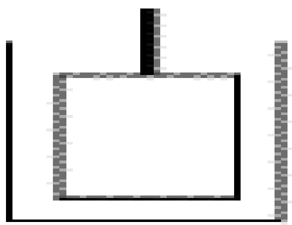
GEOMETRIE PIU' DIFFUSE:

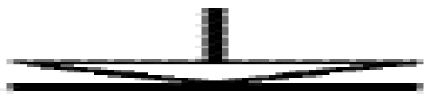
CILINDRI COASSIALI

- → Liquidi non troppo viscosi (ampia superficie del rtore)
- → Sistemi a immersione (gap molto grandi)



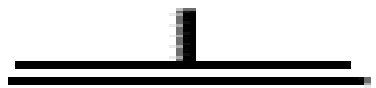
PIASTRA-CONO

- → Misure dinamiche (oscillatorio)
- → Sostanze molto viscose (anche solide)
- → Facilità di pulizia
- → Elevati valori di shear rate
- → No particelle in sospensione



PIATTI PARALLELI

- → Misure dinamiche (oscillatorio)
- → Materiali non omogenei (particelle, fibre)
- → Facilità di pulizia
- → Sostanze molto viscose (anche solide)



Un reometro è detto fondamentale quando la misura di viscosità è fatta misurando grandezze assolute:

FORZE (o grandezze dinamiche ex. **F**, **M**, **ΔP**) → in N (o N/m, Pa)

DIMENSIONI DEI SISTEMI DI MISURA → in m

TEMPO → in s

In questo modo la viscosità risultante è espressa in Pa s.

REQUISITI FONDAMENTALI

- moto laminare
- condizioni isoterme
- distribuzione uniforme di $\dot{\gamma}$

Le misure reometriche fondamentali danno risultati che sono indipendenti dal particolare strumento utilizzato. Questo fatto è abbastanza importante nella misura di fluidi Newtoniani, ma è invece di fondamentale rilevanza nel caso di sostanze non-Newtoniane.

VISCOSIMETRO ROTAZIONALE

→ METODO:

Viene misurato lo sforzo ad una certa velocità (reometri “control rate” CR) oppure la velocità ad un determinato valore di sforzo (reometri “control stress” CS). Il sensore di misura è progettato per permettere il calcolo di grandezze reologicamente pertinenti.

→ VANTAGGI:

Flessibilità: campo di viscosità, campo di temperatura e di velocità.

→ SVANTAGGI:

Costo, molto tempo nella pulizia dei sistemi di misura a cilindri coassiali.

→ APPLICAZIONI:

Sostanze Newtoniane e non-Newtoniane, a temperature diverse da quella ambiente.

SISTEMI PIATTO CONO

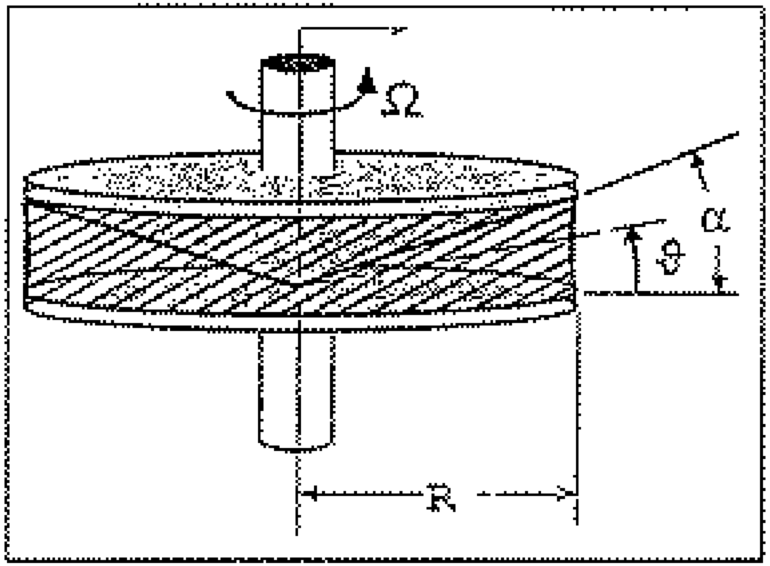
EQUAZIONI FONDAMENTALI

Il gradiente di velocità è espresso dalla relazione:

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\tan \alpha}$$

ma $$\Omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$$

quindi: $$\dot{\gamma} = \frac{\pi \; n}{30 \; \tan \alpha}$$



Di solito i coni utilizzati hanno un angolo molto piccolo (al massimo 4°) per cui è possibile approssimare tanα con α.

Si ottiene quindi:

$$\dot{\gamma} \approx \left(\frac{\pi}{30\ \alpha}\right) n$$

e posto

$$M = \frac{\pi}{30 \cdot \alpha}$$

si ha

$$\dot{\gamma} = M\ n$$

dove: n = velocità di rotazione (min^{-1})

α = angolo del cono

M = costante moltiplicativa caratteristica dell'equipaggio usato

Per il cono, quindi,

$$\boxed{\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\alpha}}$$

Ovvero all'interno del cono si ha una distribuzione uniforme di $\dot{\gamma}$.

Nella geometria piastra/cono, lo sforzo di taglio può essere espresso dalla relazione:

$$\tau_c = \left(\frac{3}{2\pi \; R_c^3} \right) M_d = f \; M_d$$

dove: τ_c = sforzo di taglio sulla superficie del cono

M_d = coppia da misurare

R_c = raggio del cono

f = fattore di forma

Se S è il segnale misurato dallo strumento, allora:

$$\tau_c = f\left(\frac{M_d}{S}\right) S$$

e posto

$$a = \frac{M_d}{S} \qquad \text{e} \qquad A = f(a)$$

si ottiene:

$$\boxed{\tau_c = A\ S}$$

dove: S = segnale dello strumento

A = costante di proporzionalità caratteristica dell’equipaggio usato e dello strumento

Per ottenere il valore della viscosità

$$\eta = \frac{A \;\; S}{M \;\; n} = \frac{G \;\; S}{n} \qquad \text{[mPa s]}$$

dove: $G = \frac{A}{M} \;\; 1000$

che possiamo anche riscrivere:

$$\eta = \frac{3 \;\; \alpha \;\; M_d}{2 \;\; \pi \;\; \Omega \;\; R_c^3}$$

SISTEMI A PIATTI PARALLELI

E' preferibile utilizzare i sistemi di misura a piatti paralleli, anziché piatto/cono, quando il campione da misurare contiene delle particelle di dimensioni confrontabili con il gap esistente tra la piastra e il cono.
Con la geometria a piatti paralleli è possibile impostare manualmente questo gap (0.3 mm ÷ 3mm); tipicamente si imposta una distanza di circa tre volte le dimensioni delle particelle più grandi.

Con questi sistemi il gradiente di velocità, al variare della coordinata radiale r, non è lineare ed è espresso in funzione del valore R del raggio esterno. Misurando fluidi newtoniani, non ha importanza che questo tipo di sensori non sia caratterizzato da un singolo valore di shear rate, ma invece da un ampio range: da zero in coincidenza del centro del piatto, fino al valore massimo per r = R . Anche se questo fatto non ha ripercussioni quando si misurano fluidi newtoniani, nel caso di fluidi diversi bisogna introdurre dei fattori di correzione per lo shear stress o la viscosità.

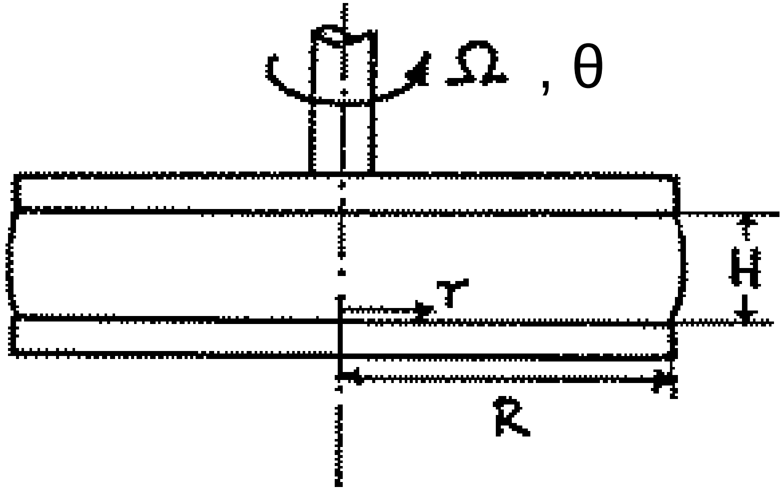
EQUAZIONI FONDAMENTALI

γ non omogeneo dipende dalla posizione.

$$\gamma = \frac{\theta \; r}{H}$$

Ad R

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega \; R}{H}$$



dove $\Omega = \frac{2\pi \; n}{60}$

e H la distanza tra i piatti.

Quindi $\dot{\gamma} = \frac{\pi \; R \; n}{30 \; H}$

posto $$M = \frac{\pi \quad R}{30 \quad H}$$

si ottiene $$\dot{\gamma} = M \quad n = \frac{\Omega \quad R}{H}$$

Lo sforzo di taglio all'estremità del piatto è proporzionale alla coppia M_d:

$$\tau = \frac{2 \quad M_d}{\pi \quad R^3}$$

e posto $$f = \frac{2}{\pi \quad R^3}$$

si ottiene: $$\tau_i = f \quad M_d$$

Se S è il segnale misurato dallo strumento, allora:

$$\tau_c = f \left(\frac{M_d}{S} \right) S$$

e posto

$$a = \frac{M_d}{S} \qquad \text{e} \qquad A = f\ a$$

si ottiene:

$$\tau = A\ S$$

dove: S = segnale dello strumento

A = costante di proporzionalità caratteristica dell’equipaggio usato e dello strumento

Per il valore della viscosità si ottiene, per un fluido newtoniano:

$$\eta = \frac{A \quad S}{M \quad n} = \frac{2 \quad H \quad M_d}{\pi \quad \Omega \quad R^4}$$

Nel caso di fluidi non-Newtoniani l'espressione diventa:

$$\eta = \frac{3H}{2\pi R^4} \frac{M_d}{\Omega} \left(1 + \frac{1}{3} \frac{d \ln M}{d \ln \Omega} \right)$$

TAVOLA DI RIEPILOGO

	CILINDRI COASSIALI	**PIASTRA /CONO**	**PIATTI PARALLELI**
$\dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = M \; n$	$\dot{\gamma} = M \; n = \frac{\Omega}{\alpha}$	$\dot{\gamma} = M \; n = \frac{\Omega \; R}{H}$
τ	$\tau_i = f \; M_d$ $\tau_i = A \; S$	$\tau_i = f \; M_d$ $\tau_i = A \; S$	$\tau_i = f \; M_d$ $\tau_i = A \; S$
η	$\eta = \frac{G \; S}{n}$ $\eta = \frac{M_d}{4 \; \pi \; h \; \Omega} \; \frac{R_a^2 - R_i^2}{R_a^2 \; R_i^2}$	$\eta = \frac{G \; S}{n}$ $\eta = \frac{3 \; \alpha \; M_d}{2 \; \pi \; \Omega \; R_c^2}$	$\eta = \frac{G \; S}{n}$ $\eta = \frac{2 \; H \; M_d}{\pi \; \Omega R^4}$
		DOVE	
M	$M = \left(\frac{\pi}{15} \; \frac{R_a^2}{R_a^2 - R_i^2} \right)$	$M = \frac{\pi}{30 \; \alpha}$	$M = \frac{\pi \; R}{30 \; H}$
f	$f = \left(\frac{1}{2\pi \; h \; R_i^2} \right)$	$f = \left(\frac{3}{2\pi \; R_c^3} \right)$	$f = \frac{2}{\pi \; R^3}$
A	$A = f \; a$	$A = f \; a$	$A = f \; a$
a	$a = \frac{M_d}{S}$	$a = \frac{M_d}{S}$	$a = \frac{M_d}{S}$
G	$G = \frac{A}{M}$	$G = \frac{A}{M}$	$G = \frac{A}{M}$

Le determinazioni reologiche e le relative risoluzioni

Per la calibrazione dei reometri rotazionali si utilizzano sofisticati dispositivi per verificare la risposta corretta dei trasduttori utilizzati per la misura delle variabili in gioco: τ, γ, Φ, Ω, T.

I fluidi (oli certificati) permettono di determinare gli errori strumentali e i limiti di misura.

REOMETRI ROTAZIONALI

Velocità di deformazione controllata

Sforzo controllato

REOMETRI A SFORZO CONTROLLATO

Utilizzano un motore "Torque Motor" controllato in corrente.

La corrente I di controllo è proporzionale allo sforzo incontrato durante la rotazione del dispositivo di misura, secondo la relazione:

$$M_d = k \ I^2$$

dove k è il coefficiente di correlazione.

Per la determinazione della deformazione viene utilizzato un sofisticato trasduttore angolare capace di definire fino a 10^6 impulsi per giro.

Tipici valori sono:

momento torcente minimo:	$1 \cdot 10^{-6}$ Nm = 1 μNm
momento torcente massimo:	$5 \cdot 10^{-2}$ Nm = 50000 μNm
accuratezza:	± 1 μNm

SORGENTI DI ERRORE NEI REOMETRI ROTAZIONALI

Anche se i reometri rotazionali sono progettati e costruiti in modo da limitare al massimo gli errori strumentali, tuttavia non ne sono esenti.

Le principali fonti di errore in una misura di viscosità sono fondamentalmente attribuibili alle seguenti variabili:

- sforzo di taglio τ
- gradiente di velocità $\dot{\gamma}$
- temperatura T

Errori dei fattori geometrici

Sistemi piatto/cono

Le seguenti equazioni esprimono il fattore **b**, ed il relativo errore, per questo tipo di sistemi:

$$b_{pk} = \frac{3\alpha}{2\pi R^3} \tag{11}$$

$$\frac{\Delta b_{pk}}{b_{pk}} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + 3\frac{\Delta R}{R} \tag{12}$$

Dalla (12) risulta chiaro che la principale fonte di errore su **b** è il raggio effettivo del sistema di misura.

Errore dovuto al gap

Nella geometria piastra/cono è fondamentale fare lo "zero" del sistema prima di compiere la misura.

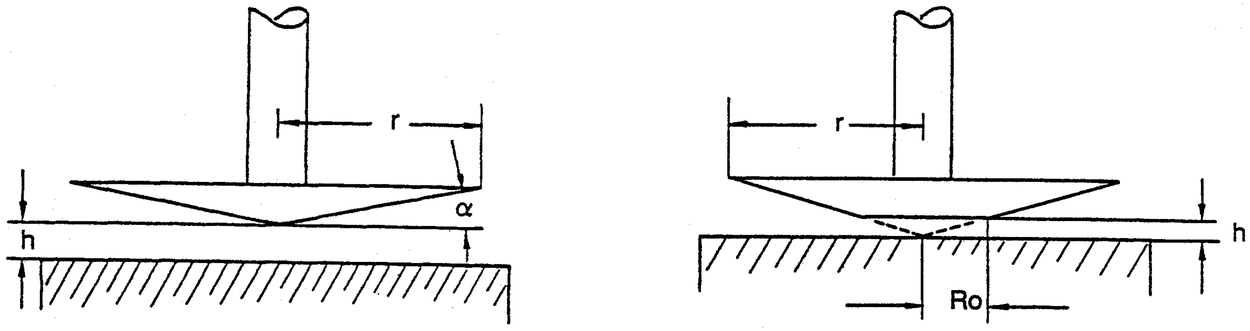
Possono essere utilizzate due diverse tipologie di coni:

- standard
- a punta tronca

Nel primo caso, una volta fatto lo zero, il sistema è pronto per la misura.

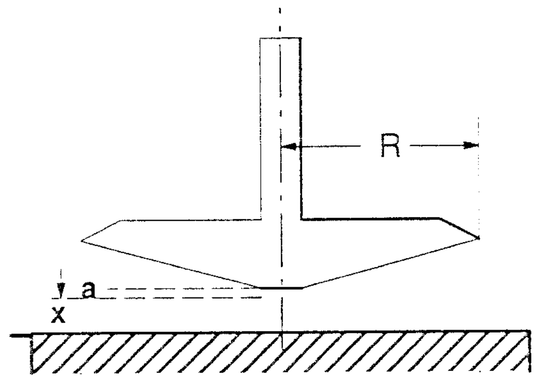
Nel secondo, tra piastra e cono bisogna impostare la distanza **h** indicata nel certificato a corredo con il sistema di misura.

Errore dovuto al gap



Questa distanza, o gap, corrisponde all'altezza della punta troncata del cono, cioè l'altezza del sensore è regolata in modo che la teorica punta sia a contatto con la piastra.

Indichiamo con **a** il gap ideale e con **x** la distanza in eccesso erroneamente impostata.

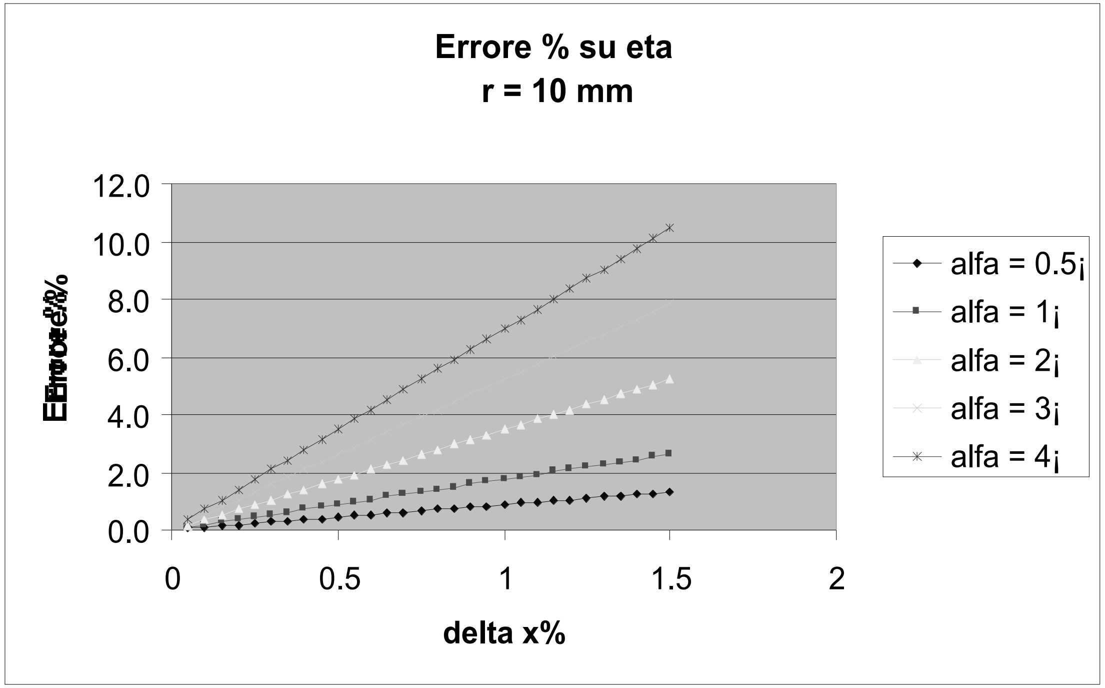


La misura di viscosità varia allora come descritto dalla seguente equazione:

$$\text{Incertezza di misura} = \frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{x\ \ (\alpha\ \ 0.0174)}{R}\ \ 1000 \qquad \%$$

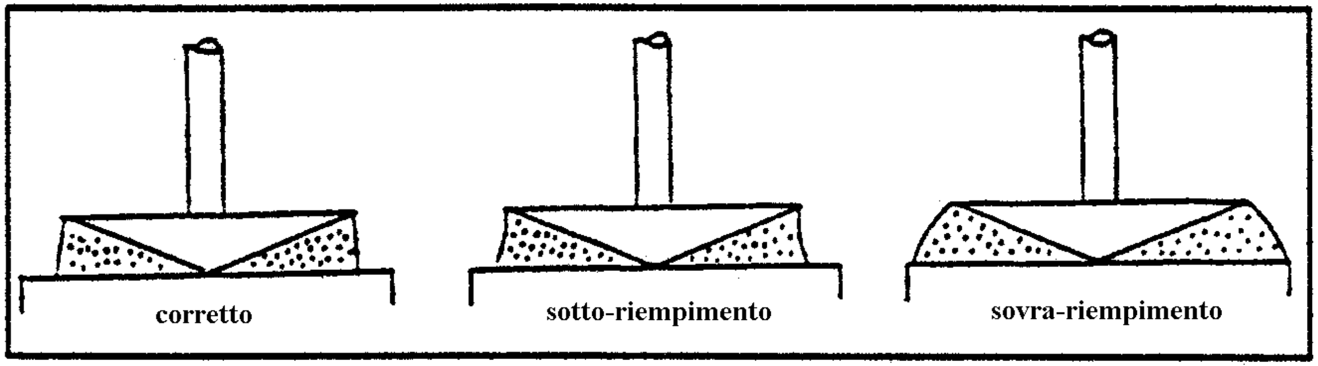
dove α = angolo del cono (1 rad = 57.296 deg; 1 deg = 0.0174 rad)

R = raggio del cono (in mm)



Eccesso o difetto di riempimento

Se il sistema piastra/cono è riempito in maniera insufficiente o in eccesso, oppure se durante la misura il gap si svuota parzialmente, si possono verificare errori nei risultati attesi.

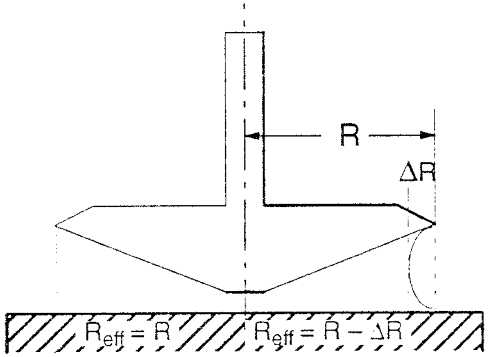


Il sovra o sotto riempimento produce quantitativamente lo stesso errore, ma di segno diverso.

La condizione di insufficiente riempimento può essere, ad esempio, immaginata come una riduzione effettiva del raggio del cono.

Indichiamo con:

- R il raggio della piastra coperta dal cono
- R_{eff} il raggio effettivo (ridotto)



L'errore sulla misura della viscosità si può ricavare dalla seguente equazione:

$$\text{Errore sulla misura della viscosità} = \varepsilon = \left|\frac{\eta_{corr} - \eta_{err}}{\eta_{corr}}\right| 100 = \left|1 - \frac{R^3}{(R - \Delta R)^3}\right| 100 \quad \%$$

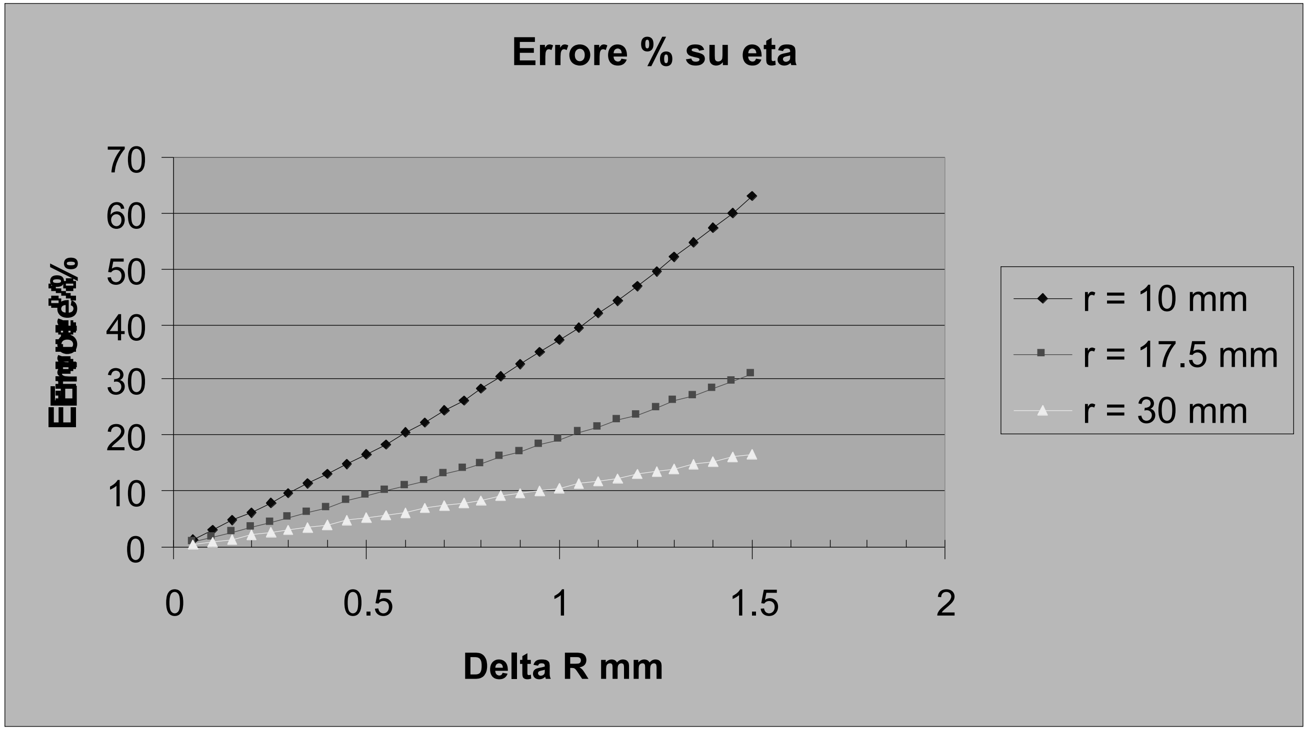
Come si vede, ε non dipende da α.

Esempio:

R = 30 mm

ΔR = 0.5 mm

ε = 5 %



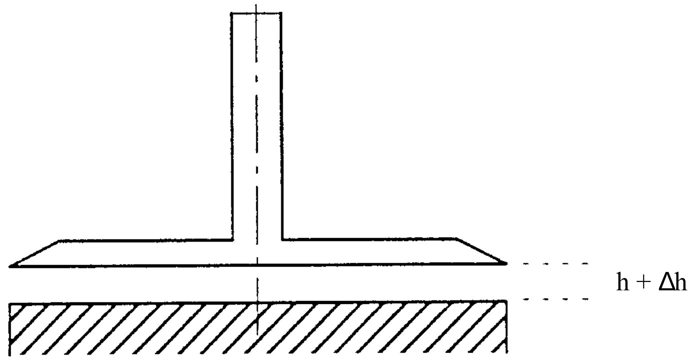
SISTEMI PIATTO/PIATTO

Utilizzando questi sistemi di misura la distanza tra la piastra e il sensore deve essere compresa tra 0.5 mm e 3 mm; in ogni caso questo gap deve essere almeno 3 volte le dimensioni della particella più grande contenuta nel campione.

Anche con questi sistemi di misura gli errori di misura più significativi sono essenzialmente 2:

- Il corretto gap tra sensore e piatto
- Non corretto riempimento del volume del gap

Errore dovuto al gap

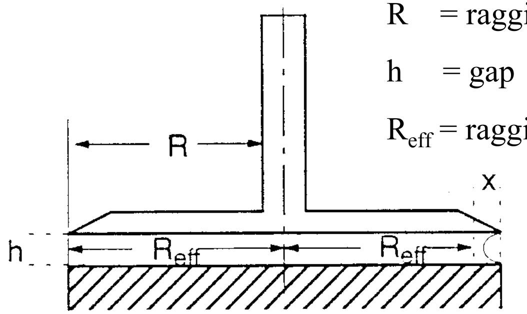


Se il gap h richiesto per la misura non viene rispettato, ma la posizione del piatto varia di Δh, l’incertezza sulla misura sarà:

$$\text{Incertezza di misura} = \frac{\Delta h}{h}$$

Eccesso o difetto di riempimento

La condizione di insufficiente riempimento può essere immaginata come una riduzione effettiva del raggio del piatto:



R = raggio del piatto

h = gap

R_{eff} = raggio effettivo

$R_{eff} = R_{piatto}$ - (raggio ridotto **x**)

L'incertezza sulla misura della viscosità sarà allora:

Errore sulla misura della viscosità $= \varepsilon = \left| \frac{\eta_{corr} - \eta_{err}}{\eta_{corr}} \right| 100 = \left| 1 - \frac{R^4}{(R-x)^4} \right| 100 \quad \%$

Come si vede, ε non dipende da h.

Esempio:

R = 30 mm

x = 0.5 mm

ε = 6.95 %