



PROPRIETÀ FISICHE DEI FLUIDI

- ⇒ Sforzi nei sistemi continui
- ⇒ Densità
- ⇒ Peso specifico
- ⇒ Tensione di Vapore
- ⇒ Comprimibilità
 - ⇒ Modulo di elasticità
 - ⇒ Coefficiente di dilatazione cubica
 - ⇒ Velocità del suono
- ⇒ Viscosità
- ⇒ Tensione superficiale

N.B.: Questo indice NON è esaustivo e NON sostituisce il libro di testo

Alcune immagini sono prese dal libro di testo (Meccanica dei Fluidi, Y.A.Cengcek e J.M. Cimbala, Ed. It G. Cozzo e C. Santoro) per scopi didattici

Proprietà dei fluidi

I fluidi come sistemi continui :

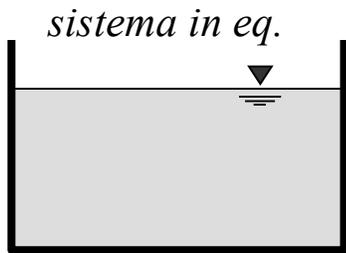


elemento infinitesimo

Sforzi nei sistemi continui : *nello studio dei sistemi continui si possono distinguere due tipi di forze*

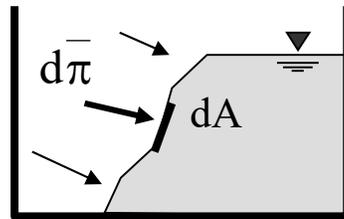
⇒ forze di massa F_m (*tipicamente la forza di gravità, o forze apparenti in sistemi di riferimento non inerziali, o forze associate a campi elettromagnetici*)

⇒ forze di superficie F_s (*le forze che vengono esercitate su una qualsiasi parte del sistema attraverso la sua superficie di contorno*)



Un sistema continuo è in equilibrio quando

$$\sum \bar{F}_m + \sum \bar{F}_s = 0$$



Per mantenere il sistema in eq. bisogna trasmettere alla superficie di separazione un complesso di forze tale per cui l'equilibrio sia ancora verificato.

per ogni areola di superficie dA agisce una forza $d\pi$

sforzo unitario

$$\lim_{dA \rightarrow 0} \frac{d\pi}{dA} = \bar{\Phi}_n$$

Sforzo unitario:

$$\overline{\Phi}_n \rightarrow \left(\frac{F}{L^2} \right) \rightarrow \left[\frac{N}{m^2} \right] = Pa$$

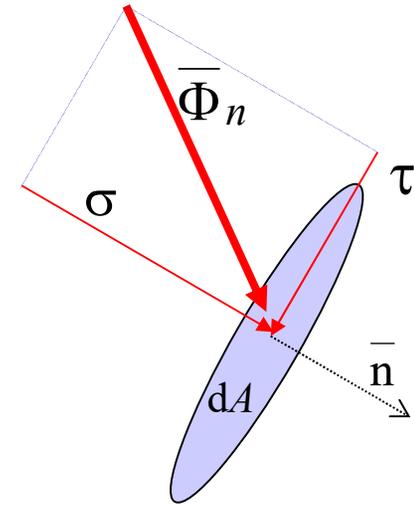
Forza elementare su dA : $d\overline{\pi} = \overline{\Phi}_n \cdot dA$ con $d\overline{\pi} \rightarrow (F) \rightarrow [N]$

*Sull'intera superficie di separazione
per l'equilibrio dovrà agire una forza pari a :*

$$\overline{\pi} = \int_A \overline{\Phi}_n \cdot dA$$

$\overline{\Phi}_n$ è, in generale, comunque orientato rispetto a dA
e dipende dalla giacitura di dA

il pedice \mathbf{n} indica il versore della normale entrante alla superficie dA



Nota: in generale la componente normale può essere di compressione o di trazione.

I fluidi poco viscosi in condizioni standard sopportano poco sforzi normali di trazione, di norma in meccanica dei fluidi si fa sempre riferimento a sforzi normali di compressione.

$\sigma \rightarrow$ componente normale

$\tau \rightarrow$ componente tangenziale

$n \rightarrow$ versore normale alla superficie

Densità (ρ): è la misura della massa contenuta nell'unità di volume $\left[\frac{M}{L^3}\right] \rightarrow [Kg / m^3]$

Peso specifico (γ): è il peso dell'unità di volume $\left[\frac{F}{L^3}\right] \rightarrow [N / m^3]$ $\gamma = \rho \cdot g$

La densità e di conseguenza il peso specifico sono funzioni della pressione e della temperatura.

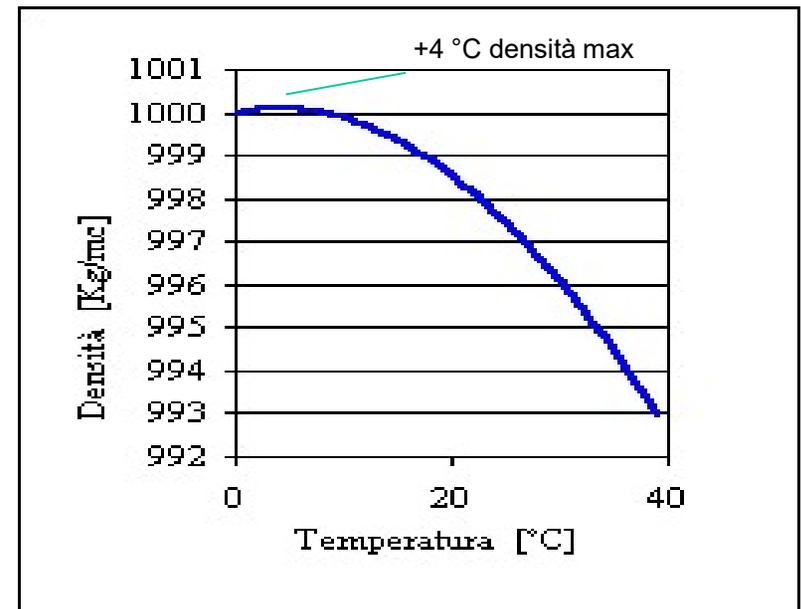
Eq. di stato di un fluido: $\rho = \rho(p, T)$

per i liquidi solitamente ρ
dipende poco dalla pressione
(vd in seguito)

$\rho \downarrow T \uparrow$

per l'acqua $\Rightarrow 0^\circ < T < 40^\circ$ Variazione 8%

$$\rho_{\text{acqua}} \cong 1000 [kg/m^3]$$



Per quanto le variazioni di densità con la temperatura appaiano piccole, esse hanno forti implicazioni in idraulica ambientale quando si studia la circolazione nei laghi o zone costiere

Per i gas:

$$\rho = \rho(p, T)$$

Es gas perfetti

$$pW = n R \cdot T$$

R è la costante universale dei gas $R = 8.314472 \frac{J}{mol K}$

T è la temperatura assoluta del gas, espressa in Kelvin

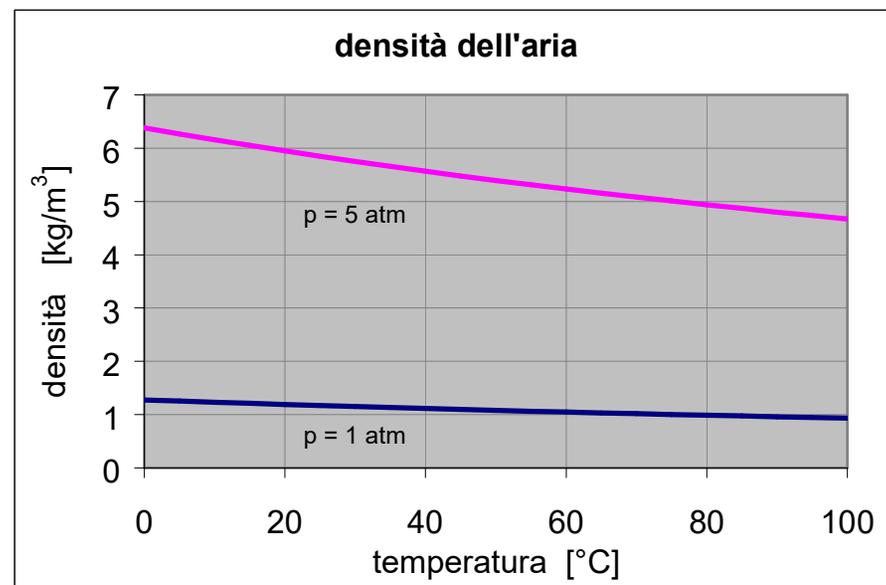
n è il numero di moli $= M / M_{\text{molare}}$

$$M = \rho W$$

$$\rightarrow \frac{pM}{\rho} = n R \cdot T \quad \rho = \frac{p M_{\text{molare}}}{R \cdot T}$$

Per una certa quantità di massa, tra due stati distinti 1 e 2 si ha:

$$\frac{p_1 W_1}{T_1} = \frac{p_2 W_2}{T_2}$$



Esempio:

Determinare densità e massa di aria secca contenuta in una stanza di dimensioni 4x5x6 m alla pressione di 1000 hPa e alla temperatura di 25°C

Per l'aria $R=2.87 \text{ hPa m}^3 /(\text{Kg. K})$

Dall'equazione dei gas perfetti:

$$\frac{m}{W} = \rho = \frac{p}{RT} = \frac{1000}{2.87 \times (25 + 273)} = 1.17 \text{ kg/m}^3$$

Quindi, considerato che il volume è pari a 120 m³, la massa sarà pari a 140 kg

Tensione di Vapore:

Regola il cambio di fase di una sostanza (da liquido a vapore e viceversa)

Importante in molte applicazioni ingegneristiche per i fenomeni di cavitazione (ebollizione a freddo)

TEMPERATURA DI SATURAZIONE: temperatura alla quale, ad una data pressione, una sostanza cambia fase

PRESSIONE DI SATURAZIONE: pressione alla quale, ad una data temperatura, una sostanza cambia fase

Definizione **TENSIONE DI VAPORE:** E' la pressione esercitata dal vapore di una sostanza in equilibrio di fase con il suo liquido a temperatura costante. E' uguale alla pressione di saturazione di un liquido ad una data temperatura

In presenza di liquido e vapore, si ha evaporazione fin quando la pressione parziale del vapore è inferiore alla tensione di vapore alla temperatura data

Cavitazione:

La tensione di vapore decresce con la temperatura

Se per effetti idrodinamici la pressione nel liquido, alla temperatura ambiente, scende al di sotto della tensione di vapore, si formano bolle di vapore

Queste bolle imploderanno non appena la pressione idrodinamica supera la tensione di vapore e si ripristina lo stato liquido.

Conseguenza: distruzione della superficie solida nella zona di implosione delle bolle

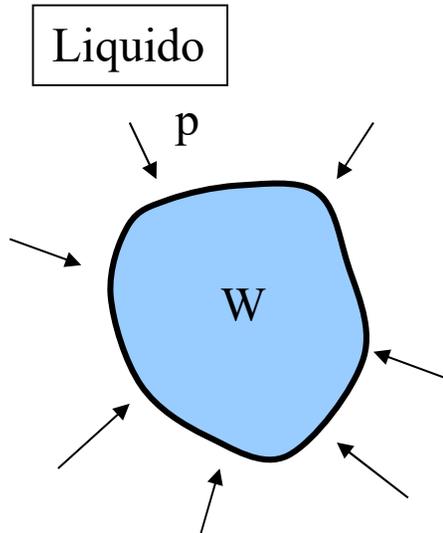


Figura 2.6

I danni causati dalla cavitazione su una piastrina di alluminio di 16 mm × 23 mm testata a 60 m/s per 2,5 ore. La piastrina è stata collocata in un generatore di cavitazione appositamente progettato per produrre grossi danni.
Foto di David Stinebring ARL/Pennsylvania State University.

temperatura (°C)	tensione di vapore (kPa)
-10	0,260
-5	0,403
0	0,611
5	0,872
10	1,23
15	1,71
20	2,34
25	3,17
30	4,25
40	7,38
50	12,35
100	101,3
150	475,8
200	1554
250	3973
300	8581

Comprimibilità : è la proprietà di un fluido di modificare il proprio volume (e quindi la propria densità) al variare della pressione alla quale esso è assoggettato



$$W = f(p) \longrightarrow \rho = \rho(p) \quad \text{HP: processo Isoterma } T = \text{Cost.}$$

Per la conservazione della massa: $\rho \cdot W = \text{cost}$

$$\rho \cdot dW + W \cdot d\rho = 0 \implies \frac{dW}{W} = -\frac{d\rho}{\rho}$$

dall'esperienza : $dW = -W \cdot \frac{dp}{\kappa}$

κ modulo di elasticità
a compressione cubica [N/m²]

$$\kappa = \rho \left. \frac{dp}{d\rho} \right|_{T=\text{cost}} = -W \left. \frac{dp}{dW} \right|_{T=\text{cost}}$$

Rappresenta la variazione di pressione necessaria per una variazione unitaria di volume o di densità, a temperatura costante

liquidi (solidi): $\rho \cong \text{cost}$ \longleftrightarrow κ elevato

$$\kappa_{\text{acqua}}(T=10^\circ\text{C}) = 2.03 \cdot 10^9 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

$$\Delta p = 1 \text{ bar} \implies \Delta \rho / \rho = 0.005 \%$$

Gas

Determiniamo solo il valore del coefficiente di elasticità a compressione cubica per una trasformazione politropica

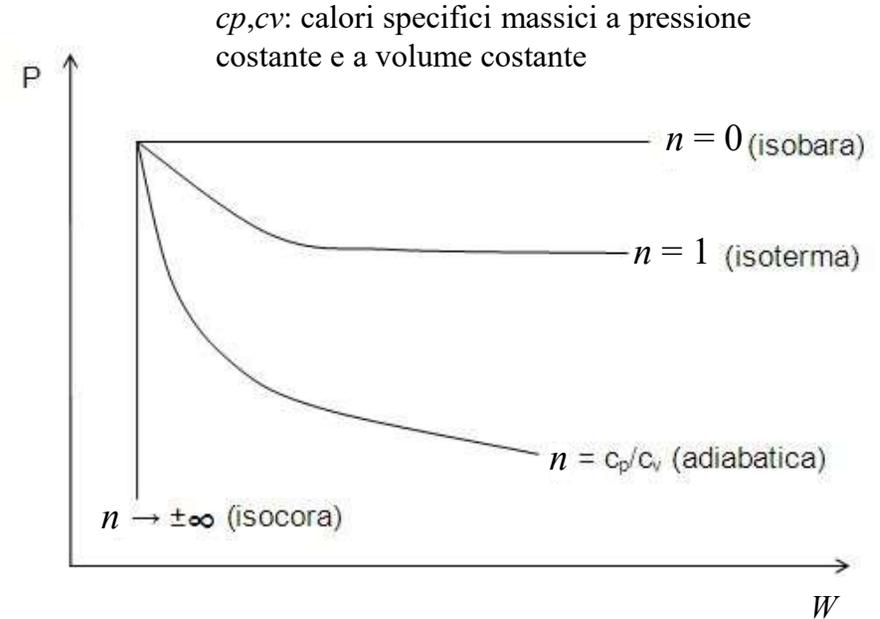
Politropica $pW^n = \text{cost}$

differenziando : $W^n dp + pnW^{n-1}dW = 0$

e ricordando

$$\kappa = -W \frac{dp}{dW} \Big|_{T=\text{cost}}$$

$$\kappa = np$$



Alla pressione atmosferica, a temperatura costante $n=1 \Rightarrow \kappa \approx 1.03 \cdot 10^5 \text{ [N/m}^2\text{]}$

Malgrado i gas siano per definizione molto comprimibili il loro moto può essere studiato con l'ipotesi di $p = \text{cost.}$ tutte le volte che non si ha una forte variazione di pressione e quindi di densità.

Coefficiente di Dilatazione cubica: un fluido modifica il proprio volume con la temperatura più che con la pressione

$$\frac{dW}{W} = \beta \cdot dT$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\beta \cdot dT$$

Rappresenta la variazione di volume, per volume unitario, in seguito ad una variazione unitaria di temperatura, a pressione costante

$$\beta = \frac{1}{W} \frac{dW}{dT} \Big|_p = - \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \Big|_p$$

Per un gas perfetto $\beta = \frac{1}{T}$

Per l'acqua $\beta \approx 10^{-4} K^{-1}$

Variazione di volume/densità per effetto combinato di temperatura e pressione

$$\frac{\Delta W}{W} = - \frac{\Delta \rho}{\rho} = \beta \cdot \Delta T - \frac{\Delta p}{\kappa}$$

Esempio: calcolo della variazione della densità con temperatura e pressione

Nota: nelle definizioni date non si è considerato l'effetto di una concentrazione di una sostanza disciolta (per esempio la salinità in acqua o l'umidità nell'atmosfera)

Per entrambe si considera un coefficiente di espansione cubica, similmente a quanto fatto per la temperatura

ESEMPIO 2.3 Variazione della densità con la temperatura e la pressione

Determinare la densità che assume l'acqua alla temperatura di 20 °C e alla pressione di 1013 hPa **(a)** se viene scaldata a 50 °C alla pressione costante di 1013 hPa e **(b)** se viene compressa alla pressione di 101 300 hPa alla temperatura costante di 20 °C, essendo il coefficiente di comprimibilità dell'acqua $\kappa = 2,11 \times 10^9$ Pa.

Ipotesi I coefficienti di dilatazione cubica e di comprimibilità dell'acqua si possono considerare costanti nell'intervallo di temperature assegnato.

Proprietà La densità dell'acqua a 20 °C a pressione atmosferica (1013 hPa) è $\rho_1 = 998,0$ kg/m³. Il coefficiente di dilatazione cubica alla temperatura media di $(20 + 50)/2 = 35$ °C è $\beta = 0,337 \times 10^{-3}$ K⁻¹.

Analisi

(a) Dalla 2.27, passando alle differenze finite, si ha

$$\Delta\rho = -\beta\rho\Delta T = -0,337 \times 10^{-3} \times 998 \times (50 - 20) = -10,1 \text{ kg/m}^3$$

La densità ρ_2 dell'acqua a 50 °C e alla pressione atmosferica vale

$$\rho_2 = \rho_1 + \Delta\rho = 998,0 + (-10,1) = 987,9 \text{ kg/m}^3$$

In realtà, come mostrato in Figura 2.11, il coefficiente β varia quasi linearmente con la temperatura.

(b) Dalla 2.19, passando alle differenze finite,

$$\Delta\rho = \rho\Delta p/\kappa = 998 \times (101\,300 - 1013)/(2,11 \times 10^7) = 4,74 \text{ kg/m}^3$$

La densità ρ_2 dell'acqua a 20 °C e alla pressione di 101 300 hPa vale

$$\rho_2 = \rho_1 + \Delta\rho = 998,0 + 4,74 = 1003 \text{ kg/m}^3$$

Discussione Avendo a disposizione le funzioni che esprimono il modo di variare dei coefficienti, il problema può essere affrontato in maniera più accurata usando l'analisi differenziale.

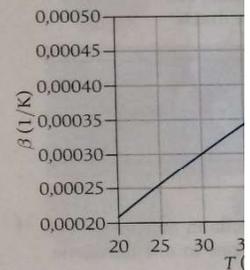


Figura 2.11 Variazione del coefficiente cubica dell'acqua con la temperatura tra 20 °C e 50 °C.

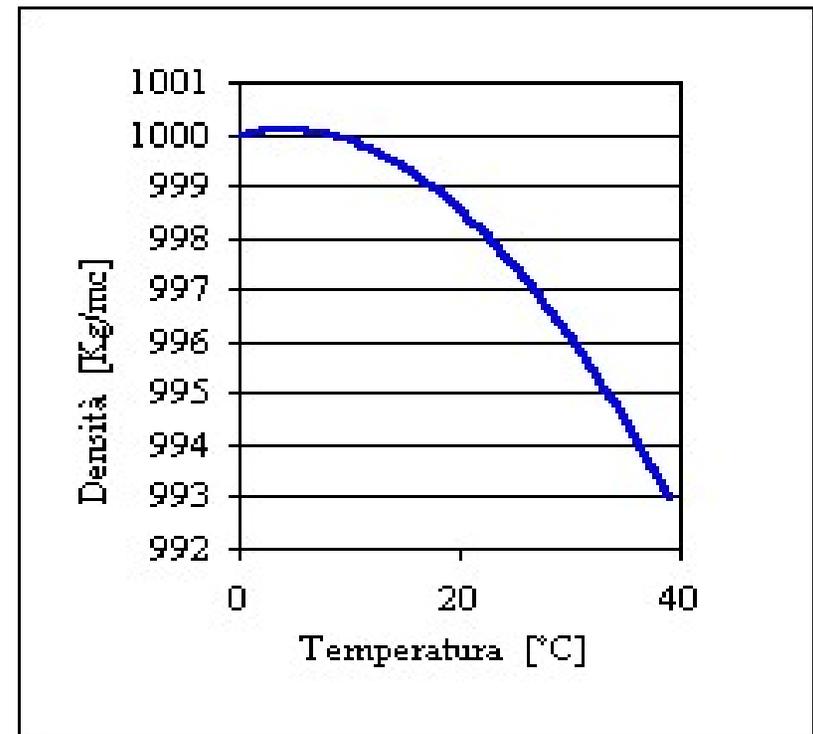
L'acqua ha un comportamento anomalo:
La densità cresce da 0 a 4 °C e poi decresce

Cosa comporta?

I bacini idrici (mare, lago etc) ghiacciano solo in superficie perché in inverno lo strato d'acqua superficiale si raffredda e, diventando più denso dello strato inferiore, scende sul fondo.

Questo processo continua finché la temperatura dell'intera massa d'acqua non ha raggiunto la temperatura di 4°C : oltre questo punto il raffreddamento dello strato superficiale rende quest'ultimo meno denso di quelli inferiori (appunto perché da 4 a 0°C la densità dell'acqua diminuisce), perciò lo strato superficiale rimane fermo galleggiando sulla superficie del bacino.

Questo strato superficiale finisce per congelare diventando una lastra solida di ghiaccio mentre il resto dell'acqua del lago rimane a 4 °C. Il ghiaccio formatosi impedisce la perdita di calore del lago ed ogni altra perdita di calore causa soltanto un ispessimento della lastra senza perturbare gli strati più profondi che rimangono alla temperatura costante di 4 °C : le forme di vita che popolano il fondo del bacino possono quindi sopravvivere.



Celerità delle onde di pressione: *La velocità con la quale una perturbazione (o il suono) si propaga in un fluido*

Causata da un corpo in movimento o dal movimento di un organo di manovra (valvola in una condotta, accensione o spegnimento di una pompa....)

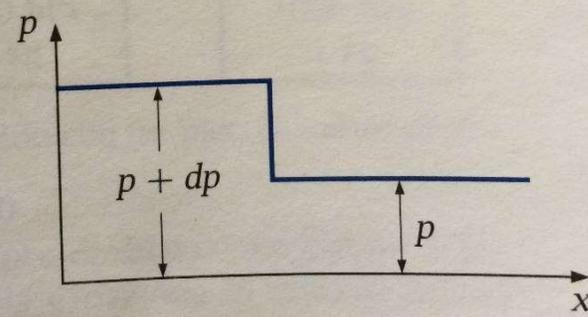
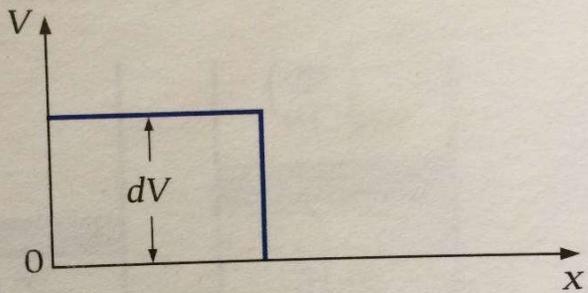
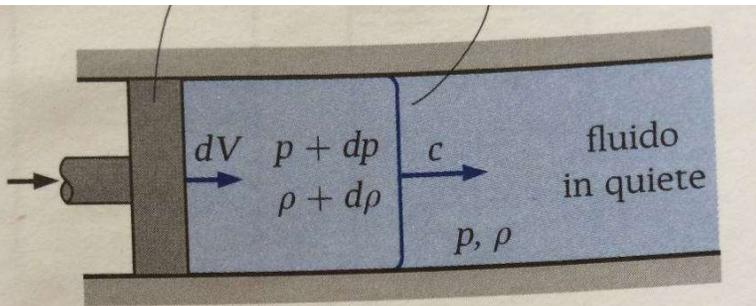


Figura 2.12

Consideriamo una condotta e un pistone che si sposta da sn verso dx . Questo provoca un incremento di velocità pressione e densità nella parte sn mentre il fluido è in quiete a dx. Si identifica un fronte d'onda che si propaga con celerità c (si veda la figura)

Determiniamo la celerità c:

Consideriamo il volume di controllo della figura a dx, in moto con velocità c

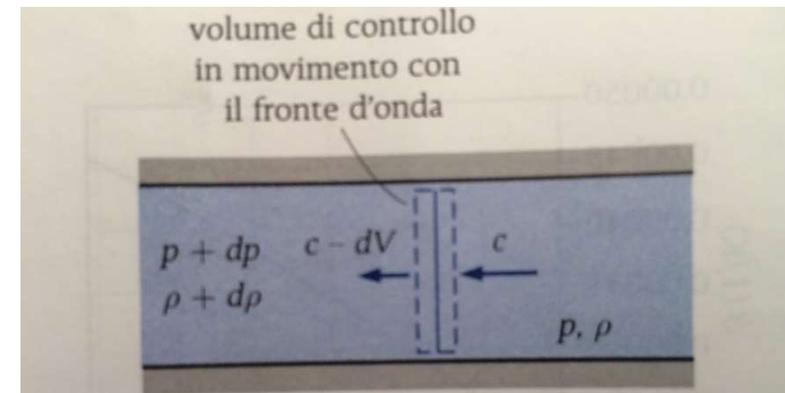


Figura 2.13

Volume di controllo in movimento con un'onda di pressione in una tubazione.

Applicando la legge di conservazione della massa al volume di controllo della figura (riportata anche in questa slide per chiarezza di esposizione):

$$(\rho + d\rho)A(c - dV) = \rho Ac$$

Da cui, trascurando gli infinitesimi al secondo ordine, segue:

$$cd\rho - \rho dV = 0$$

Applicando il principio di conservazione della quantità di moto al volume di controllo, il bilancio delle forze di pressione è uguale alla variazione della quantità di moto:

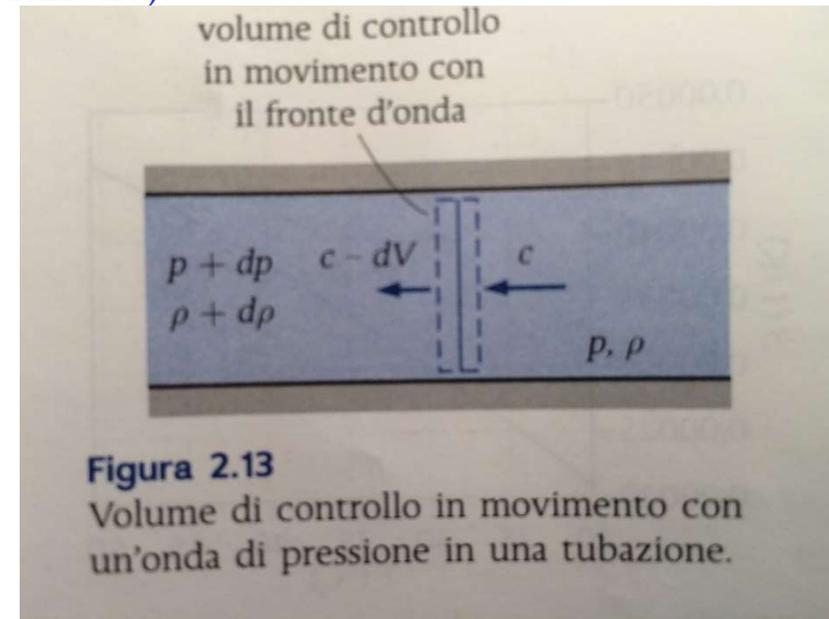
$$[(p + dp) - p]A = [c - (c - dV)]\rho Ac$$

Da cui segue

$$dp = \rho cdV$$

Ricavando dV dalla prima delle due e sostituendo nella seconda:

$$dp = c^2 d\rho \quad \Rightarrow \quad c^2 = \frac{dp}{d\rho} \quad \Rightarrow \quad c = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}}$$



Velocità del suono per liquidi e gas:

Nel caso di acqua, $\kappa=2.11 \cdot 10^9$ Pa e $\rho=1000$ kg/m³

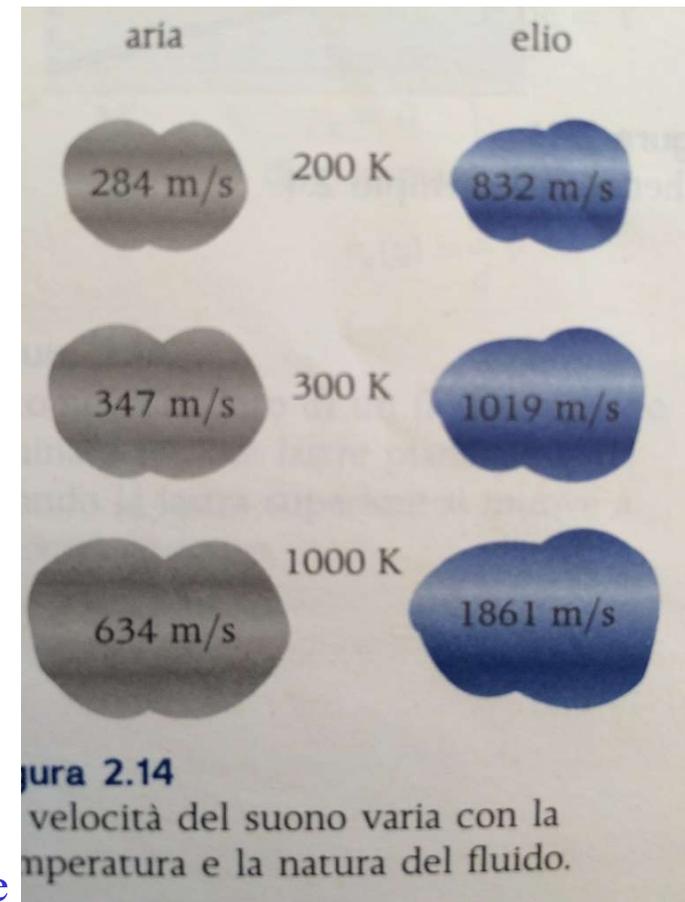
$$c = 1450 \text{ m/s}$$

Per un gas, ipotizzando il processo adiabatico, e quindi utilizzando l'opportuno coefficiente per la politropica, si ottiene:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}} = \sqrt{\frac{n p}{\rho}} = \sqrt{n R T}$$

Nei gas, il rapporto tra i calori specifici n dipende dalla temperatura, R è costante, sicchè c dipende dalla temperatura

Da notare: la teoria è valida per mezzi non confinati; Nel caso di fluidi confinati, c decresce sensibilmente a causa dell'elasticità delle pareti del contenitore (per esempio condotta)



Numero di Mach:

Quantifica il regime di moto di una corrente nei confronti della comprimibilità:

$$Ma = \frac{V}{c}$$

Dove V è la velocità caratteristica del flusso (per esempio la velocità mediata su una sezione di ingresso al volume di controllo)

$Ma < 0.3$	regime incomprimibile
$0.3 < Ma < 1$	regime comprimibile subsonico
$Ma > 1$	regime comprimibile supersonico

ESEMPIO 2.4 Numero di Mach di una corrente d'aria all'ingresso di un diffusore

La velocità di una corrente d'aria nella sezione di ingresso di un diffusore (Figura 2.16) è pari a 200 m/s. Calcolare **(a)** la velocità del suono e **(b)** il numero di Mach in tale sezione quando la temperatura è di 30 °C.

Ipotesi L'aria si comporta come un gas perfetto.

Proprietà Per l'aria la costante è $R = 0,287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ e il rapporto tra i calori specifici alla temperatura di 30 °C è $k = 1,4$.

Analisi

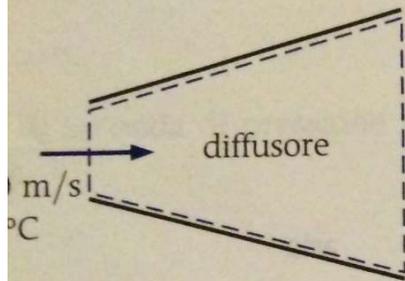
(a) Dalla 2.41 si ha

$$c = \sqrt{kRT} = \sqrt{1,4 \times 0,287 \times 1000 \times 303} = 349 \text{ m/s}$$

(b) Il numero di Mach è allora

$$\text{Ma} = \frac{V}{c} = \frac{200}{349} = 0,573$$

Discussione Nella sezione di ingresso del diffusore il moto è subsonico, perché $\text{Ma} < 1$.

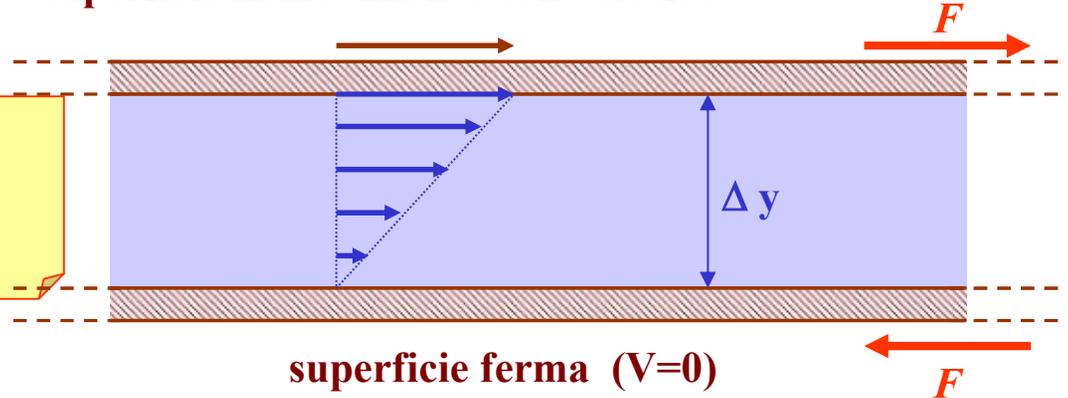


Esempio 2.4.

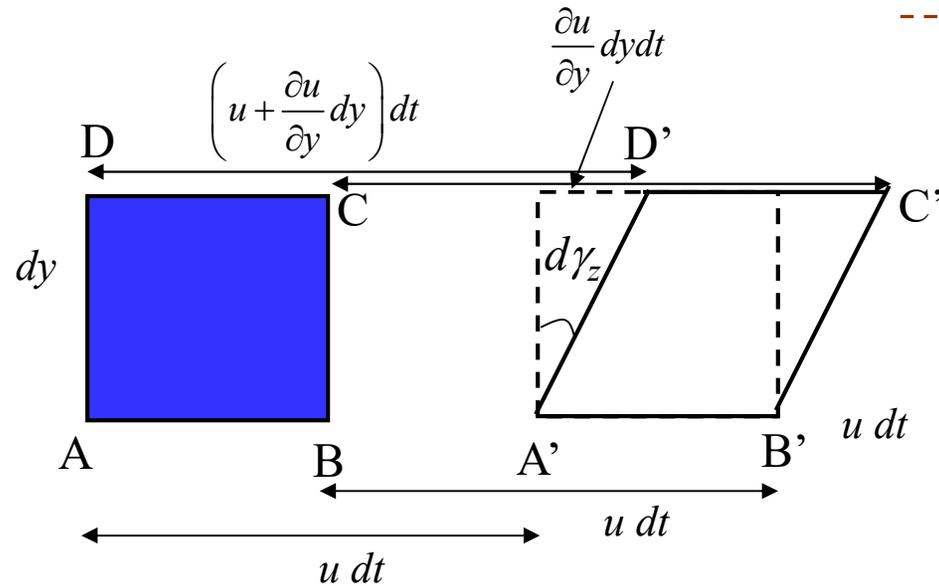
Viscosità (modello a scala del continuo di interazioni a scala molecolare per le azioni superficiali tra strati di fluido)

esperimento ideale

superficie in movimento con velocità V



$$\frac{F}{A} \propto \frac{V}{\Delta y} \quad \rightarrow \quad \tau = \frac{F}{A} = \mu \cdot \frac{\partial V}{\partial n}$$



$\mu =$ viscosità
[N s/ m²]

proprietà del
fluido

$\nu = \mu/\rho$ viscosità cinematica [m²/s]

ν rappresenta il prodotto tra la velocità di agitazione molecolare e la distanza percorsa dalle particelle prima di urtare quelle adiacenti

$$\frac{\partial u}{\partial y} dy dt = - dy d\gamma_z \quad \frac{d\gamma_z}{dt} = - \frac{\partial u}{\partial y}$$

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} = -\mu \frac{d\gamma_z}{dt}$$

lo sforzo tangenziale si può legare alla velocità di deformazione angolare $d\gamma$ della particella fluida

Variazione della viscosità con la temperatura θ

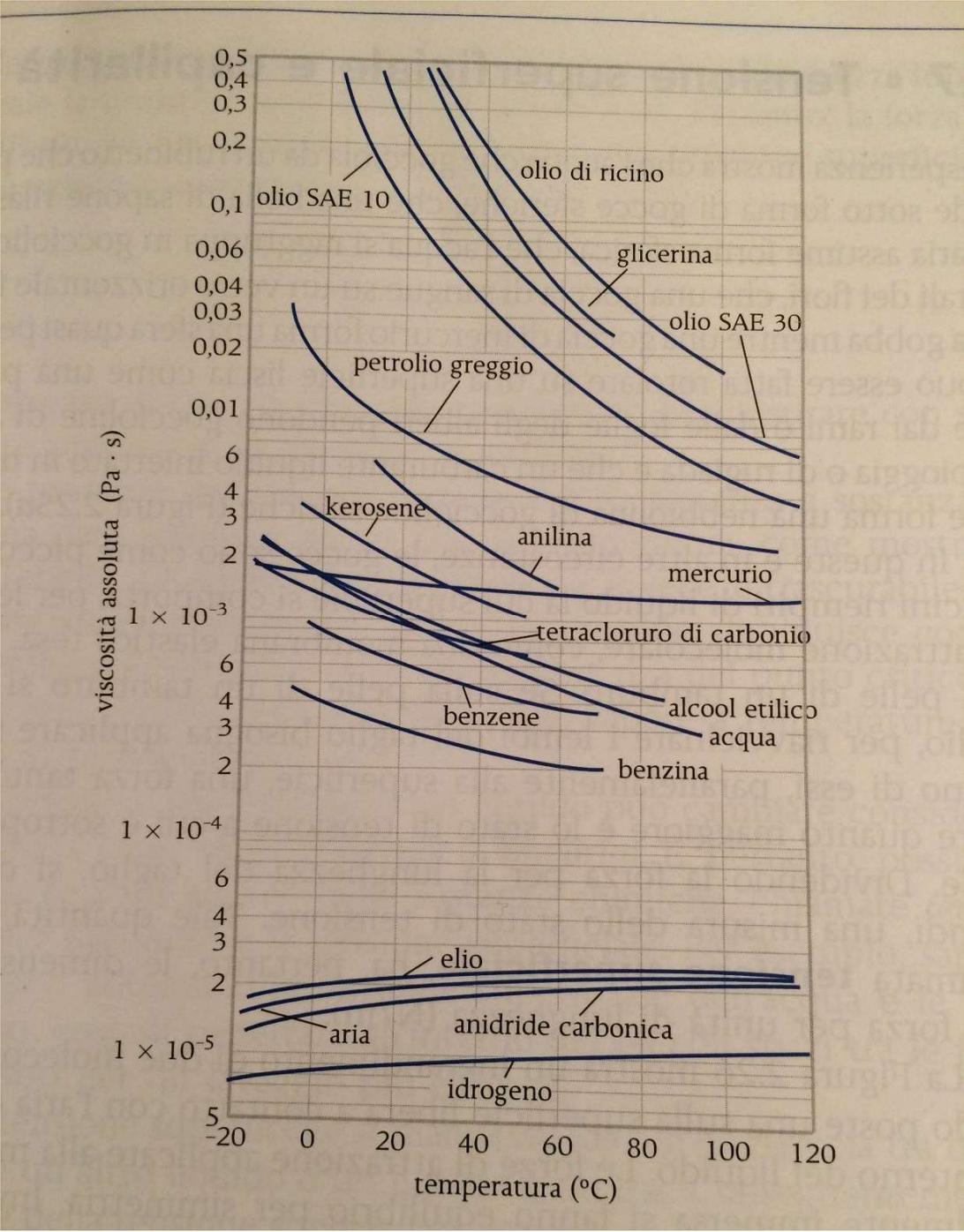
Liquidi: aumento di temperatura produce aumento di energia interna che contrasta le forze di coesione intermolecolare. Molecole si muovono più liberamente;

Gas: forze di coesione assenti. Aumento di temperatura produce aumento di energia interna e quindi del numero di urti tra particelle

Gas $\Rightarrow \mu = \frac{A \cdot \sqrt{\theta}}{\left(1 + \frac{B}{\theta}\right)}$ $\mu \uparrow \theta \uparrow$ dove A e B sono opportuni coeff.

Liquidi $\Rightarrow \mu \downarrow \theta \uparrow$ ad esempio per l'acqua :

$\mu = \mu_0 \cdot (1 + a \cdot \theta + b \cdot \theta^2)^{-1}$
 $\mu_0 = \mu(0^\circ\text{C}) = 1.773 \text{ E-5 [N}\cdot\text{s/m}^2\text{]} = \text{Pa/s]$

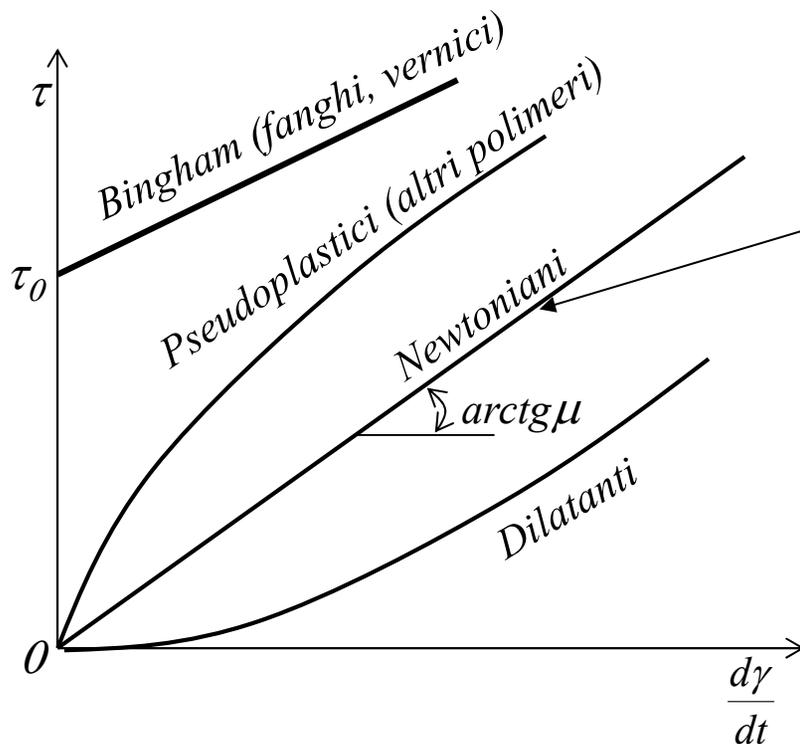


FLUIDI NON NEWTONIANI

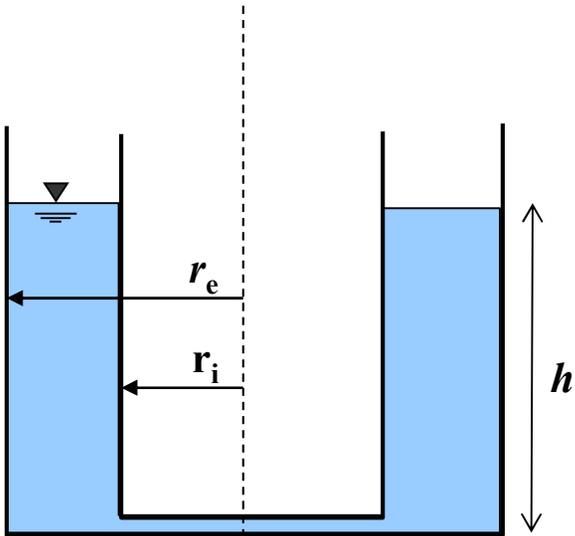
$$\text{Eq. reologica} \quad \tau = f\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)$$

- diversi tipi di fluidi:*
- A) fluidi le cui caratteristiche reologiche sono indipendenti dal tempo
 - B) *fluidi per i quali il legame sforzi-deformazioni dipende dal tempo*
 - C) *fluidi che possiedono alcune caratteristiche dei solidi, parziale reversibilità alle deformazioni*

A) indipendenti dal tempo



Rispettano la legge di Newton, per esempio, aria e acqua



Esperienza dei cilindri coassiali

- ✓ se si mette in rotazione il cilindro esterno \Rightarrow dopo poco ruota anche quello interno $\Rightarrow \exists$ **gli sforzi tangenziali**
- ✓ se si vuole mantenere fermo il cilindro interno occorre applicare una coppia resistente (es. una forza tangenziale T)
- ✓ all'interfaccia solido-liquido $\Delta u = 0$
- ✓ se $(r_e - r_i)$ è piccolo \Rightarrow si può supporre che u vari quasi linearmente

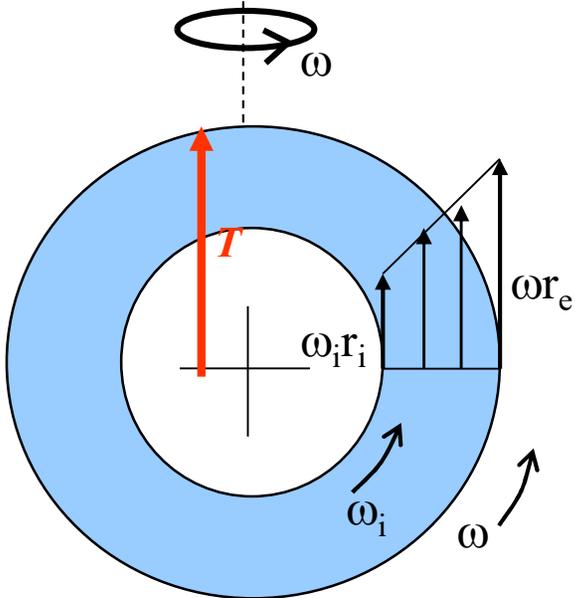
$$T = \mu \cdot A_{\text{int}} \cdot \frac{\Delta u}{\Delta r}$$

dove : $A_{\text{int}} = 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot h$ - superficie di contatto solido liquido

$\Delta u = \omega \cdot r_e - \omega_i \cdot r_i$ - diff. di velocità alle pareti

$$\Delta r = r_e - r_i$$

μ è un coeff. di proporzionalità $[N \cdot s / m^2]$ \Rightarrow **Def.** \Rightarrow Viscosità



T è la forza tangenziale necessaria a mantenere fermo ($\omega_i = 0$) oppure in rotazione a velocità angolare costante ($\omega_i = \text{cost}$) il cilindro interno

Esempi:

Un olio lubrificante è posto tra due piatti piani e paralleli. Un piatto è fisso, l'altro si muove con velocità $v = 3$ m/s. Nota la distanza tra i due piatti $h = 2.6$ cm, determinare lo sforzo di taglio nel lubrificante. $\mu_{\text{olio}} = 0.26$ [N s/m²]

$$\tau = \mu \, dv/dn \Rightarrow \tau = \mu \, v/h \Rightarrow \tau = 0.26 * 3 / 0.026 = 30 \text{ [N/m}^2\text{]} = 30 \text{ [Pa]}$$

nota: anche se si tratta di olio a viscosità elevata, lo sforzo di taglio è piuttosto modesto. La pressione atmosferica è 101.325 [Pa], più di 3000 volte più grande.

Il momento torcente applicato sul cilindro interno si trova con semplici considerazioni a partire dalla conoscenza di T

$$M = TR = \mu V / s AR$$



$$M = \mu \frac{4\pi^2 h n R^3}{s}$$

$$\text{con } n = \frac{\omega}{2\pi}$$

ESEMPIO 2.5 Determinazione della viscosità di un fluido

L'intercapedine di un viscosimetro a cilindri (Figura 2.23), avente spessore $s = 0,15$ cm, è piena di liquido per un'altezza $h = 40$ cm. Tenendo fermo il cilindro esterno, per porre in rotazione a $n' = 300$ rpm il cilindro interno, di raggio $R = 6$ cm, occorre applicarvi un momento $M = 1,8$ N·m. Determinare la viscosità del liquido.

Ipotesi Essendo $s/R \ll 1$, il profilo di velocità è praticamente lineare.

Analisi Dalla 2.53 si ha

$$\mu = \frac{Ms}{4\pi^2 h n R^3} = \frac{1,8 \times 0,0015}{4 \times \pi^2 \times 0,4 \times 0,06^3 \times 300 / 60} = 0,158 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

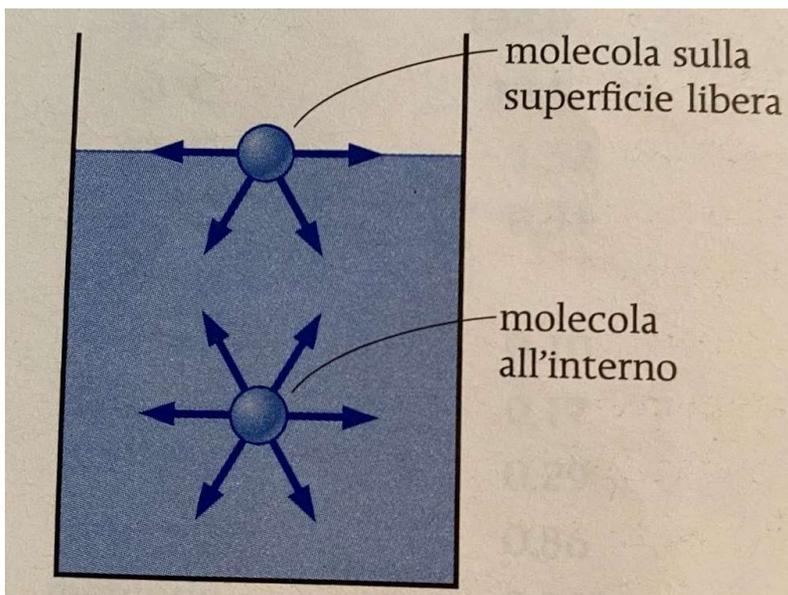
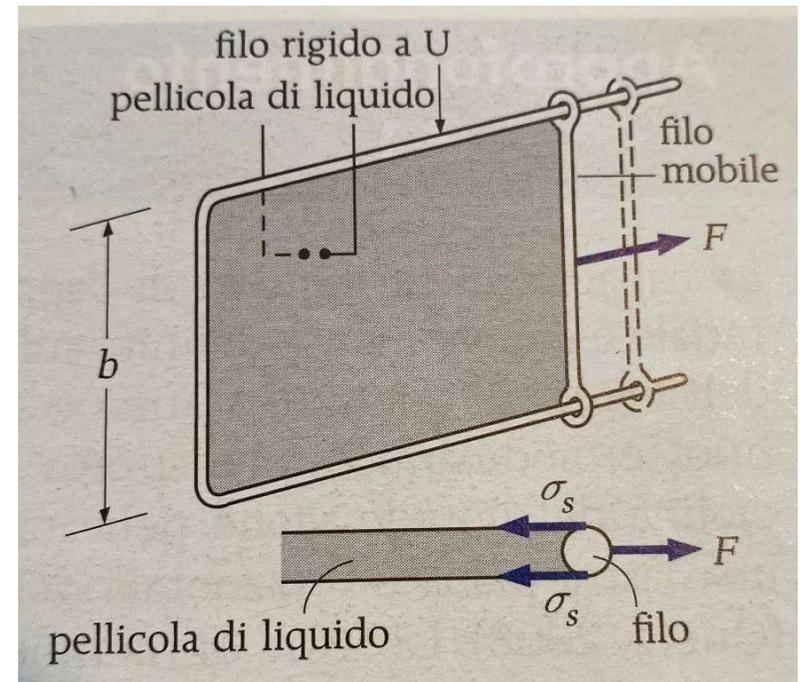
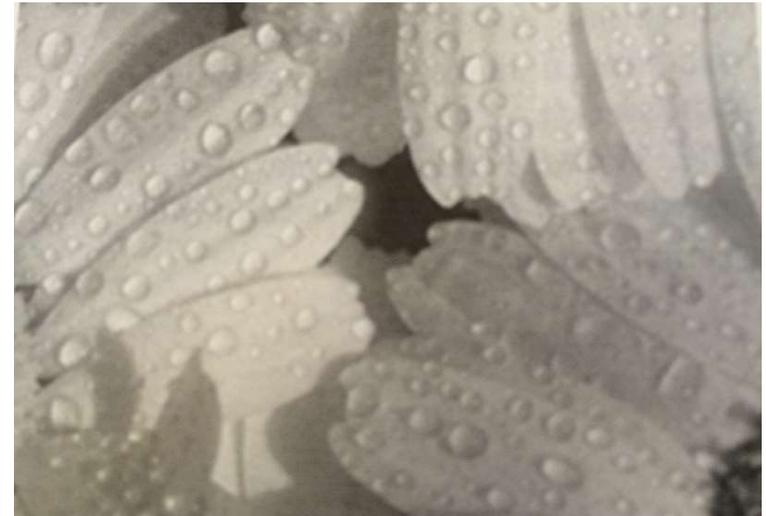
Discussione La viscosità è funzione della temperatura. Pertanto, durante l'esperimento va misurata anche la temperatura.

Tensione superficiale

Le gocce d'acqua su una foglia, le bolle di sapone, una piccola parte di mercurio etc., tendono a disporsi con una forma sferica

E' come se, all'interfaccia tra un liquido e un gas, si formasse una pellicola che mantiene la forma della goccia

Dovuto alle azioni molecolari che non sono bilanciate in corrispondenza della superficie di separazione tra liquido e gas



$$l = 2b$$

Lunghezza della linea di separazione tra liquid e gas

Tensione superficiale

Si definisce tensione superficiale tale forza diviso per la lunghezza del taglio

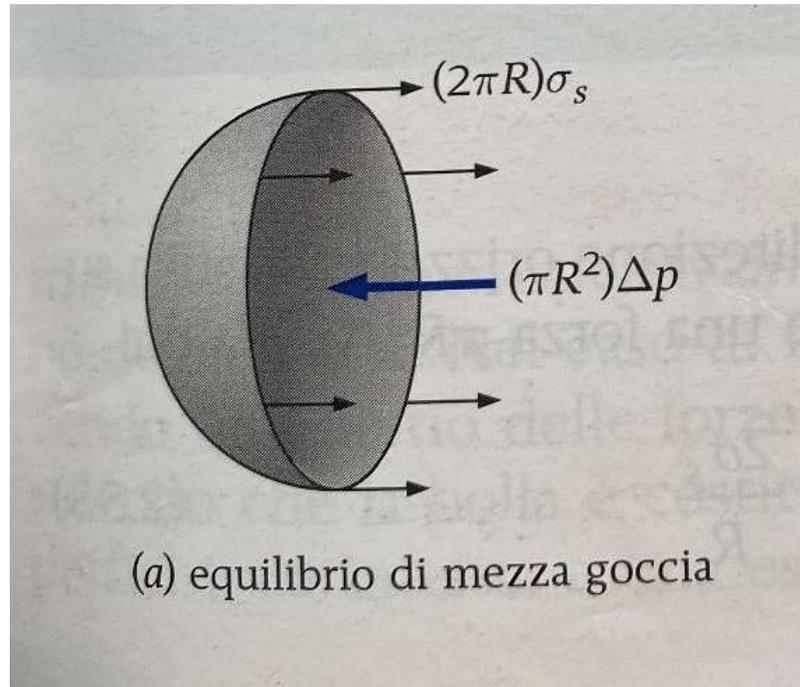
$$\sigma = \frac{F}{l} [N/m]$$

Per un dato liquido, assegnate le caratteristiche del gas, la tensione superficiale varia con la temperatura e con il fluido



TABELLA 2.4 Tensione superficiale di alcuni fluidi a contatto con aria a pressione atmosferica (1013 hPa) e a 20 °C (salvo diversa specificazione)

fluido	tensione superficiale (N/m)
acqua:	
0 °C	0,076
20 °C	0,073
100 °C	0,059
300 °C	0,014
glicerina	0,063
olio SAE 30	0,035
mercurio	0,440
alcool etilico	0,023
sangue a 37 °C	0,058
benzina	0,022
ammoniaca	0,021
sapone (soluz.)	0,025
kerosene	0,028



$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R} [N/m^2]$$

La pressione a cui resiste la goccia è inversamente proporzionale al raggio di curvatura della goccia stessa

Effetti di capillarità

Una conseguenza pratica della tensione superficiale è la capillarità

Tra un liquido e una superficie solida non si può avere un angolo di contatto tra superficie del liquido e parete del contenitore pari a 90° ($R=0$), altrimenti la forza F sarebbe infinita. Si forma un menisco con raggio di curvatura R

A causa della differenza tra le forze di coesione molecolare all'interno del liquido e le forze di adesione tra liquido e superficie solida, l'angolo Φ sarà <90 (liquido che bagna)

o > 90 (liquido che non bagna)

Se il liquido è in un tubicino piccolo si forma una superficie di separazione concava o convessa con R finito e si sviluppano salti di pressione all'interfaccia

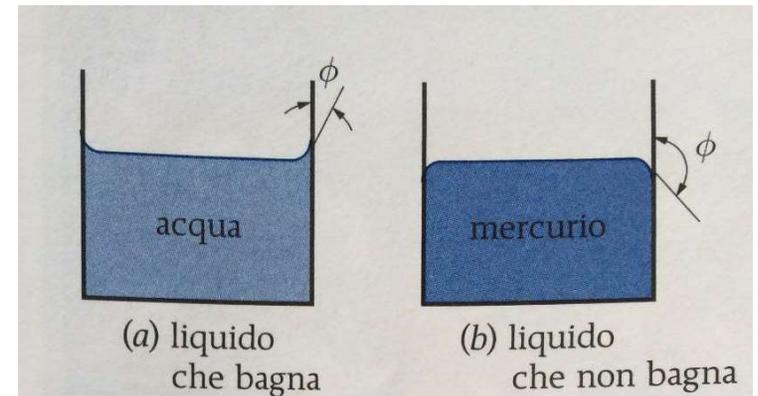


Figura 2.29

Angolo di contatto per liquidi che bagnano e liquidi che non bagnano.



Figura 2.30

Il menisco di acqua colorata in un tubo di vetro di 4 mm di diametro.

Effetti di capillarità: risalita

La capillarità provoca una risalita (o discesa) del fluido all'interno di cavità con diametro piccolo

L'equilibrio tra le forze fornisce:

$$P = F \quad \Rightarrow \quad \frac{\rho g \pi D^2 h}{4} = \pi D \sigma \cos \phi \quad \Rightarrow \quad h = \frac{4\sigma}{\rho g D} \cos \phi$$

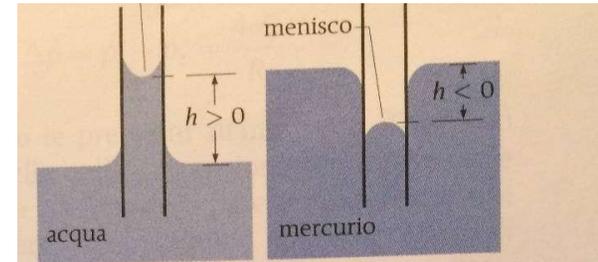


Figura 2.31

In un tubo di vetro di piccolo diametro la capillarità provoca un innalzamento del livello se il liquido è acqua e un abbassamento se il liquido è mercurio.

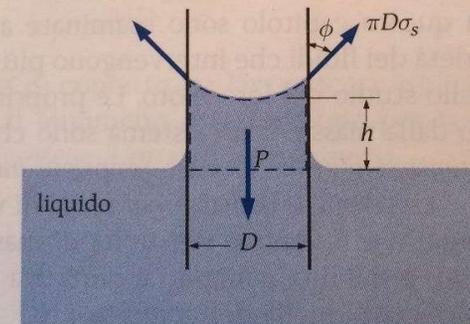


Figura 2.32

Forze agenti su una colonna di liquido risalita per capillarità in un tubo.

ESEMPIO 2.6 Risalita capillare di acqua in un tubo

Determinare la risalita capillare in un tubo di vetro del diametro di 0,6 mm inserito in un recipiente contenente acqua a 20 °C (Figura 2.33).

Ipotesi Il recipiente è in aria a pressione atmosferica.

Proprietà La tensione superficiale dell'acqua a 20 °C è $\sigma_s = 0,073$ N/m, l'angolo di contatto acqua-vetro è $\phi = 0^\circ$ e la densità è $\rho = 1000$ kg/m³.

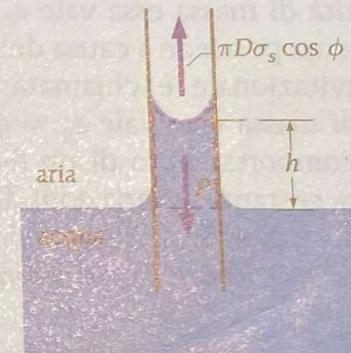


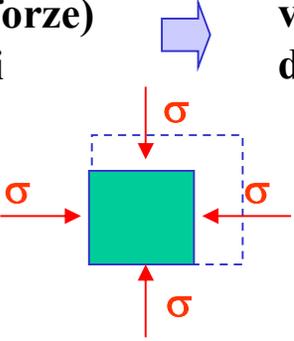
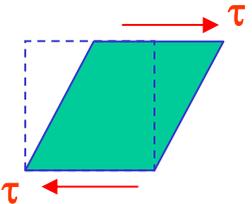
Figura 2.33
Schema dell'Esempio 2.6.

Analisi Dalla 2.57 si ha

$$h = \frac{4\sigma_s}{\rho g D} \cos \phi = \frac{4 \times 0,073}{1000 \times 9,81 \times 0,0006} \cos 0 = 0,050 \text{ m} = 50 \text{ mm}$$

Discussione In un tubo di 60 mm la risalita capillare sarebbe di 0,5 mm, cioè difficilmente percepibile a occhio nudo. Quindi, per tubi con diametro maggiore di qualche centimetro, il fenomeno può essere del tutto ignorato.

legame sforzi ↔ deformazioni

		solidi	fluidi
			<i>liquidi</i> <i>gas</i>
sforzi (forze) normali → variazione di volume 	piccole deformazioni (ϵ grande)	grandi deformazioni (ϵ piccolo)	
		volume proprio	volume del recipiente
sforzi (forze) tangenziali → variazione di forma 	piccole deformazioni	deformazioni infinite	
		forma propria	forma del recipiente



legame sforzi (forze) tangenziali
↔ velocità di deformazione