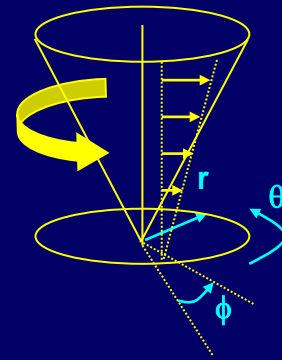
**Piatti paralleli traslatori**



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



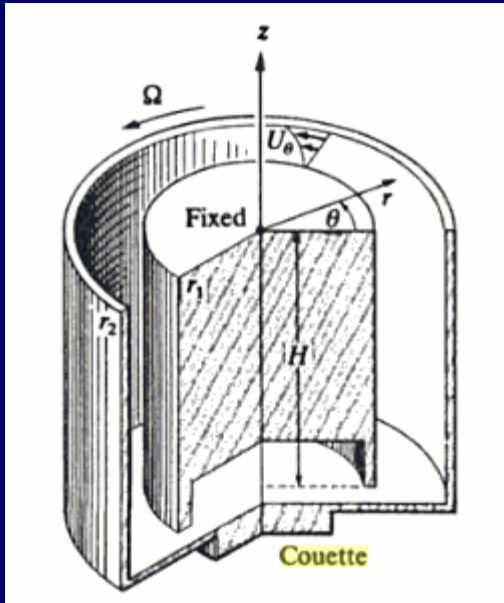
**Piatto-cono**



**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  $\Omega$ , riconducibile alla shear rate



Inserendo i valori di  $M$  e  $\Omega$  nell'equazione del viscosimetro si ottiene la viscosità

## Reometro a stress controllato

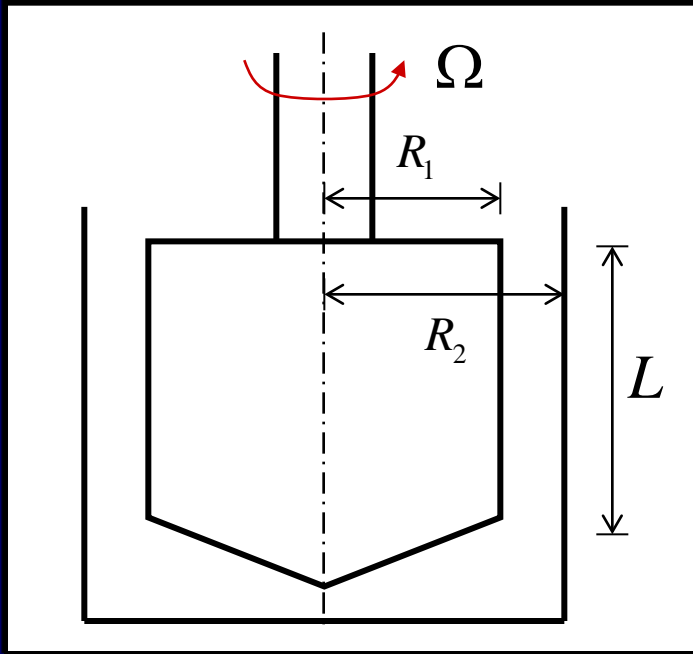
Si impone  $M$ , si misura  $\Omega$

## Reometro a deformazione controllata

Si impone  $\Omega$ , si misura  $M$

# Reometro di Couette

Nell'ipotesi di intercapedine piccola rispetto al raggio



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

$$R_1 \approx R_2 = R$$

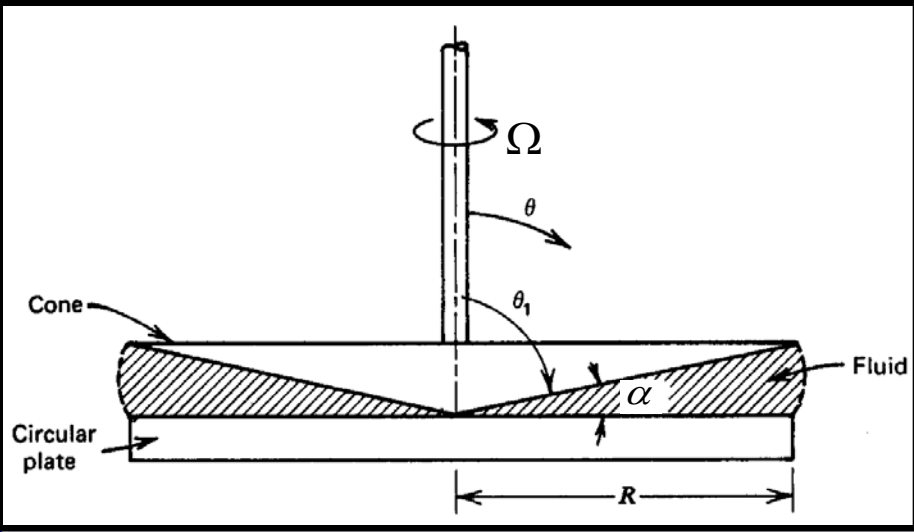
$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega R}{\delta} = \text{costante}$$

**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  $\alpha$  piccolo

**Equazione del viscosimetro**

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

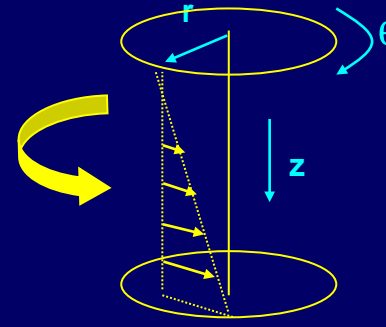
$$\eta = \frac{3M\alpha}{2\pi R^3 \Omega}$$

**Sforzi normali**

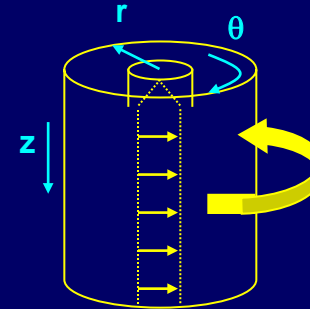
$$N_1 = \frac{2}{\pi R^2} F$$

# Reometri a flusso viscometrico non uniforme

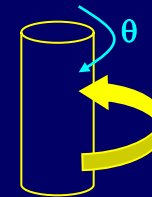
**Geometria piatto-piatto**



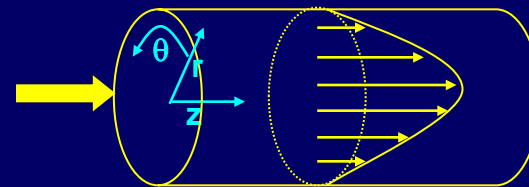
**Cilindri concentrici  
(reometro di Couette)  
caso generale**



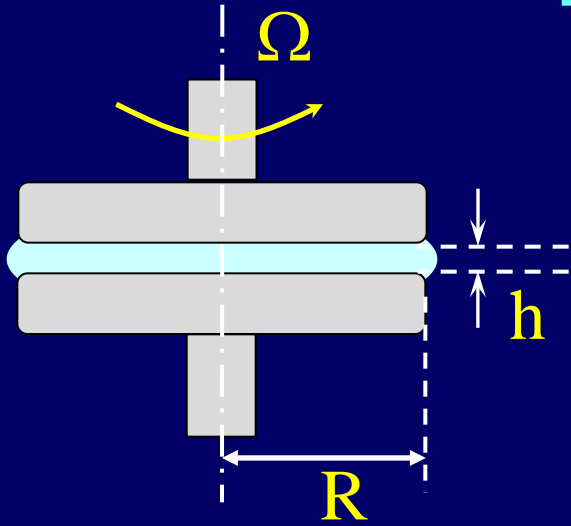
**Reometro di Brookfield**



**Reometro a capillare**



# Reometro piatto-piatto



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

## Equazione del viscosimetro

**Fluidi Newtoniani**

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

# Viscosimetro di Brookfield

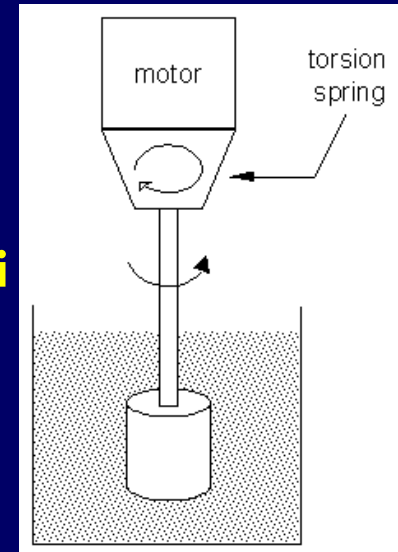


**Il rotore è immerso nel fluido da analizzare**

**Si impone una velocità angolare e si misura la coppia**

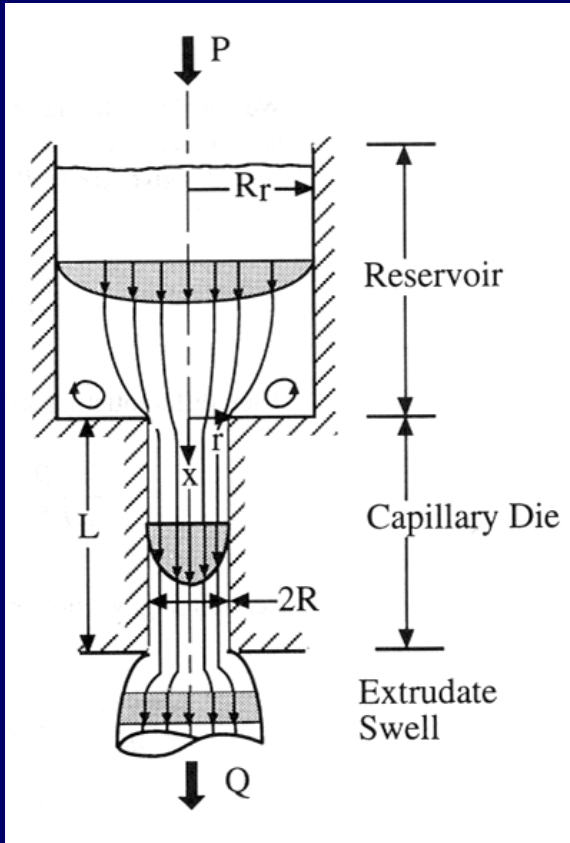


**La viscosità si ricava come  
(coppia/velocità angolare)\*costante  
di calibrazione**



- **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



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

$$\tau = \frac{\Delta P}{L} \frac{r}{2}$$

Bilancio di forze

Equazione del viscosimetro

Fluidi Newtoniani (eq. di Poiseuille)

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

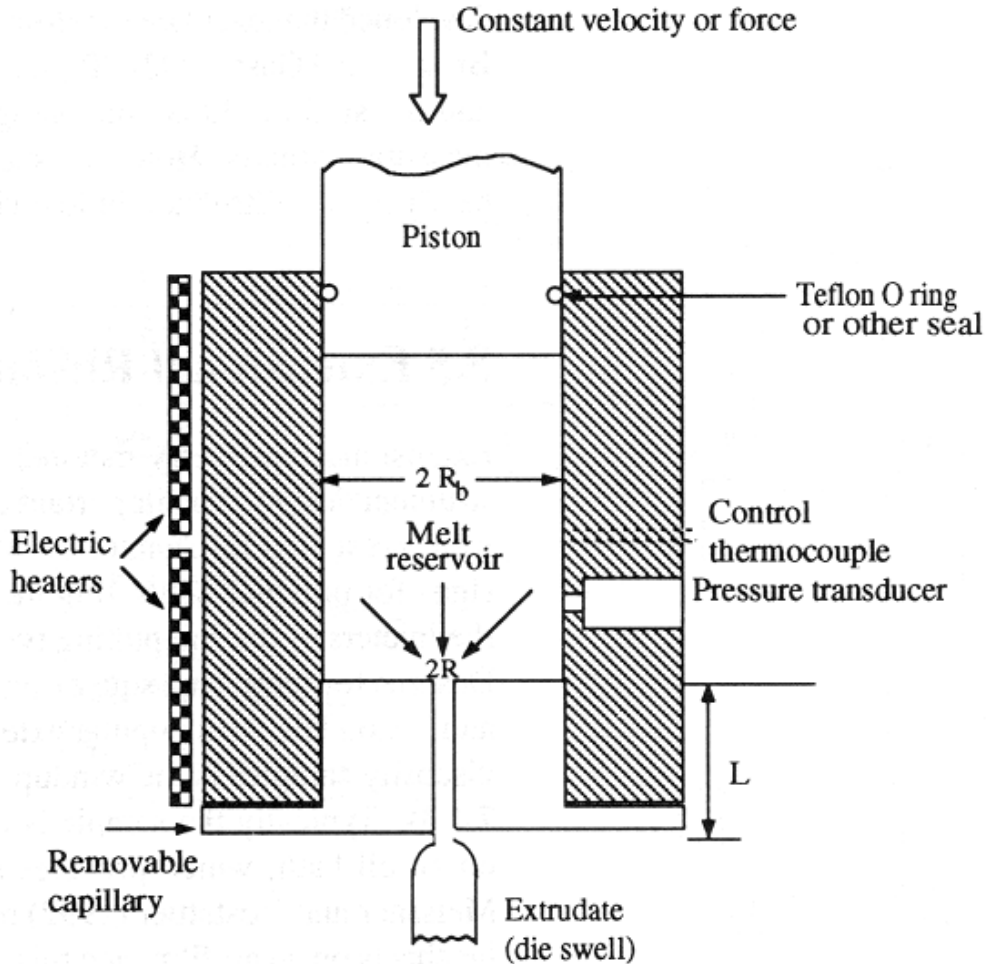


$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8QL}$$

# 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

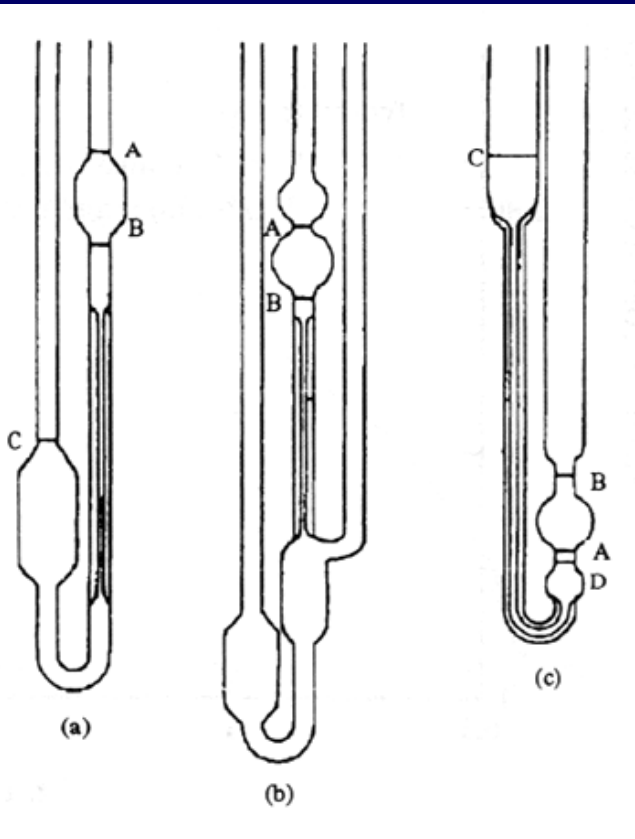
Il flusso attraverso il capillare è generato dalla forza peso

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  $\eta/\rho$  e tempo di efflusso viene determinata mediante taratura

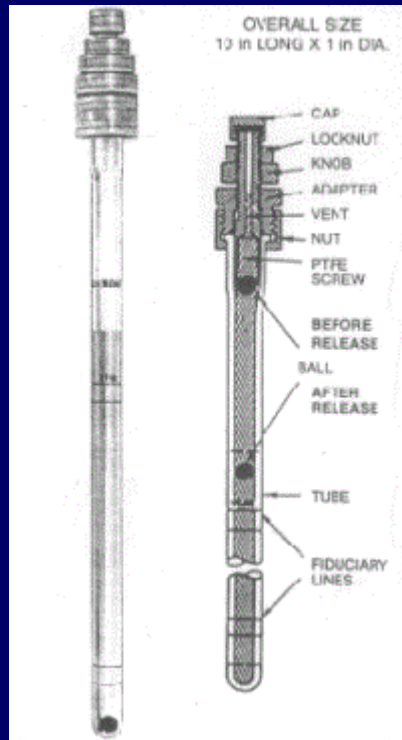
$$\frac{\eta}{\rho} = \nu = Kt$$



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

# 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

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

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



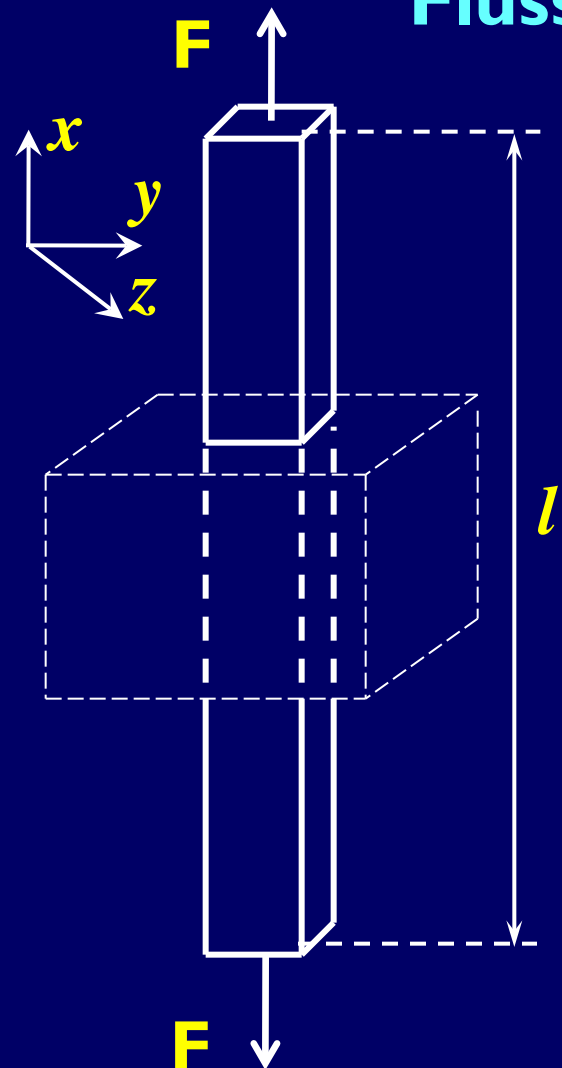
$$\eta = \frac{2gR^2(\rho_s - \rho)}{V_\infty}$$

Viscosimetro di Hoesppler  
(liquidi opachi)



La velocità  $V_\infty$  viene  
misurata con un  
cronometro

# Flusso non viscometrico analizzabile



Flusso estensionale uniassiale

Strain rate:

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

Sforzo di trazione:

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

Viscosità elongazionale:

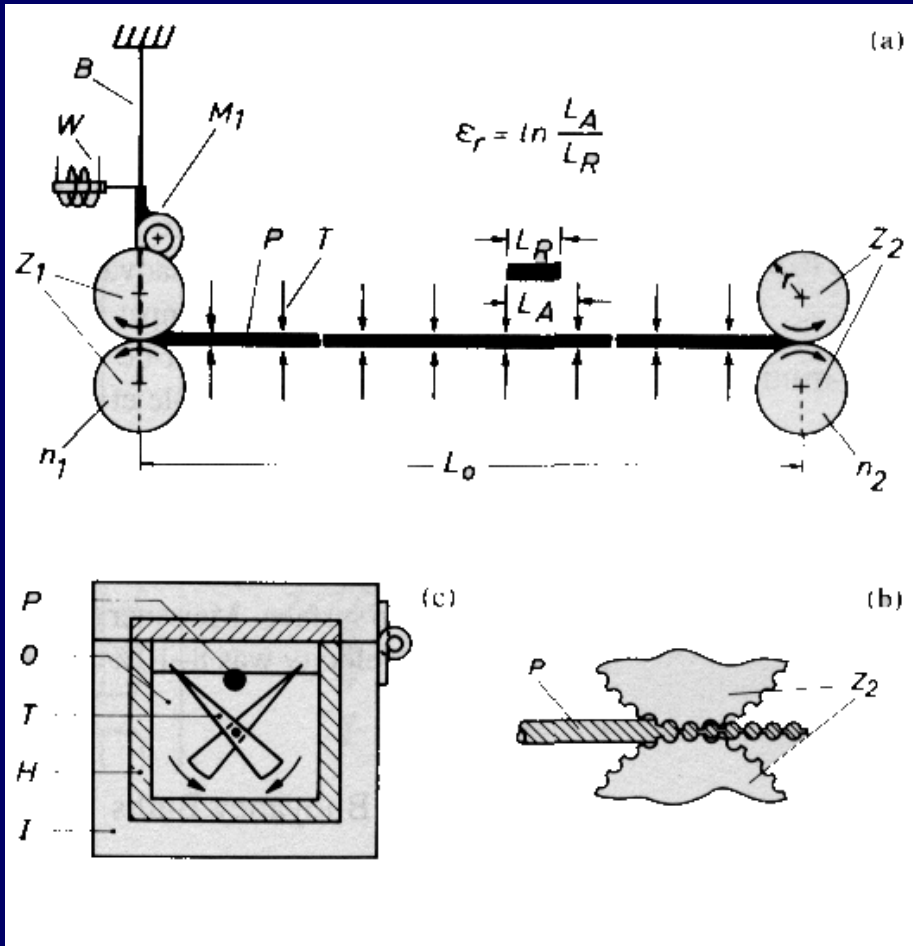
$$\eta_{el}^+(\dot{\varepsilon}, t) = \frac{T_{xx} - T_{yy}}{\dot{\varepsilon}}$$

Fluido Newtoniano

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

# 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**

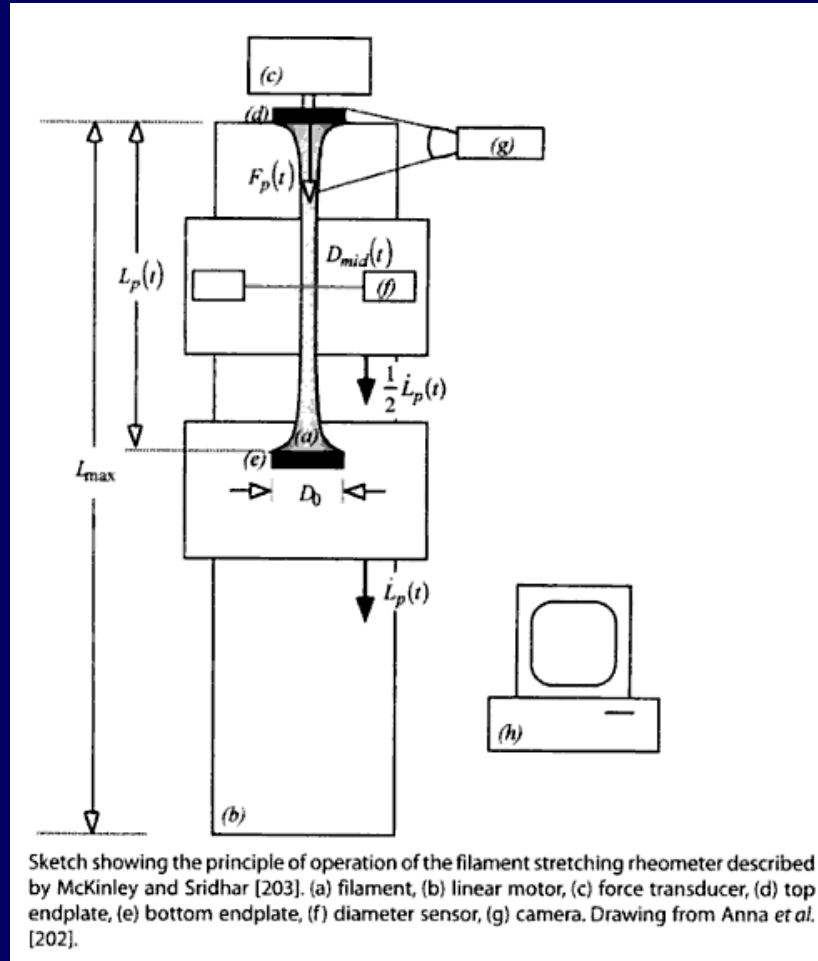
$$\dot{\epsilon} = \frac{(\Omega_1 + \Omega_2)R}{L_0} \quad \eta_{el}(t) = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}} = \frac{F(t)}{S_0 \exp(-\dot{\epsilon}t)\dot{\epsilon}}$$



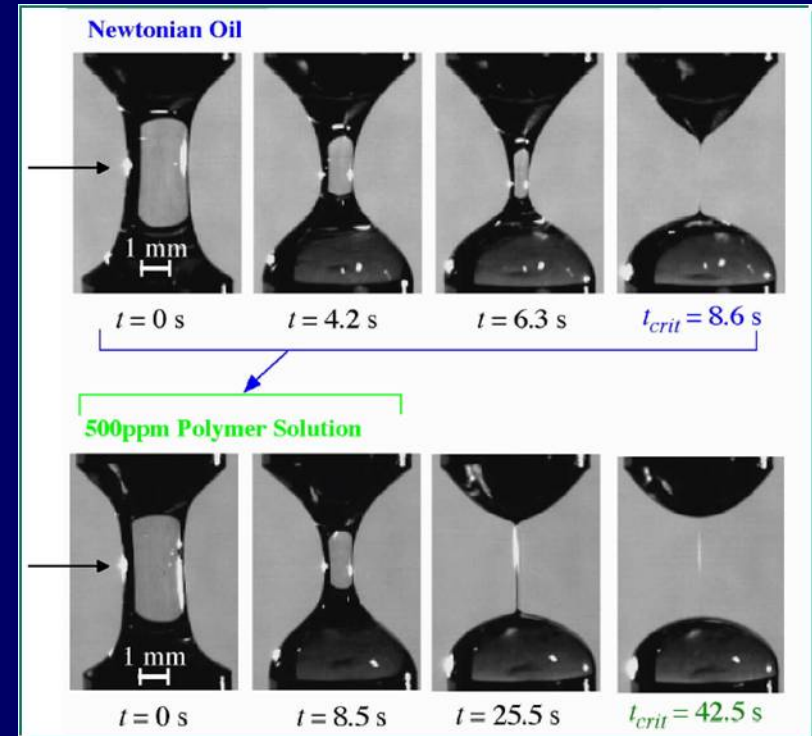
**SER extensional rheometer**

# Reometri a flusso elongazionale uniassiale

## Filament stretching



## The Capillary Breakup Extensional Rheometer (CABER™)



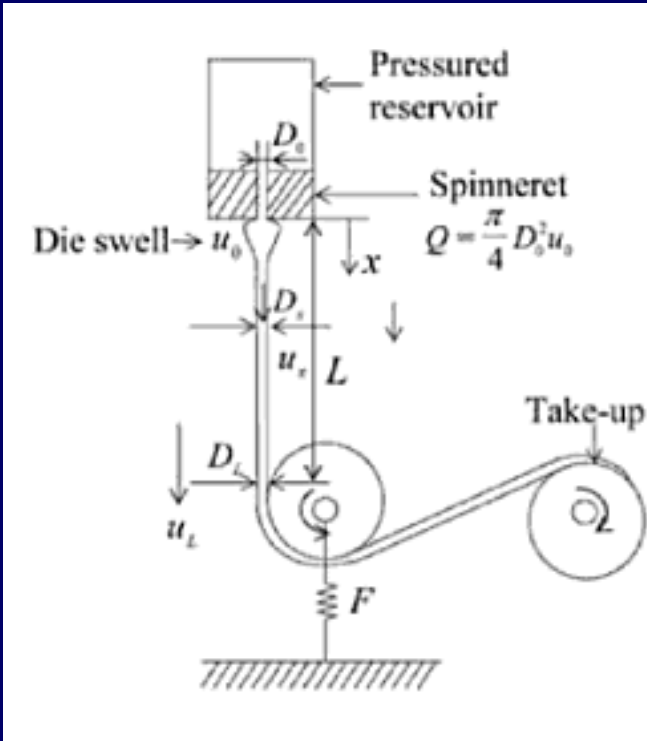
$$D_{mid}(t) = 0.142(\sigma_{int} / \eta_{el})(t_c - t)$$

**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



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

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

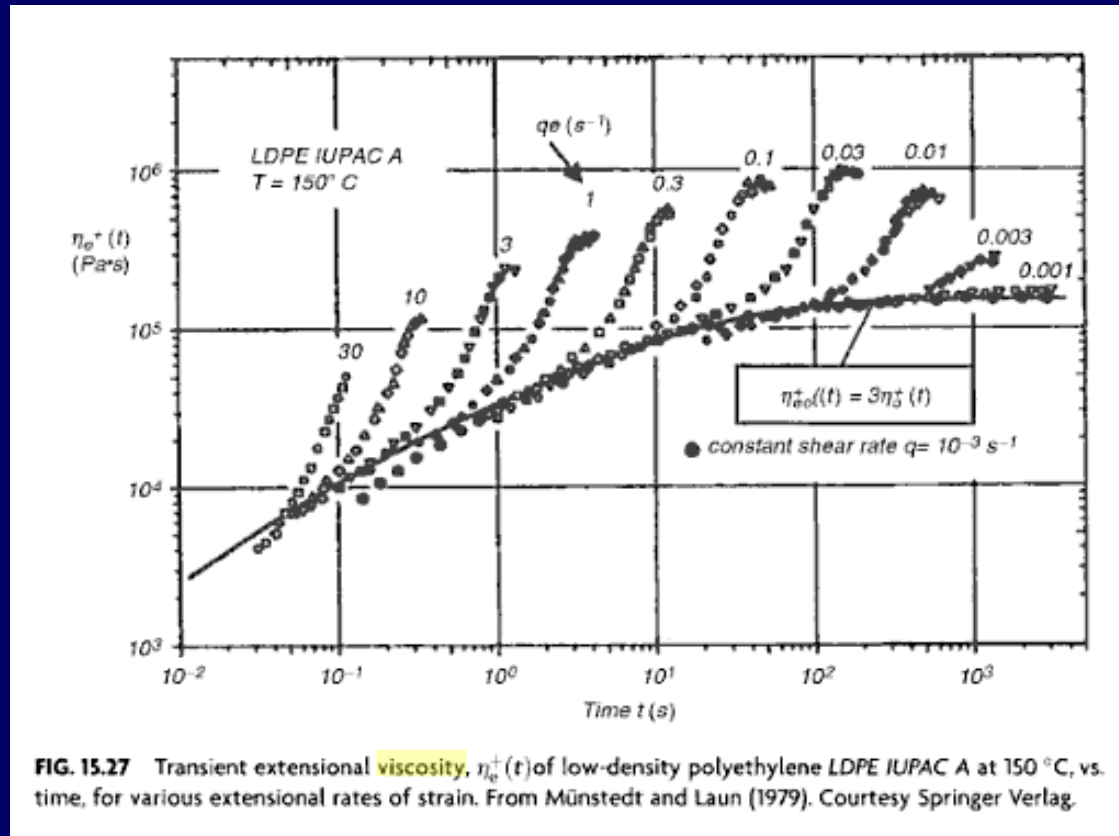
$$\eta_{el} = \frac{\sigma_{el}}{\dot{\epsilon}} \cong \frac{4FL}{\pi D_L^2 u_L}$$

Engineering Fluid Mechanics, Hiroshi Yamaguchi ,  
Springer, 2008



Rheotens

# Viscosità elongazionale in transitorio



## Extensional thickening

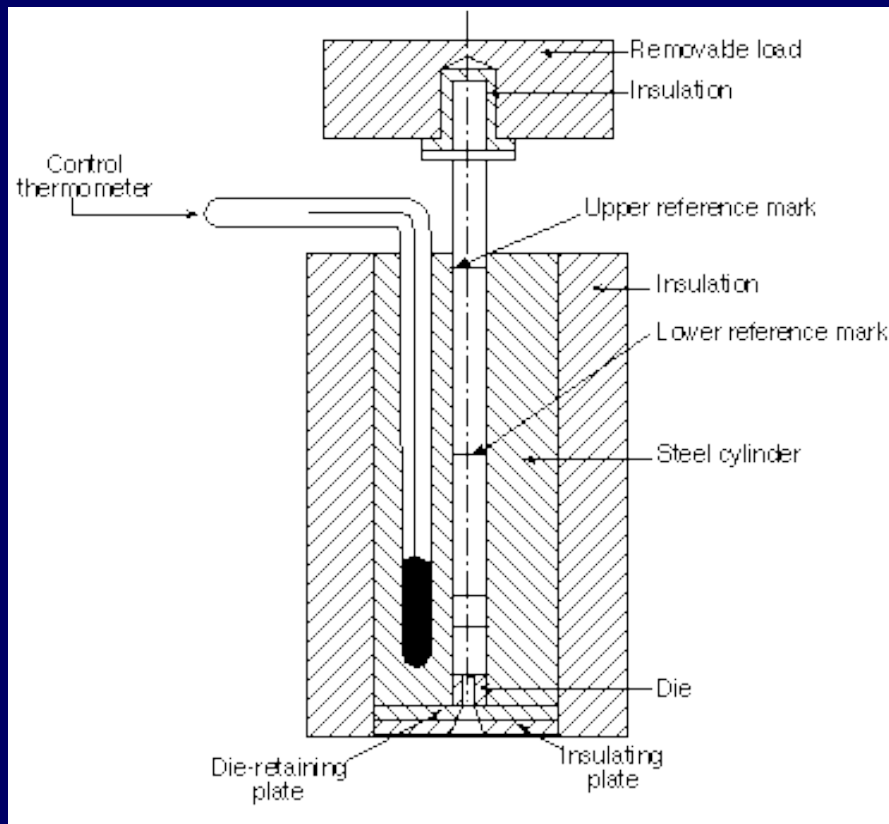
Properties of Polymers: Their Correlation with Chemical Structure; Their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions, D.W. van Krevelen, Klaas te Nijenhuis, Elsevier, 2009

# Viscosità elongazionale in transitorio

# Reometri a flusso non analizzabile

- Si tratta di strumenti per i quali non è possibile ricavare un'equazione del reometro in forma analitica
  - Nel caso di fluidi Newtoniani si può pervenire ad un'equazione per la viscosità effettuando una taratura
  - Nel caso di fluidi non-Newtoniani è possibile ottenere una misura qualitativa della viscosità, ad esempio un tempo di flusso sotto l'azione di una forza assegnata (ad esempio, un peso noto) utilizzando degli standard
- 
- Melt Flow Index
  - Coppa Ford
  - Cono Marsh

# Melf Flow Index (MFI)

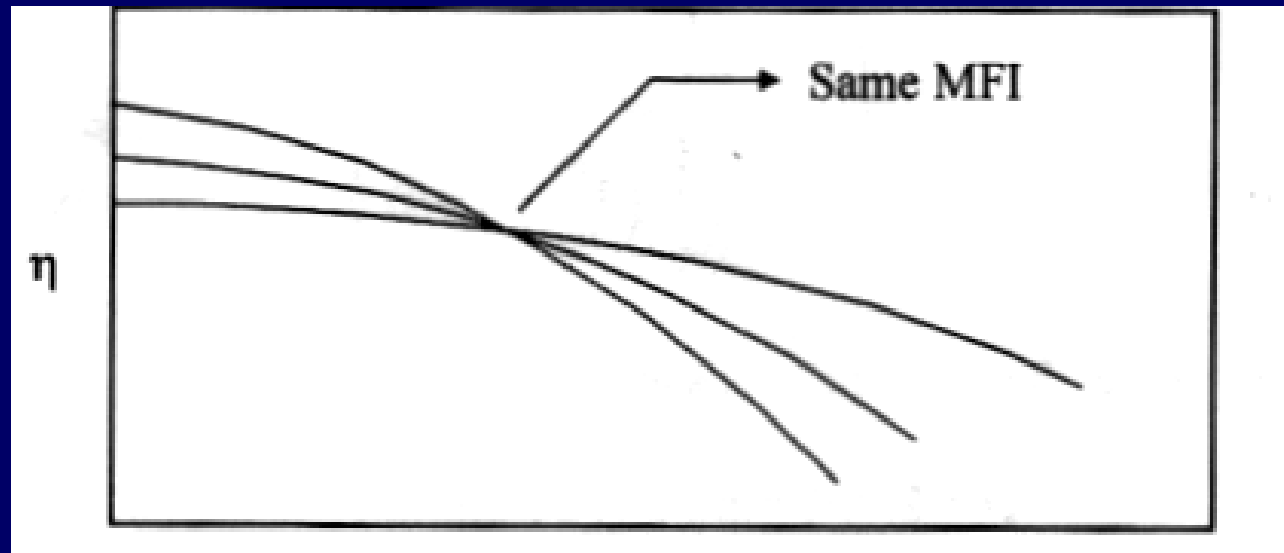


## Modalità di misura (ISO 1133 e ASTM D1238-98)

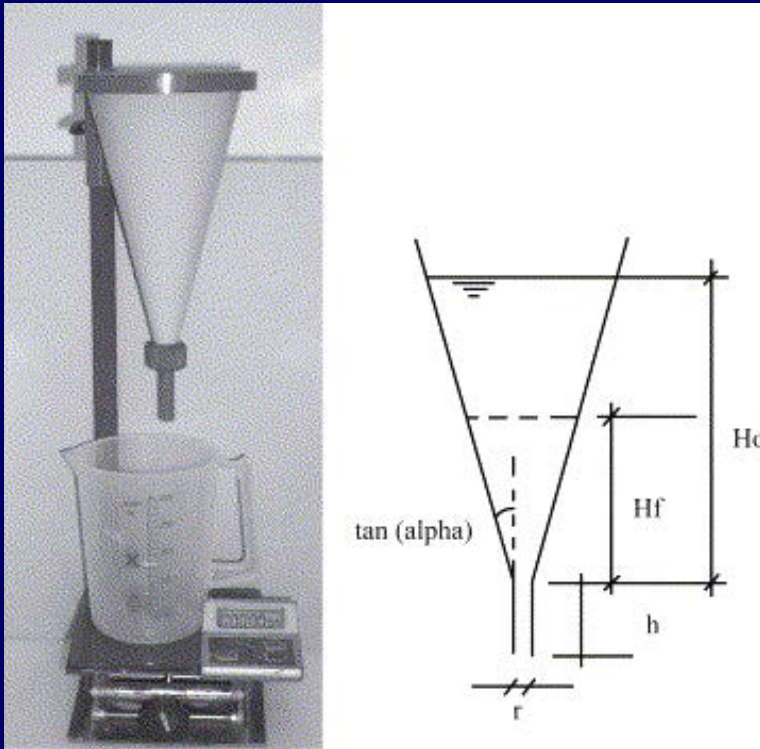
- Il campione viene caricato sotto forma di pellet, polvere o granuli e sottoposto ad una temperatura ed un peso standard dipendenti dal polimero (es. 300°C/1.2 Kg per PC)
- Il peso viene applicato attraverso un pistone di acciaio di lunghezza 115-180 mm (ISO 1133) o 162 mm (ASTM D1238-98) e diametro 9.55 mm. La sezione di uscita (die) ha lunghezza 8 mm e diametro 2.095 mm
- Il valore di MFI è pari ai grammi di campione estrusi in 10 minuti (dopo un tempo di attesa standard)

# Melt Flow Index (MFI)

- Il Melt Flow Index è una misura standard utile per controllo di prodotto
- E' inversamente proporzionale alla viscosità ( un valore pari ad 1 corrisponde a circa  $10^4$  Pa·s) ed è dipendente dal peso molecolare
- Non fornisce informazioni sulla curva di flusso (di cui può rappresentare solo un punto) e la viscoelasticità



# Cono Marsh



**Modalità di misura (ASTM C939-94a, EN 445 or EN12715)**

- **Si carica un volume standard di materiale (0.8-1.7 litri) fino a raggiungere l'altezza  $H_0$  tappando l'estremità del cono**
- **Si misura il tempo di efflusso  $t_v$  di una certa frazione di campione (0.4-1.0 litri) fino a raggiungere l'altezza  $H_f$**
- **Per un fluido Newtoniano**

$$t_v = \frac{\mu}{\rho g} \text{function}(\alpha, r, H_0, h, H_f)$$

- **Utilizzato principalmente per cementi**

# Coppa Ford

## Modalità di misura (ASTM D1200)



- Simile al cono Marsh
- Si riempie la coppa e si misura il tempo di efflusso del campione (fino alla prima rottura del getto in uscita)
- Disponibile in 5 modelli con orifizi di diverso diametro per un range di viscosità: 10-1200 cStokes (sono disponibili altre coppe, come Zahn e ISO, per viscosità più alte)
- Utilizzato principalmente per vernici (quasi Newtoniane)

