

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TERAMO

Fisica

Medicina Veterinaria — Semestre Aperto
2026

Prof. Francesco de Pasquale

Lezioni 33, 34 e 35

Outline

Lezione 33

- Esercitazione su resistenze idrauliche in serie e in parallelo

Lezione 34

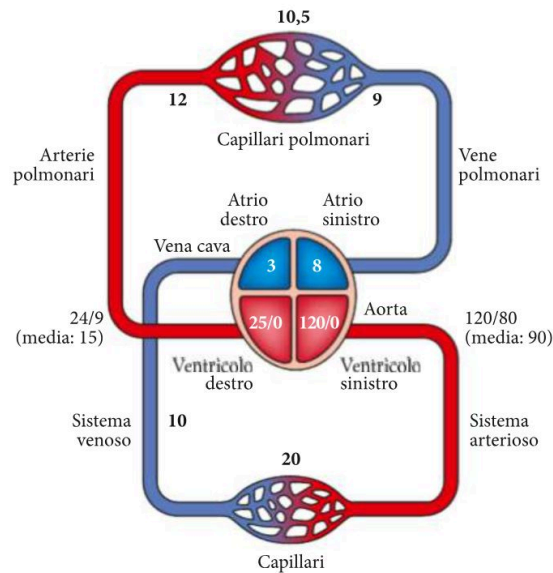
- Fenomeni di superficie: tensione superficiale e suoi effetti su piccole quantità di liquido
- Fenomeni di capillarità e comportamento delle interfacce fluide, sia piane che curve

Lezione 35

- Pressione di curvatura e sua descrizione qualitativa mediante la legge di Laplace
- Esercizi

Applicazione biomedica fluidi reali Pouiselle: Circolazione sangue

Il sangue si comporta come un fluido reale ma incompressibile in un sistema chiuso. Essendo un fluido reale l'energia si dissipa durante il movimento



La pressione è massima all'uscita del ventricolo sinistro e diminuisce progressivamente man mano che ci si allontana dal cuore. Questo è dovuto alla resistenza offerta dalle forze viscosive interne al fluido e dei vasi. Energia è dissipata sotto forma di calore. (Tratto dal libro di testo Contessa)

Legge di Poiseuille: Portata nei Vasi Sanguigni (vedi esempio libro di testo Contessa)

La legge di Poiseuille descrive il flusso laminare stazionario in un condotto cilindrico:

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8 \eta \ell}$$

Dove:



Q = Portata Volumetrica

[m³/s]

Volume di fluido che attraversa una sezione in un'unità di tempo.



r = Raggio del Vaso

[m]

Misura del calibro del condotto, fondamentale per la resistenza.



ΔP = Differenza di Pressione

[Pa]

Il gradiente di pressione che spinge il fluido attraverso il vaso.



η = Viscosità Dinamica

[Pa·s]

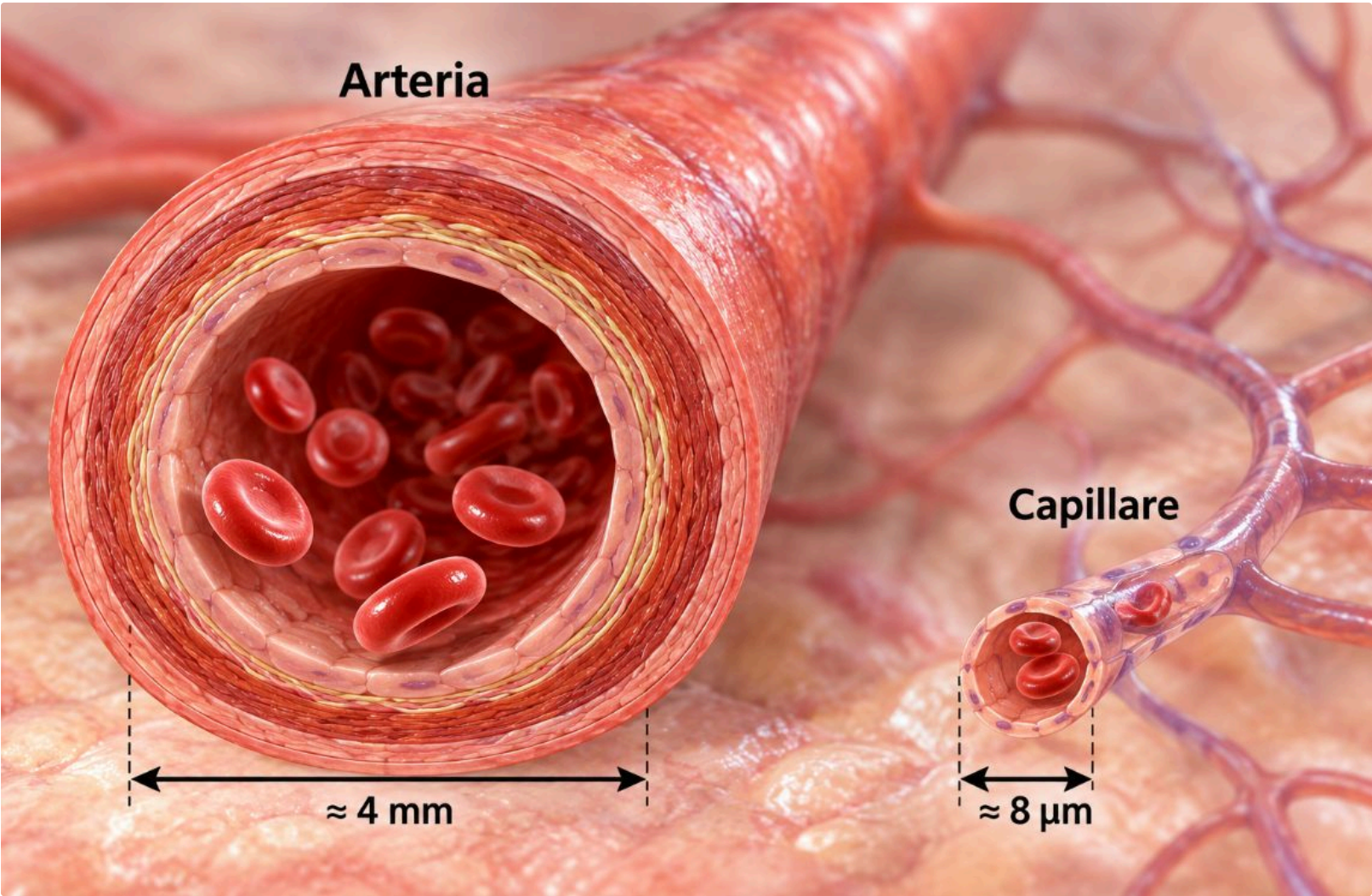
Misura della resistenza interna di un fluido allo scorrimento.



La portata dipende dal raggio alla QUARTA potenza: — raddoppiare il raggio aumenta la portata di 16 volte!

Questo è fondamentale in fisiologia cardiovascolare: piccole variazioni del calibro vasale (vasocostrizione/vasodilatazione) producono effetti enormi sulla portata.

Confronto Portata: Arteria vs Capillare



Dati del problema:

- $\Delta P = 2000 \text{ Pa}$ (uguale per entrambi)
- Arteria: $r = 2,0 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\ell = 0,20 \text{ m}$
- Capillare: $r = 4,0 \times 10^{-6} \text{ m}$, $\ell = 1,0 \times 10^{-3} \text{ m}$
- Viscosità normale: $\eta = 3,5 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- Ematocrito alto: $\eta = 5,0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Di seguito, una tabella riassuntiva dei calcoli di portata per arterie e capillari in diverse condizioni di viscosità:

Vaso	η normale	η alta
Arteria	$Q \approx 1,8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \approx 18 \text{ mL/s} \approx 1,08 \text{ L/min}$	$Q \approx 1,26 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \approx 12,6 \text{ mL/s} \approx 0,75 \text{ L/min}$
Capillare	$Q \approx 5,7 \times 10^{-14} \text{ m}^3/\text{s} \approx 57 \text{ pL/s}$	$Q \approx 4,0 \times 10^{-14} \text{ m}^3/\text{s} \approx 40 \text{ pL/s}$

Implicazione Clinica – Ematocrito Alto

L'ematocrito alto (es. policitemia) aumenta la viscosità del sangue, riducendo la portata. Questo aumenta il rischio cardiovascolare e il carico sul cuore.

Implicazione Clinica – Vasocostrizione

Una riduzione del 20% del raggio (vasocostrizione) riduce la portata di circa il 59% (fattore r^4). Questo spiega l'efficacia dei vasodilatatori nell'ipertensione.

Esercizi su resistenze idrauliche in serie e in parallelo

Esercizio # 956

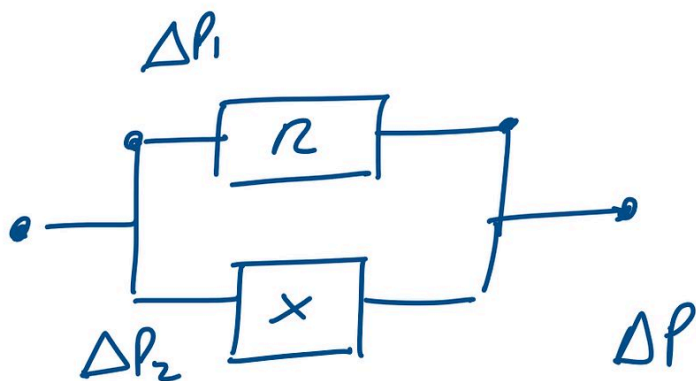
$$Q' = 3Q$$



- | | | |
|----|------------|------------------|
| A) | IN PARALL. | $\rightarrow 2R$ |
| B) | " | $R/3$ |
| C) | " | $R/2 \leftarrow$ |
| D) | IN SERIE | $2R$ |
| E) | " | $R/3$ |



$$\Rightarrow Q \quad \Rightarrow 3Q$$



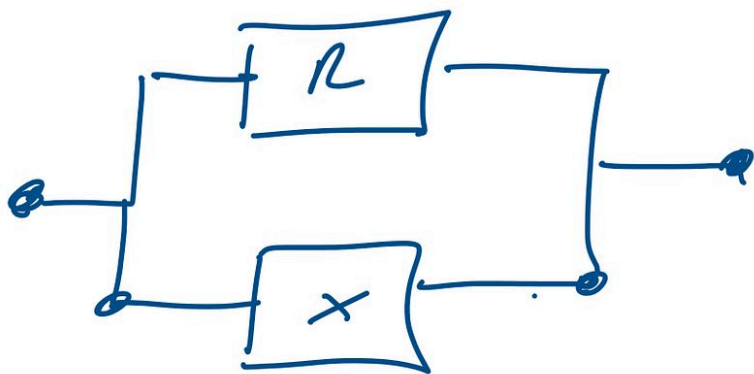
- 1) $\Delta P = \Delta P_1 = \Delta P_2$
- 2) $Q_1 \neq Q_2$



$$\downarrow Q = \frac{\Delta P_1}{R}$$

$$\boxed{\Delta P_1 = QR}$$

$\Rightarrow$



$$\Delta P' = \Delta P_1 = QR$$

$$\frac{1}{R_{TOT}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{x} = \frac{(x + R)}{Rx}$$

$$R_{TOT} = \frac{Rx}{(x + R)}$$



$$Q' = \frac{\Delta P}{R_{TOT}}$$

$$Q' = 3Q$$

$$Q' = QR \frac{1}{R_{TOT}} = QR \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{x} \right)$$

$$Q' = Q + \frac{Q}{x} = Q \left(1 + \frac{R}{x} \right)$$

$$\frac{Q'}{Q} = 3 = \left(1 + \frac{R}{x}\right)$$

$$3 - 1 = \frac{R}{x} \qquad \frac{R}{x} = 2$$

$$x = \frac{R}{2}$$

$$= \Delta \boxed{x = \frac{R}{2}} \quad c) \checkmark$$

Esercizio # 969

H₂O ref. eliminare stat.

$$Q_{H_2O} = 10 \text{ cm}^3/\text{s}$$

H₂O → O₂O

$$Q_{O_2O} = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$\eta_{O_2O} / \eta_{H_2O}$$

- | | |
|----|-----|
| A) | 1 |
| B) | 2 |
| C) | 3 |
| D) | 4 |
| E) | 5 ✓ |

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

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

$$\eta_{O_2O} / \eta_{H_2O} = \frac{\cancel{\pi r^4 \Delta P}}{\cancel{8 Q_{O_2O} L}}$$

$$\frac{\cancel{8 Q_{H_2O} L}}{\cancel{\pi r^4 \Delta P}}$$

$$\eta_{O_2O} / \eta_{H_2O} = \frac{Q_{H_2O}}{Q_{O_2O}}$$

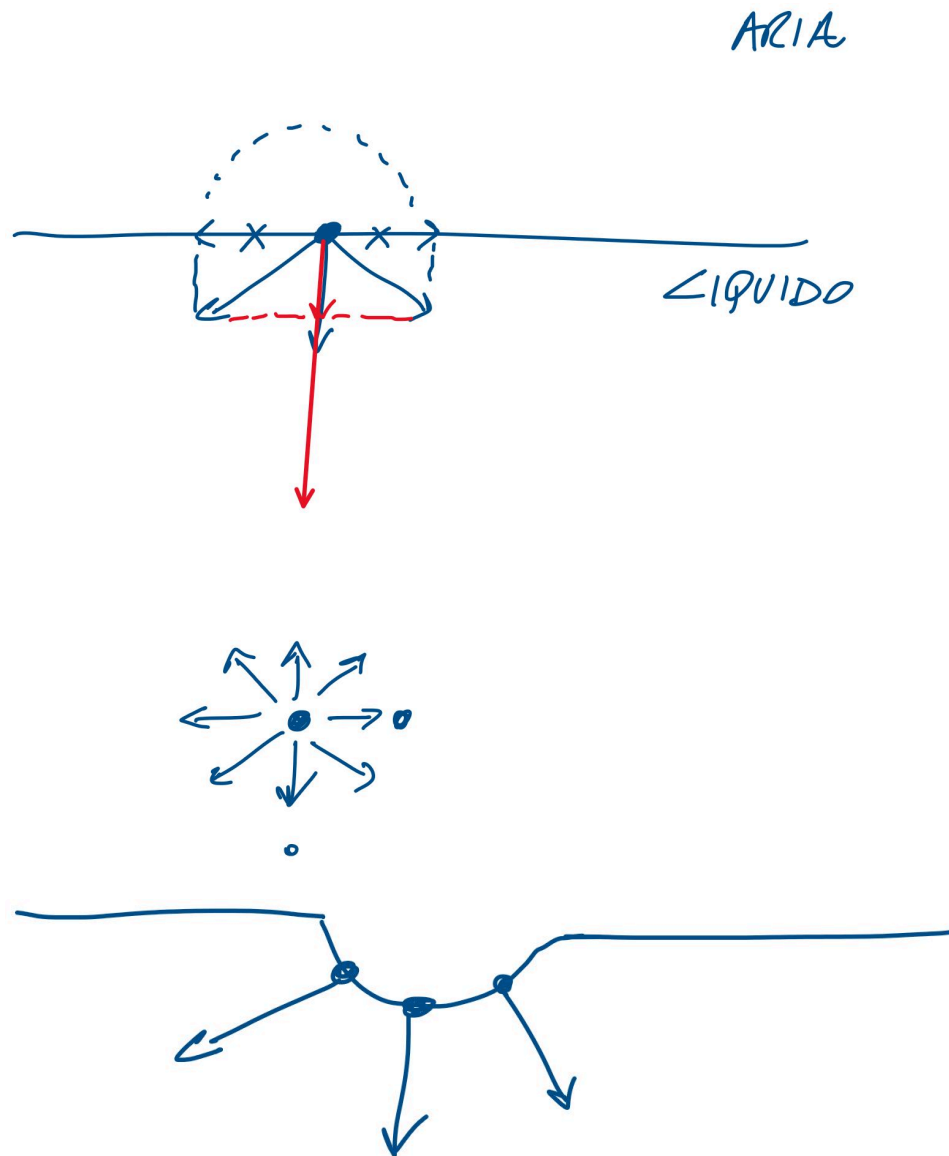
$$= \frac{10}{2} = 5$$

$$\eta_{O_2O} / \eta_{H_2O} = 5$$

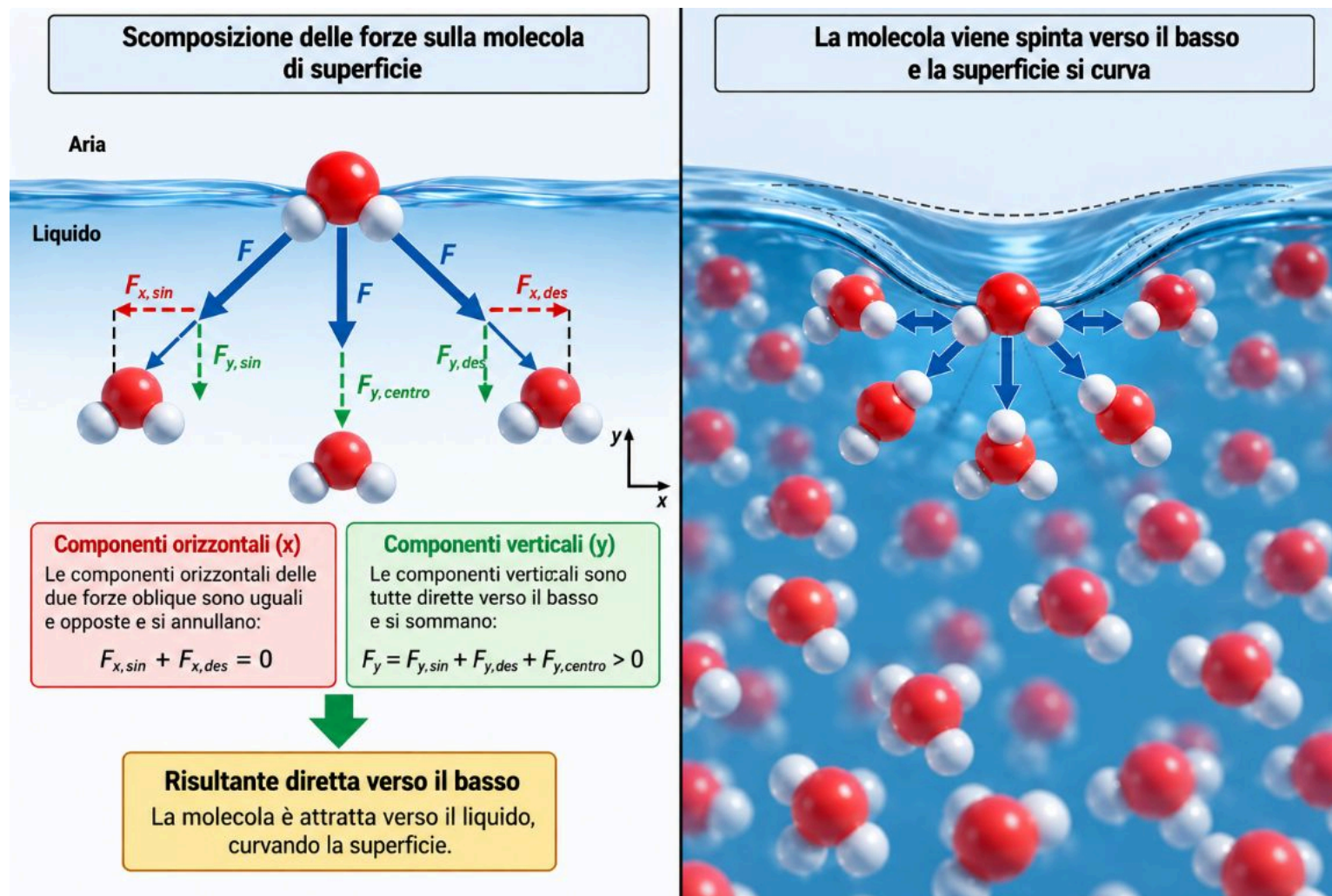
E) ✓

La Tensione Superficiale

La **tensione superficiale** nasce dalle forze di coesione tra le molecole del fluido. È responsabile di fenomeni come le gocce sferiche, il galleggiamento degli insetti e la capillarità.



Forze di Coesione in Superficie



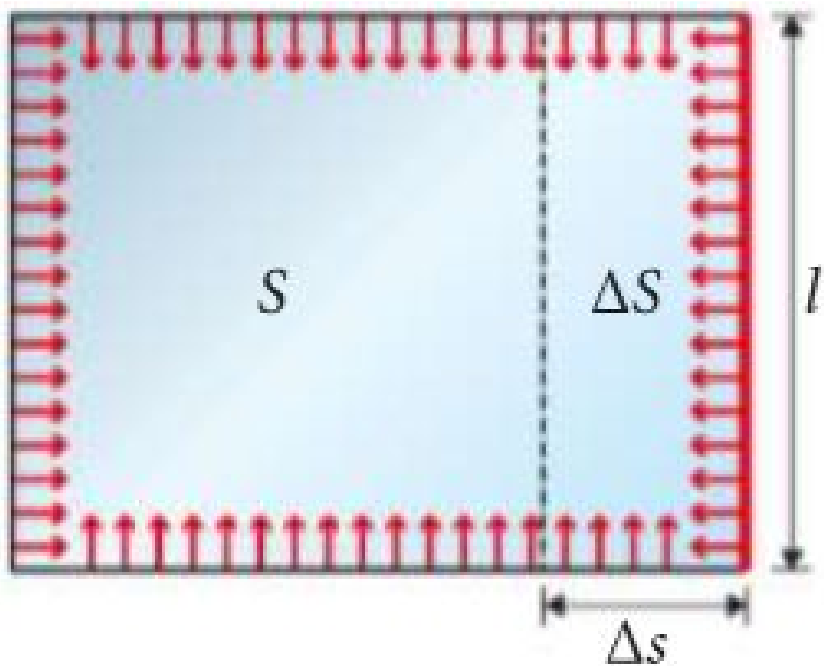
Una molecola all'interno del liquido è circondata da altre molecole in tutte le direzioni: la forza risultante è **nulla** ($R = 0$). Una molecola in superficie ha vicini solo da un lato: la forza risultante è **diretta verso l'interno** del liquido ($R \neq 0$) creando una sorta di pellicola elastica deformata

Intrappolamento di gas: Quando l'aria penetra nel liquido (per esempio soffiando o per agitazione), questa forza elastica cerca di racchiudere il gas nello spazio più piccolo possibile

- ❗ Questo squilibrio di forze tende a minimizzare la superficie del liquido, portando alla formazione di gocce sferiche.

Definizione di Tensione Superficiale

Supponiamo di avere una interfaccia aria-liquido. Per aumentare la superficie devo compiere lavoro contro l'energia dei legami delle molecole. Il lavoro sarà proporzionale alla variazione dell'area di interfaccia $\Delta S = l \Delta s$



La tensione superficiale τ è definita come la forza per unità di lunghezza del contorno, diretta tangenzialmente alla superficie e perpendicolare al contorno:

$$\gamma = \frac{F}{l}$$

Le forze di tensione superficiale sono dirette tangenzialmente alla superficie e perpendicolari al contorno. L'unità di misura è N/m (o dyne/cm nel sistema CGS).

Superficie Minima: La Sfera

Principio fisico

Un fluido a parità di volume tende ad assumere la forma che minimizza la superficie. La sfera è la forma geometrica con il minimo rapporto superficie/volume.

Forma sferica: La sfera è la figura geometrica che, a parità di volume, possiede la superficie più piccola. La tensione superficiale tira uniformemente da tutti i lati, dando alla bolla la sua tipica forma rotonda

Esempio: goccia d'acqua

Una goccia d'acqua in caduta libera assume forma sferica proprio per minimizzare l'energia superficiale. Questo principio vale per bolle di sapone, gocce di mercurio e molti altri sistemi.

Sfera $\Rightarrow$ Superficie minima per volume fisso



Interfaccia Solido–Liquido: Angolo di Contatto

Quando un liquido è a contatto con una superficie solida, si forma un **angolo di contatto θ** che determina se il liquido bagna o meno il solido. L'angolo di contatto è determinato dall'equilibrio tra le tensioni superficiali solido–liquido, solido–vapore e liquido–vapore:

$$\theta < 90^\circ$$

Il liquido **bagna** il solido (es. acqua su vetro).
Superficie idrofila.

$$\theta > 90^\circ$$

Il liquido **non bagna** il solido (es. acqua su cera).
Superficie idrofoba.



Bagnabilità: Idrofilo vs Idrofobo

Superficie Idrofila ($\theta < 90^\circ$)

L'acqua si espande sulla superficie. Esempi: vetro, metalli puliti, tessuti biologici.

Superficie Idrofoba ($\theta > 90^\circ$)

L'acqua forma gocce compatte. Esempi: cera, teflon, foglie di loto (effetto lotus).



CAPITOLO 4

Flottazione per Tensione Superficiale

Un piccolo insetto può galleggiare sull'acqua anche se la sua densità è maggiore di quella dell'acqua. La tensione superficiale genera una forza verso l'alto che bilancia il peso.

Perché l'Insetto Galleggia?

Per la legge di Archimede ci aspetteremmo che l'insetto affondi ($F_p > F_s$). In realtà, il volume immerso V_E è trascurabile, quindi la spinta di Archimede è irrilevante. È la **tensione superficiale** a sostenere l'insetto:

→ Peso dell'insetto

$F_p = mg$, diretto verso il basso

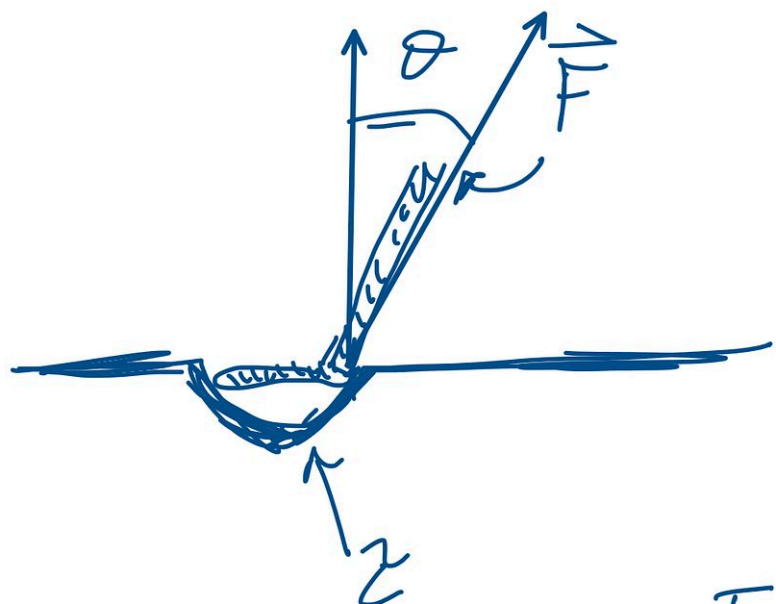
→ Forza di tensione superficiale

$F_{\gamma L}$ agisce lungo il perimetro di contatto, con componente verticale verso l'alto

→ Equilibrio

L'insetto galleggia se $F_{\gamma L} \geq mg$

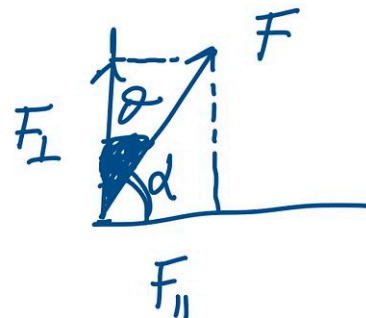
FloTTazione insetto:



$$f = \frac{F}{l} \quad \text{Tensione surf}$$

$$F = f l$$

$$F_{\perp} = f l \sin \theta$$



$$= f l \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) = f l \cos \theta$$

$$F_{\perp} = f l \cos \theta$$

Visto dall'alto



$$l = 2\pi r$$

$$F_{\perp} = f \underbrace{2\pi r}_l \cos \theta$$

Supponiamo che angolo di contatto che $\theta = 30^\circ$

$$r = 1 \text{ mm}$$

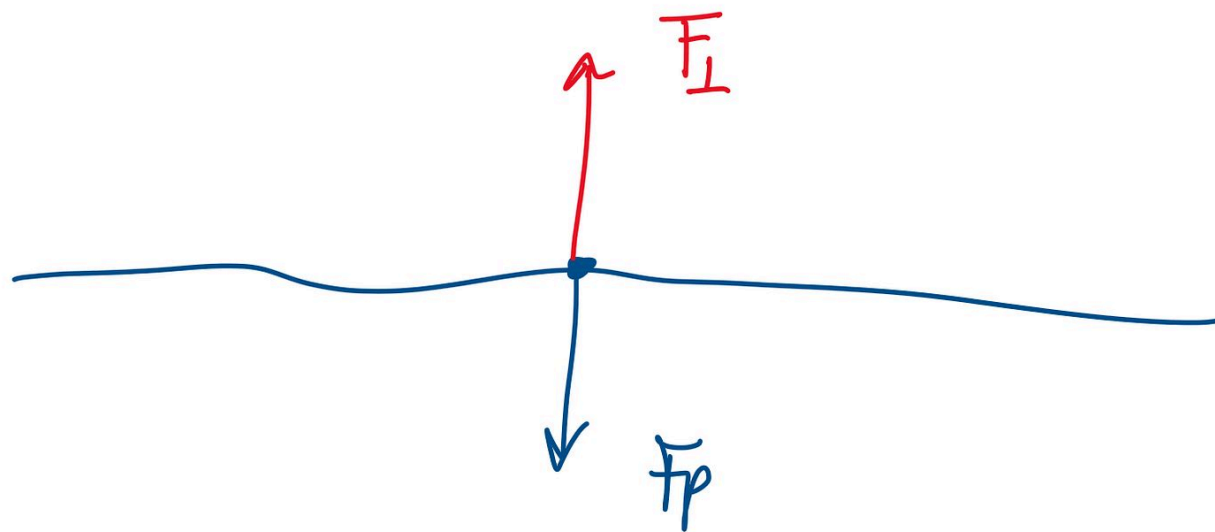
$$f = 47,5 \text{ dyne/cm}$$

6 zampette

$$F_{\perp} = 42,5 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 0,1 \cdot \cos(30^{\circ})$$

$$F_{\perp} = 39,4 \text{ dyne}$$

Per poter galleggiare



$$6 F_{\perp} = F_p = mg$$

$$m = 6 F_{\perp} \frac{1}{g} = 6 \cdot 39,4 \frac{1}{9,81 \cdot 10^2}$$

$$m \approx \frac{24}{100} = 0,24 \text{ g (cgs)}$$

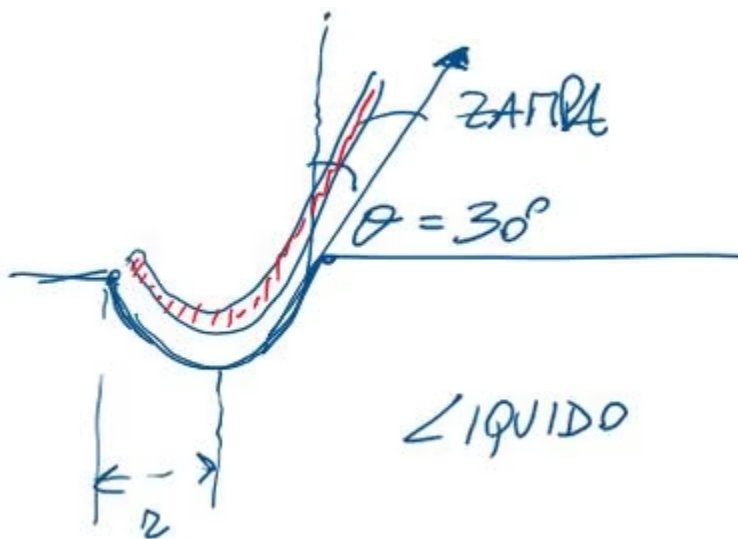
La massa massima dell'insetto per poter galleggiare
è pari 0,24g

Forza di Tensione Superficiale sul Menisco

La tensione superficiale γ tende a riportare il fluido alla configurazione di equilibrio. La forza verticale esercitata dalla tensione superficiale lungo il perimetro di contatto è:

$$\text{se } \gamma = \frac{F}{l} \Rightarrow F_{\perp} = F \cos \theta = \gamma l \cos \theta = \gamma \cdot 2\pi r \cos \theta$$

Esempio insetto che galleggia



Un insetto galleggia su acqua grazie alla tensione superficiale. I dati del problema sono:

Raggio

$r = 1 \text{ mm} = 0,1 \text{ cm}$
(raggio di depressione
del menisco)

Angolo di contatto

$\theta = 30^\circ$ (angolo tra
menisco e parete)

Tensione superficiale

$\gamma = 42,5 \text{ dyne/cm}$ (acqua
a temperatura
ambiente)

Zampe

6 zampe, ognuna con il
proprio menisco

Domanda 1: Calcolare la forza verticale $F_{\gamma L}$ determinata dalla tensione superficiale su una singola zampa.

$$\begin{aligned} F_{\gamma L} &= \gamma \cdot 2\pi r \cos \theta \\ &= 42,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \text{ cm} \cdot \cos(30^\circ) \\ F_{\gamma L} &= 39,4 \text{ dyne} \end{aligned}$$

✔ La forza verso l'alto su ciascuna zampa è $F_{\gamma L} = 39,4$ dyne.

Domanda 2: Calcolare la massa massima dell'insetto affinché possa galleggiare. L'insetto ha 6 zampe, ognuna con forza $F_{\gamma L}$ verso l'alto:

$$\text{Per galleggiare: } 6 \cdot F_{\gamma L} = 6 \cdot mg$$

$$m = \frac{6 \cdot F_{\gamma L}}{g} = \frac{6 \times 39,4 \text{ dyne}}{980 \text{ cm/s}^2}$$

$$m = 0,24 \text{ g}$$

✓ La massa massima dell'insetto per galleggiare è **m = 0,24 g**.

Capillarità: La Superficie Libera si Deforma

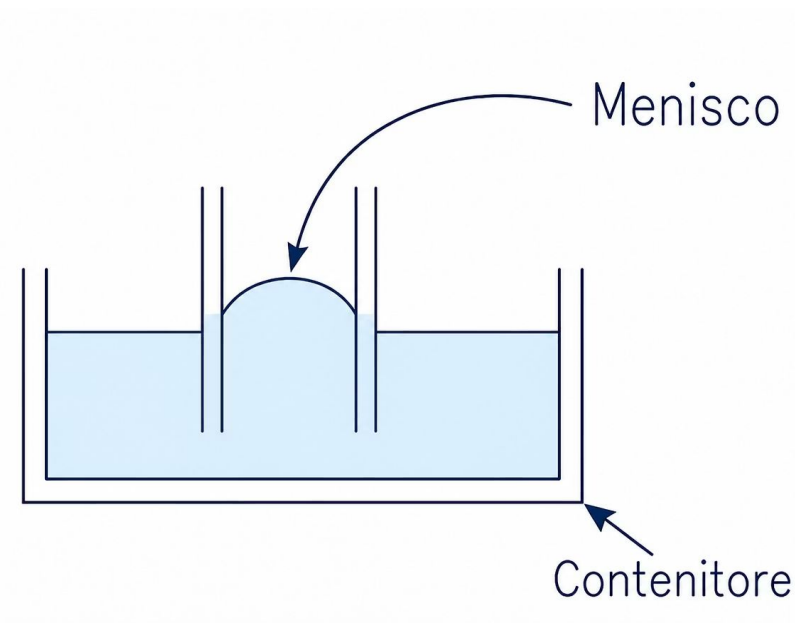
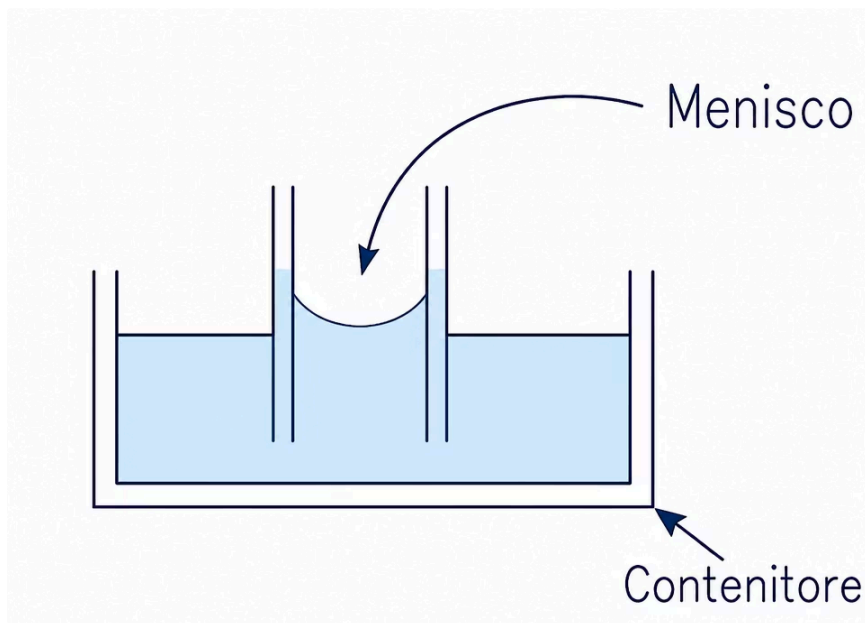
La **capillarità** è il fenomeno per cui un liquido in un tubo sottile sale o scende rispetto al livello esterno, deformando la superficie libera in una curva detta **menisco**. Il comportamento dipende dall'interazione tra il liquido e il materiale del tubo:

Menisco concavo

Liquidi **bagnanti** (es. acqua): le forze di adesione superano quelle di coesione → il liquido *sale* nel tubo.

Menisco convesso

Liquidi **non bagnanti** (es. mercurio): le forze di coesione superano quelle di adesione → il liquido *scende* nel tubo.



Il Menisco: Concavo e Convesso

Menisco Concavo

Si forma quando il liquido **bagna** le pareti del tubo (angolo di contatto $\theta < 90^\circ$). Il liquido **sale** nel tubo.

Esempio: acqua nel vetro.

Menisco Convesso

Si forma quando il liquido **non bagna** le pareti (angolo di contatto $\theta > 90^\circ$). Il liquido **scende** nel tubo.

Esempio: mercurio nel vetro.

Pressione di curvatura e Formula di Laplace:

Riepilogando, la tensione superficiale può essere definita in due modi equivalenti:

Definizione per Forza

$$\gamma = \frac{F}{l}$$

Forza per unità di lunghezza esercitata sulla linea di contatto.

Definizione per Lavoro

$$\gamma = \frac{dL}{dS}$$

Lavoro necessario ad aumentare di un'unità l'area della superficie membranosa.

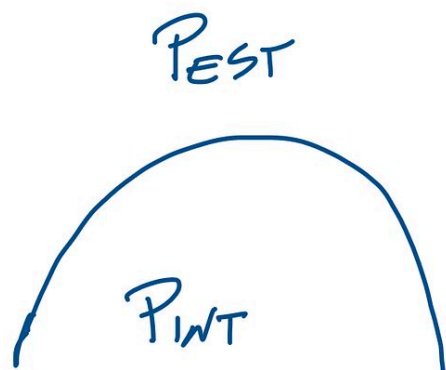
Derivazione Legge di Laplace

PRESSIONE DI CURVATURA e LEGGE DI LAPLACE

$$a) \quad f = \frac{F}{l}$$

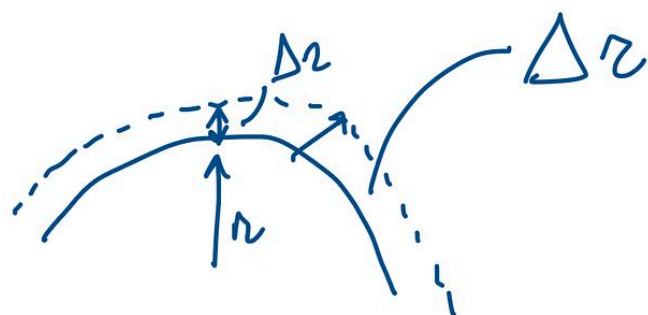
$$b) \quad f = \frac{\Delta L}{\Delta s} \quad \text{o} \quad \frac{dL}{ds}$$

GOCCIA SUP. SFERICA



↳ SI ESPANDE

$$\Delta P = P_{EXT} - P_{INT}$$



$$\Delta S = 4\pi (r + \Delta r)^2$$

$$= 4\pi r^2 + \cancel{4\pi (\Delta r)^2} + 4\pi 2r\Delta r$$

Se Δr è piccolo

$$= \cancel{4\pi r^2} + 8\pi r\Delta r$$

⇓
 $(\Delta r)^2 \rightarrow$ trascurabile

$r^2 \rightarrow$ trascurabile

$$\boxed{\Delta S = 8\pi r \Delta r}$$

$$\gamma = \frac{\Delta L}{\Delta S}$$

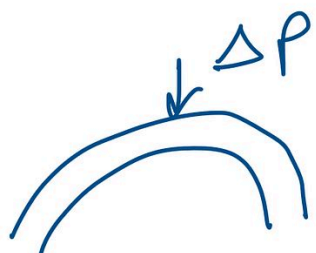
$$\Delta L = \gamma \Delta S = \gamma 8\pi r \Delta r$$

$$\Delta L_\gamma = \gamma 8\pi r \Delta r$$

$$\Delta L_p = \overbrace{(\Delta p \ 4\pi r^2)}^{F \text{ spost.}} \Delta r$$

P.S

F



Se $\Delta L_p = \Delta L_\gamma$

$$\cancel{\gamma} \cancel{8\pi} \cancel{r} \cancel{\Delta r} = \Delta p \cancel{4\pi} \cancel{r^2} \cancel{\Delta r}$$

$$\boxed{\Delta p = \frac{2\gamma}{r}}$$

Legge di Laplace

Formula

Riepilogando:

Consideriamo una interfaccia liquido-gas sferica. In questa membrana sferica:



con pressione esterna P_{est} e pressione interna P_{int} . La differenza di pressione è:

$$\Delta p = P_{est} - P_{int}$$

Per ricavare la formula di Laplace, partiamo dal lavoro compiuto espandendo la superficie di un incremento Δr . Espandendo il raggio di Δr , la variazione di superficie è:

$$\Delta S = 4\pi(r + \Delta r)^2 - 4\pi r^2 = 8\pi r \Delta r + 4\pi \Delta r^2$$

Per Δr molto piccolo, il termine Δr^2 è trascurabile:

$$\Delta S \approx 8\pi r \Delta r$$

Il lavoro compiuto dalla tensione superficiale è quindi:

$$\Delta L_\gamma = \gamma \Delta S = 8\pi r \gamma \Delta r$$

Il lavoro compiuto dalla differenza di pressione Δp sull'intera superficie sferica deve eguagliare il lavoro della tensione superficiale:

$$\Delta L_p = \Delta p \cdot 4\pi r^2 \cdot \Delta r$$

Imponendo $\Delta L_\gamma = \Delta L_p$:

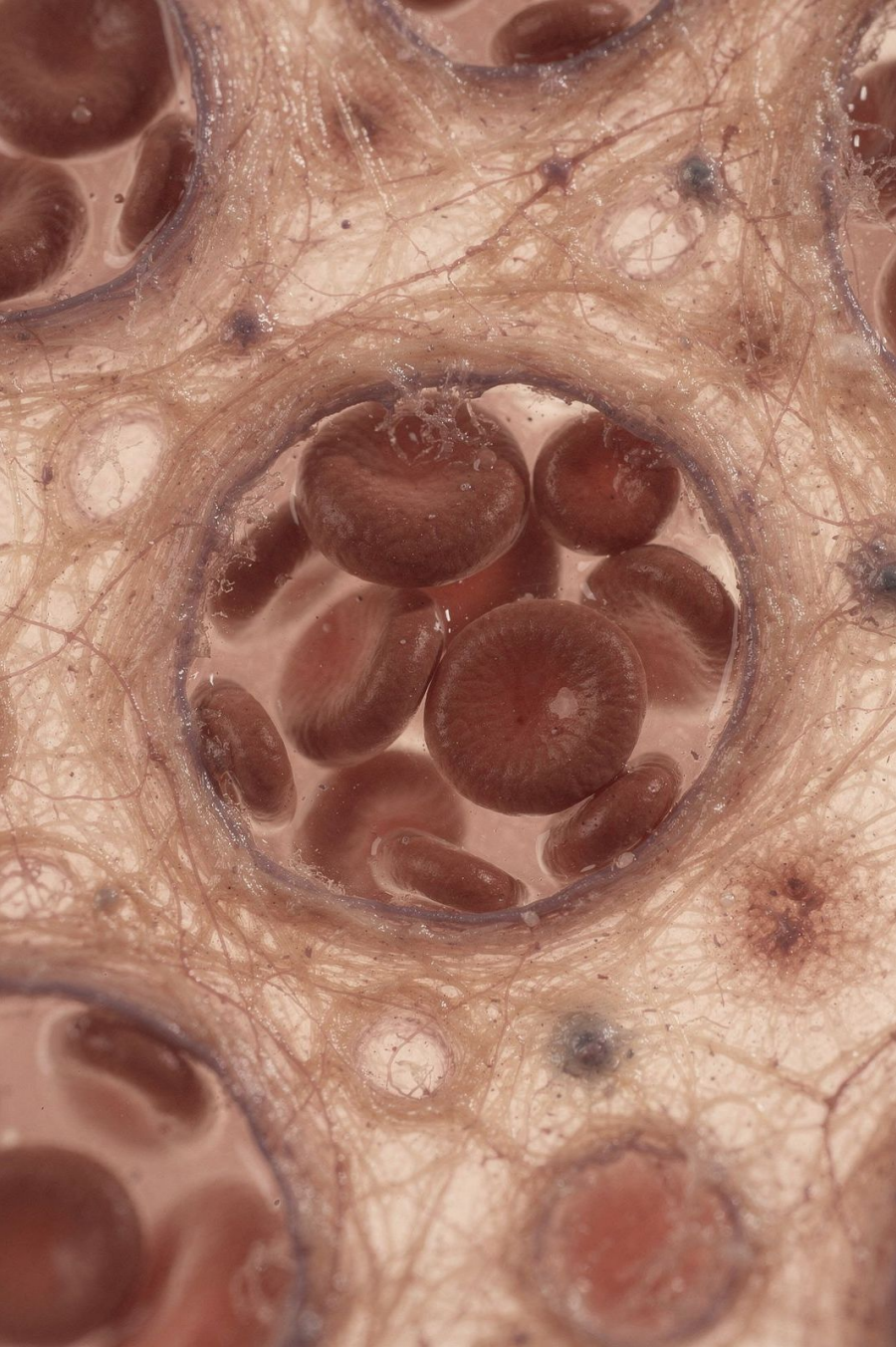
$$\gamma \cdot 8\pi r \Delta r = \Delta p \cdot 4\pi r^2 \Delta r$$

$$\boxed{\Delta p = \frac{2\gamma}{r}}$$

Formula di Laplace

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{r}$$

La differenza di pressione attraverso una membrana sferica è direttamente proporzionale alla tensione superficiale e inversamente proporzionale al raggio.



Applicazione Fisiologica: Capillari del Sangue

Nei capillari polmonari, il raggio r è molto piccolo. Dalla formula di Laplace si deduce che, a parità di tensione superficiale γ , una riduzione di r comporta un **aumento significativo di Δp** . Questo spiega perché nei capillari polmonari è necessaria una differenza di pressione elevata per mantenere il flusso.

Esercizi (Tommasi)

Esercizio # 1018

$$d = 2 \text{ cm}$$

P supera la P_0 di 10 Pa

$$f = ?$$

- A) $0,01 \text{ Pe/mv}$
- B) $0,025 \text{ Pe/mv}$
- C) $0,1 \text{ Pe.mv}$
- D) $0,01 \text{ Pe.mv}$
- E) $0,025 \text{ Pe.mv}$

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{z}$$

$$f = \frac{\Delta P \cdot z}{2}$$

$$P_{\text{est}} = P_0$$

P_{int}

$$\Delta P = P_{\text{int}} - P_{\text{est}} = 10 \text{ Pa}$$

$$z = 1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$$

$$f = \frac{10 \cdot 0,01}{2} = 0,05 \text{ Pe.m} \quad ?$$

Esercizio # 1037

Gocce alcool etilico

$$\gamma = 2,2 \cdot 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$\Delta P = 2 \text{ mmHg}$$

$$r = ?$$

- A) 1,7 mm
- B) 1,7 μm
- C) 17 μm
- D) 0,17 μm
- E) 0,17 mm

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{r}$$

$$r = \frac{2\sigma}{\Delta P} =$$

$$\Delta P = 2 \text{ mmHg} = 2 \cdot 133 \text{ Pa} = 266 \text{ Pa}$$

$$[1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Pa}]$$

$$r = \frac{2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-2}}{266} = \frac{4,4 \cdot 10^{-2}}{26600 \cdot 10^{-2}} \text{ m}$$

$$= 0,17 \text{ mm}$$

E)

Riepilogo: Tensione Superficiale



Definizione

Forza per unità di lunghezza:
 $\tau = F/l$. Nasce dalle forze di coesione molecolare in superficie.



Superficie minima

A volume fisso, il fluido minimizza la superficie $\rightarrow$ forma sferica (gocce, bolle).



Angolo di contatto

$\theta < 90^\circ$: bagna il solido. $\theta > 90^\circ$: non bagna. Determina capillarità e flottazione.

Applicazioni della Tensione Superficiale in Biologia



Flottazione degli insetti

Insetti con $\rho > \rho_{\text{acqua}}$ galleggiano grazie alla tensione superficiale sulle zampe. Massa massima: $m = 0,24 \text{ g}$ (es. 6.6).



Surfactante polmonare

Il surfactante riduce la tensione superficiale negli alveoli polmonari, impedendone il collasso durante l'espirazione.



Capillarità

La tensione superficiale e l'angolo di contatto determinano l'ascesa capillare nei vasi sottili e nei tessuti biologici.

Riepilogo della Lezione



Legge di Poiseuille

La portata $Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8 \eta \ell}$ dipende dal raggio alla quarta potenza. Piccole variazioni del calibro vasale producono enormi effetti sulla portata. Fondamentale per capire vasocostrizione e ematocrito.



Resistenze Idrauliche

In serie: $R_{tot} = R_1 + R_2$. In parallelo: $1/R_{tot} = 1/R_1 + 1/R_2$. Analogia con i circuiti elettrici. Applicazione alla circolazione sistemica e polmonare.



Tensione Superficiale

$\gamma = F/l$ [N/m]. Nasce dalle forze di coesione molecolare. Determina la forma sferica delle gocce, la flottazione degli insetti e il funzionamento del surfactante polmonare.



Capillarità e Menisco

$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r}$. Menisco concavo ($\theta < 90^\circ$): liquido sale. Menisco convesso ($\theta > 90^\circ$): liquido scende. Cruciale per i vasi capillari e i tessuti biologici.



Formula di Laplace

$\Delta P = 2\gamma/r$ (interfaccia singola), $\Delta P = 4\gamma/r$ (bolla con due superfici). Spiega la pressione negli alveoli polmonari e il meccanismo dell'embolia da bolla d'aria.

✓ **Concetto chiave trasversale:** la geometria (raggio r) governa sia la portata (r^4) che la pressione capillare ($1/r$) — due facce della stessa fisica dei fluidi biologici.

Domande di Autovalutazione

1. Vasocostrizione e Portata

Se il raggio di un'arteria si riduce del 50% per vasocostrizione, di quanto si riduce la portata?

Suggerimento: usa $Q \propto r^4$

2. Menisco Concavo e Convesso

Qual è la differenza tra menisco concavo e convesso? In quale caso il liquido sale nel tubo capillare?

Suggerimento: pensa all'angolo di contatto θ

3. Altezza Capillare

**Come varia l'altezza capillare h al variare del raggio r del tubo?
Cosa succede se r dimezza?**

Suggerimento: $h = 2\gamma \cos\theta / \rho g r$

4. Ematocrito e Rischio Cardiovascolare

Perché un aumento dell'ematocrito aumenta il rischio cardiovascolare? Collega viscosità, portata e lavoro cardiaco.

Suggerimento: usa la legge di Poiseuille

5. Formula di Laplace e Alveoli

Enuncia la Formula di Laplace per una bolla sferica. Perché è importante per gli alveoli polmonari?

Suggerimento: $\Delta P = 4\gamma/r$ per una bolla con due superfici

6. Embolia da Bolla d'Aria

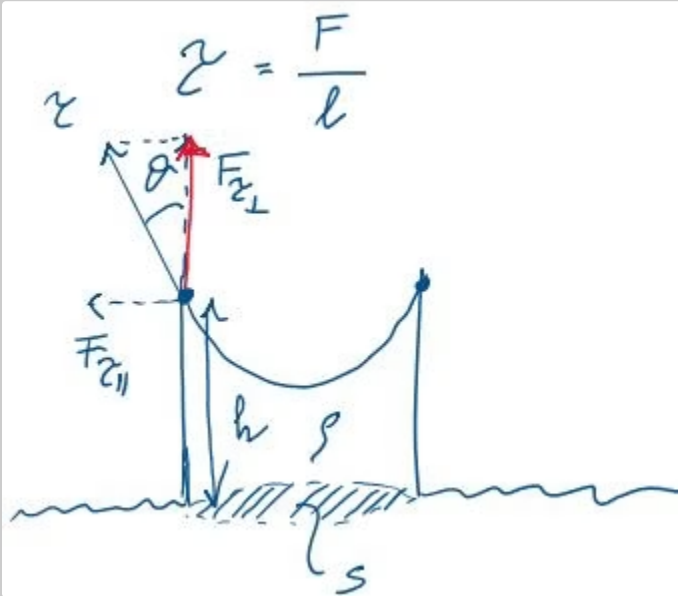
Come una bolla d'aria in un capillare può causare embolia? Qual è la condizione di ostruzione completa?

Suggerimento: pensa ai due menischi e alla differenza di pressione

✔ Rispondi senza guardare gli appunti, poi verifica con le slide precedenti!

Le slides seguenti su sfondo grigio sono opzionali, i.e. non esplicitamente menzionate nel Syllabus 2026

Forze in Gioco nella Capillarità (vedi appunti)



La tensione superficiale $\gamma = F/l$ genera una forza verticale sul perimetro del tubo. La componente verticale di questa forza bilancia il peso della colonna di liquido sollevata.

Equilibrio delle Forze: Derivazione (vedi appunti)

La forza di tensione superficiale verticale bilancia il peso del liquido nella colonna:

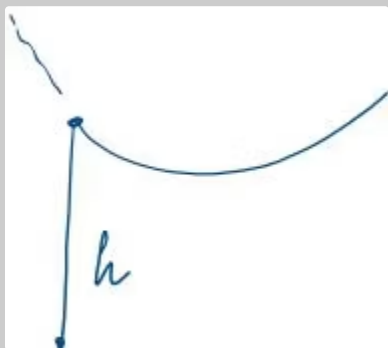
$$F_{\sigma} = 2\pi r \gamma \cos \theta$$

$$F_{\sigma} = F_p = mg = \rho V g = \rho \pi r^2 h g$$

$$2\pi r \gamma \cos \theta = \rho \pi r^2 h g$$

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho r g}$$

Formula dell'Altezza Capillare (vedi appunti)



Dall'equilibrio tra tensione superficiale e peso si ricava l'altezza h della colonna capillare:

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r}$$

L'altezza dipende dalla tensione superficiale γ , dall'angolo di contatto θ , dalla densità ρ e dal raggio r del tubo.

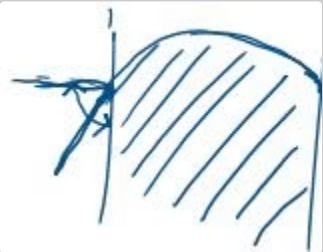
Segno di h e Angolo di Contatto (vedi appunti)

$$0^\circ < \theta < 90^\circ$$

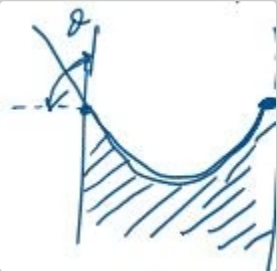
$\cos \theta > 0 \rightarrow h > 0$: il liquido **sale** nel tubo (menisco concavo, liquido bagnante).

$$90^\circ < \theta < 180^\circ$$

$\cos \theta < 0 \rightarrow h < 0$: il liquido **scende** nel tubo (menisco convesso, liquido non bagnante).



Menisco Convesso: θ tra 90° e 180° (vedi appunti)



Quando l'angolo di contatto è compreso tra 90° e 180° , il coseno è negativo e quindi $h < 0$: il livello del liquido nel tubo è **inferiore** rispetto al livello esterno. Questo comportamento è tipico del mercurio nel vetro.

$$90^\circ < \theta < 180^\circ \Rightarrow h < 0$$