

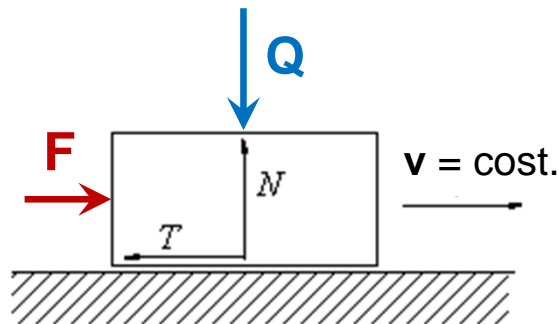
MECCANICA DEGLI AZIONAMENTI

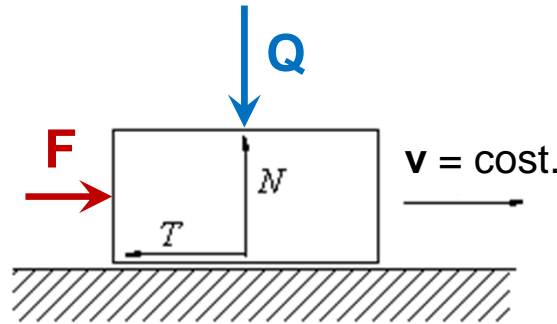
Presentazione 12: Teoria elementare della lubrificazione

Richiami di Tribologia

LEGGI DELL'ATTRITO DI STRISCIAMENTO

Il valore del coefficiente d'attrito dipende quasi esclusivamente dalla natura e dallo stato delle *superfici* a contatto.





- Le prime due leggi dell'attrito di strisciamento fra superfici asciutte, detto anche *attrito coulombiano* (o *attrito "secco"*), affermano che:
 - il coefficiente d'attrito è indipendente dal carico.
 - il coefficiente d'attrito è indipendente dall'area di contatto.
- Di validità un po' meno generale è invece la terza legge, la quale afferma che:
 - il coefficiente d'attrito è indipendente dalla velocità di strisciamento.

Richiami di Tribologia

- Le superfici delimitanti i corpi solidi non sono mai perfettamente lisce, ma sono car



- Nelle zone molto limitate in cui avviene effettivamente il contatto, nascono pressioni molto elevate → ivi la sollecitazione raggiunge il carico di snervamento del materiale il quale, localmente, si plasticizza.

$$N = p_s \sum A_i = p_s A_c$$

- In corrispondenza delle areole di contatto, a causa dell'elevata pressione e dell'alta temperatura dovuta al calore che si sviluppa, si verificano delle microgiunzioni (delle vere e proprie saldature locali fra i due corpi).
- Per produrre il moto relativo, occorre rompere tali giunzioni: la resistenza che esse oppongono alla rottura è, appunto, una delle cause dell'attrito.
→ il valore della resistenza d'attrito T si può valutare come: $T = R_t A_c$

Richiami di Tribologia

- Il coefficiente di attrito f si può allora valutare con l'espressione:

$$\left. \begin{aligned} N &= p_s \sum A_i = p_s A_c \\ T &= R_t A_c \end{aligned} \right\} f = \frac{T}{N} = \frac{R_t}{p_s}$$

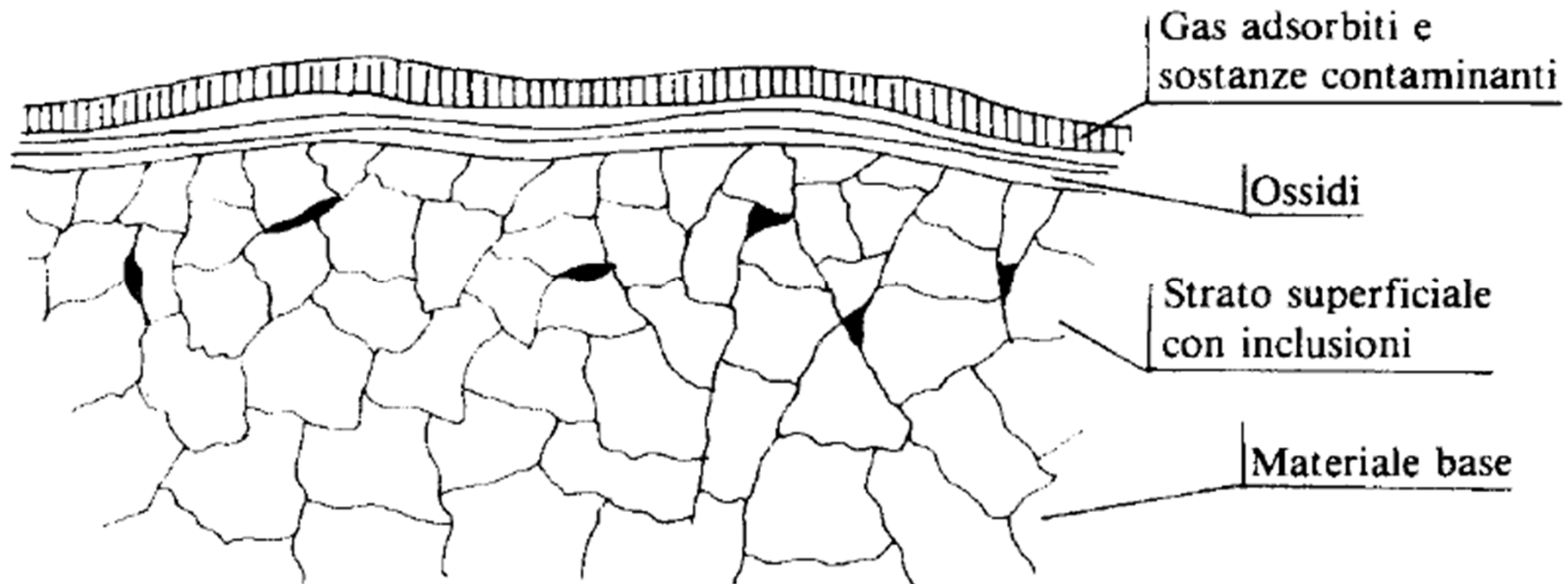
- La teoria esposta giustifica in modo soddisfacente le leggi dell'attrito; infatti da essa risulta evidente che il valore del coefficiente d'attrito è indipendente sia dal carico applicato, sia dall'area di contatto.
- TEORIA PERFEZIONATA → Se la forza che i due corpi si trasmettono ha anche una componente tangenziale T lo stato di plasticizzazione del materiale viene raggiunto con valori del carico normale più bassi che in assenza della T . Ne segue che il coefficiente d'attrito risulta maggiore.

$$f = \frac{T}{N} = \frac{R_t}{p} \quad (p < p_s)$$



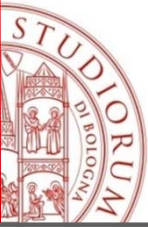
Richiami di Tribologia

- Il perfezionamento della teoria dell'adesione è applicabile essenzialmente all'attrito fra superfici metalliche perfettamente pulite e sotto vuoto spinto, e rende ragione del motivo per cui, in tali condizioni, il coefficiente d'attrito può raggiungere valori molto elevati (fino a $1 \div 2$, e anche oltre).
- Il diverso valore del coefficiente d'attrito sotto vuoto spinto e in ambiente normale si può spiegare tenendo conto che in questo secondo caso le superfici dei corpi sono sempre ricoperte da pellicole di differente natura:



Richiami di Tribologia

- La dipendenza del coefficiente d'attrito dalla **velocità** è in genere modesta.
- La dipendenza dalla **temperatura** può diventare talvolta molto importante, come nel caso dei freni; infatti, al di sopra di una certa temperatura critica (circa 250 °C per la ghisa, fra i 300 e i 400 °C per la maggior parte degli altri materiali da guarnizione), il valore del coefficiente d'attrito negli accoppiamenti impiegati in tali dispositivi subisce forti abbassamenti, con conseguente brusca diminuzione dell'efficacia dell'azione frenante.
- **Nelle applicazioni pratiche**, tenendo conto della complessità del fenomeno e che la velocità di strisciamento, la pressione di contatto e la temperatura (purché questa resti al di sotto di un valore critico che, per molti lubrificanti, è dell'ordine dei 50 °C) influiscono relativamente poco sul valore del coefficiente d'attrito, **si suole di solito ammettere che il coefficiente d'attrito sia costante.**



Richiami di Tribologia

- Si definisce **usura** la perdita di materiale superficiale che si verifica progressivamente sulle superfici di corpi a contatto soggette a moto relativo.
- Il **tasso di usura** si può esprimere come volume di materiale rimosso in corrispondenza di uno spostamento relativo unitario.
- Pur presentandosi insieme con l'attrito, l'usura non è correlata ad esso in modo semplice ed univoco: vi sono, infatti, coppie di superfici che presentano basso coefficiente d'attrito ed elevato tasso di usura e viceversa.
- Si considerano generalmente quattro principali tipi di usura:
 - usura adesiva
 - usura abrasiva
 - usura corrosiva
 - fatica superficiale

Richiami di Tribologia

- Usura **ADESIVA**

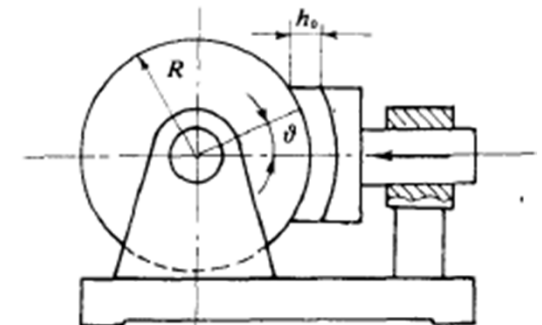
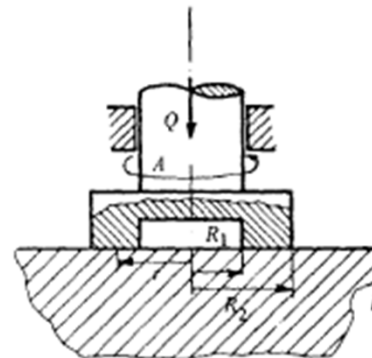
- in corrispondenza delle asperità a contatto sulle superfici di due corpi premuti uno contro l'altro si formino delle microgiunzioni, che durante il moto relativo dei due corpi si spezzano → si verifica l'usura (che, per il meccanismo che la origina, si dice adesiva).
- È logico attendersi che il volume V di materiale asportato sia proporzionale all'area effettiva di contatto A_c e allo spostamento relativo s dei due corpi.



- IPOTESI del REYE

$$\left. \begin{aligned} V &= K A_c s \\ N &= p_s A_c \end{aligned} \right\} V = K \frac{N}{p_s} s = K \frac{T}{f p_s} s$$

$$V = K \frac{T}{f p_s} s = K' L_{\text{attrito}}$$



- Usura **ABRASIVA**

- è dovuta all'azione di solcatura esercitata in un materiale più tenero o dalle sporgenze della rugosità superficiale del corpo accoppiato più duro o da particelle dure interposte fra i due corpi a contatto.
- le particelle possono provenire dall'ambiente circostante o essere originate dall'azione dell'usura stessa.

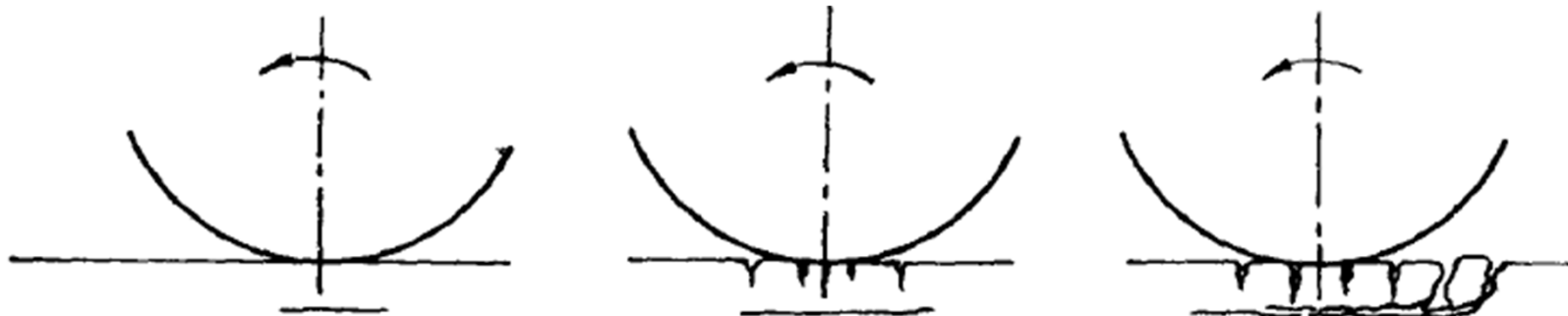


- Usura **CORROSIVA**

- Sulle superfici metalliche si formano degli strati di composti, dovuti all'azione chimica delle sostanze presenti nell'ambiente. Se queste pellicole superficiali, a causa dello strisciamento, vengono asportate, si riformano molto rapidamente.
- In ambiente corrosivo, l'azione meccanica e quella chimica possono esaltare reciprocamente i rispettivi effetti: gli strati superficiali vengono continuamente rimossi e subito si riformano: si innesca così un meccanismo di usura che può talvolta essere molto rapida.

- Usura per **FATICA SUPERFICIALE**

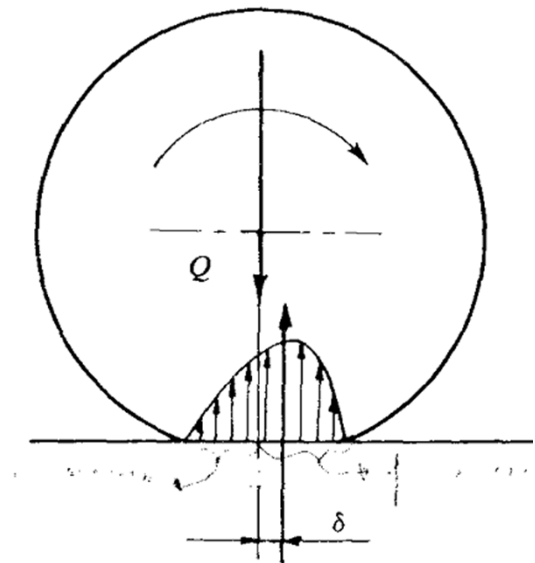
- nel contatto fra due corpi premuti uno contro l'altro e limitati da superfici, con curvatura relativa diversa da zero, la sollecitazione raggiunge il valore massimo non sulla superficie dei corpi, ma ad una certa profondità (dell'ordine di $0.1 \div 0.3 \text{mm}$).
- Se il carico viene ripetutamente applicato e tolto, nella zona dove la sollecitazione è massima può originarsi una fessura, che può poi (anche dopo milioni o miliardi di cicli di applicazione del carico) propagarsi ed estendersi fino alla superficie, con conseguente distacco di una scaglia di materiale.
- Questo tipo di usura (pitting), è tipico dei contatti di rotolamento sotto forti pressioni, quali possono verificarsi ad esempio nei cuscinetti a rotolamento e nelle ruote dentate.



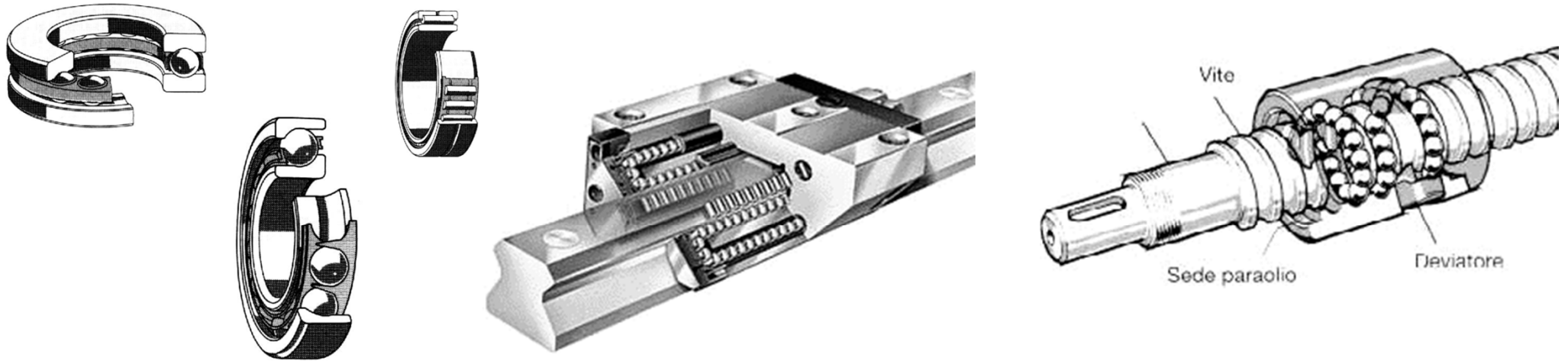
- Materiali “antifrizione”
 - es. il politetrafluoroetilene (PTFE → teflon)

<i>Materiali a contatto</i>	<i>f</i>	<i>f_s</i>
Acciaio/PTFE	0,05	—
Acciaio/Acciaio	0,11 ÷ 0,40	0,6 ÷ 0,8

- Lubrificanti “solidi”
 - pellicole di metallo tenero (es. Piombo)
 - grafite (ha struttura lamellare)
 - reazioni chimiche superficiali
- Contatti VOLVENTI
- Coppie cinematiche lubrificate



Richiami di Tribologia



Cuscinetti radiali orientabili a sfere	0,0010
Cuscinetti assiali a sfere	0,0013
Cuscinetti radiali rigidi a sfere.....	0,0015
Cuscinetti a rulli cilindrici	0,0011÷0,0020
Cuscinetti orientabili a rulli	0,0018
Cuscinetti a rulli conici	0,0018
Cuscinetti obliqui a sfere	0,0020÷0,0024
Ruota su rotaia (D è il diametro della ruota in mm)	$0,026/\sqrt{D}$
Pneumatico su strada (a velocità inferiore a c. 100 km/ora)	0,01

Richiami di Tribologia

- Le superfici di contatto degli organi delle macchine vengono lubrificate qualora si voglia evitare il contatto diretto fra corpi solidi (sostituendolo con un contatto mediato solido-lubrificante-solido).
 - lubrificazione PERFETTA: non si ha contatto diretto fra le asperità delle superfici costituenti la coppia
 - lubrificazione LIMITE: lo strato di lubrificante è così sottile da non impedire il contatto fra le asperità delle due superfici.
- In condizioni di lubrificazione LIMITE si ha una sensibile riduzione del coefficiente di attrito di strisciamento rispetto al caso di superfici asciutte (il sottile film di lubrificante ostacola la formazione di microgiunzioni riducendo l'ampiezza delle zone di contatto diretto e la resistenza dei loro collegamenti).

Valori orientativi dei coefficienti d'attrito statico (f_s) e cinetico (f).

<i>Stato delle superfici</i>	<i>Materiali a contatto</i>	<i>f</i>	<i>f_s</i>
Superfici asciutte in aria	Acciaio/PTFE	0,05	—
	Acciaio/Acciaio	0,11 ÷ 0,40	0,6 ÷ 0,8
	Acciaio/Nailon	0,15 ÷ 0,40	—
	Acciaio/Bronzo fosforoso	0,30	0,35
	Acciaio o ghisa/Materiale per freni	0,30 ÷ 0,40	—
	Acciaio/Elastomeri	1,6 ÷ 10	—
Condizioni di lubrificazione limite	Metallo/Metallo	0,08 ÷ 0,20	0,10 ÷ 0,20
	Acciaio/Acciaio	0,07 ÷ 0,16	0,08 ÷ 0,20
	Acciaio/Bronzo	0,10	0,15 ÷ 0,20
	Acciaio/Met. bianco	0,10	0,10

- Il coefficiente d'attrito può talvolta variare sensibilmente in dipendenza di circostanze quali lo stato di pulizia delle superfici, la temperatura, la pressione di contatto → i valori riportati vanno intesi come indicativi

Richiami di Tribologia

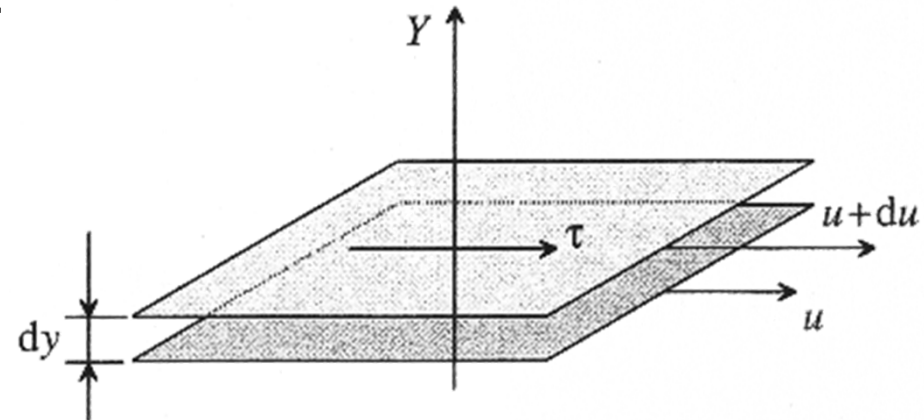
- LUBRIFICAZIONE PERFETTA
→ Fra gli elementi cinematici di una coppia con contatto di strisciamento viene introdotto un fluido, in modo tale che al contatto diretto fra due superfici asciutte venga sostituito un contatto mediato solido-fluido-solido.
- L'intercapedine prende il nome di **meato**.
- Il fluido contenuto nel meato è comunemente un liquido, talvolta un gas
→ ad esso si dà il nome di **lubrificante**.
- Il lubrificante deve essere in grado di reagire alle forze normali che i due membri a contatto si trasmettono in corrispondenza della coppia e, nello stesso tempo, di dare origine ad azioni tangenziali relativamente piccole. Tali risultati possono essere conseguiti mediante:
 - una opportuna progettazione della geometria della coppia
 - una opportuna scelta delle caratteristiche fisiche del lubrificante (in particolare della **viscosità**).

Viscosità di un fluido

- Nel trattare il problema della lubrificazione supporremo che il lubrificante sia NEWTONIANO ossia, considerati due strati adiacenti di fluido – in moto LAMINARE (basso numero di Reynolds) – la tensione tangenziale che si trasmettono risponde alla relazione:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

con μ viscosità DINAMICA



- Il moto del fluido è a regime LAMINARE se il numero di Reynolds Re della corrente fluida risulta sufficientemente basso.

– il numero di Reynolds è dato da:

$$Re = \frac{U h \rho}{\mu}$$

ρ = massa volumica; h = altezza del meato

- Nei casi pratici il moto del lubrificante è in genere a regime laminare: il numero di Reynolds risulta infatti basso sia per i piccoli valori dello spessore di lubrificante sia per i valori relativamente elevati della viscosità dei lubrificanti impiegati.

Viscosità di un fluido

- Fluidi NEWTONIANI

la viscosità è funzione solo della natura del fluido e del suo stato fisico (ossia della temperatura e della pressione), mentre è indipendente dal gradiente di velocità

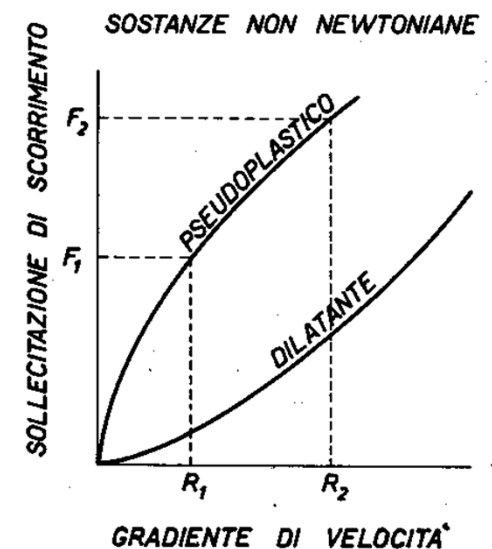
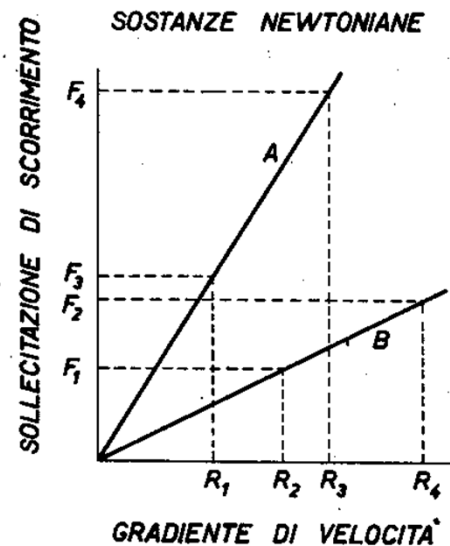
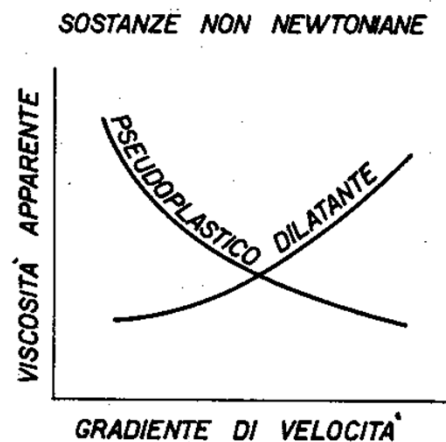
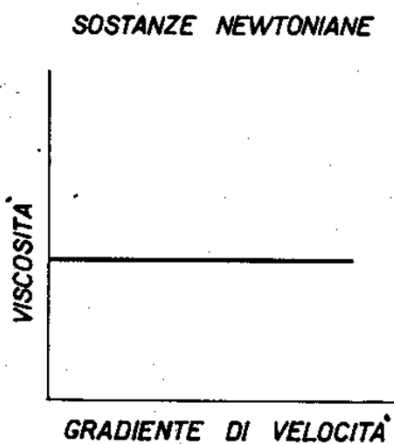
→ gas e liquidi a basso peso molecolare, oli minerali

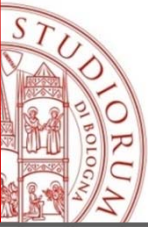
- Fluidi NON NEWTONIANI

la loro viscosità dipende anche dal gradiente di velocità

→ grassi lubrificanti; oli multigradi

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$





Viscosità di un fluido

■ Viscosità DINAMICA

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad [\mu] = \frac{[M L T^{-2} L^{-2}]}{[L T^{-1} L^{-1}]} = [M L^{-1} T^{-1}]$$

Nel sistema internazionale: $1 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} = 1 \text{ N m}^{-2} \text{ s} = 1 \text{ Pa s}$

Nel sistema CGS l'unità di misura della viscosità dinamica è il poise (P):

$1 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1} = 1 \text{ poise} = 10^{-1} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ $1 \text{ poise} = 10^{-1} \text{ Pa s}$

Viene comunemente usato il centipoise (cP): $1 \text{ cP} = 10^{-2} \text{ P} = 10^{-3} \text{ Pa s} = 1 \text{ mPa s}$

■ Viscosità CINEMATICA

$$[\nu] = \frac{[M L^{-1} T^{-1}]}{[M L^{-3}]} = [L^2 T^{-1}]$$

Nel sistema internazionale l'unità di misura è il $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Nel sistema CGS l'unità di misura della viscosità cinematica è lo stokes (St):

$1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ St}$

Viene comunemente usato il centistokes (cSt): $1 \text{ cSt} = 10^{-2} \text{ St} = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Viscosità di un fluido

Classificazione SAE

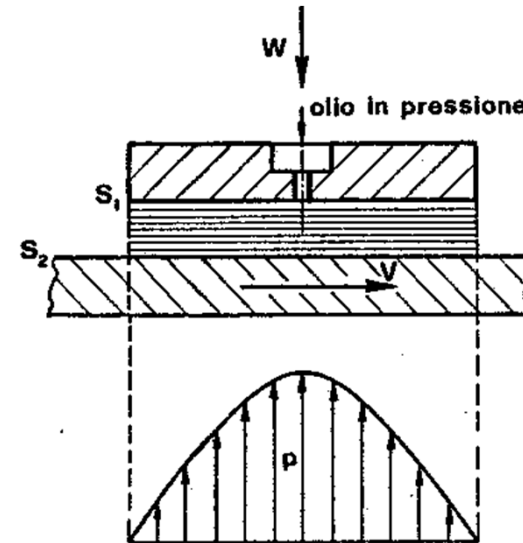
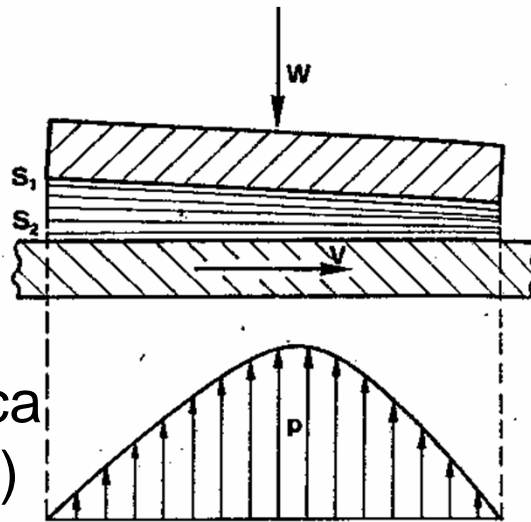
SAE viscosità	Viscosità cinematica cSt	
	a $-18^{\circ}C$	a $98.9^{\circ}C$
5 W	869	
10 W	1303 – 2606	
20 W	2606 – 10423	
20		5.73 – 9.62
30		9.62 – 12.93
40		19.93 – 16.77
50		16.77 – 22.68

Gradazione SAE del multigrado	Specifiche viscosimetriche (SAE J 300 a)				Indice di viscosità ASTM D 2270
	Viscosità cSt a $0^{\circ}F$		Viscosità cSt a $210^{\circ}F$		
	max	min	max	min	
5 W-20	1300	–	–	5,7	≥ 124
5 W-30	1300	–	–	9,6	≥ 182
5 W-40	1300	–	–	12,9	≥ 208
5 W-50	1300	–	–	16,8	≥ 231
10 W-20	2600	–	–	5,7	min 92
	–	1300	9,6	–	max 182
10 W-30	2600	–	–	9,6	min 146
	–	1300	12,9	–	max 208
10 W-40	2600	–	–	12,9	min 170
	–	1300	16,8	–	max 231
10 W-50	2600	–	–	16,8	min 191
	–	1300	22,7	–	max 257
20 W-20	10500	–	–	5,7	min 20
	–	2600	9,6	–	max 145
20 W-30	10500	–	–	9,6	min 94
	–	2600	12,9	–	max 170
20 W-40	10500	–	–	12,9	min 113
	–	2600	16,8	–	max 191
20 W-50	10500	–	–	16,8	min 132
	–	2600	22,7	–	max 215

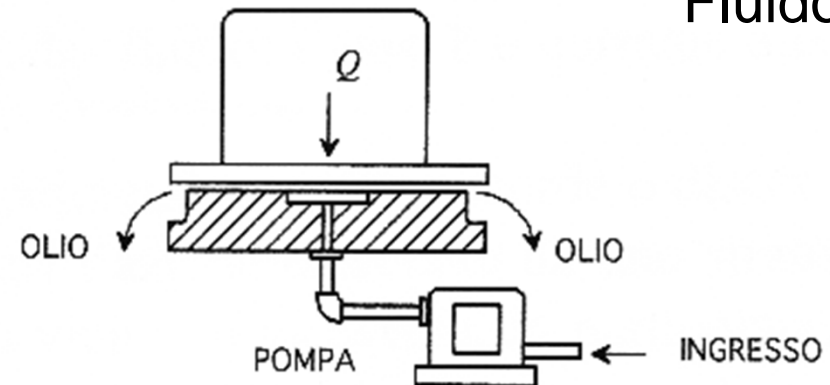
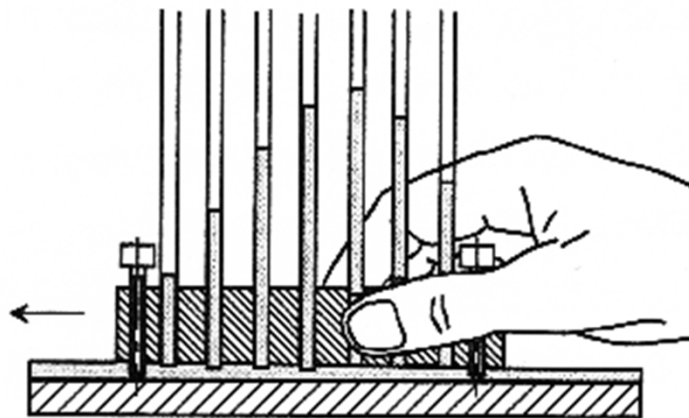
Coppie cinematiche lubrificate

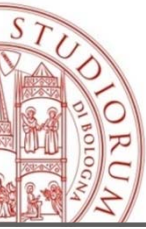
- Per permettere al lubrificante di reagire al carico che due corpi a contatto si trasmettono occorre creare all'interno del meato un campo di pressione superiore a quella ambiente.

Fluidodinamica
(idrodinamica)



Fluidostatica





Bibliografia

- E. Funaioli, A. Maggiore, U. Meneghetti, *Lezioni di Meccanica Applicata alle Macchine - Prima Parte: Fondamenti di Meccanica delle Macchine*, Patron, Bologna, 2005.
- A. Z. Szeri, *Fluid Film Lubrication: Theory and Design*, Cambridge University Press, 2005