

Meccanica dei fluidi

2^a parte

Corso di Fisica
A.A. 2024-2025



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

1

Sommario

- Fluidi reali
 - Non validità del Teorema di Bernoulli
 - Scorrimento di un liquido reale
 - Resistenza di un condotto
 - Resistenza fluidodinamica
- Flusso in regime laminare (fluido ideale)
 - Fluidi ideali e Fluidi reali
 - Resistenza fluidodinamica
 - Viscosità
 - Moto in un condotto
 - Differenza tra densità e viscosità
 - Viscosità e temperatura
- Flusso in regime laminare (fluido reale)
 - Formula di Poiseuille



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

3

Sommario

- Flusso in regime turbolento
 - Strato limite
 - Velocità critica
 - Numero di Reynolds
 - Transizione dal regime laminare al regime turbolento
 - Portata di un regime turbolento
 - Moto non stazionario nei fluidi
- Forze di Van der Walls
 - Forze di Coesione
 - Tensione superficiale
 - Forze di Adesione
- Applicazioni della tensione superficiale
 - Contatto fluido-fluido
 - Liquidi tensioattivi
 - Capillarità



Fluidi reali



Teorema di Bernoulli

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = cost$$

↑
↑
↑
altezza geometrica
altezza piezometrica
altezza cinetica

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = cost$$

↑
↑
↑
lavoro delle forze di pressione per unità di volume
energia potenziale gravitazionale per unità di volume
energia cinetica per unità di volume



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

6

Scorrimento di un liquido ideale

- Il Teorema di Bernoulli

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

- **non** é applicabile, senza correzioni, al flusso dei **liquidi reali**, in quanto non tiene conto delle forze di attrito (o, comunque, di resistenza allo scorrimento) incontrate da un liquido reale nel suo moto attraverso un *tubo di flusso* o un *condotto*.
- Ciò vale anche per il moto relativo di un corpo in un fluido.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

7

Scorrimento di un liquido ideale

- Applichiamo il teorema di Bernoulli ad un condotto orizzontale con sezione costante:

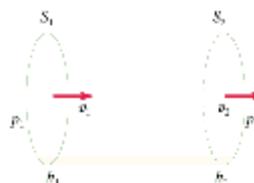
$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

- In questo caso

- $v_1 = v_2$
- $h_1 = h_2$

- quindi

- $p_1 = p_2$



- La pressione risulta, quindi, costante in tutto il condotto.

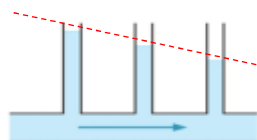


Scorrimento di un liquido reale

- Introducendo una qualche forma di **attrito** del liquido (**resistenza allo scorrimento**), come si osserva sperimentalmente, se ne deduce che il liquido dissipa energia (E_a) e quindi:

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + E_a$$

- dall'equazione di continuità



$$Sv = cost$$

$$\begin{matrix} S_1 = S_2 \\ v_1 = v_2 \\ h_1 = h_2 \end{matrix} \rightarrow$$

$$E_a = p_1 - p_2$$

- per far scorrere il liquido reale in un condotto orizzontale con velocità costante, bisogna applicare agli estremi del condotto una differenza di pressione, che serve per vincere le forze di attrito.



Fluidi reali

Resistenza del condotto



Scorrimento di un liquido reale

- Perché ci sia una portata Q di *fluido reale costante* in un condotto dalle pareti rigide, è necessario applicare alle estremità una variazione di pressione

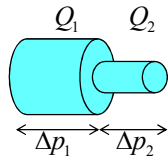


- DEF
 - Si definisce *resistenza del condotto*, il rapporto

$$R = \frac{\Delta p}{Q}$$



Resistenza di un condotto

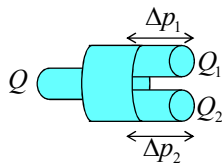


$$Q = \frac{\Delta p}{R}$$

$$Q = Q_1 = Q_2$$

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 = QR_1 + QR_2 = Q(R_1 + R_2)$$

$$\frac{\Delta p}{Q} = R = R_1 + R_2$$



$$\Delta p = \Delta p_1 = \Delta p_2$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = \frac{\Delta p_1}{R_1} + \frac{\Delta p_2}{R_2} = \Delta p \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$$\frac{Q}{\Delta p} = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$



Flusso laminare

Fluidi ideali a Fluidi reali



Moto laminare e moto turbolento

- Nel moto di un fluido reale si distinguono due **regimi** di moto: laminare e turbolento.
- Il *moto* è detto **laminare** quando il fluido si muove a strati (o lamine) che *scorrono* gli uni sugli altri, seguendo traiettorie ordinate.



- Il *moto* è detto **turbolento** quando il fluido si muove in modo caotico, senza seguire traiettorie ordinate
 - le forze viscosive non sono sufficienti a contrastare le forze di inerzia



Fluidi reali

Resistenza fluidodinamica

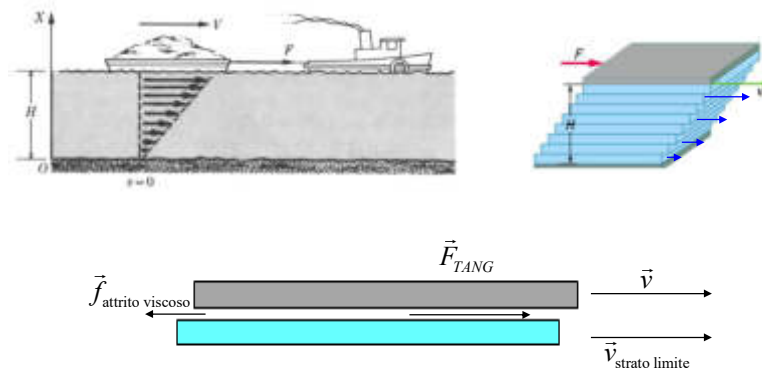


Forza di resistenza fluidodinamica

- La **forza di resistenza fluidodinamica** è quella forza che si oppone al movimento di un corpo in un fluido:
 - si chiama **forza di resistenza idrodinamica** nei liquidi,
 - si chiama **forza di resistenza aerodinamica** negli aeriformi.
- Il corpo che si muove in un fluido scambia con il fluido stesso delle forze dovute alla **viscosità** di quest'ultimo.
- La **forza di resistenza** è la componente della risultante di queste forze (F_{NET}) nella stessa direzione del vettore velocità $\mathbf{v}$ del corpo ma nel verso contrario.
- La forza dipende da:
 - natura del fluido
 - velocità
 - forma geometrica del corpo



Forza di resistenza fluidodinamica



DEF:

- La zona di fluido, generalmente molto sottile, in prossimità della superficie del corpo risente del cambiamento di velocità si chiama **strato limite**.



Flusso laminare

Viscosità



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

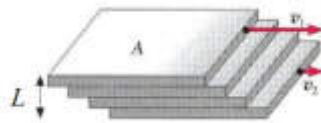
30

Viscosità

- Nel caso di moto laminare, la forza di attrito (o resistenza) *sperimentale* che si esercita fra le lamine è:

$$\vec{F}_v = -\eta A \frac{\vec{v}}{L}$$

come per l'attrito statico o dinamico, il segno meno indica il verso opposto a quello della velocità
viscosità del fluido
distanza tra le lamine



$$\eta = \frac{F_v L}{A v} = \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} \text{m} \frac{1}{\text{m}^2} \frac{\text{s}}{\text{m}} = \frac{\text{kg}}{\text{sm}}$$

$$[\eta] = \frac{[F][L]}{[A][v]} = \frac{[ML^2T^{-2}]}{[L^3T]} = [MT^{-1}L^{-1}]$$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

31

Flusso laminare

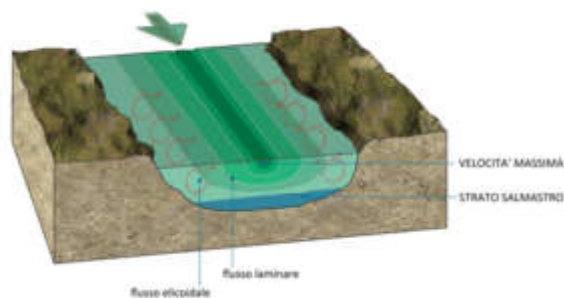
Moto in un condotto



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

33

Moto di un fluido in un condotto: fiume

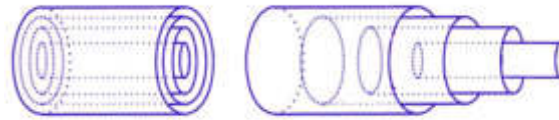


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

34

Moto di un fluido in un condotto

- Consideriamo un fluido che scorre all'interno di un condotto.
- Consideriamo, inoltre, un flusso di lamine (cilindriche) che scorrono una dentro l'altra.



parete del condotto

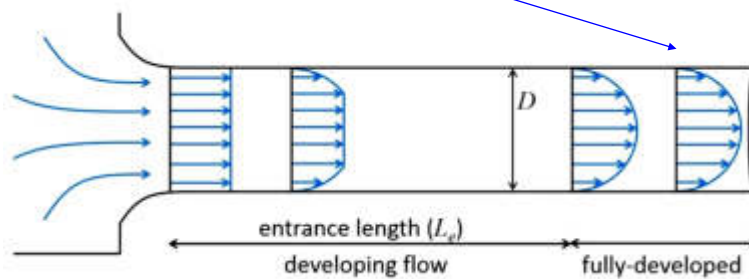


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

36

Moto di un fluido in un condotto

- Studiamo l'evoluzione del flusso all'interno di un condotto prima in *regime laminare* e poi in *regime turbolento*

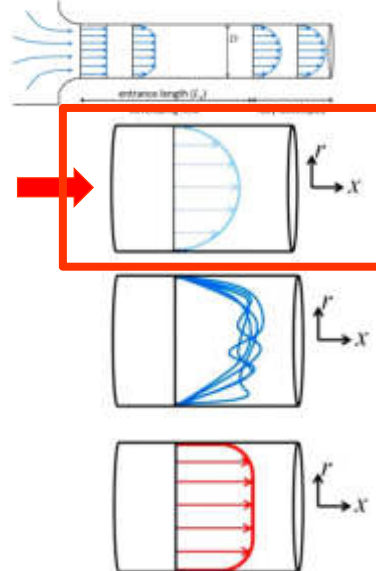


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

37

Moto di un fluido in un condotto

- Una volta sviluppato il flusso in **regime laminare**:
 - il profilo della velocità è costante nel tempo,
 - il profilo ha una forma parabolica (ogni strato laminare ha una propria velocità),
 - la velocità ha solo componente assiale,
 - la velocità varia solo nella direzione radiale.

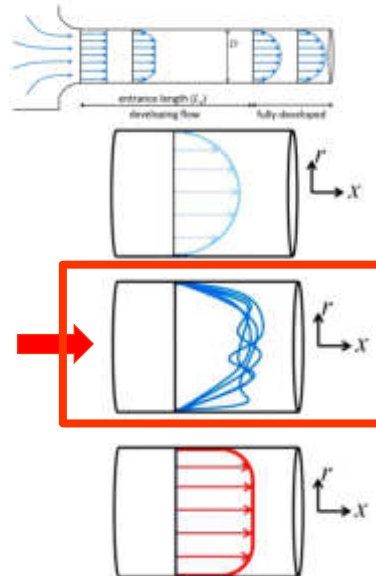


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

40

Moto di un fluido in un condotto

- Nel caso di moto in **regime turbolento**, invece,
 - il profilo della velocità istantanea può variare nel tempo in maniera non predicibile,
 - il profilo può variare da punto a punto,
 - la componente assiale della velocità è maggiore che nel caso precedente (laminare),
 - i vortici fanno sì che gli strati si sovrappongano.

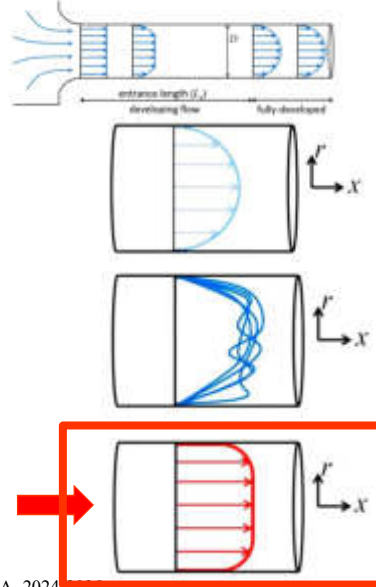


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

41

Moto di un fluido in un condotto

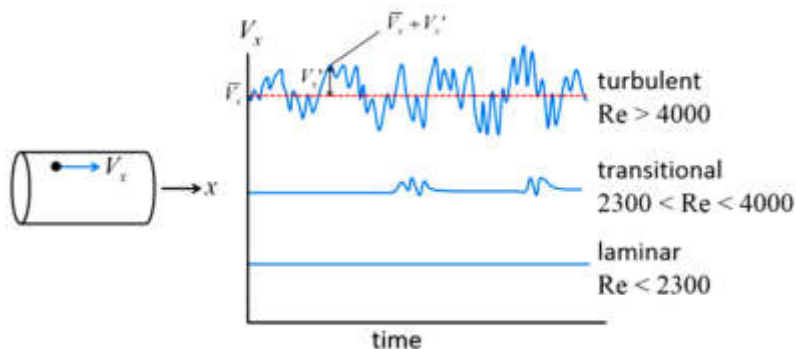
- Se, Nel caso di moto in **regime turbolento**, facciamo la media (cioè NON consideriamo il profilo istantaneo ma quello mediato delle velocità):
 - il profilo delle velocità mediate appare costante nel tempo,
 - appare la sola componente assiale,
 - la componente assiale varia radialmente,
 - appaiono velocità significative anche in prossimità delle pareti del condotto.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

Moto di un fluido in un condotto

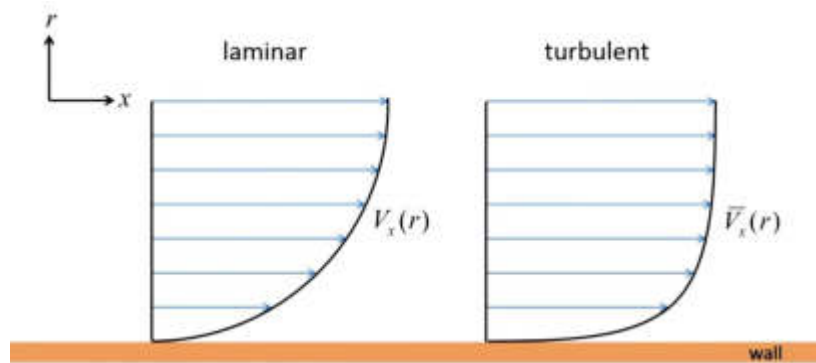
- Se andiamo a vedere le velocità, noteremo che
 - nel caso di **regime laminare**, la velocità è costante
 - nel caso di **regime turbolento** la velocità varia casualmente
 - esiste una zona intermedia "**regime di transizione**" tra i due precedenti



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

43

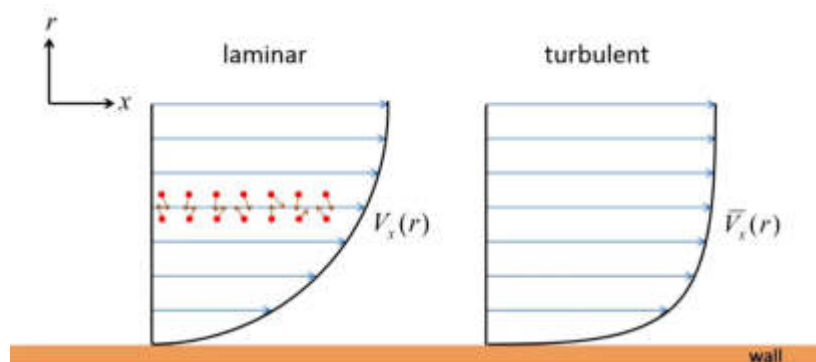
Moto di un fluido in un condotto



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

44

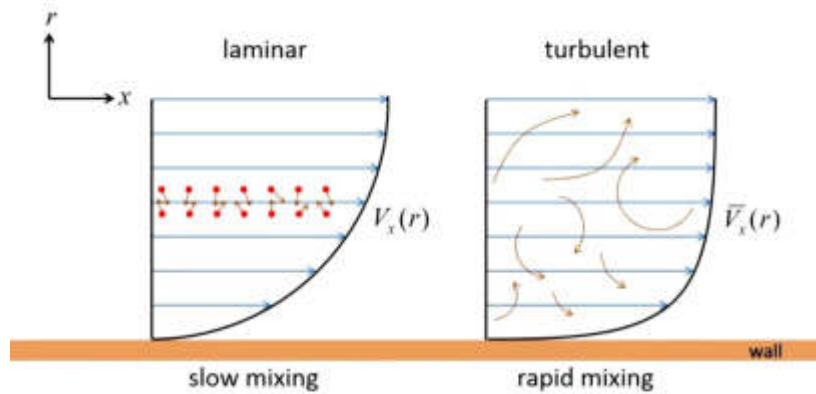
Moto di un fluido in un condotto



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

45

Moto di un fluido in un condotto

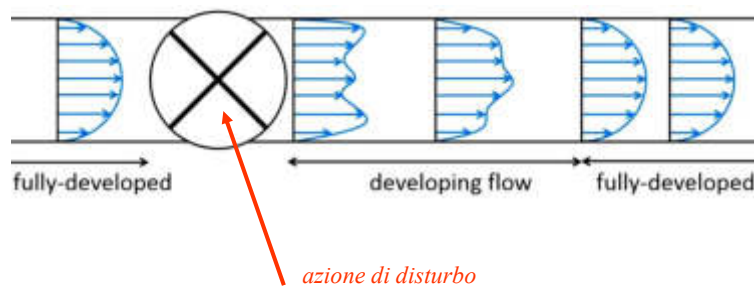


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

46

Azione di disturbo

- Se il flusso è disturbato in qualche maniera, c'è bisogno di una certa distanza perché assuma nuovamente il profilo di velocità che aveva precedentemente ...

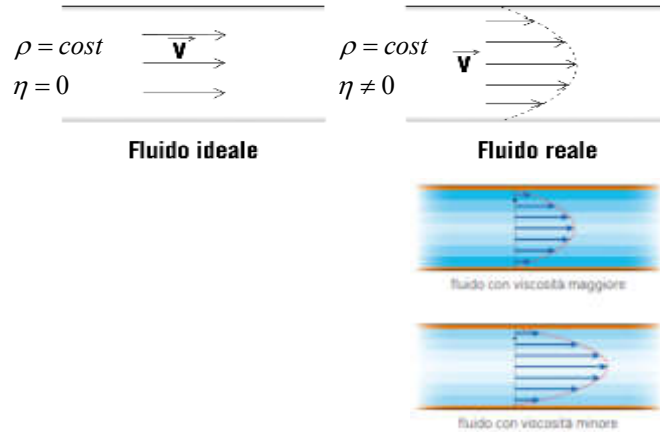


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

47

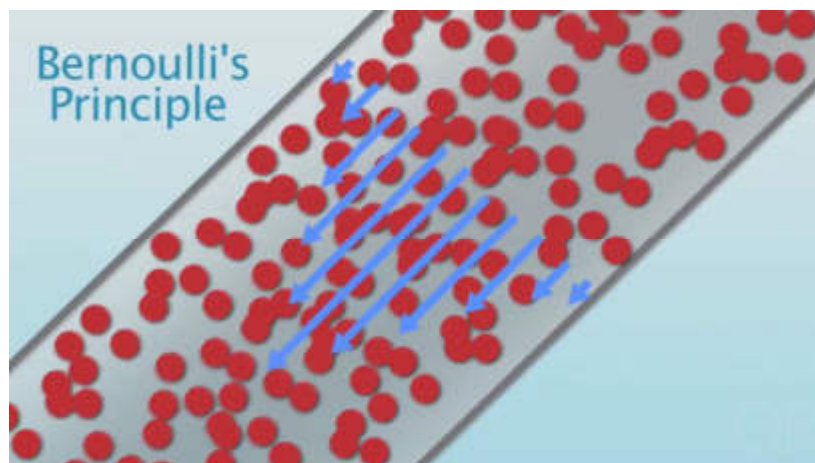
Fluidi ideali e Fluidi reali

- La differenza, quindi, tra il campo vettoriale delle velocità di scorrimento nel **moto laminare** nel caso di **fluidi ideali** e **fluidi reali** è la seguente:



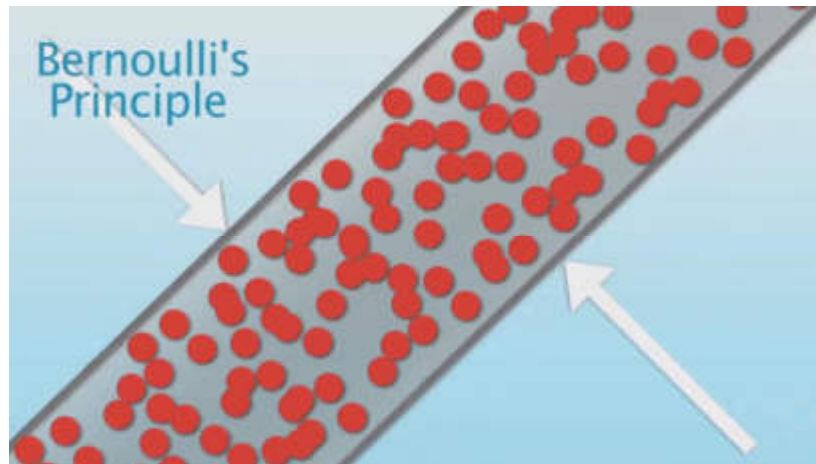
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

48



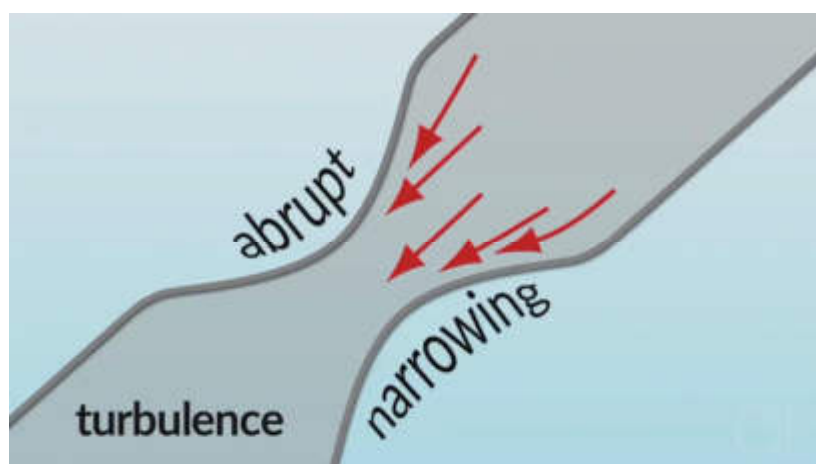
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

53



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

54



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

55

Viscosità

- Un corpo che si muove in un fluido (liquido o aeriforme) scambia con il fluido stesso delle forze dovute alla *viscosità* di quest'ultimo.
- La viscosità è una proprietà intrinseca di ogni fluido e si può immaginare come la resistenza che il fluido stesso incontra nello scorrere.



Differenza tra densità e viscosità

- **Densità di un materiale:** rapporto tra la sua massa ed il suo volume
 - **massa:**
 - quantità di materia presente in un corpo
 - costante legata al comportamento dinamico del corpo, quando sottoposto ad una F_{NET}
 - non varia con la temperatura
 - **volume:**
 - estensione spaziale occupata dal corpo
 - può variare in funzione della temperatura (dilatazione: aumenta la densità/contrazione: aumenta la densità)
 - La densità, essendo un rapporto tra massa e volume, ha come unità di misura il kg/m^3 . Il materiale in esame può essere sia un liquido che un solido o un gas.
- **Viscosità**
 - grandezza fisica relativa a fluidi ed i gas
 - rappresenta la *resistenza di un fluido allo scorrimento*
 - *coefficiente di scambio di quantità di moto*, cioè la resistenza che il fluido oppone allo scorrimento.
 - Il coefficiente di viscosità ha unità di misura il kg/ms
- **Fluidità**
 - grandezza fisica reciproca della viscosità.

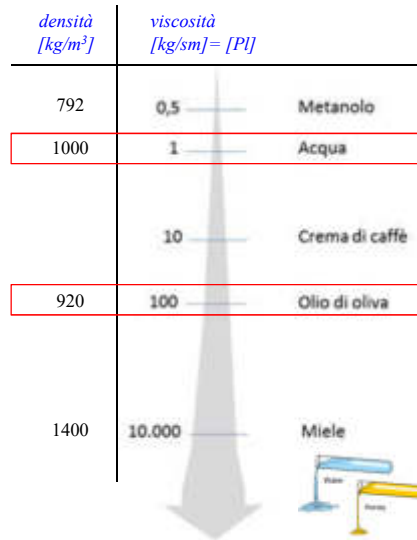


Differenza tra densità e viscosità

- Nel linguaggio “comune” si dice, ad esempio, che l'olio è “più denso” dell'acqua, intendendo “più viscoso”.

- SBAGLIATO!!!**

- Invece l'olio è più “leggero” dell'acqua.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

61

Coefficiente di viscosità

Fluido	Coefficiente di attrito-viscosità
acqua (10 °C)	$1,298 \cdot 10^{-3}$ Pl
acqua (20 °C)	$1,202 \cdot 10^{-3}$ Pl
acqua (50 °C)	$5,47 \cdot 10^{-4}$ Pl
acqua (100 °C)	$2,7122$ Pl
olio (1 °C)	$17 \cdot 10^{-3}$ Pl
olio (20 °C)	$13,6 \cdot 10^{-3}$ Pl
olio (50 °C)	$7,96$ Pl
olio (100 °C)	$4,7$ Pl
olio (200 °C)	$2,3$ Pl
olio (300 °C)	$1,2$ Pl
olio (400 °C)	$0,7$ Pl
olio (500 °C)	$0,4$ Pl
olio (600 °C)	$0,25$ Pl
olio (700 °C)	$0,15$ Pl
olio (800 °C)	$0,1$ Pl
olio (900 °C)	$0,07$ Pl
olio (1000 °C)	$0,05$ Pl
olio (1100 °C)	$0,04$ Pl
olio (1200 °C)	$0,03$ Pl
olio (1300 °C)	$0,02$ Pl
olio (1400 °C)	$0,01$ Pl
olio (1500 °C)	$0,005$ Pl
olio (1600 °C)	$0,002$ Pl
olio (1700 °C)	$0,001$ Pl
olio (1800 °C)	$0,0005$ Pl
olio (1900 °C)	$0,0002$ Pl
olio (2000 °C)	$0,0001$ Pl

Fluido	Temp (°C)	Viscosità (Poleuille Pl)
Plasma	37	0,0015
Sangue	37	0,004
Glicerina	20	1,48
Olio	16	0,113
Olio	38	0,034
Acqua	20	0,0011
Acqua	37	0,00069
Aria	18	0,0000183

LIQUIDO	COEFFICIENTE DI VISCOSITÀ (mPa·s)	TEMPERATURA (°C)
acqua	1,79	0
	1,00	20
	0,28	100
alcol etilico	1,20	20
glicerina	1490	20
mercurio	1,685	0
	1,554	20
	1,240	100
olio d'oliva	84,0	20
olio per motori	200	30
sangue	4,0	37

Fonte: libro di testo



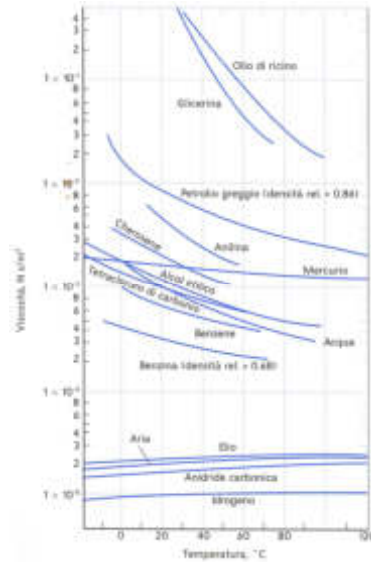
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

63

Coefficiente di viscosità

$$\eta = \frac{F_v L}{A v} = F_v \left[\frac{L}{A v} \right]$$

$$\eta = \frac{kg \, m}{s^2} \left[m \frac{1}{m^2} \frac{s}{m} \right] = N \frac{s}{m^2}$$

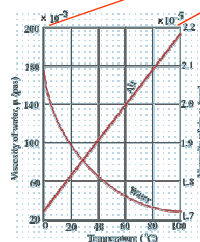
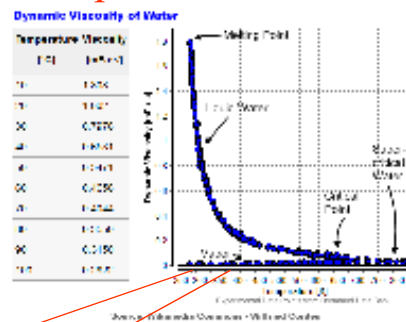


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

64

Viscosità e Temperatura

- Liquidi
 - La forza di coesione tra le molecole scende con l'aumento della temperatura T
- Gas
 - Urti tra molecole lontane
 - $\eta_{\text{GAS}} \propto \eta_{\text{LIQ}}$
 - La viscosità aumenta con T perché aumenta l'agitazione termica e, quindi, la frequenza degli urti



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

65

Regime laminare (fluido reale)

- Se si fa scorrere un fluido *omogeneo* in regime *laminare*, in un condotto rigido, a *sezione circolare*, e si eseguono una serie di misure sperimentali (cambiando di volta in volta la variazione di pressione agli estremi Δp , il raggio r , la lunghezza l del condotto e il tipo di fluido) si deriva la legge empirica:

$$R = \frac{8\eta l}{\pi r^4} \quad \text{Legge empirica}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{definizione} \quad R = \frac{\Delta p}{Q} \\ \text{sperimentale} \quad R = \frac{8\eta l}{\pi r^4} \end{array} \right\} \rightarrow Q = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \Delta p \quad \text{Formula di Poiseuille (portata in regime laminare)}$$

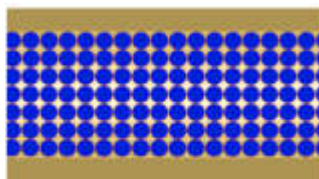


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

67

Regime laminare (fluido reale)

- Flusso laminare per un *fluido reale* in un tubo (si noti che le particelle al centro del tubo si muovono più velocemente, in quanto risentono in misura minore dell'effetto dissipativo delle pareti).



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

68

Regime laminare

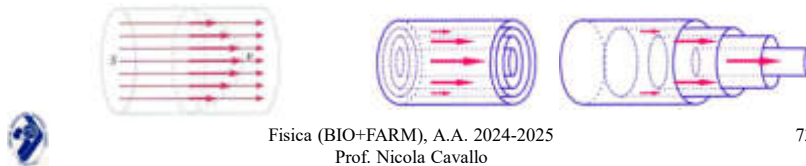
- Poiché in regime stazionario (nel caso di un condotto rigido cilindrico con raggio r)

$$Q = Sv = \pi r^2 v = \text{costante}$$

- la Formula di Poiseuille stabilisce una relazione tra la forza che esercita la pressione e la velocità del fluido:

$$\vec{F}_p = 8\pi\eta l \vec{v}$$

- Tale proporzionalità (*caratteristica del moto laminare*):
 - non provoca rumore, cioè è *silenzioso*
 - mostra*, nel caso di fluido omogeneo, un *profilo parabolico delle velocità delle lamine*



73

Flusso turbolento

Numero di Reynolds



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

75

Regime turbolento: velocità critica

- Se aumentiamo la velocità del fluido nel condotto, aumentando Δp agli estremi del condotto, si osserva sperimentalmente che la formula di Poiseuille cessa di valere, quando il fluido raggiunge e supera una certa **velocità critica**:

$$Q = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \Delta p$$

formula di Poiseuille

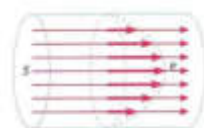
per

$$v > v_c = \Re_e \frac{\eta}{\rho r}$$

Numero di Reynolds
(costante adimensionale)

$$\Re_e = \frac{\rho v l}{\eta}$$

- La spiegazione risiede nel passaggio dal **regime laminare** al **regime turbolento** (detto anche vorticoso)



a) linee di velocità in regime laminare



b) linee di velocità in regime turbolento



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

76

Numero di Reynolds

- Il **numero di Reynolds**, di fatto, può essere definito come il rapporto tra le forze relative all'inerzia e quelle viscosi

$$\Re_e = \frac{\text{forze d'inerzia}}{\text{forze viscosi}}$$

favorisce il flusso turbolento

favorisce il flusso laminare

- Per alti valori di $\Re_e$, le forze d'inerzia predominano e il flusso sarà turbolento
- Bassi valori di $\Re_e$ implicano che le forze viscosi predominino ed il flusso sarà laminare



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

77

Numero di Reynolds

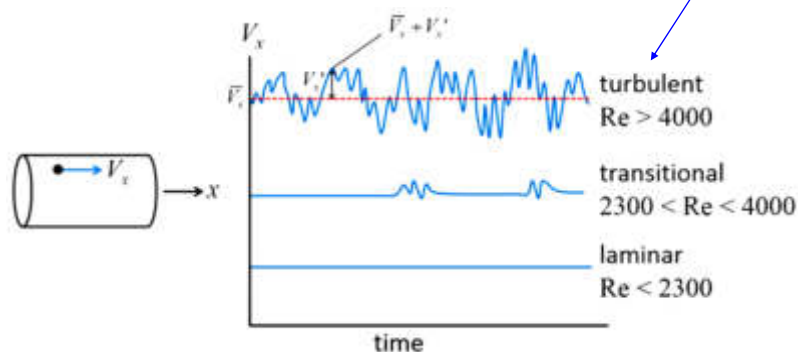
- Il *numero di Reynolds* è una quantità adimensionale.

$$\Re_e = \frac{\rho v l}{\eta} = \frac{\left[\frac{kg}{m^3}\right] \left[\frac{m}{s}\right] [m]}{\left[\frac{kg}{ms}\right]} = \left[\frac{kg}{m^3}\right] \left[\frac{m}{s}\right] [m] \left[\frac{ms}{kg}\right]$$



Moto di un fluido in un condotto

- Se andiamo a vedere le velocità, noteremo che
 - nel caso di *regime laminare*, la velocità è costante
 - nel caso di *regime turbolento* la velocità varia casualmente
 - esiste una zona intermedia "*regime di transizione*" tra i due precedenti

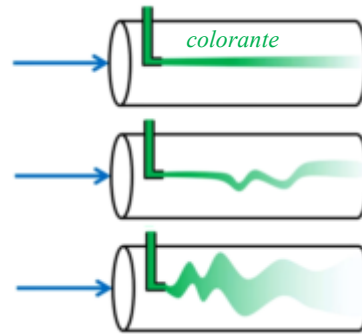


Numero di Reynolds

- Il *numero di Reynolds* ci consente di distinguere i regimi di scorrimento di un fluido

- Immaginiamo tre condotti (dimensioni differenti) con un fluido blu (differente) che scorre a velocità (differente)

- Nel condotto inferiore, il liquido verde scorre sempre in modo non predicibile (caotico) e si miscela con il liquido blu molto velocemente.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

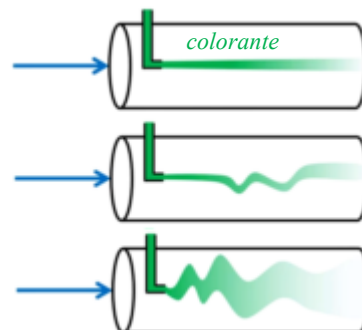
80

Numero di Reynolds

- Il numero di Reynolds ci consente di distinguere i regimi di scorrimento di un fluido

- Immaginiamo tre condotti (dimensioni differenti) con un fluido blu (differente) che scorre a velocità (differente)

- Nel condotto superiore, il liquido verde scorre in linea retta e si miscela con il liquido blu molto lentamente.

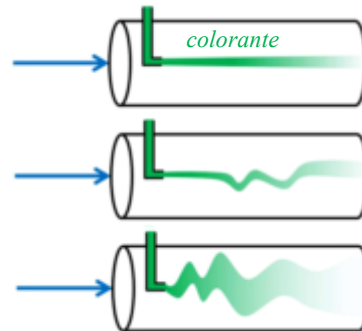


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

81

Numero di Reynolds

- Il numero di Reynolds ci consente di distinguere i regimi di scorrimento di un fluido
- Immaginiamo tre condotti (dimensioni differenti) con un fluido blu (differente) che scorre a velocità (differente)
- Nel condotto intermedio, il liquido verde scorre inizialmente in linea retta e, successivamente, inizia ad avere un moto caotico imprevedibile.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

82

Numero di Reynolds

- Il numero di Reynolds ci consente di distinguere i regimi di scorrimento di un fluido
- Immaginiamo tre condotti (dimensioni differenti) con un fluido blu (differente) che scorre a velocità (differente)

$$R_e < 2300$$

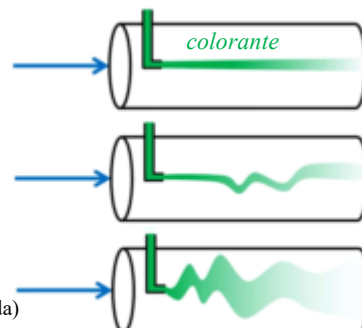
laminare (predicibile, miscelazione lenta)

$$2300 < R_e < 4000$$

transizione (scoppio turbolento)

$$R_e > 4000$$

turbolento (non predicibile, miscelazione rapida)



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

84

Numero di Reynolds

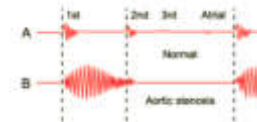
$$\begin{array}{l} \uparrow \text{velocità} \\ \uparrow \text{diametro} \\ \uparrow \text{densità} \\ \downarrow \text{viscosità} \end{array} \rightarrow \uparrow \Re_e = \frac{\rho v l}{\eta} \rightarrow \uparrow \text{rischio di turbolenza}$$



flusso laminare

v aumenta (eq. Continuità)

flusso turbolento

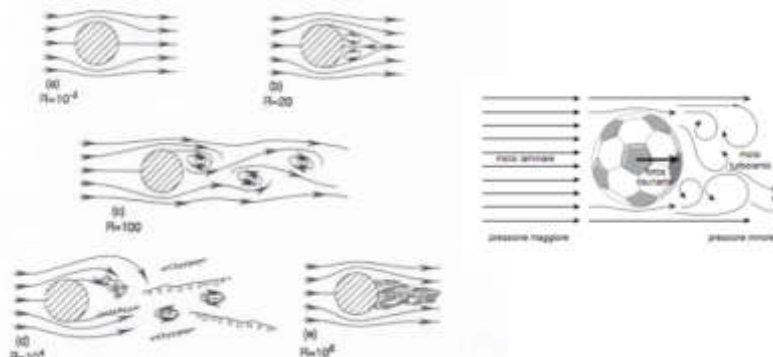


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

86

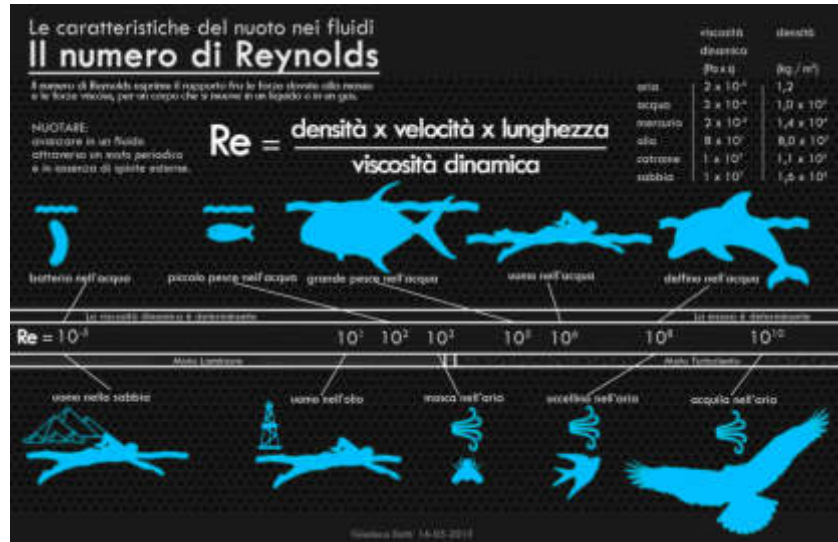
Numero di Reynolds

- Il *numero di Reynolds*
 - è costante per condotti che non offrono irregolarità.
 - in corrispondenza di strozzature o gomiti (ma anche ostruzioni) diminuisce di molto e, pertanto, in corrispondenza delle irregolarità il flusso di fluido diventa più facilmente turbolento.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

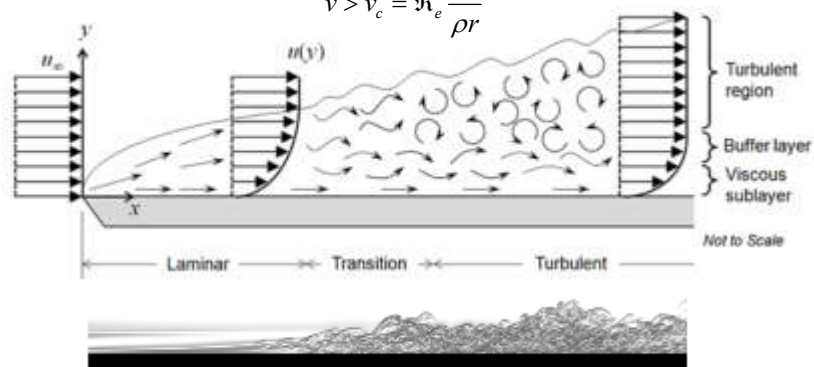
95



Da regime laminare a turbolento

- Il passaggio dal *regime laminare* al *regime turbolento* ha le caratteristiche di una transizione di fase, in quanto esso avviene bruscamente in tutto il volume del fluido, quando la condizione di velocità critica viene raggiunta.

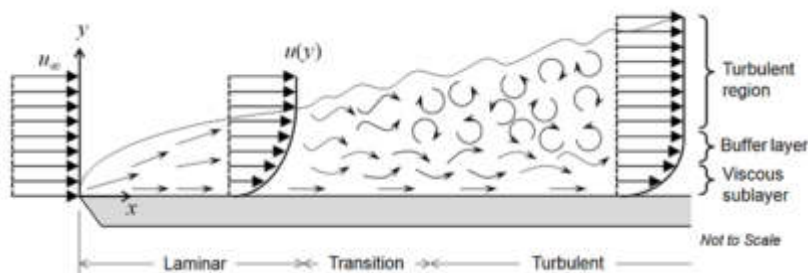
$$v > v_c = \Re_e \frac{\eta}{\rho r}$$



Portata in regime turbolento

- In *regime turbolento* la resistenza R del condotto aumenta ed appare una notevole dissipazione di energia per attrito.
- Sperimentalmente:

$$Q \approx \sqrt{\Delta p}$$



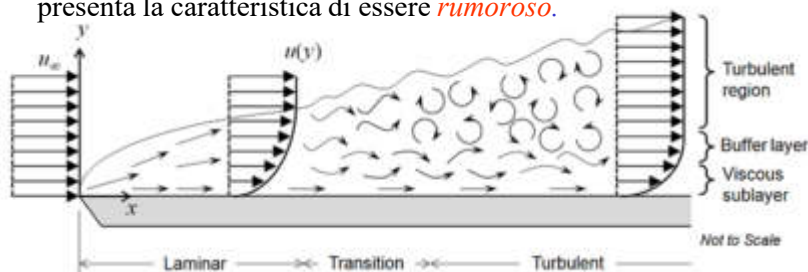
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

106

Portata in regime turbolento

$$Q \approx \sqrt{\Delta p}$$

- Per raddoppiare la portata di fluido, è necessario *quadruplicare* la differenza di pressione applicata agli estremi del condotto (e non semplicemente raddoppiarla come avviene nel regime laminare).
- Inoltre, a differenza dal regime laminare, quello turbolento presenta la caratteristica di essere *rumoroso*.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

107

Forze di Van der Walls



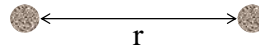
Forze di Van der Waals

- Le forze di *attrazione* o *repulsione* che si manifestano tra le molecole di una sostanza, e determinandone lo stato di aggregazione, si chiamano **Forze di Van der Waals** (1837-1924).
- Esso sono
 - forze di natura elettrica, di intensità sensibilmente minore rispetto a quelle che determinano la formazione dei legami chimici tra gli atomi,
 - agiscono a corto range, vale a dire, che si esercitano a breve distanza.
- Esse sono anche alla base di diversi fenomeni fisici e chimici
 - adesione,
 - coesione,
 - tensione superficiale,
 - diffusione,
 - viscosità,
 - comportamento dei gas non ideali.

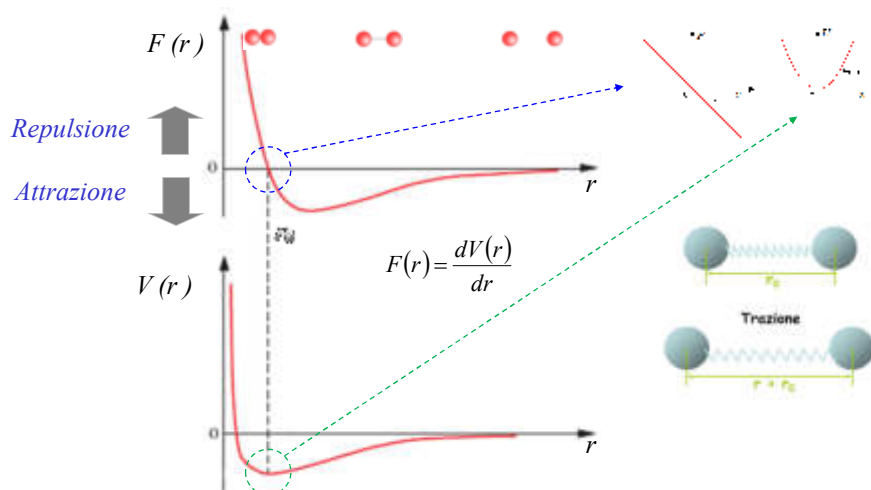


Forze di Van der Waals

- assumiamo, che le molecole
 - siano a simmetria sferica
 - che distino r tra loro



Forze di Van der Waals



Forze di Van der Waals

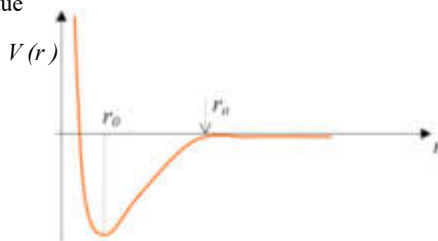
- Assumiamo che una delle due molecole stia a $r=0$

- Dalla relazione

$$F(r) = \frac{dV(r)}{dr}$$

- deduciamo che:

- per $r = r_0$ le due molecole sono in **equilibrio**,
- per $r < r_0$ l'interazione è fortemente **repulsiva**,
- per $r > r_0$ l'interazione è **attrattiva** ma decresce rapidamente con r ,
- per $r > r_a$ l'interazione è praticamente **nulla**.



- La distanza r_0 rappresenta il **diametro** della molecola (non è possibile avvicinare oltre le molecole)
- la distanza r_a è detta **raggio di azione** (due molecole a distanza $r > r_a$ sono considerate non interagenti)
- $r_a \approx 10^{-8} \text{ m}$ si dice pertanto che le forze molecolari sono a **forze corto raggio d'azione**.

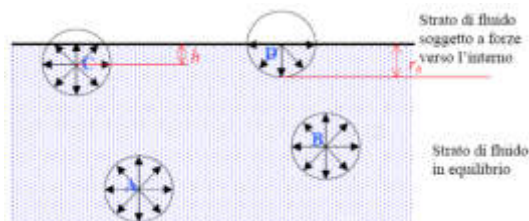


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

129

Forze di Van der Waals

- Se trascuriamo l'interazione con il fluido esterno, ogni molecola all'interno di un liquido interagisce, con le altre che la circondano contenute entro una sfera di raggio r_a .
- Per le molecole A e B, la sfera d'azione è interamente nel fluido. La risultante delle forze sulle molecole A e B è nulla.
- La molecola C, a distanza $h < r_a$ dalla superficie, è invece soggetta ad una forza risultante diretta verso l'interno del liquido. Tale forza è sempre più intensa al diminuire di h .
- La forza diventa massima per le molecole (caso D) sulla superficie ($h=0$).

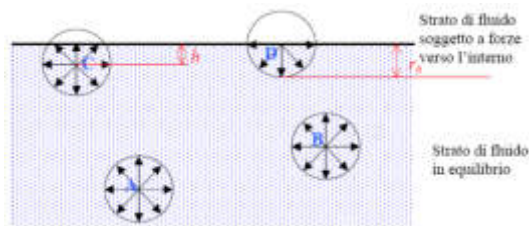


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

130

Forze di Van der Waals

- Ne consegue una forza risultante, verso l'interno del fluido, che:
 - a) tende a comprimere leggermente lo strato superficiale,
 - b) porta il liquido, a causa della compressione, a minimizzare la sua area superficiale,
 - c) fa comportare la superficie di un liquido come una membrana elastica.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

131

Forze di coesione

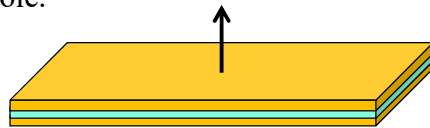


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

133

Concetto di coesione

- Una trazione su un corpo solido ne provoca la rottura.
- Analogo fenomeno avviene nei fluidi che manifestano anch'essi la tendenza a rimanere compatti.
- Esempio: per separare due superfici lisce con acqua nell'intercapedine, priva d'aria all'interno, è necessario esercitare una forza notevole.



- Chiamiamo le interazioni che si esercitano tra le molecole del liquido, *forze di coesione*.

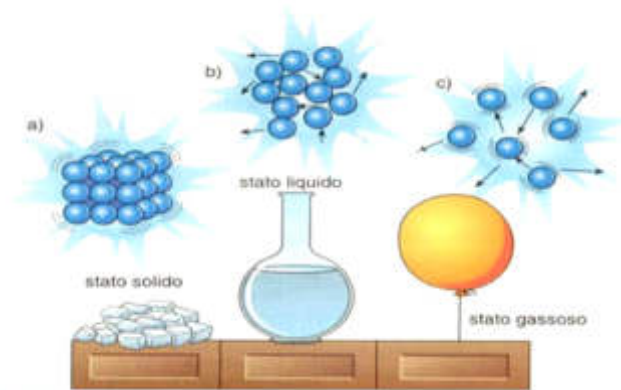


Concetto di coesione

- Nei **solidi** le forze di coesione mantengono le molecole le une accanto alle altre in posizioni fisse, permettendo loro solo di oscillare intorno a tali posizioni di equilibrio.
 - *I solidi hanno pertanto forma e volume proprio.*
- Nei **gas**, viceversa, le forze di coesione sono così deboli che le molecole sono soggette a moti rettilinei uniformi, finché non avvengono urti con altre molecole o con le pareti del recipiente.
 - *I gas assumono pertanto la forma e il volume del recipiente che li contiene.*



Concetto di coesione



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

136

Concetto di coesione

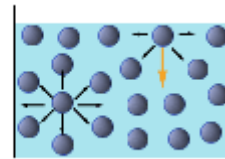
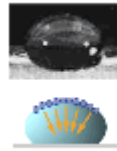
- I **liquidi** costituiscono un caso intermedio, in cui le forze di coesione sono abbastanza forti da mantenere le molecole le une accanto alle altre, ma sono tali da permettere che le molecole si scambino facilmente di posizione e, quando si trovano in superficie, possano abbandonare il liquido per passare allo stato di vapore.
 - *I liquidi hanno dunque volume proprio, ma assumono la forma del recipiente che li contiene.*



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

137

Evidenza sperimentale della coesione



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

138

Evidenza sperimentale della coesione

- una goccia, in caduta libera, tende ad assumere la forma sferica, poiché essa possiede l'area minima, tra quelle che racchiudono lo stesso volume.
- alcuni oggetti possono galleggiare su una superficie d'acqua perfettamente in quiete.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

139

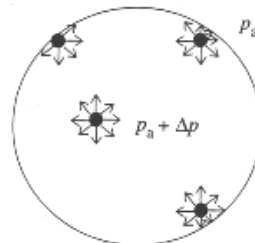
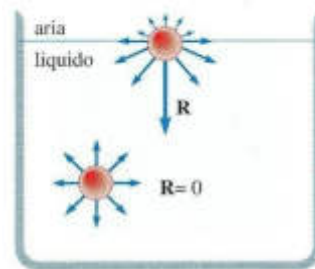
Coesione

- DEF: **Coesione**: forza di attrazione che si manifesta tra le molecole di una stessa sostanza, determinandone lo stato di aggregazione.
- Le forze di coesione hanno corto raggio d'azione e sono dovute alle interazioni di carattere elettrico e magnetico che si verificano tra le cariche presenti nelle molecole del corpo: elettroni e protoni. Vanno distinte dalle forze di adesione che si esercitano tra due superfici di natura diversa.



Coesione: meccanismo

- La risultante R dipende
 - (oltre che anche dalle forze di adesione),
 - dalla tensione superficiale di un liquido, all'interfaccia di due mezzi,
 - dalla natura di ambedue i mezzi.



Coesione: meccanismo

- La superficie di un liquido si comporta come una membrana tesa al cui interno agiscono forze che tendono a contrarla.
- Queste forze sono dirette *tangenzialmente alla superficie del liquido* e agiscono *perpendicolarmente al contorno*.
- Sperimentalmente che
 - la forza, per unità di lunghezza del contorno, è indipendente dall'estensione superficiale della lamina liquida.



Tensione superficiale



Tensione superficiale

- Si definisce pertanto il coefficiente di tensione superficiale τ come l'intensità della forza per unità di lunghezza che agisce lungo il bordo della lamina liquida:

$$\tau = \frac{|\vec{F}|}{l} \quad \left[\frac{N}{m} \right]$$

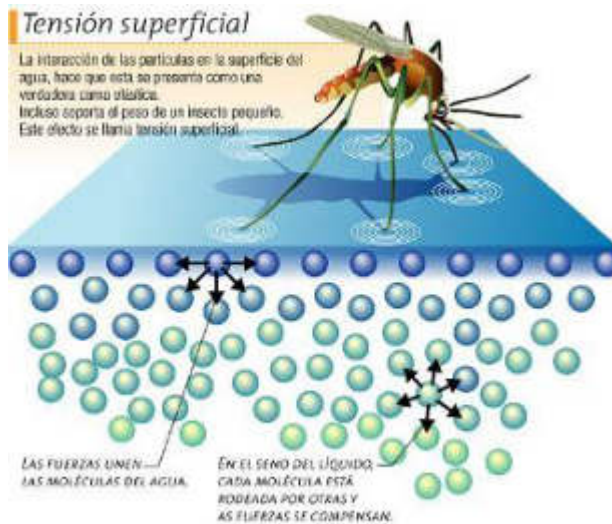
- dove l è la lunghezza del bordo, se si tratta di una superficie libera, e il doppio di essa, se si tratta di una lamina (in questo caso le superfici libere sono due, sopra e sotto). La forza F è chiamata *forza di tensione superficiale*.



Evidenza della tensione superficiale



Evidenza della tensione superficiale



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

158

Coefficiente di tensione superficiale

TABELLA 5.2 Coefficiente di tensione superficiale per diverse interfacce (a 20°C)

INTERFACCIA	τ (dyne cm ⁻¹)	INTERFACCIA	τ (dyne cm ⁻¹)
mercurio - aria	476.0	alcool etilico - aria	22.3
acqua - aria	72.5	carburi alifatici saturi - aria	20
benzene - aria	28.9	olio d'oliva - aria	32
cloroformio - aria	26.8	urina - aria	66
etere - aria	17.0	bile - aria	45
acqua - benzene	33.6	saliva - aria	18
acqua-olio di oliva	20.6	sudore - aria	69
mercurio - acqua	427.0	glicerina - aria	64.5

Per avere N/m occorre dividere per 1000.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

159

Tensione superficiale: esempi

- **Detergente liquido:**

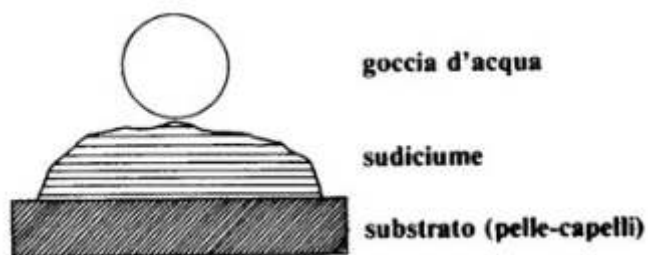
- Un liquido, avente una bassa tensione superficiale, tende a distribuirsi sulla superficie da lavare con maggiore facilità, cioè “bagna” meglio la superficie.
- l'aggiunta di saponi e detersivi all'acqua serve, in parte, per abbassare la tensione superficiale dell'acqua.

- **Disinfettante liquido:**

- Esiste una notevole correlazione tra il potere antisettico e la tensione superficiale.
- A parità di altre proprietà, un disinfettante è tanto più efficace, quanto più è bassa la sua tensione superficiale, perché si distribuisce sulla superficie da disinfettare in modo più ottimale.



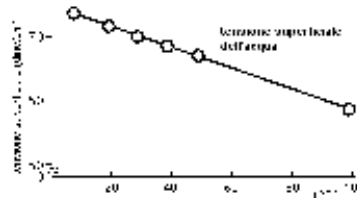
Tensione superficiale: esempi



Tensione superficiale: dipendenza da T

- Il valore della *tensione superficiale* dipende dalla temperatura.

- l'acqua calda lava meglio di quella fredda a causa della diminuzione di τ con l'aumento della temperatura
- la maggiore agitazione termica (temperatura) riduce gli effetti delle forze di coesione tra le molecole.



- La tensione superficiale diminuisce con la temperatura T (espressa in $^{\circ}\text{C}$) secondo la *relazione empirica*:

$$\tau = \tau_0 \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^n$$

- T_c : temperatura critica del liquido
- τ_0 : tensione superficiale a 0°C
- n : indice che vale circa 1.2



Drops

- Osservazione:
 - Le gocce sono tutte simili,
 - il peso medio delle gocce é ben riproducibile.
- Fenomeno
 - si forma una semisfera,
 - la parte sottostante si allarga mentre in alto, all'attaccatura del capillare, si forma un *collo* che man mano si stringe fino a staccarsi.



Drops

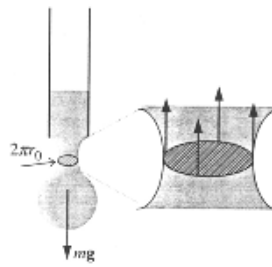
- La goccia si rompe quando il collo non riesce più a sopportarne il peso.
- Il fatto che le gocce siano tutte eguali ci fa pensare che il peso massimo che può sostenere il collo della goccia sia una proprietà della superficie dell'acqua.



Contagocce

- Il **contagocce** può essere usato
 - per misurare accuratamente piccole quantità di un liquido
 - per stimarne la tensione superficiale.
- La goccia si stacca dall'orifizio quando il suo peso mg diventa uguale alla forza che la tensione superficiale produce lungo la circonferenza di raggio minimo r_o ;
- al momento del distacco si ha

$$mg = 2\pi r_o \tau$$
- Se le gocce vengono fatte defluire lentamente, queste hanno tutte la stessa massa.



Densità, viscosità e tensione superficiale



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

168

Forze di Adesione

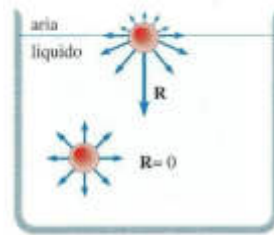


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

171

Concetto di adesione

- Se un liquido è a contatto con un gas, un altro liquido o un solido, oltre alle *forze di coesione*, che si esercitano tra le molecole stesse del liquido, esistono anche delle forze di attrazione tra le molecole del liquido e quelle della sostanza con cui il liquido è a contatto, forze che prendono il nome di *forze di adesione*.
- La risultante R dipende
 - (oltre che anche dalle forze di adesione),
 - dalla tensione superficiale di un liquido, all'interfaccia di due mezzi,
 - dalla natura di ambedue i mezzi.



Concetto di adesione

- **Adesione:** Forza d'attrazione che si manifesta lungo la superficie di contatto tra *due fasi diverse* o tra *due materiali* aventi una differente composizione chimica.
- L'adesione va distinta dalla coesione che è dovuta a forze che agiscono tra molecole dello stesso tipo.
- La forza di adesione è dovuta a fenomeni di natura elettromagnetica prodotti dalla variazione della distribuzione degli elettroni nelle molecole delle superfici a contatto. La distanza fra le superfici a contatto è quindi un fattore determinante nell'intensità di tale forza.



Concetto di adesione

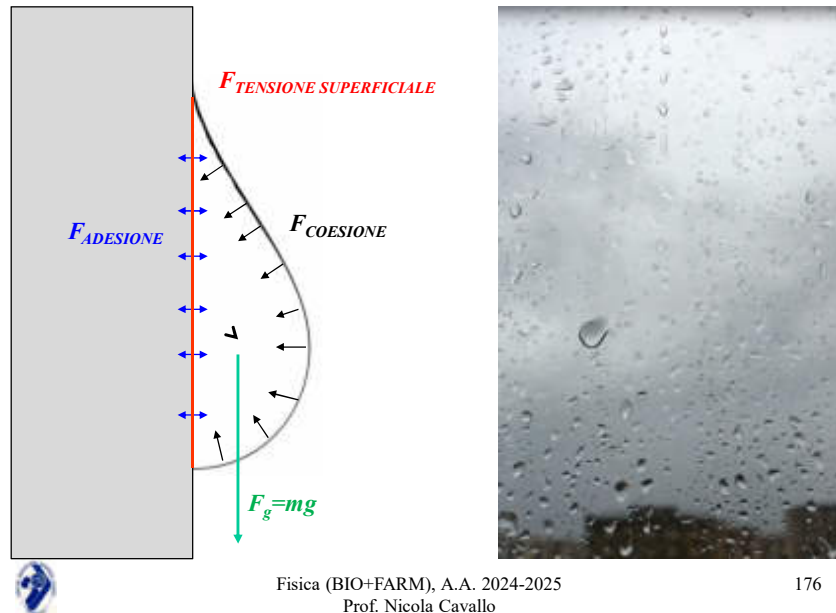
- Per effetto delle forze di adesione, una lastra di vetro immersa in acqua, e quindi ritirata, risulta bagnata: infatti, a causa delle forze di adesione tra vetro e acqua, una parte delle molecole d'acqua resta “*attaccata*” alla superficie della lastra; la parte restante, sottoposta alla forza di coesione da parte delle altre molecole d'acqua, scivola lungo la lastra e torna all'interno del liquido.
- In generale, se un liquido bagna la parete di un contenitore si può concludere che le forze di adesione superano quelle di coesione.



Esempio: coesione e adesione



Esempio: goccia

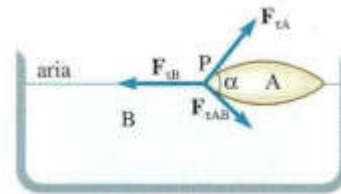


Applicazioni della tensione superficiale



Contatto fluido-fluido

- Ipotesi:
 - due liquidi A e B non miscibili
 - ρ_A tale che A galleggi su B
- In equilibrio, si verificano 2 casi:
 - A ha la forma a goccia
 - A ricopre B stendendosi sulla sua superficie libera.



- F_{AB} : la forza di tensione superficiale liquido-liquido,
- F_{TA} e F_{TB} : forze di tensione superficiale relative ai contatti liquido-aria.

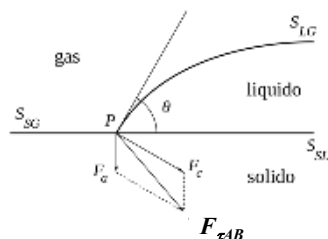
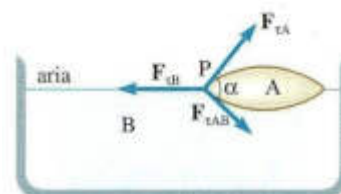


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

187

Contatto fluido-fluido

- Ipotesi:
 - due liquidi A e B non miscibili
 - ρ_A tale che A galleggi su B
- In equilibrio, si verificano 2 casi:
 - A ha la forma a goccia
 - A ricopre B stendendosi sulla sua superficie libera.



- F_{AB} : la forza di tensione superficiale liquido-liquido
- F_c : normale alla tangente al profilo del liquido in P e rivolto verso l'interno
- F_a : normale alla superficie solida rivolto verso di essa



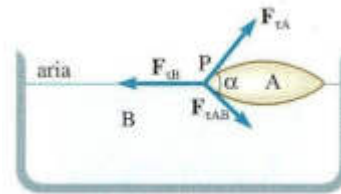
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

188

Contatto fluido-fluido

- Forze agenti all'equilibrio:
 - forze di tensione superficiale alle interfacce liquido-liquido,
 - forze di tensione superficiale e liquido-aria,
 - le forze di gravità ("peso"),
 - le reazioni vincolari (forze normali) del recipiente.
- Le forze di tensione superficiale $F_{\tau A}$, $F_{\tau B}$ ed $F_{\tau AB}$, definite come:

$$\tau = \frac{F}{l}$$
- Risultano tangenti alle superfici e perpendicolari alle linee di intersezione tra le interfacce.



- $F_{\tau AB}$: la forza di tensione superficiale liquido-liquido,
- $F_{\tau A}$ e $F_{\tau B}$: forze di tensione superficiale relative ai contatti liquido-aria.



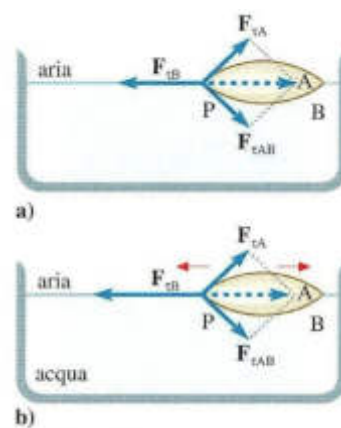
Contatto fluido-fluido

- Trascurando la forza di gravità ("peso") si ha l'equilibrio quando:

$$\vec{F}_{\tau A} + \vec{F}_{\tau B} + \vec{F}_{\tau AB} = 0$$

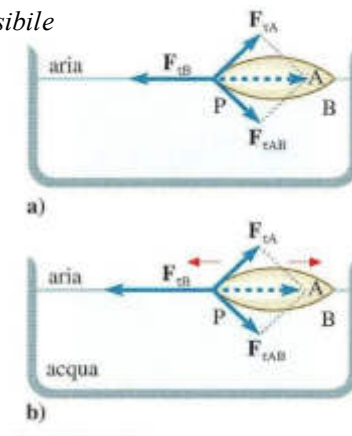
- Se l'angolo α è molto piccolo (*grande affinità tra i due liquidi*), si ottiene l'uguaglianza scalare:

$$\vec{F}_{\tau A} + \vec{F}_{\tau AB} = \vec{F}_{\tau B} \rightarrow \tau_A + \tau_{AB} = \tau_B$$



Contatto fluido-fluido

- Nel caso in cui
 $\tau_B > \tau_A + \tau_{AB} \rightarrow \text{equilibrio impossibile}$
- ed il liquido A si distende sul liquido B
- Questo é il caso di una goccia d'olio depositata su una superficie d'acqua, per la quale, in un punto P del bordo, agiscono le tre forze di tensione superficiale

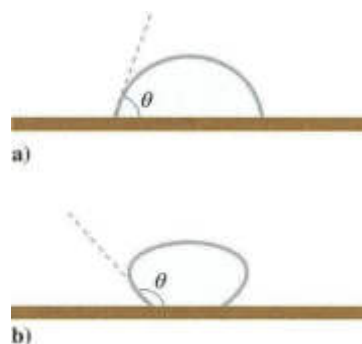


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
 Prof. Nicola Cavallo

191

Contatto fluido-solido

- Deponiamo ora una goccia di liquido sulla superficie di un solido. Per ogni coppia di sostanze esiste un tipico angolo θ di raccordo tra le due superfici, chiamato *angolo di contatto*.
- Per $\theta < 90^\circ$ (es: *coppia acqua-vetro*) si dice che il liquido bagna la superficie.
- Per $\theta > 90^\circ$ (es: *mercurio-vetro*), si dice che il liquido non bagna la superficie.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
 Prof. Nicola Cavallo

193

Liquidi tensio-attivi



Tensione superficiale nelle soluzioni

- Sostanze tensioattive
 - Sono sostanze che abbassano la tensione superficiale di un liquidi (ad es. acqua) in modo notevole, anche a bassa concentrazione.
- si suddividono in tre classi:
 - **Tensioattivi anionici**
 - Sono dotati di alta capacità bagnante ed emulsionante. Sono schiumogeni. Sciolgono efficacemente lo sporco
 - **Tensioattivi cationici**
 - Sono dotati di alta capacità bagnante. Hanno potere battericida in aggiunta al potere detergente. Sono in uso presso ospedali e stabilimenti di acque minerali
 - **Tensioattivi non ionici**
 - Producono poca schiuma, ma hanno comunque ottimo potere detergente. Sono ottimi emulsionanti perché non hanno carica
- **Esempi:**
 - alcool,
 - acidi grassi,
 - sali biliari.



Tensione superficiale nelle soluzioni

- Sciolti in acqua in piccola quantità (1-2%), i tensioattivi formano soluzioni acquose che, rispetto all'acqua, hanno una minore tensione superficiale e un maggiore potere bagnante.
- La tensione superficiale di una soluzione, in genere, differisce poco da quella del solvente.
- La variazione relativa di tensione superficiale è dell'ordine di grandezza della concentrazione percentuale della soluzione:

$$\frac{\tau_{\text{soluzione}} - \tau_{\text{solvente}}}{\tau_{\text{soluzione}}} \approx C[\%]$$

- Soluti minerali:
 - In generale i soluti minerali aumentano la tensione superficiale.
 - Esempio soluzione acquosa di NaCl al
 - 10% $\rightarrow \tau = 0.077 \text{ N/m}$,
 - 25% $\rightarrow \tau = 0.084 \text{ N/m}$.
- Soluti organici
 - In generale i soluti organici riducono la tensione superficiale.
 - Esempio soluzione acquosa di acido acetico al
 - 20% $\rightarrow \tau = 0.046 \text{ N/m}$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

199

Tensioattivi

- I fenomeni superficiali nei liquidi vengono trattati anche in *chimica*, *chimica-fisica* e *fisiologia* e fanno parte della nostra esperienza quotidiana.
- Sostanze quali *alcool*, *acidi grassi*, *sali biliari* che riducono la tensione superficiale di una soluzione acquosa si chiamano **tensioattivi**.
- In particolare, *sapone* e *glicerina* sono gli ingredienti dei preparati per le **bolle di sapone**, che si formano tanto più facilmente quanto minore è la tensione superficiale.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

200

Tensioattivi

- Più alto è il tenore di alcool di una bevanda, minore è la sua tensione superficiale;
- per questo l'intenditore valuta il tasso alcolico di un vino roteando delicatamente il calice; più alta e persistente è la pellicola di liquido che si attacca alle pareti, minore è la tensione superficiale del liquido e maggiore è il suo contenuto d'alcool.
- Il fenomeno si valuta ancor meglio nella coppetta d'argento del sommelier.

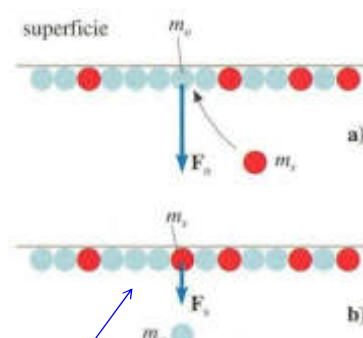


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

201

Tensione superficiale nelle soluzioni

- Le molecole di soluto (*rosse*), per le quali le forze di adesione col solvente (*blu*) sono più deboli di quelle di coesione tra le molecole di solvente, tendono a sostituirsi a queste in superficie.
- Le molecole di tensioattivo (*rosse*) si addensano in superficie, anche se la loro concentrazione è molto piccola, modificando la tensione superficiale efficace della soluzione.



la tensione superficiale diminuisce



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

202

Tensione superficiale nelle soluzioni

- Le sostanze tensioattive sono utilizzate in soluzioni acquose molto diluite per ottenere in grande quantità efficaci disinfettanti: le molecole di tensioattivo disinfettante tendono infatti a concentrarsi nello strato sottile di interfaccia che si crea intorno ai batteri quando sono bagnati dalla soluzione.

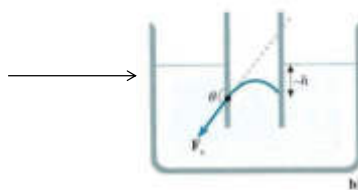
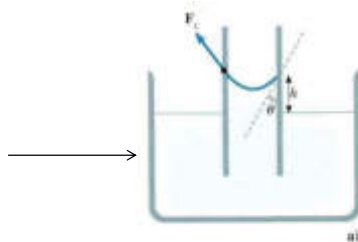


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

205

Menisco

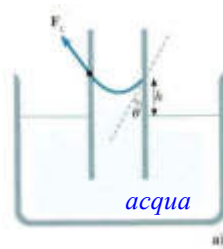
- È ben noto il fenomeno per il quale la superficie libera di un liquido risulta incurvata (*menisco*) in vicinanza delle pareti del recipiente
- Caso vetro-acqua
 - Il menisco è curvato verso l'alto (*menisco concavo*)
 - il liquido “*bagna*” la parete
- Caso vetro-mercurio
 - Il menisco è curvato verso il basso (*menisco convesso*)
 - (il liquido “*non bagna*” la parete)



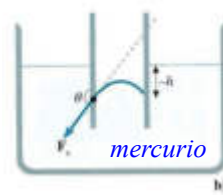
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

206

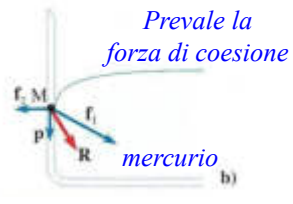
Menisco



a)



b)



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

207