

Sommario (2)

- I fluidi: nuove grandezze, la densità e la pressione
- Statica dei fluidi
- Dinamica dei fluidi: equazione di continuità
- Bernoulli e attrito nei fluidi
- Esercizi: il sistema cardiocircolatorio

Lezione 3 (12/01/2018)

Statica dei Fluidi

Corso riallineamento

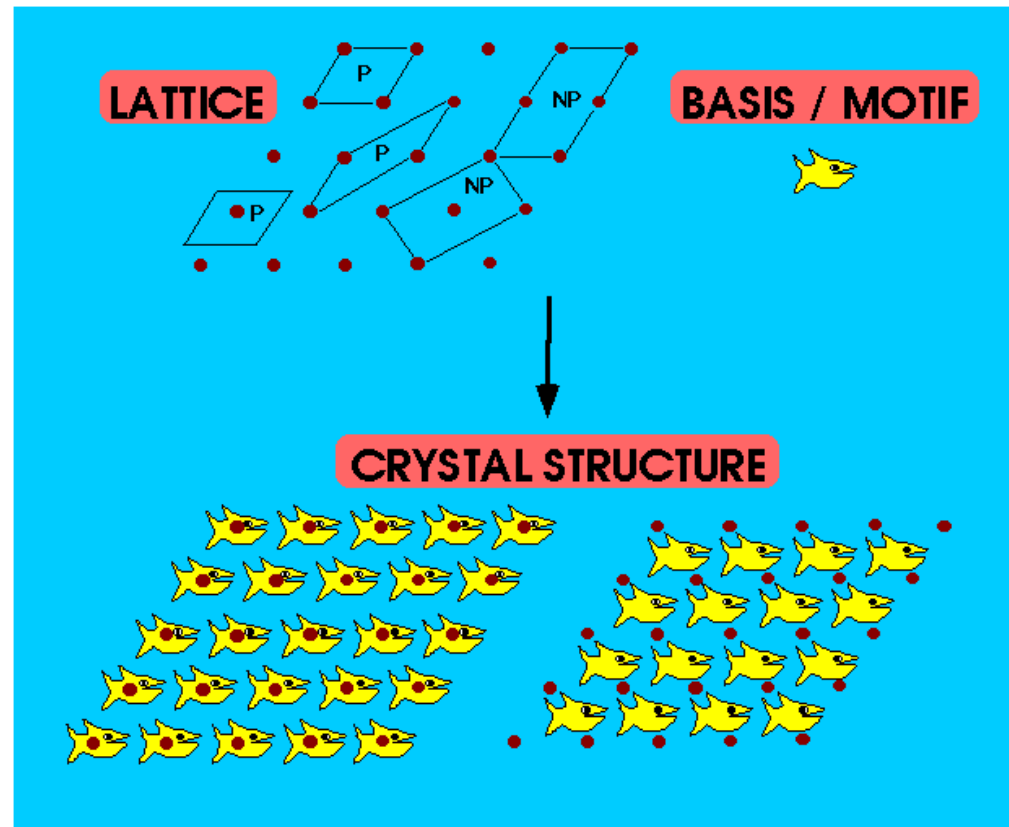
<http://elearning.unica.it/corsi-di-riallineamento/>

I fluidi

3 stati della materia:

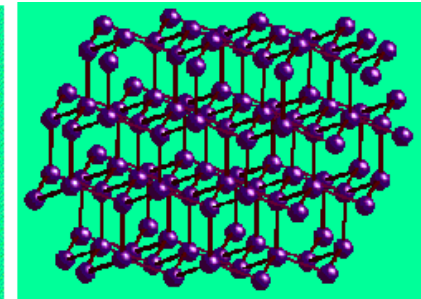
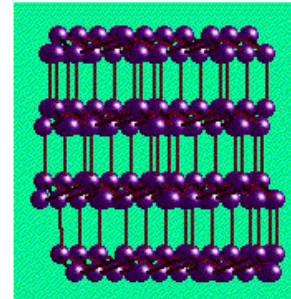
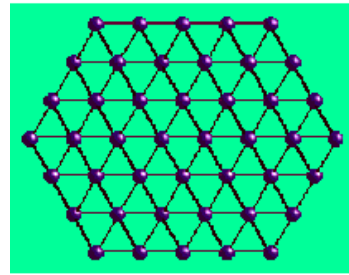
1. Solido: mantiene sempre la sua forma anche se applichiamo forze
2. Liquido: forma del contenitore ma non comprimibile
3. Gassoso: forma del contenitore e altamente comprimibile

Le proprietà della materia dipendono fortemente dalla struttura atomica, cioè dalla disposizione degli atomi gli uni rispetto agli altri e dalle forze tra loro

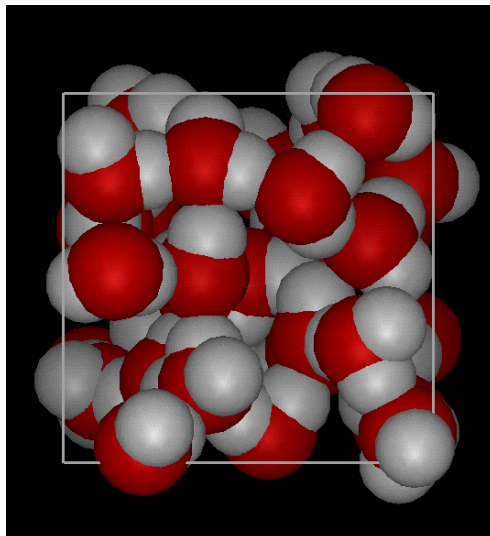
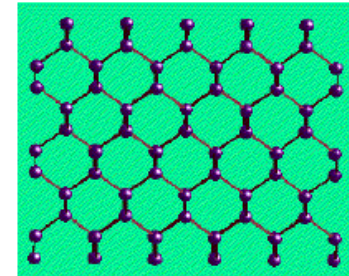
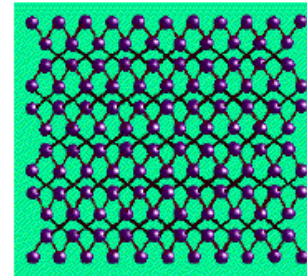
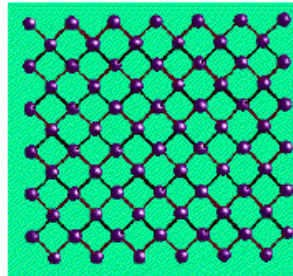


Stati della materia

Struttura del diamante,
Atomi disposti in
posizioni ben definite,
struttura regolare e
ordinata



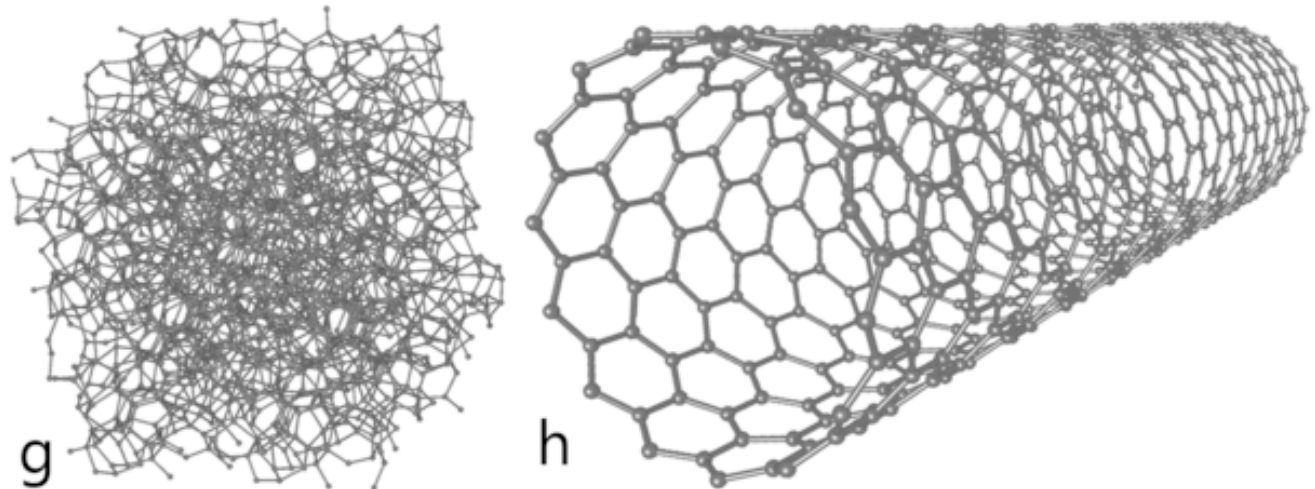
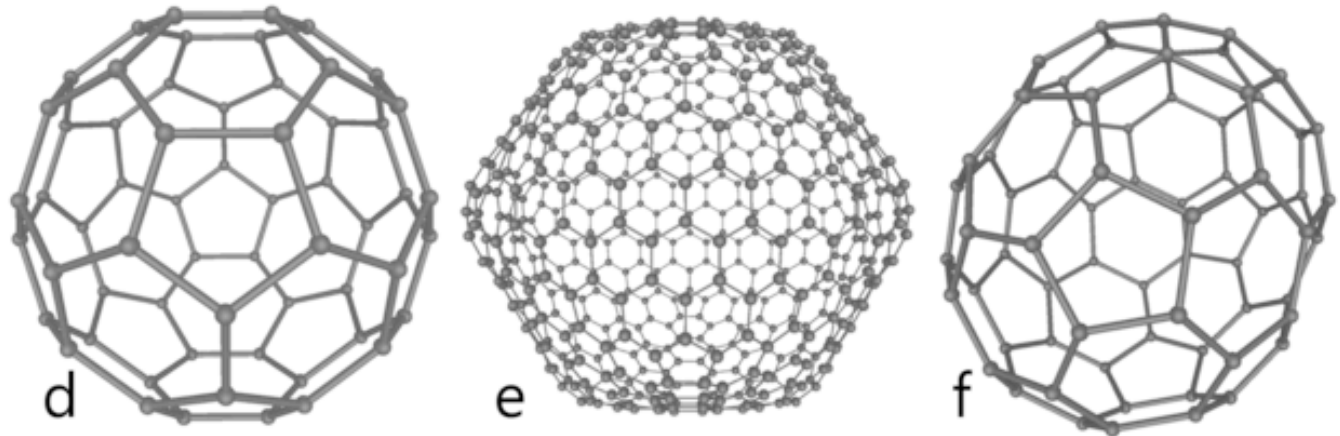
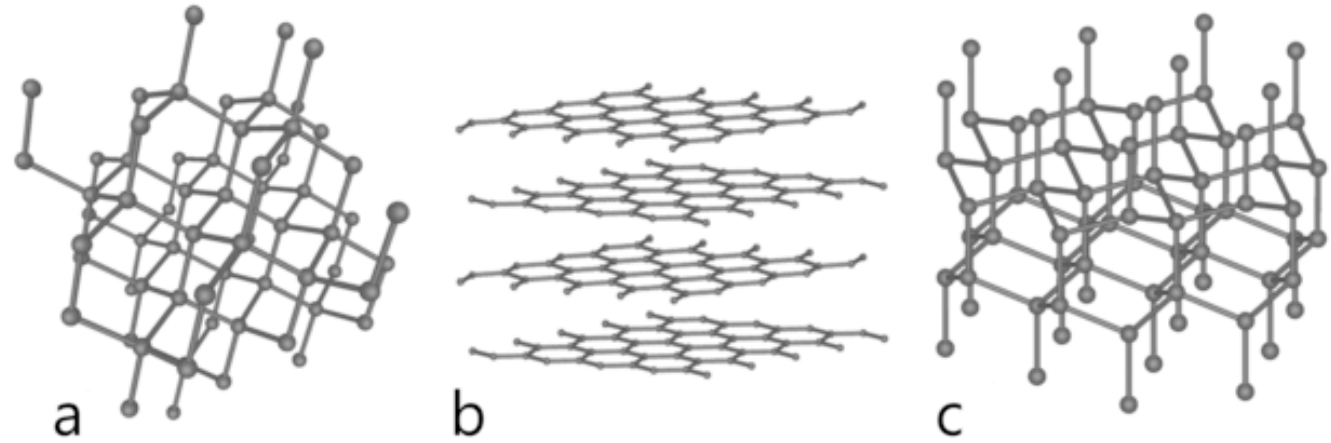
Views of the Diamond Network



acqua liquida
Molecole disordinate
ma vicine le une alle
altre, compattezza!

I fluidi comprendono
liquidi e gas
Fluido \Leftrightarrow Fluire
i fluidi, al contrario dei
solidi hanno capacità di
scorrimento

Il carbonio in tutte le sue forme



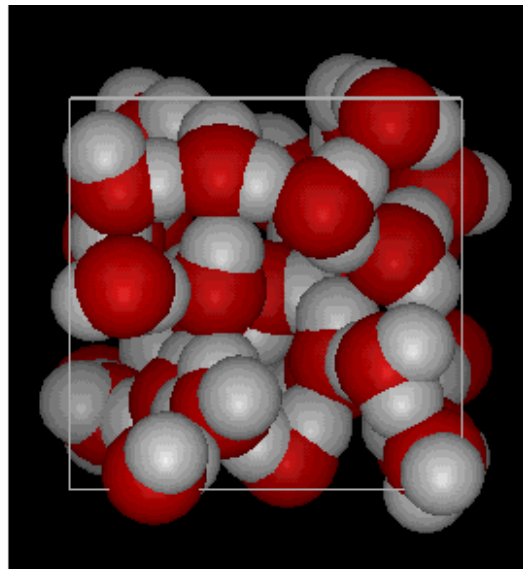
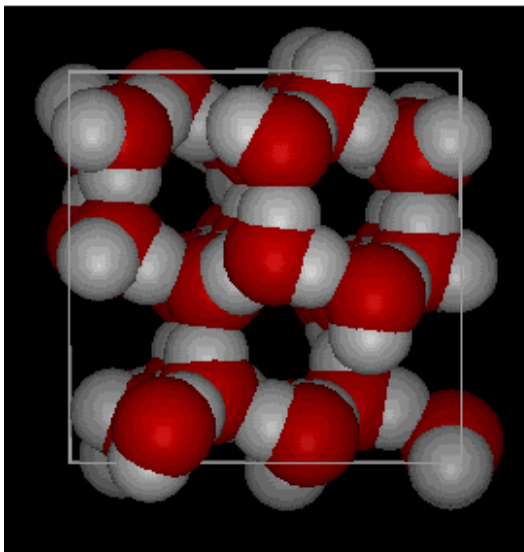
- a) Diamante
- b) Grafite
- c) Lonsdaleite
- d) Fullerene C60
- e) Fullerene C540
- f) Fullerene C70
- g) Carbonio amorfo
- h) Nanotubo di carbonio

Densità

Nello studio dei fluidi introduciamo la densità come grandezza nuova che esprime il rapporto tra la massa di una data quantità di fluido e il volume occupato: $d=m/V$ kg/m^3 o g/cm^3

I fluidi non hanno volume proprio!

La minore densità della materia allo stato gassoso è dovuta alla maggiore distanza tra le particelle



Ghiaccio e acqua liquida

Nonostante i liquidi di solito abbiano densità minore dei solidi, il ghiaccio rappresenta un'eccezione! Nel ghiaccio la struttura regolare mostra dei buchi che ne diminuisce la densità!

Volume e massa

Siccome i **fluidi non hanno volume proprio**, ci si deve domandare quale sia la massa di un fluido che occupa un volume V .

Esempio: abbiamo una sostanza in una siringa che occupa un volume di 3 ml. Quale massa ha? Dipende dalla densità, maggiore la densità e maggiore sarà la massa

$$d=m/V \Rightarrow m=d*V \Rightarrow m=d*3\text{ml}$$

Se abbiamo acqua allora ($d = 1 \text{ g/cm}^3$):

$$m=???$$

Se abbiamo una sostanza con $d= 1.2 \text{ g/cm}^3$

$$m=???$$

300 g di farina NON occupano lo stesso volume di 300 g di riso!!!

Pressione

Nello studio dei fluidi introduciamo la pressione come grandezza nuova che esprime il rapporto tra la componente della forza applicata sulla superficie di liquido e ivi perpendicolare e la superficie stessa:

$P=F/S$ La pressione è uno scalare!

Se applichiamo una forza alla superficie di un liquido possiamo scomporla in una forza tangenziale alla superficie e una perpendicolare:

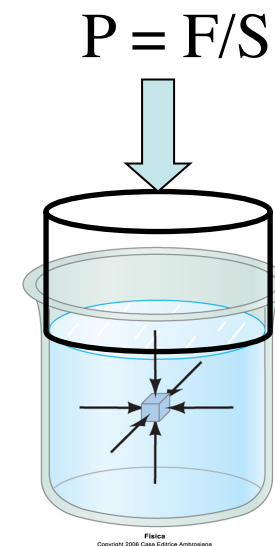
(i) la forza tangenziale produce una perturbazione del liquido vicino alla superficie;

(ii) la forza perpendicolare, applicata attraverso un pistone, viene invece sentita in tutto il liquido:

Principio di Pascal

- In un fluido in equilibrio le forze tangenziali sono **nulle**
- Qualsiasi elemento di fluido sente la stessa pressione

1 Pascal=1N/m²

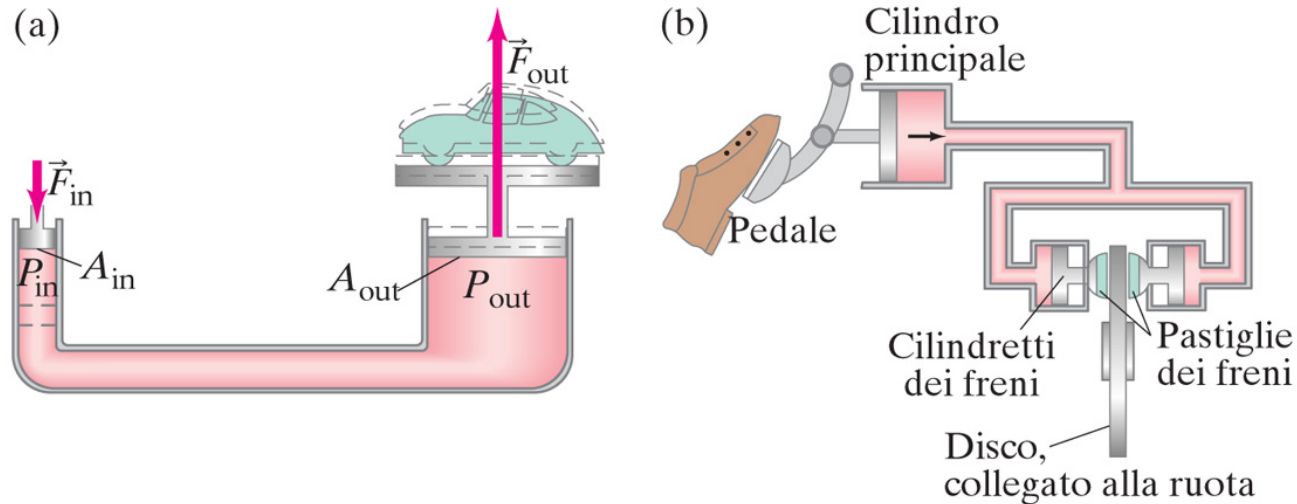


Pascal: esempi

Torchio o pressa idraulica:

Isotropia della pressione

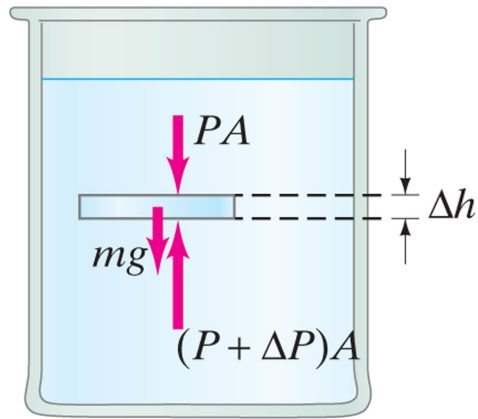
$$P = F_{in} / A_{in} = F_{out} / A_{out} \Rightarrow F_{out} = F_{in} * A_{out} / A_{in}$$



$$F_{in} = 50 \text{ kg} * g \quad A_{in} = 0.5 \text{ m}^2 \quad A_{out} = 10 \text{ m}^2 \quad \Rightarrow$$
$$F_{out} = 50 * 10 / 0.5 \text{ kg} * g = 1000 \text{ kg} * g$$

Moltiplicatore o demoltiplicatore di forze

Principio di Stevino



$$\Delta P = d g \Delta h$$

Qual'è la pressione all'interno di un fluido a una profondità h dalla superficie?

Per isotropia pressione

$$P \cdot A + mg = (P + \Delta P) \cdot A \Rightarrow \Delta P \cdot A = mg$$

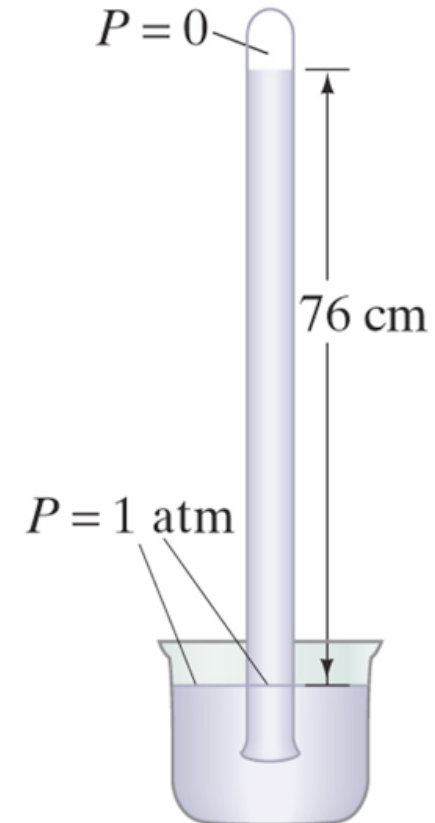
$$\Delta P = mg/A \quad m = d \cdot V = d \cdot A \cdot \Delta h \Rightarrow$$

$$\Delta P = d \cdot A \cdot \Delta h \cdot g / A = d g \Delta h$$

$$P(h) = d g h$$

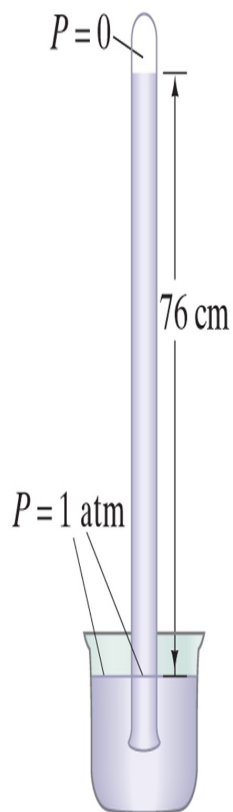
Esperimento di Torricelli: un tubo pieno di mercurio viene rovesciato in una vaschetta. Il livello del mercurio si stabilizza a 76 cm dalla superficie della vaschetta. Cosa equilibria il mercurio?

$$P = 13.6 \text{ g/cm}^3 \cdot 980 \text{ cm/s}^2 \cdot 76 \text{ cm} = 1.012 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$



Barometro ad acqua

$$P = dgh$$



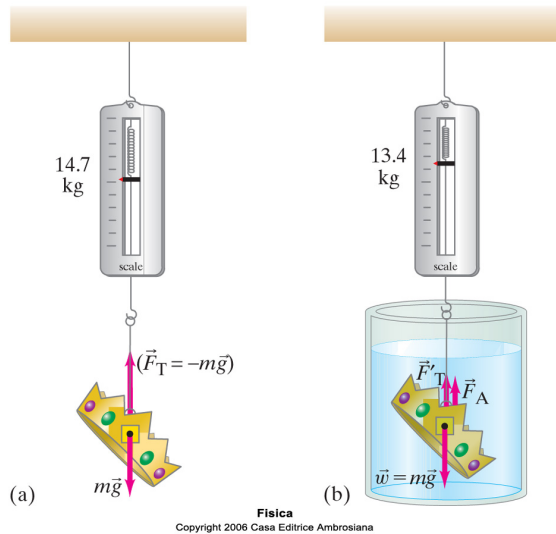
Fisica
Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana



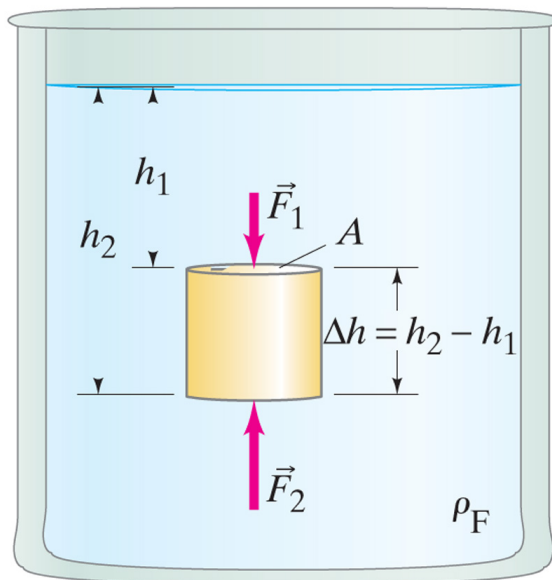
Fisica
Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

Principio di Archimede

I corpi immersi in un liquido sembrano essere più leggeri...



Principio di Archimede: qualsiasi corpo immerso in un **fluido** riceve una spinta (forza) dal basso verso l'alto pari al peso di acqua spostata dal corpo stesso

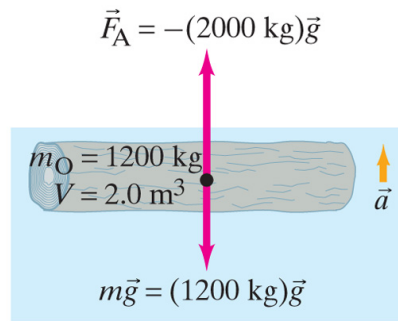


Fisica
Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

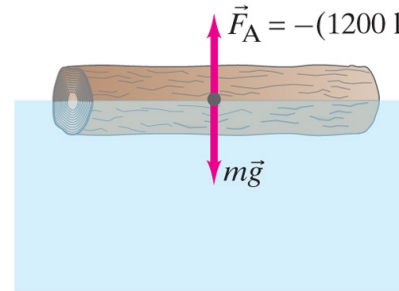
$$F_A = F_2 - F_1 = (P_2 - P_1) * A = d_F g (h_2 - h_1) * A = d_F V g = m_F g$$

$$F_{TOT} = F_P - F_A = mg - m_F g = (d - d_F) V g$$

Galleggiamento



(a)



(b)

Un corpo galleggia quando la spinta di Archimede bilancia completamente la forza peso

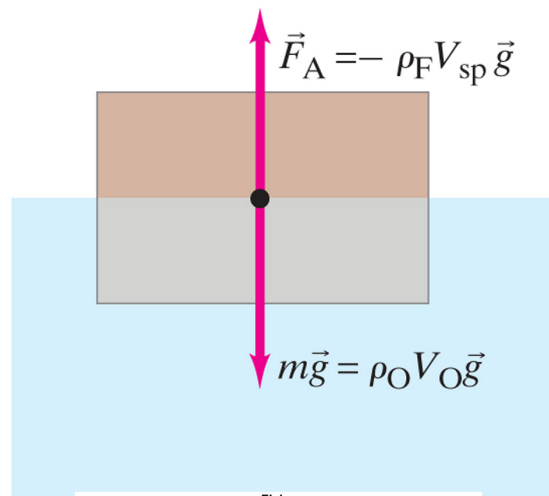
$2 \text{ m}^3 \text{ legno} \Rightarrow 1200 \text{ kg}$

$2 \text{ m}^3 \text{ acqua} \Rightarrow 2000 \text{ kg}$

Il legno **sommerso** riceve una spinta dal basso verso l'alto:

galleggiamento!

Fisica
Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana



Fisica
Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

Il ghiaccio ha una densità minore dell'acqua
Un iceberg galleggia, che volume si trova sotto la superficie dell'acqua?

$$F_P = mg = V_C d_C g$$

$$\text{Acqua spostata } F_A = V_I d_F g$$

$$V_C d_C g = V_I d_F g \Rightarrow$$

$$V_I / V_C = d_C / d_F = 0.92 / 1.025 = 0.90$$

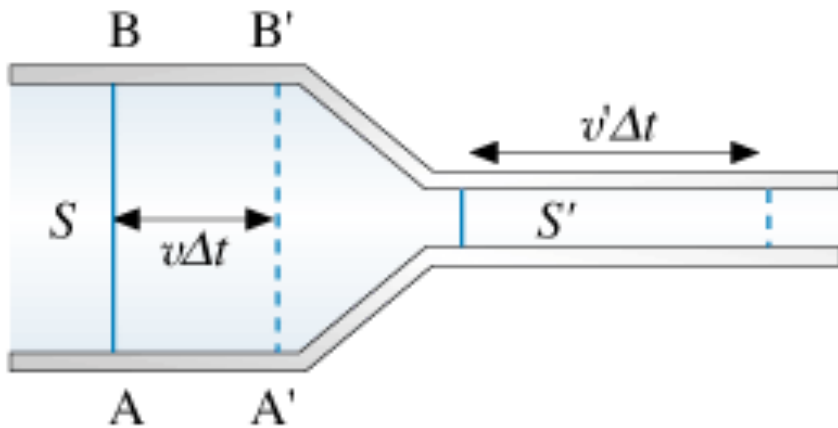
Il 90%
dell'iceberg
sta
immerso!



Portata di un condotto

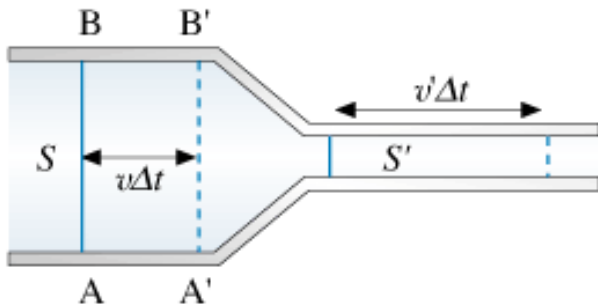
Portata: quantità di volume che passa attraverso una superficie in un tempo Δt : $Q = \Delta V / \Delta t$ [m^3]/[s]

$$Q = \Delta V / \Delta t \quad \Delta V = S \Delta l = S v \Delta t \Rightarrow Q = S v \Delta t / \Delta t = S v$$



!v perpendicolare a S!

Equazione di continuità



Per un fluido che scorre in un condotto senza perdite e in moto stazionario, la portata è uguale in tutti i punti del condotto perché la massa si deve conservare: tutto ciò che entra da una parte esce dall'altra

Poiché deve essere valido per tutti i punti del condotto abbiamo:

$$Q = \text{costante} \Rightarrow Sv = S'v' \Rightarrow v' = S/S' * v$$

Se come in questo caso $S' < S$ troviamo che $v' > v$

L'equazione di continuità è il **principio di conservazione della massa** e come tutti gli altri principi di conservazione gioca un ruolo importante nella dinamica dei fluidi.

Bernoulli

Il principio di Bernoulli non è altro che un principio di conservazione dell'energia applicato a una massa di liquido che scorre. Le energie in gioco sono

- l'energia cinetica
- l'energia potenziale
- l'energia della pressione

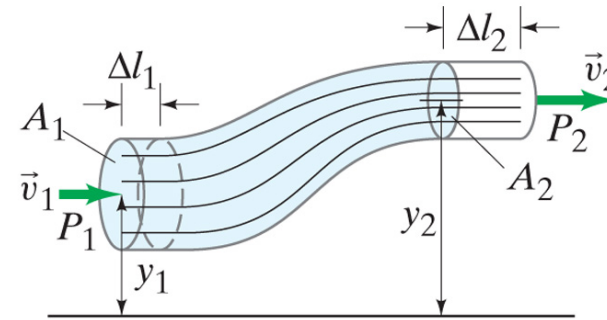
Teorema dell'energia cinetica

$$\Delta K = \text{Lavoro} = L_p + L_g$$

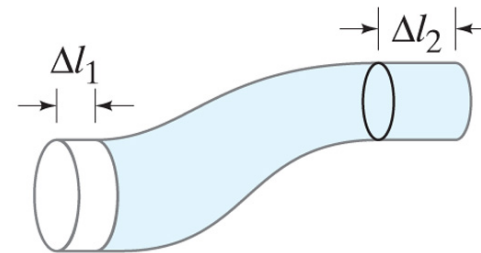
$$\text{Lavoro di } P = P_1 A_1 \Delta l_1 - P_2 A_2 \Delta l_2$$

$$\text{Lavoro di } g = -mg(y_2 - y_1)$$

$$\Delta K = 0.5mv_2^2 - 0.5mv_1^2$$



(a)



(b)

Fisica

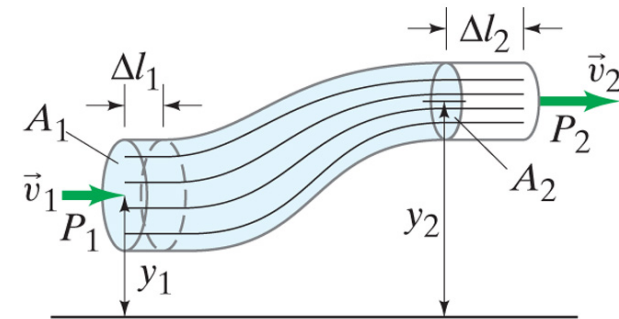
Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

$$(P_1 - P_2) \cdot \Delta V - d \cdot \Delta V \cdot g \cdot (y_2 - y_1) = 0.5 \cdot d \cdot \Delta V \cdot v_2^2 - 0.5 \cdot d \cdot \Delta V \cdot v_1^2$$

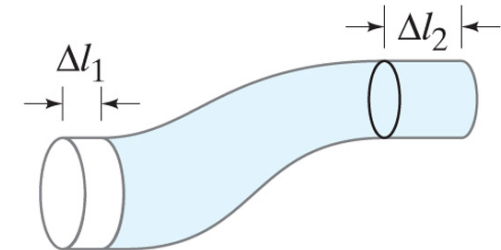
Bernoulli

$$P_1 + 0.5 \rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + 0.5 \rho v_2^2 + \rho g y_2 = \text{costante}$$

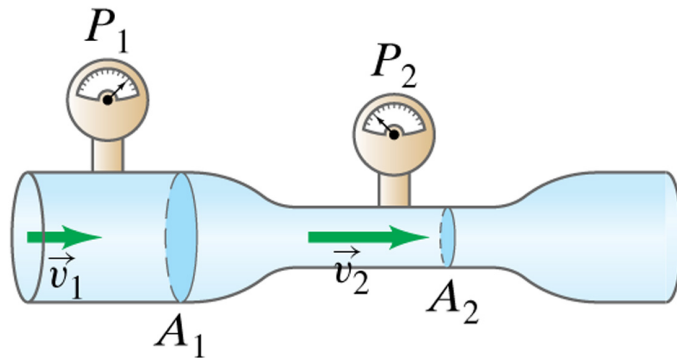
Nonostante in questa forma, più facile da ricordare, ciascun termine ha le dimensioni di una pressione, l'equazione esprime la conservazione dell'energia: la somma dell'energia dovuta alla pressione, del termine cinetico e di quello potenziale sono costanti!!! Se moltiplichiamo tutto per ΔV ritroviamo le dimensioni di un'energia!!!



(a)



Tubo di Venturi



Fisica
Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana



Fisica
Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

Esempi

$$P_1 + 0.5dv_1^2 + dgy_1 = P_2 + 0.5dv_2^2 + dgy_2$$

$$P_1 + 0.5dv_1^2 = P_2 + 0.5dv_2^2$$

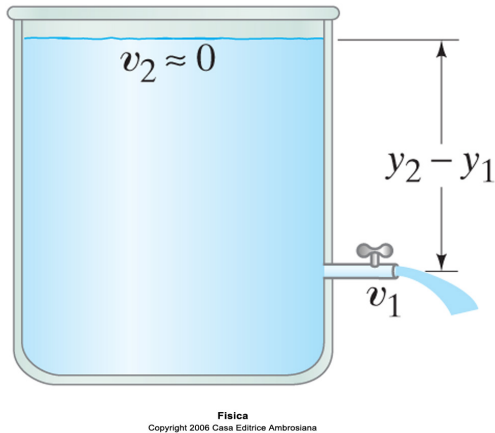
La pressione è minore dove la velocità è maggiore. È vero?

ESEMPI:

- Soffiando tra due fogli di carta questi si avvicinano
- Porta che sbatte con il vento
- Uscita dal cinema

Pensare alla teoria cinetica dei gas dove la pressione è la misura degli urti delle molecole sul contenitore!!!

Torricelli



$$P_1 + 0.5dv_1^2 + dgy_1 = P_2 + 0.5dv_2^2 + dgy_2$$

$$P_1 = P_2 = \text{pressione atmosferica}$$

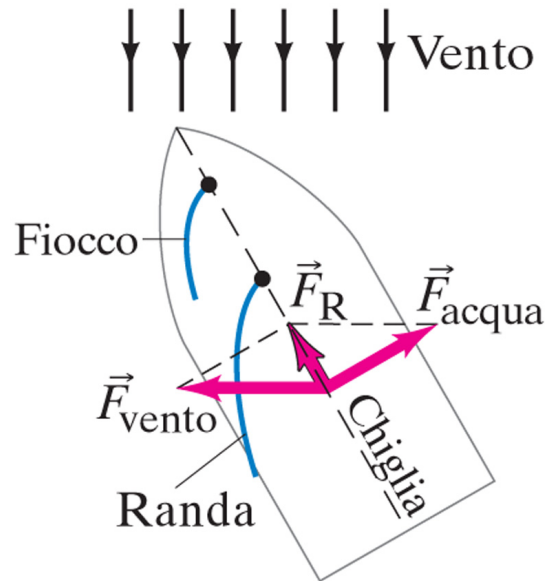
$v_2 \approx 0$ immaginiamo che si svuoti lentamente

$$0.5dv_1^2 = dg(y_2 - y_1) \Rightarrow v_1 = \sqrt{2g(y_2 - y_1)}$$

Ricorda qualcosa?

Meccanica: velocità di caduta di un oggetto da un'altezza h !

Barche a vela



Fisica
Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

$$P_1 + 0.5dv_1^2 + dgy_1 = P_2 + 0.5dv_2^2 + dgy_2$$

Se applichiamo Bernoulli al fluido che scorre sulle vele si ha: $y_1 = y_2$
Rimane solo pressione + En. Cinetica

$$P_{\text{ext}} + K_{\text{ext}} = P_{\text{int}} + K_{\text{int}}$$

La velocità dell'aria che scorre sulla parte esterna (curva) della vela è maggiore di quella che scorre sulla parte interna:

Quindi si ha che $K_{\text{ext}} > K_{\text{int}}$ allora $P_{\text{ext}} < P_{\text{int}}$

Forza efficace (F_{vento}) che spinge sulla vela! La forza che agisce sulla barca è poi la risultante di questa forza + la forza di resistenza dell'acqua sulla chiglia (F_{acqua})

Le barche a vela navigano (quasi) controvento!
Stesso principio per le ali degli aeroplani!

Lezione 3 (12/01/2018)

Fluidi reali: il gradiente di pressione

L'attrito come viscosità

Formula di Poiseuille

Quando f è proporzionale a v

Regime turbolento

Velocità di trascinamento

Corso riallineamento

<http://elearning.unica.it/corsi-di-riallineamento/>

Fluidi reali

$$P_1 + 0.5dv_1^2 + dgy_1 = P_2 + 0.5dv_2^2 + dgy_2$$



Poiché il condotto ha sezione costante, per l'equazione di continuità $v_1=v_2$, e poiché è orizzontale $h_1=h_2$, abbiamo quindi:

$$P_1=P_2 \text{ o } \Delta P=0$$

Questa condizione vale quando gli attriti vengono trascurati!

In un fluido reale dobbiamo scrivere:

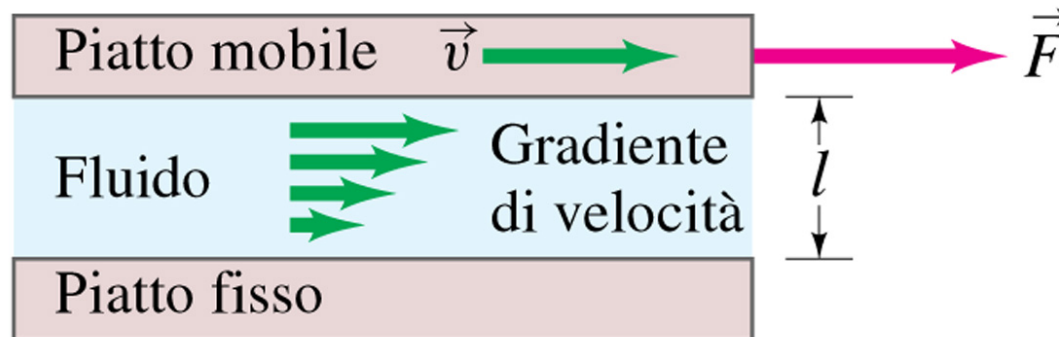
$$P_1 + 0.5dv_1^2 + dgy_1 = P_2 + 0.5dv_2^2 + dgy_2 + P_A$$

Dove P_A rappresenta la pressione persa per attrito. Si ha quindi:

$\Delta P * \Delta V = E_A$ ovvero occorre una differenza di pressione per far muovere un fluido a velocità costante in un condotto rettilineo ove vi siano degli attriti

Viscosità

La viscosità esprime la difficoltà di un fluido reale a scorrere. La viscosità è la grandezza che quantifica l'attrito nei fluidi. Nei liquidi dipende principalmente dalla **forza di coesione tra le molecole**, cioè dipende dalla **struttura microscopica/molecolare** del liquido.

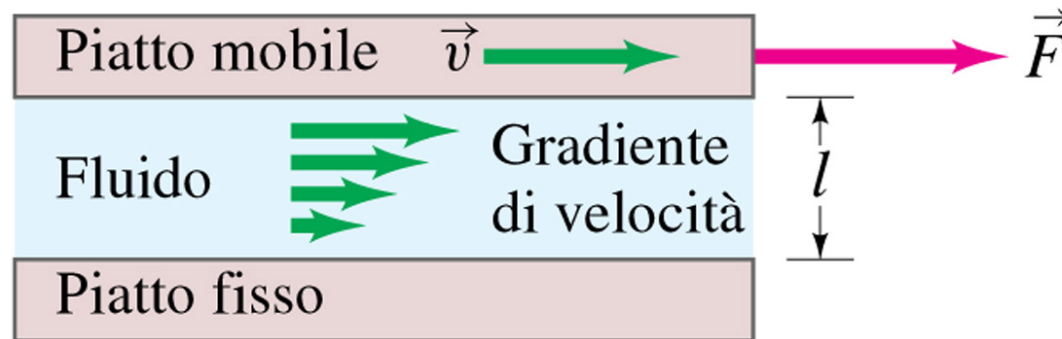


Nonostante la sua natura molecolare, l'evidenza macroscopica è rappresentata in figura:

per far muovere un piatto mobile che galleggia sulla superficie del liquido occorre applicare una forza F . Questa forza è tanto maggiore quando maggiore è la viscosità del liquido.

Viscosità

Per velocità non troppo elevate il fluido al di sotto del piatto mobile scorre in regime **laminare**: il fluido è stratificato e ogni strato ha una velocità diversa. Se partiamo dal piatto mobile lo strato sottostante si muove a velocità minore e così via sino ad arrivare all'ultimo strato in contatto con il piatto fisso, il quale, a causa dell'attrito, ovvero le forze di adesione tra liquido e piatto, avrà velocità quasi zero.



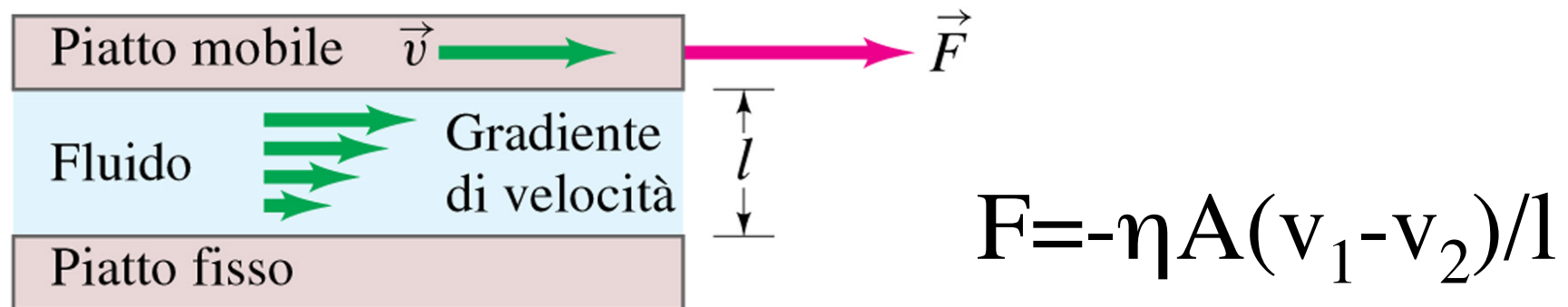
La differenza di velocità tra gli strati dipende dalla viscosità del fluido: più il fluido è viscoso e più è difficile far scorrere gli strati tra loro

$$F = -\eta A (v_1 - v_2) / l$$

si misura in poise = $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$ o S.I. $\text{Pa} \cdot \text{s}$
dove A è l'area del piatto e l la distanza tra gli strati le cui velocità sono v_1 e v_2 .

Viscosità

Anche in questo caso la struttura di questa formula ricorda $F=ma$. Sotto l'azione della forza \vec{F} , lo strato di area A subisce un gradiente di velocità (accelerazione) inversamente proporzionale al valore della viscosità (massa) del liquido:



Il miele ha una viscosità molto maggiore dell'acqua, difficile farlo scorrere, tra le lamine non c'è differenza (gradiente) di velocità!

La viscosità diminuisce (miglior scorrevolezza) con la temperatura!!!
Ovvero aumenta a bassa temperatura! **Perché?**

Domanda: se dividiamo F/A , si può parlare di pressione applicata?

Resistenza



Concetto di resistenza di un condotto:

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

Rapporto tra la differenza di pressione che applichiamo a un condotto e la portata che otteniamo, $Q = Sv$

Per un condotto rettilineo si ha per la resistenza: $R = \frac{8 \eta l}{\pi r^4}$
Dove l è la lunghezza del condotto, r il raggio e η la viscosità del fluido

I condotti di sezione piccola hanno una resistenza molto alta
Se dimezziamo il raggio la resistenza aumenta di un fattore 16!

Poiseuille

$$R = \frac{\Delta P}{Q} \quad \text{Definizione}$$

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

Dalle due precedenti relazioni si ricava la legge di Poiseuille:

$$\frac{8 \eta l}{\pi r^4} = \frac{\Delta P}{Q} \quad \text{Ovvero} \quad Q = \frac{\pi r^4}{8 \eta l} \Delta P$$

$$Q \propto \Delta P$$

La portata è proporzionale alla differenza di pressione applicata ai due estremi del condotto:

in un fluido reale è la differenza di pressione che genera il movimento del fluido!

Poiseuille

Se riscriviamo l'equazione per un fluido che scorre in un condotto a sezione circolare e ricordandoci l'espressione della portata:

Sezione circolare

$$S = \pi r^2$$

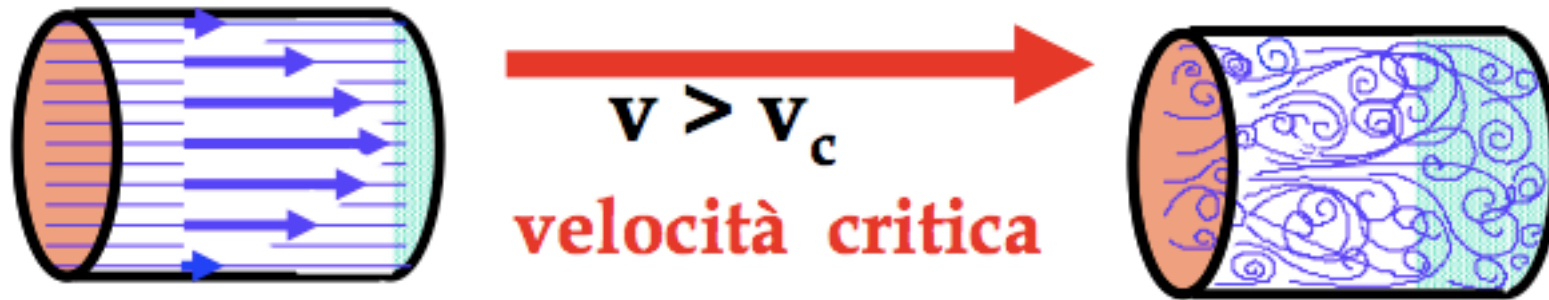
$$Q = \frac{\pi r^4}{8 \eta l} \Delta P = \frac{\pi r^4 F}{8 \eta l S} = \frac{r^2 F}{8 \eta l}$$

$$Q = Sv \quad \pi r^2 v = \frac{r^2 F}{8 \eta l} \quad F = 8\pi \eta l v$$

$$F \propto v$$

La velocità di scorrimento proporzionale alla forza applicata è tipica di una forza d'attrito: in macchina, per andare a velocità maggiore dovete aumentare i giri del motore, ovvero più forza! **F=forza totale?**

Velocità critica



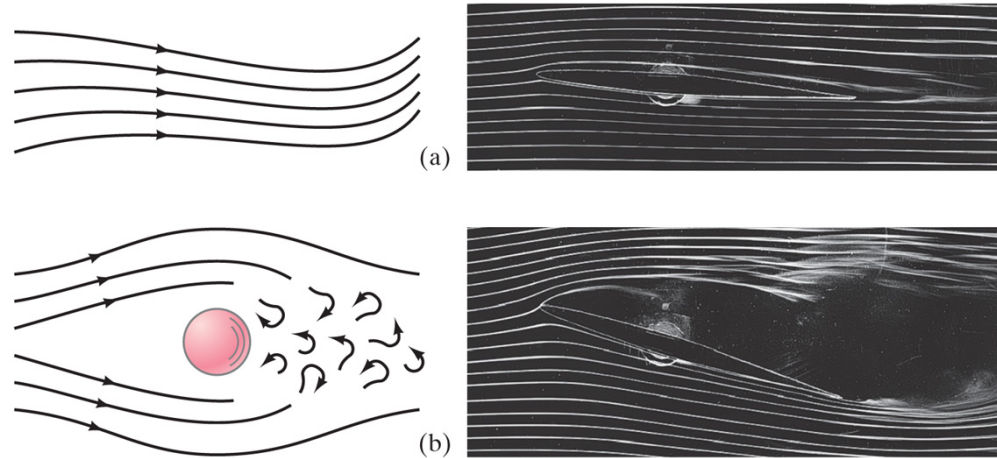
Il regime laminare, che ha un profilo di velocità parabolico, dura sinché la velocità non aumenta a un valore detto critico, oltre il quale si ha un regime detto turbolento, in cui appaiono dei vortici. Questi vortici provocano un aumento degli attriti e quindi più energia si perde per far scorrere il fluido.

Il moto laminare è anche detto moto silenzioso, al contrario del moto turbolento che viene detto rumoroso

Regime turbolento

In regime laminare la portata
è proporzionale
alla pressione applicata

$$Q \propto \Delta P$$

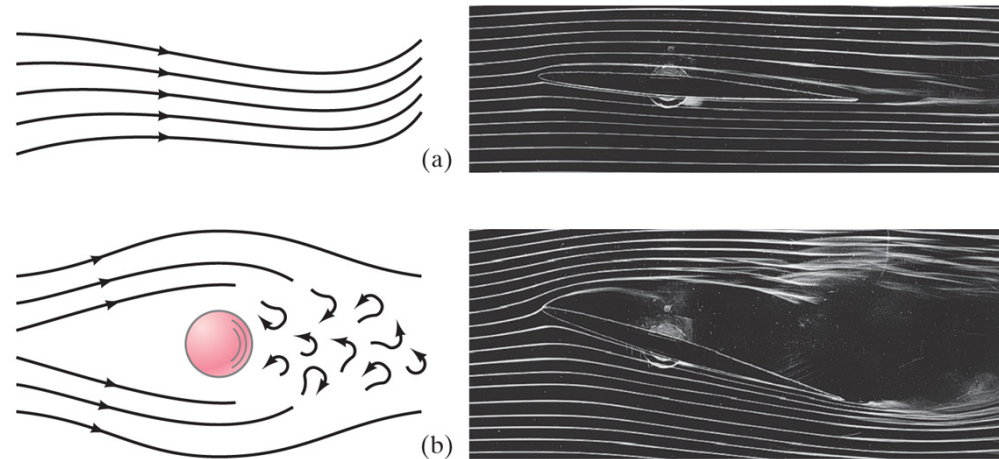


In regime turbolento invece abbiamo che tutto il fluido è pervaso da vortici, cioè energia viene spesa in eccesso per creare questi vortici. Non è valida la relazione di Poiseuille e la resistenza è quindi proporzionale al volume di fluido che transita, cioè la portata: $R=KQ$ dove K è una costante, il fattore di attrito. Quindi abbiamo:

$$R = \frac{\Delta p}{Q} = KQ \quad \longrightarrow \quad Q \propto \sqrt{\Delta p}$$

Regime turbolento

$$Q \propto \sqrt{\Delta P}$$



A parità di pressione la portata diminuisce, il regime turbolento ha una dispersione di energia per attrito maggiore (i vortici)!

Velocità critica, velocità alla quale il regime passa da laminare a turbolento

$$v_c = \frac{\Re \eta}{r^* d}$$

\Re = Numero di Reynolds, che permette di calcolare la v_c

Vale circa 1200 per condotti rettilinei regolari

Vale meno di 1200 in corrispondenza di strozzature dove è più facile avere un moto turbolento!!!

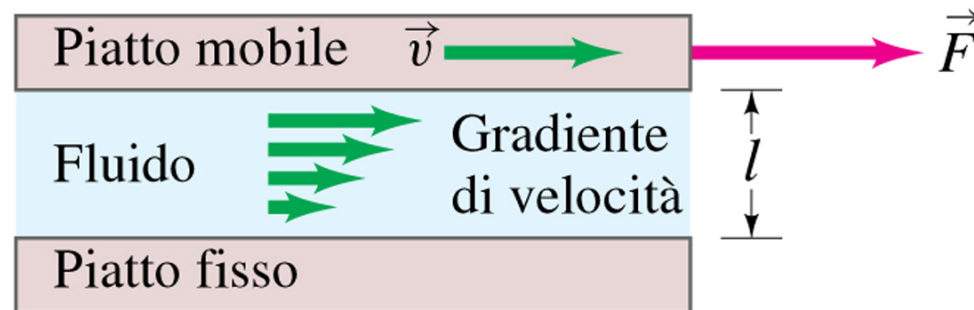
Poiseuille e attrito

$$F \propto v$$

La velocità di scorrimento proporzionale alla forza applicata è tipica delle forze d'attrito: in macchina, per andare a velocità maggiore dovete aumentare i giri del motore, ovvero più forza!

Trasporto in regime viscoso

- $F=ma \Rightarrow$ moto uniformemente accelerato, $a = \text{costante}$
Ma nei fluidi reali non ci sono moti uniformemente accelerati!
- infatti nei fluidi reali c'è attrito = viscosità del fluido
per far scorrere un oggetto a velocità costante bisogna applicare una forza costante



Forza di attrito: il caso del paracadutista

- Consideriamo il caso di una forza costante come quella peso che agisce su una particella immerso in un fluido

$$F=mg$$

- La forza di attrito che si oppone al moto della particella dipende dalla velocità della particella, maggiore velocità = maggiore attrito:

$$F_A = -f v \quad \text{il segno meno indica una forza che si oppone al moto!}$$

- Appena messa in movimento la particella sente una forza di attrito piccola, essendo la sua velocità piccola, e procede quindi di moto accelerato, perché $F(\text{peso}) > F_A$

Forza di attrito: il caso del paracadutista

- All'aumentare del tempo la velocità aumenta sino a che la forza di attrito uguaglia la forza motrice (peso), e si ha:

$$F_A + F = 0 \quad \Rightarrow \quad -fv + F = 0 \quad \Rightarrow \quad v = F/f$$

- Da questo momento in poi la particella procede a velocità costante e $v_S = F/f$ si chiama la **velocità di trascinamento**

- **Nota bene:** benché la forza che provoca il movimento sia la forza peso, i corpi **NON** cadono tutti alla stessa velocità di trascinamento, perché siamo in presenza di attrito che non dipende dalla massa!!!

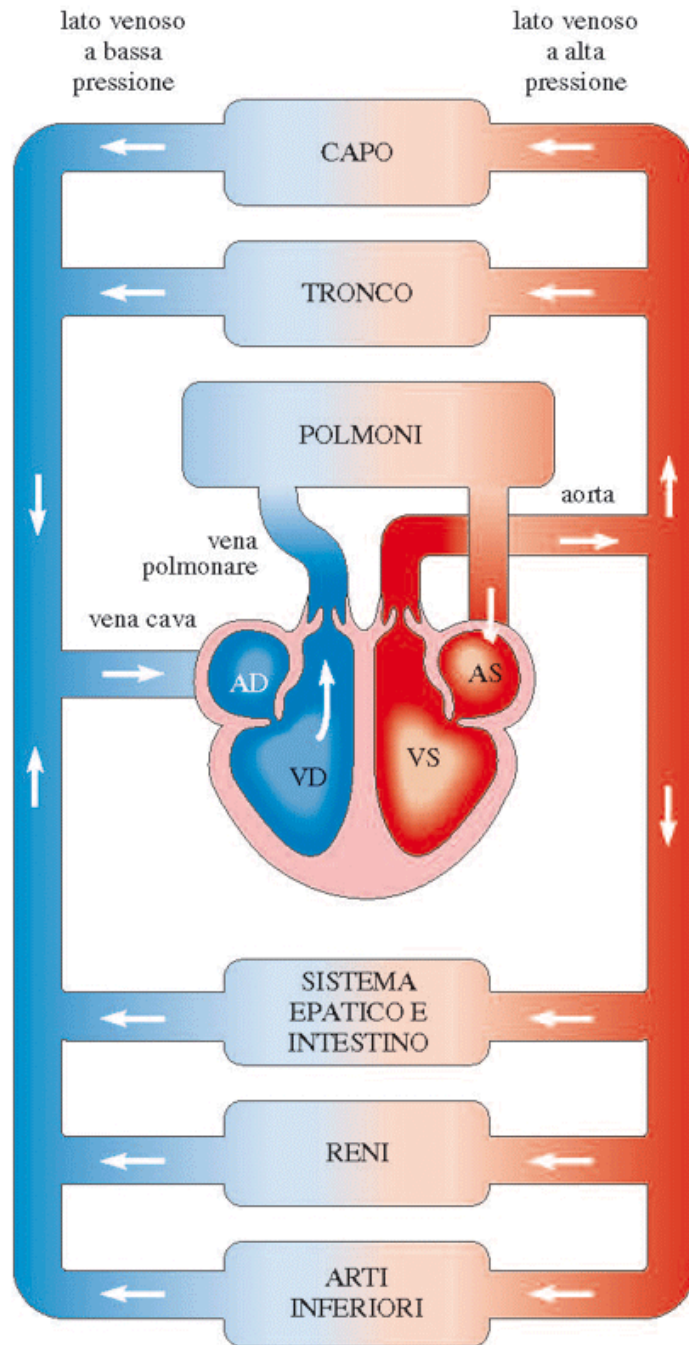
$$v_S = F/f = mg/f$$

La velocità di trascinamento è maggiore per i corpi di massa maggiore? Solo a parità di attrito (f)!!!

Lezione 4 (17/01/2018)

Sistema cardiocircolatorio

Sistema cardiocircolatorio



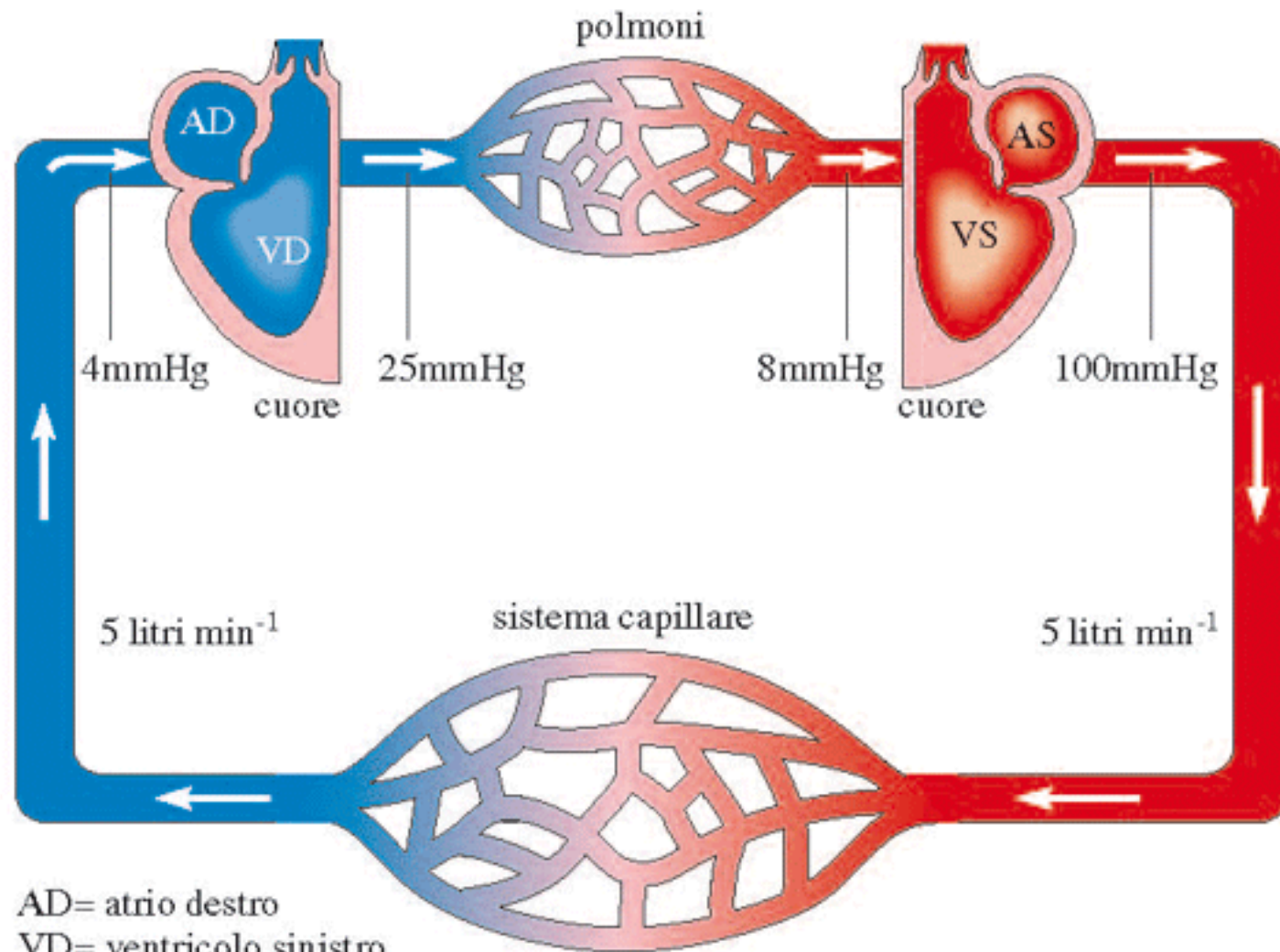
Sistema idraulico chiuso

Il cuore è la pompa che mette in movimento il sangue

Pressione arteriosa: cosa viene misurato? Cosa significa 120 mmHg?

A differenza di un acquedotto cittadino che serve le case, i condotti del corpo umano, arterie e vene, non sono rigidi ma altamente deformabili.

Circolazione del sangue



$$V_{TOT} = 6 \text{ l}$$

AD= atrio destro
VD= ventricolo destro
AS= atrio sinistro
VS= ventricolo sinistro

Circolazione del sangue: commenti

Alcuni utili commenti:

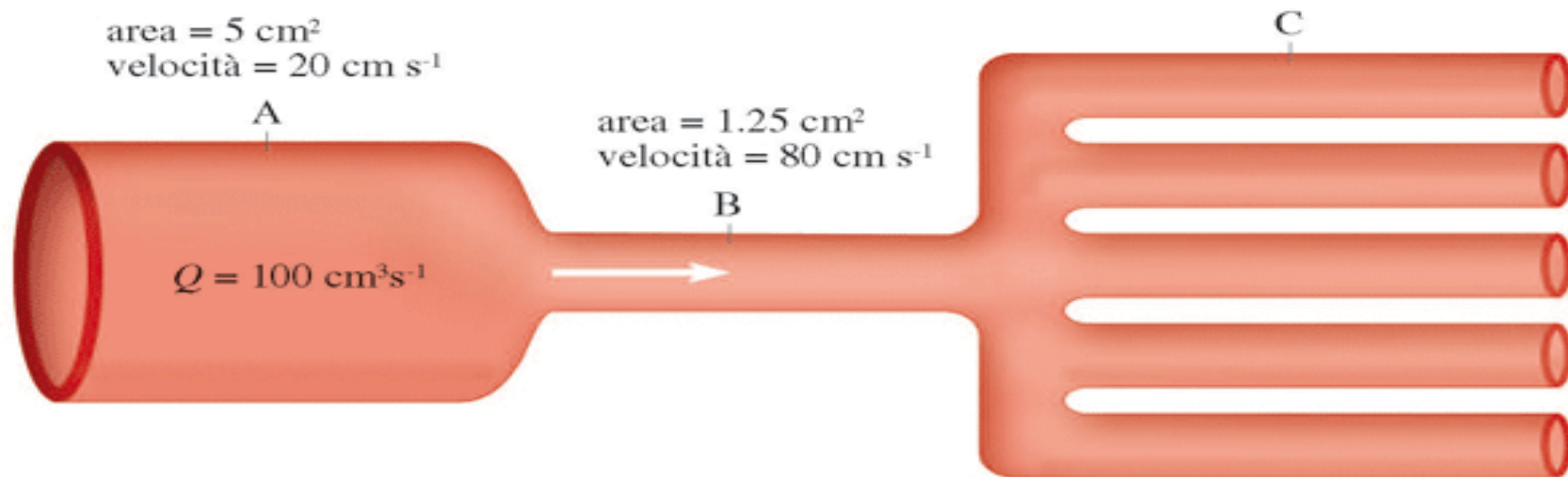
1. Il sangue esce dal ventricolo sinistro con una pressione maggiore rispetto al ventricolo destro, perché?

2. Cosa significa una pressione di uscita di 100 mmHg? Da ricordare che la pressione atmosferica vale 760 mmHg, quindi la pressione di uscita sembra essere molto più piccola (circa il 13%) di quella atmosferica. Come fa il sangue a uscire dal cuore se c'è una pressione maggiore che ne impedisce l'uscita?

Equazione di continuità

La portata è costante: né emorragie né trasfusioni!!! Quindi:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

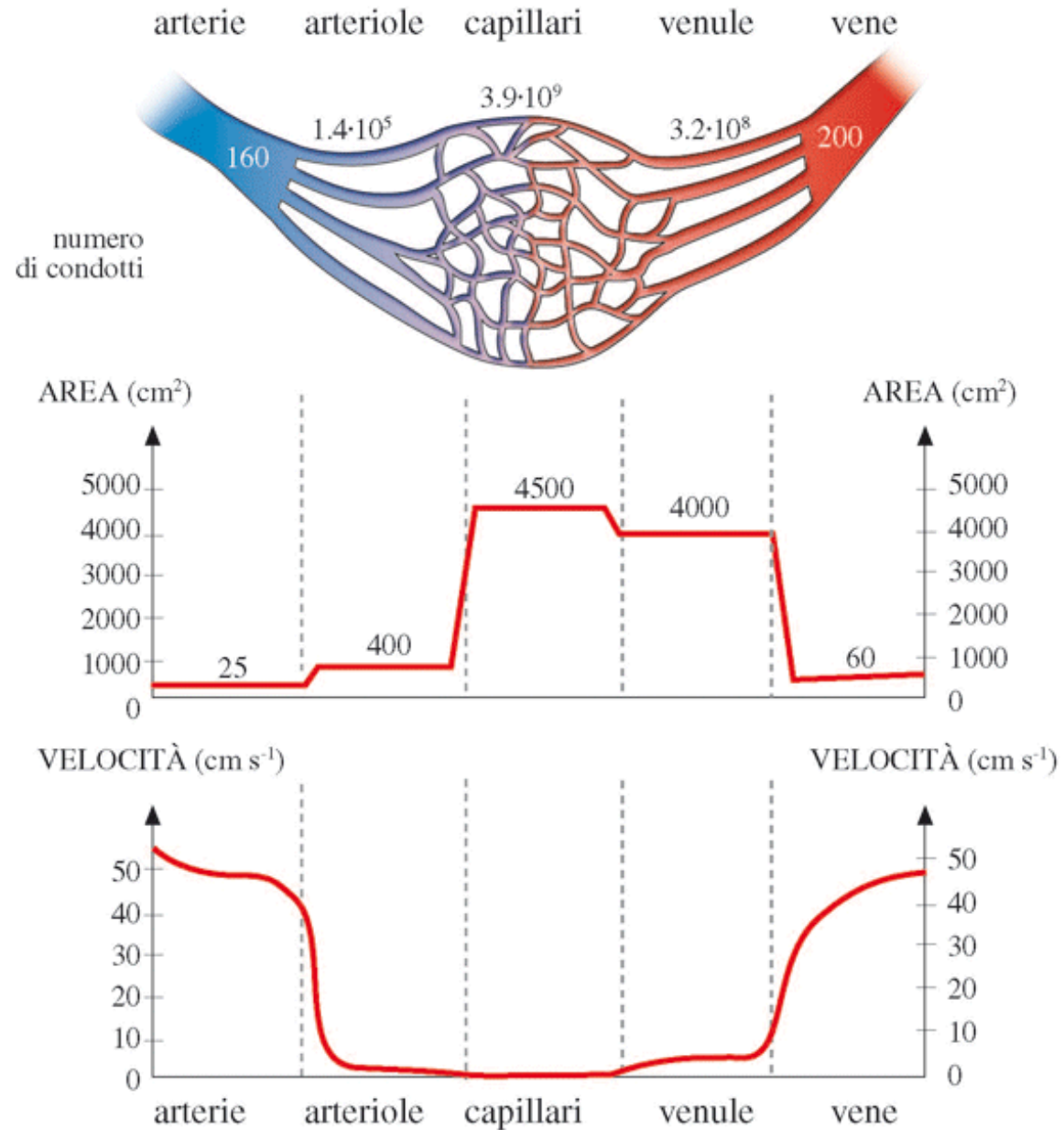


$$S = 5 \text{ cm}^2$$
$$v = 20 \text{ cm s}^{-1}$$

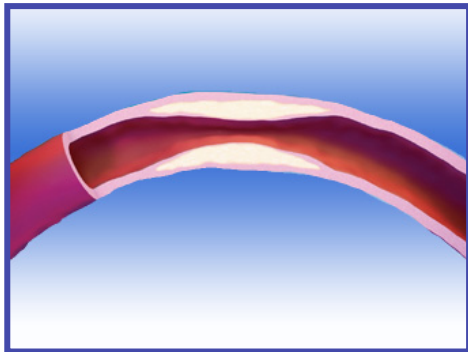
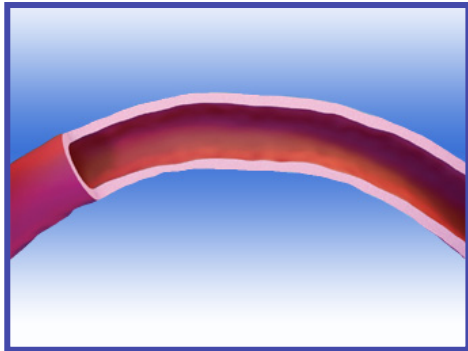
$$S = 1.25 \text{ cm}^2$$
$$v = 80 \text{ cm s}^{-1}$$

$$S = 0.5 \text{ cm}^2$$
$$v = 200 \text{ cm/s}???$$

Vasi sanguigni

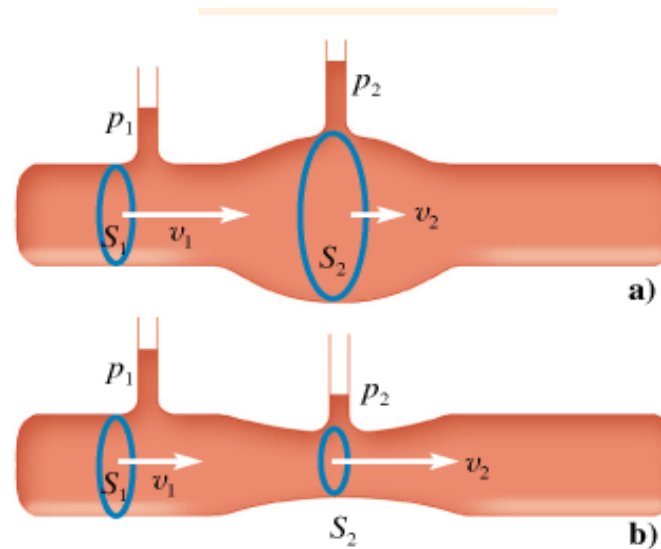


Stenosi/aneurisma



Se consideriamo i vasi rigidi allora la stenosi/aneurisma sarebbero **stazionari**.
Ma se applichiamo Bernoulli e consideriamo i vasi elastici abbiamo:

$$v_1 < v_2$$
$$p_1 > p_2$$



Queste complicanze non sono stabili con vasi elastici!

Misure di flusso/velocità

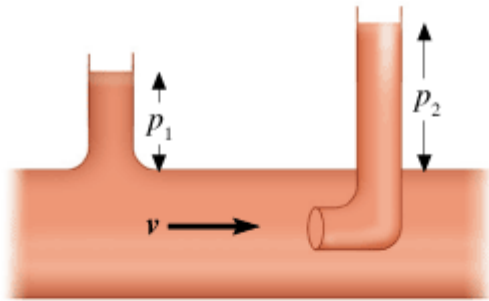


Figura 6.6

La pressione laterale in un vaso è minore della pressione terminale, come è dimostrato dalla minore altezza della colonna nel caso in cui la superficie di apertura della canna manometrica è tangente alla velocità del sangue. La pressione terminale è infatti data dalla pressione laterale più il termine cinetico $\frac{1}{2}dv^2$ (vedasi la (5.14)).

$$P_1 + \frac{1}{2}dv_1^2 = P_2$$

$$\Delta P = \frac{1}{2}dv_1^2$$

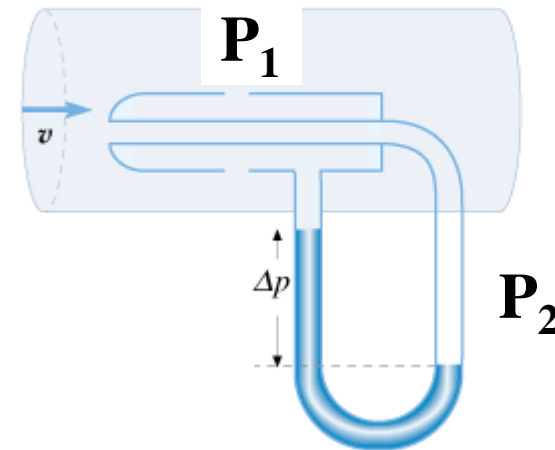


Figura 6.9

Tubo di Pitot: il manometro misura una differenza di pressione che è proporzionale al quadrato della velocità del fluido.

Oggi esistono tecniche non invasive, come quella Doppler, per misurare la velocità del sangue nei vasi.

Viscosità del sangue

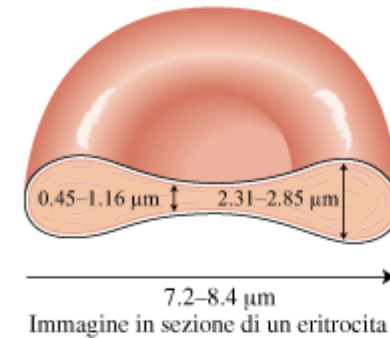
Il sangue è costituito da:

Plasma: acqua + proteine (7%) + ioni (2%)

Globuli rossi: $\sim 5 \cdot 10^6$ /mm³

Globuli bianchi: $\sim 5 \cdot 10^3$ /mm³

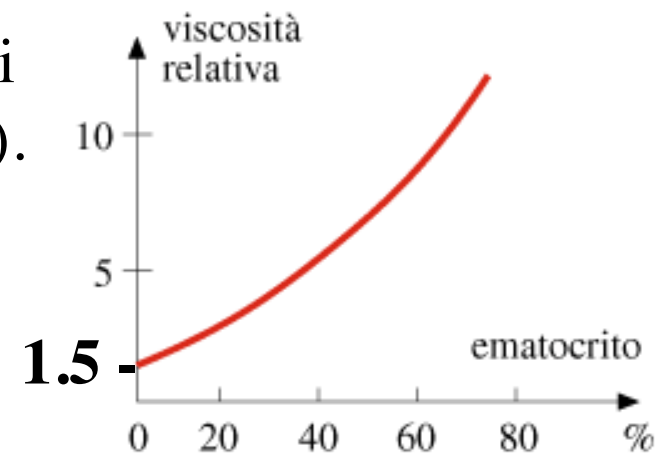
Piastrine: $\sim 250 \cdot 10^3$ /mm³



È una buona approssimazione considerare il sangue costituito da acqua e globuli rossi, ovvero un liquido viscoso omogeneo.

La viscosità del **plasma** è circa 1.5 quella dell'acqua. La viscosità del sangue dipende fortemente dalla percentuale di globuli rossi (++) e dalla temperatura (diminuisce con T). A bassi valori di ematocrito (anemia) la portata aumenta molto perché la viscosità diminuisce.

A temperature basse si possono avere fenomeni di congelamento per alta viscosità!! (nei capillari!!!)



Flusso laminare con accumulo assiale

Se il sangue fosse omogeneo, dovremmo avere un profilo di velocità parabolico in regime laminare.

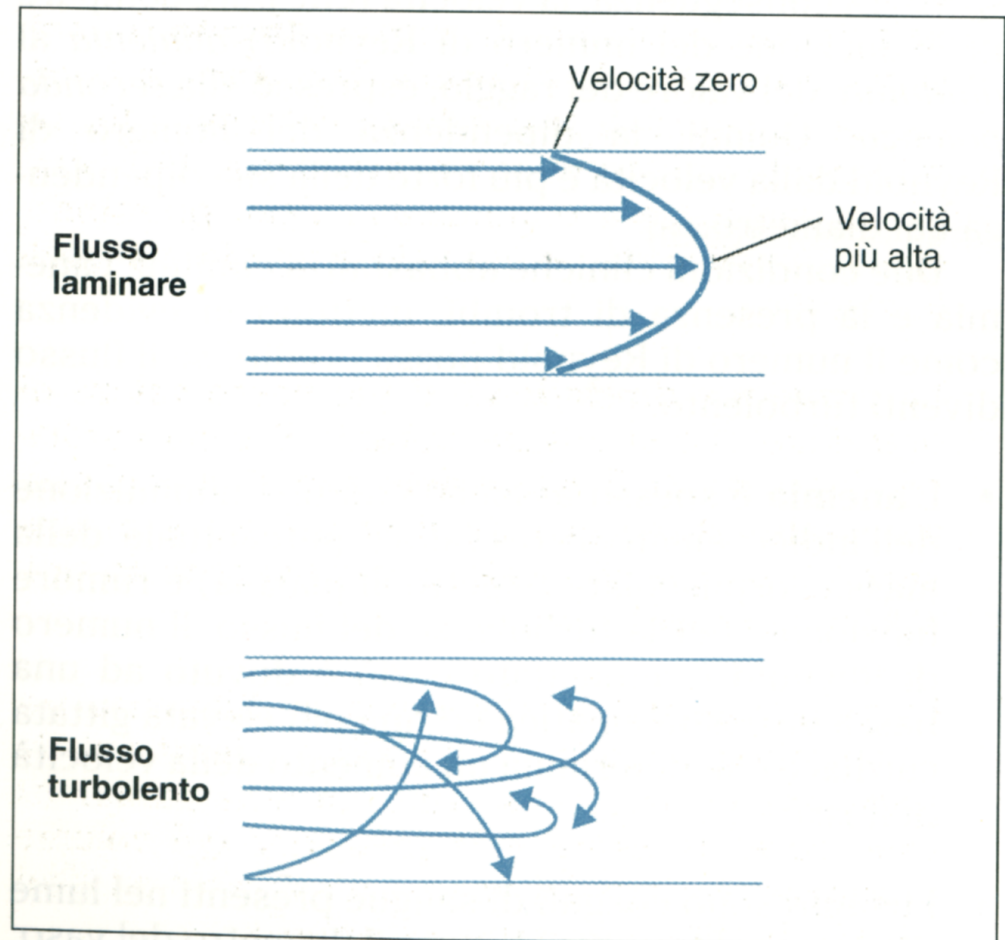
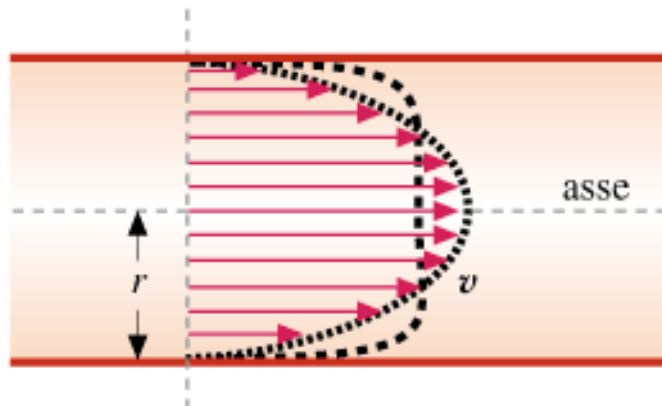
Invece la presenza degli eritrociti, particelle abbastanza grandi, crea un accumulo assiale dovuto al loro orientamento nel flusso.



Accumulo assiale

L'accumulo assiale ha però due vantaggi:

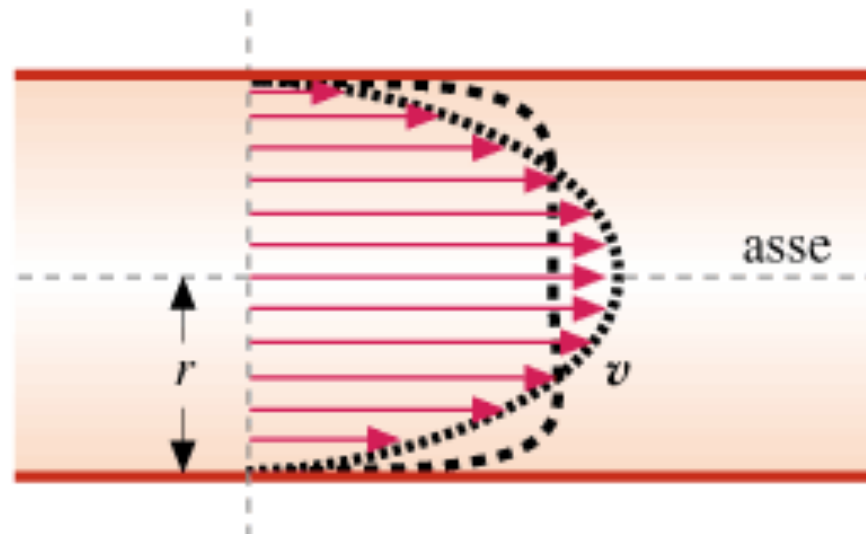
1. Siccome la viscosità del fluido aumenta al centro, il gradiente della velocità diminuisce, e il profilo di velocità diventa quasi costante al centro. Questa diminuzione di velocità proprio dove sarebbe più elevata diminuisce la probabilità di avere flusso turbolento, meno attrito!!!



Accumulo assiale

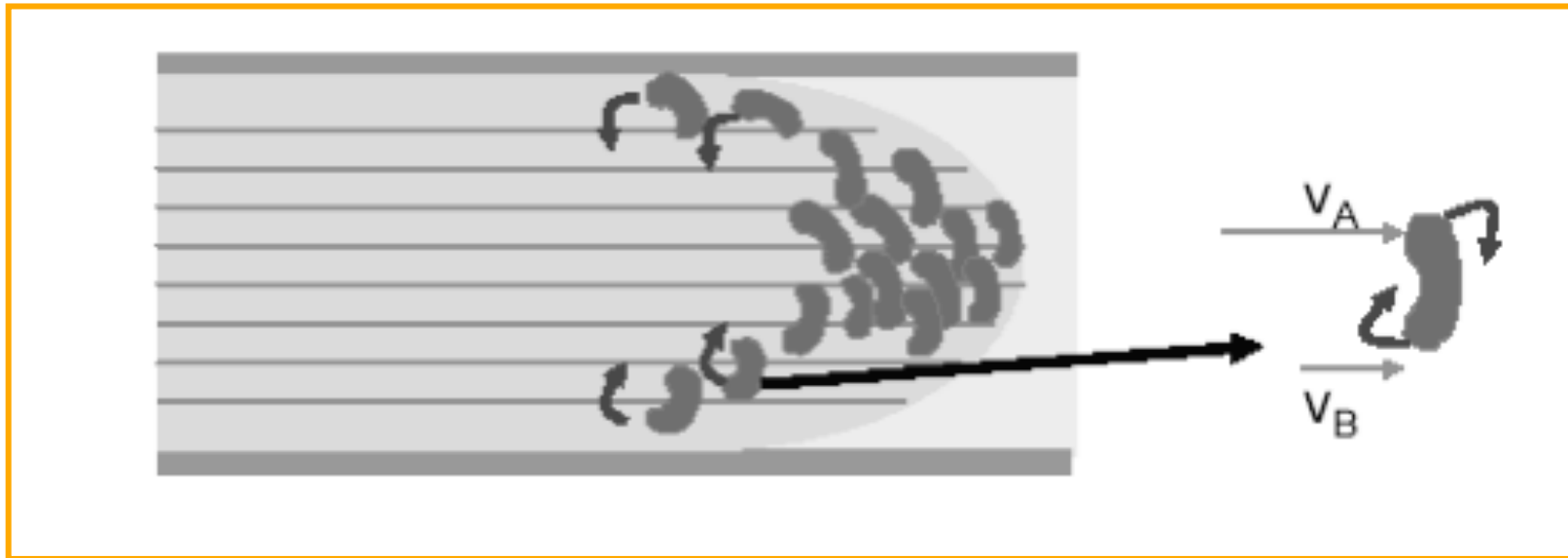
2. Poiché ai lati ci sono meno eritrociti, abbiamo essenzialmente plasma, la viscosità diminuisce. Proprio in prossimità delle pareti dove la velocità è prossima allo zero abbiamo un forte incremento dovuto alla minore viscosità.

I due fenomeni, perdita di velocità al centro e aumento ai lati, comunque favorisce un aumento della portata, perché la perdita al centro è minore dell'aumento ai lati!!!



Accumulo assiale e velocità

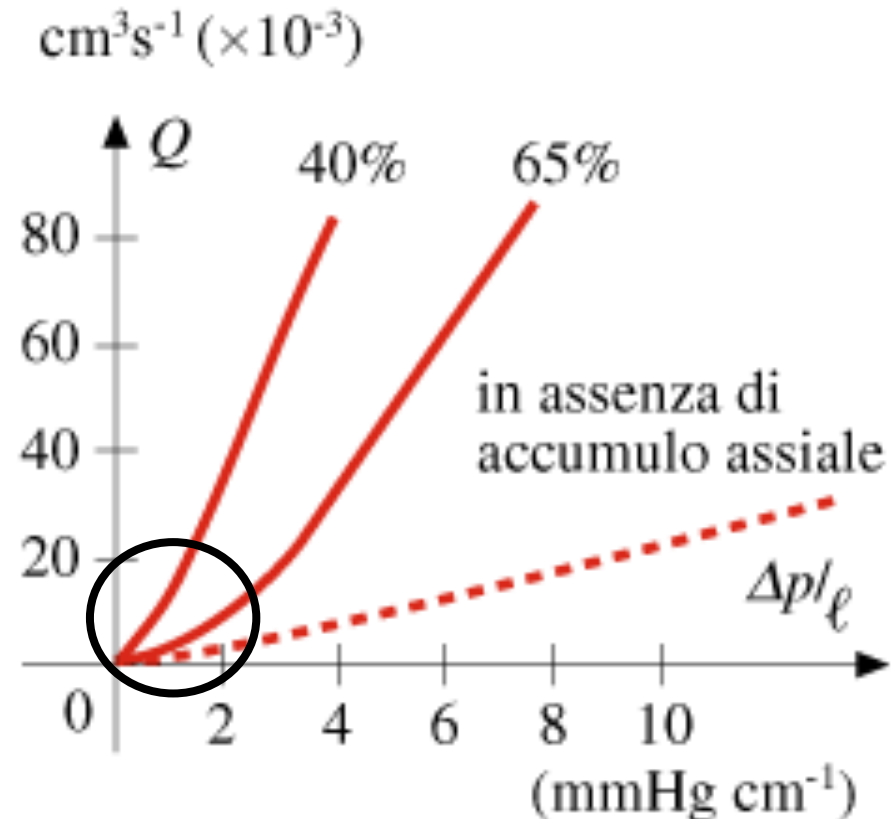
Abbiamo detto che è la velocità a favorire l'accumulo assiale, come si può dimostrare?



Viscosità e velocità

Questa curva mostra la relazione tra pressione applicata e portata e per la formula di Poiseulle abbiamo:

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



Il coefficiente angolare della retta è inversamente proporzionale alla viscosità: maggiore la viscosità più bassa è la curva!

1. In assenza di accumulo assiale la viscosità aumenta (linea a tratti)
2. Per basse velocità la pendenza diminuisce e la viscosità aumenta, perché è la velocità che favorisce l'accumulo assiale

Resistenza e pressione

Un'altra considerazione da fare è la relazione tra portata e pressione, ovvero la resistenza delle varie regione dei distretti sanguigni. Negli organi come polmoni, fegato, reni, dediti allo scambio di sostanze attraverso il sangue, si nota una portata elevata e bassa resistenza, per diminuire la perdita di pressione.

In figura viene riportata la caduta di pressione passando da un distretto all'altro. Si nota come la variazione maggiore sia il passaggio attraverso le arteriole (maggiore pendenza). Si è notato che durante l'attività sportiva sono proprio le resistenze delle arteriole che cambiano, diminuendo, per favorire un aumento della portata senza incrementare troppo la caduta di pressione, ovvero meno perdite di energia e meno incremento di lavoro del cuore!!!

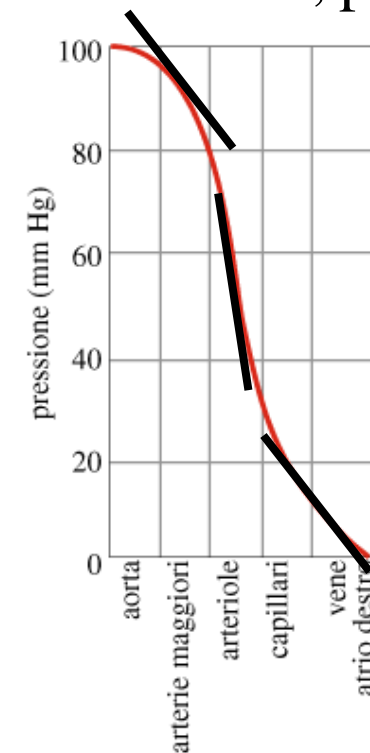
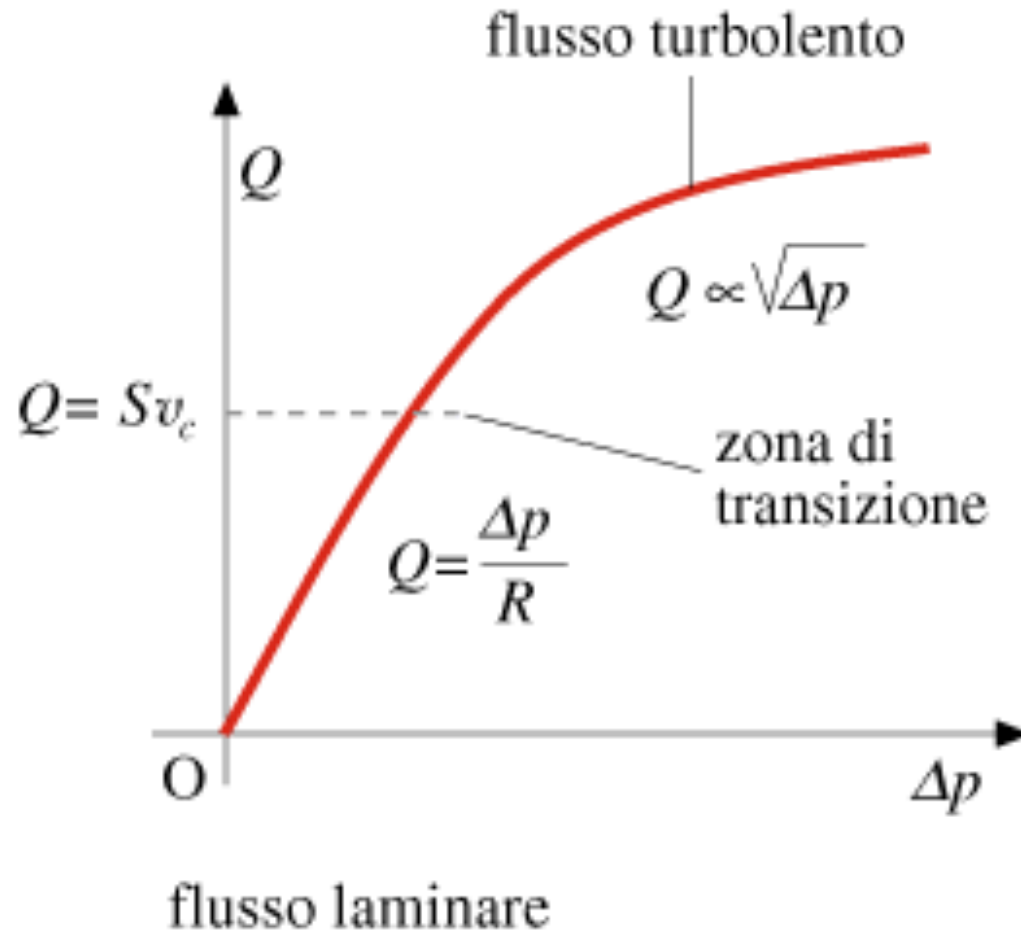


Figura 6.15

Rappresentazione schematica della variazione della pressione media del sangue nei vari distretti del sistema circolatorio in un soggetto in posizione orizzontale.

Resistenza dei vasi:



Il flusso laminare si ha sino a una certa velocità, dopodiché se aumenta la pressione ΔP la velocità supera il valore critico e il moto diventa turbolento.

In questo regime costa di più aumentare la portata perché si ha una dipendenza dalla radice di ΔP , la curva tende a schiacciarsi

Resistenza nelle stenosi:

In caso di stenosi il cuore si affatica per 2 motivi:

1. il vaso diventa più piccolo e la resistenza aumenta
2. per mantenere la stessa portata la velocità in corrispondenza della stenosi aumenta ancora di più e si passa a un flusso turbolento, ove gli attriti aumentano:

numero di Reynolds più piccolo per strozzature!

Figura 6.19

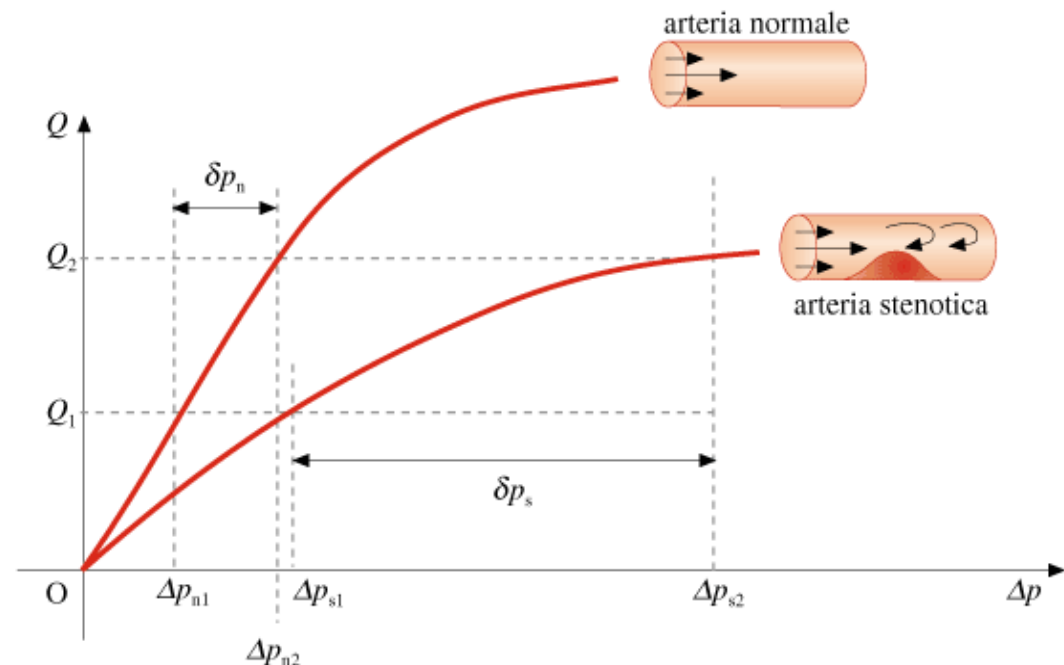
La pressione che fornisce una data portata, per esempio Q_2 , è maggiore nel caso di un'arteria stenotica, rispetto ad un'arteria normale. Inoltre, se il cuore viene sollecitato ad aumentare la portata di sangue nel circolo da Q_1 a Q_2 , la turbolenza prodotta nell'arteria ostruita richiede un aumento decisamente maggiore di pressione e quindi uno sforzo maggiore da parte del cuore:

$$\delta p_s > \delta p_n$$

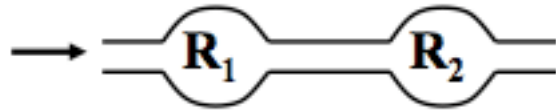
essendo:

$$\delta p_s = \Delta p_{s2} - \Delta p_{s1}$$

$$\delta p_n = \Delta p_{n2} - \Delta p_{n1}$$

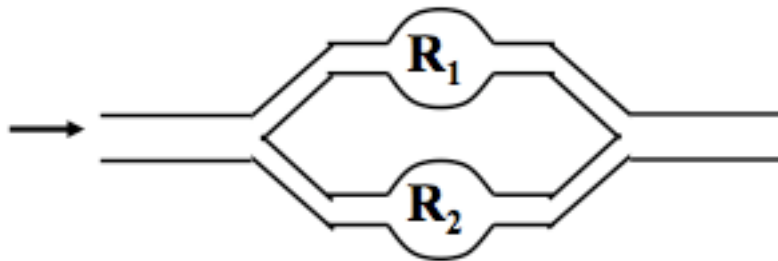


Circuito idraulico



$$R_1 = \frac{\Delta P_1}{Q}; R_2 = \frac{\Delta P_2}{Q}$$

$$\frac{\Delta P}{Q} = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{Q} = R_1 + R_2 = R_T$$



$$R_1 = \frac{\Delta P}{Q_1}; R_2 = \frac{\Delta P}{Q_2}; Q = Q_1 + Q_2$$

$$\frac{Q}{\Delta P} = \frac{Q_1}{\Delta P} + \frac{Q_2}{\Delta P} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_T}$$

In un circuito idraulico due resistenze messe in serie, cioè con la stessa portata, hanno una resistenza totale che è la somma delle due

$$\mathbf{R_T = R_1 + R_2}$$

Invece due resistenze messe in parallelo, con la stessa pressione, hanno una resistenza totale secondo la formula:

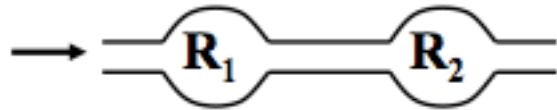
$$\mathbf{1/R_T = 1/R_1 + 1/R_2}$$

Esempio

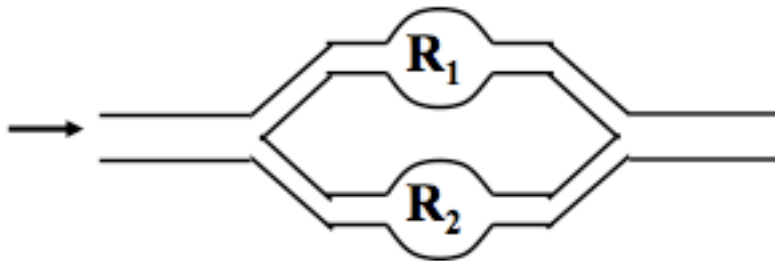
$$R = \frac{8 \eta l}{\pi r^4}$$

Unità di misura: Pascal*secondo/m³

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



$$R_1=10 \quad R_2=20$$
$$R_T=30$$



$$R_1=20 \quad R_2=10$$
$$R_T=6.67$$

$$R_1=10 \quad R_2=10$$

$R_T=5!!!$ Perché la portata è il doppio!

Ricorda qualcosa?
Cosa è un bypass?

EFFETTI FISIOLGICI della PRESSIONE IDROSTATICA

La pressione idrostatica è la
pressione esercitata da una
colonna di liquido sulla propria
base per effetto della forza peso:

$$p = d g h$$

Densità acqua: 1.01 g/cm^3
Densità sangue: 1.06 g/cm^3
Densità globuli rossi: 1.10 g/cm^3

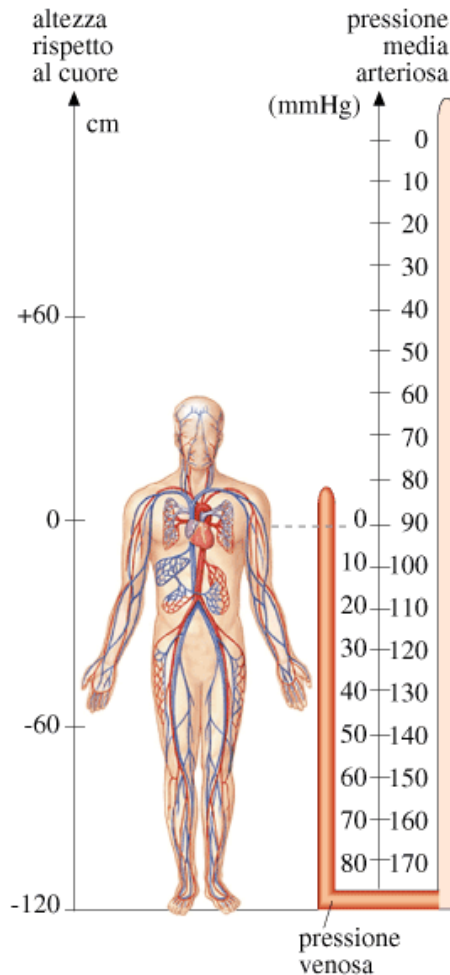


Figura 6.20

Valori della pressione media arteriosa e venosa in un soggetto in posizione eretta.

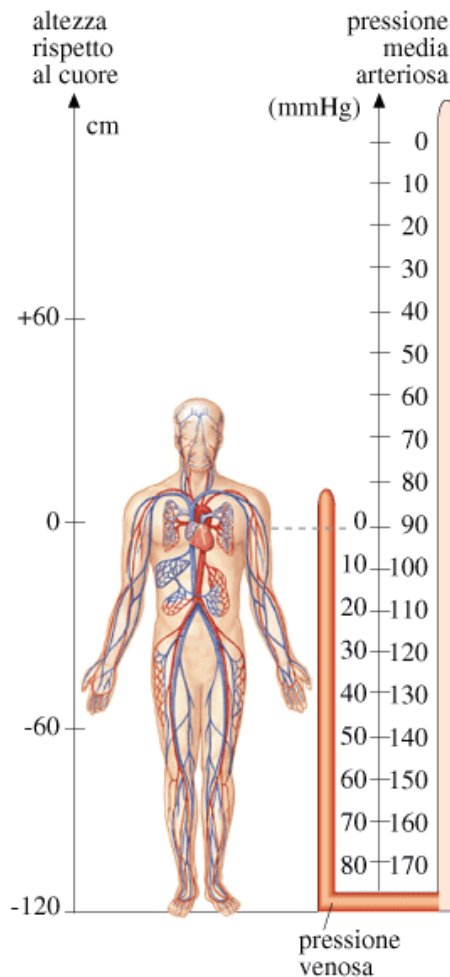


Figura 6.20

Valori della pressione media arteriosa e venosa in un soggetto in posizione eretta.



Scannicchio
Fisica Biomedica
Edises

Se all'uscita del cuore la pressione vale 90 mmHg, quanto in alto può salire il sangue? Quanto misura la pressione nelle dita quando il braccio viene disteso in alto? E nel cervello?

760 mmHg=10 metri acqua ~ ? metri sangue

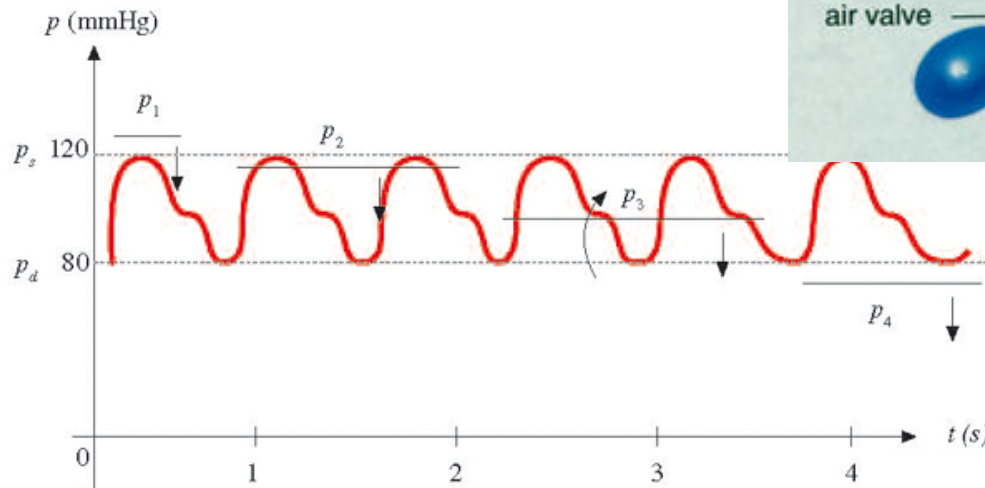
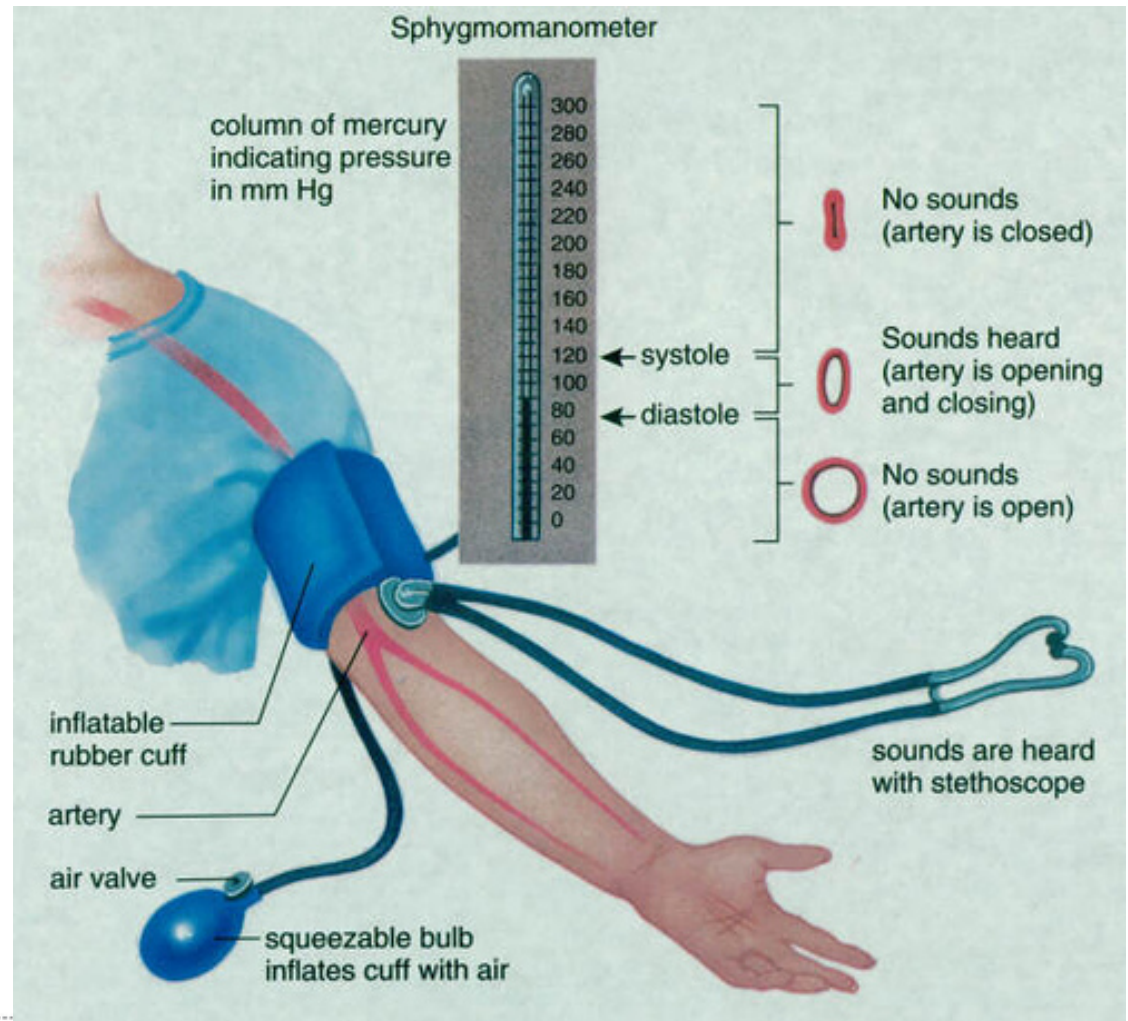
$$\frac{90}{760} = \frac{x}{10m}$$

$$x = 10m \frac{90}{760} = 1.18m$$

Perché alcune persone hanno momenti in cui vedono nero (piloti aerei da guerra/acrobazia)? Pensate all'accelerazione centrifuga!

Misurare la pressione

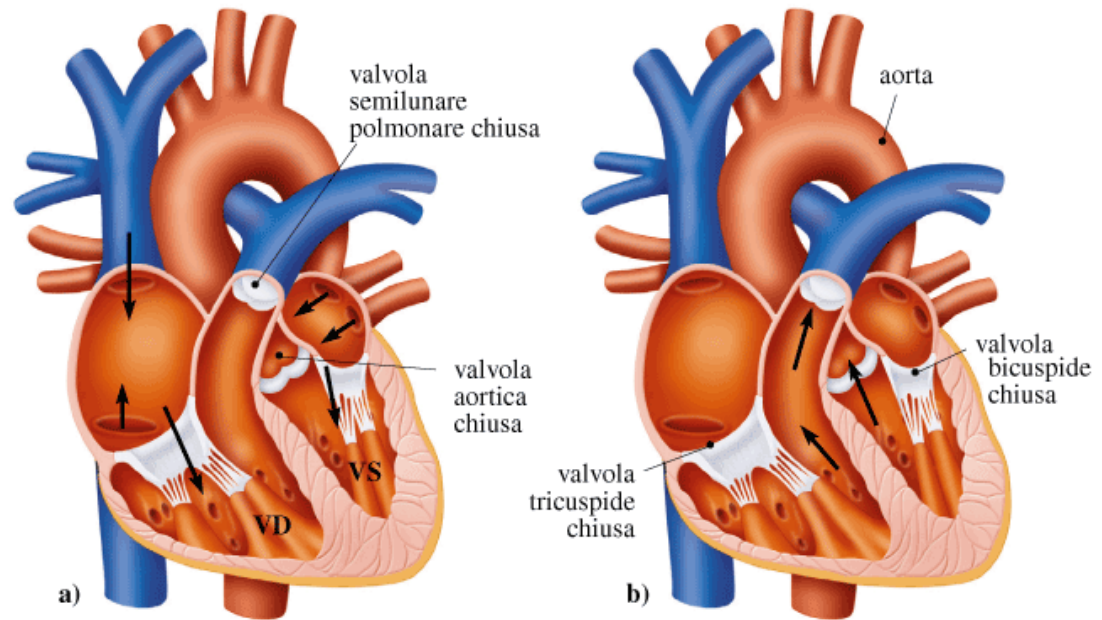
Perché la pressione si misura al braccio e non nella coscia?
Cosa vuole dire avere una pressione di 120 mmHg?



Con lo strumento variamo la pressione dal massimo valore P_1 al minimo P_4 . Con lo stetoscopio si sentono le varie fasi dell'arteria: da chiusa ad aperta!

Lavoro e Potenza Cardiaca

Il cuore è la pompa del nostro sistema idraulico e serve a dare al sangue la necessaria energia per circolare, energia che viene persa per attrito sotto forma di calore.



Gittata pulsatoria: quantità di sangue immessa dal cuore in circolo a ogni contrazione di un singolo ventricolo, sia dx che sx, **60 cm³**, che può salire a 250 cm³ sotto sforzo.

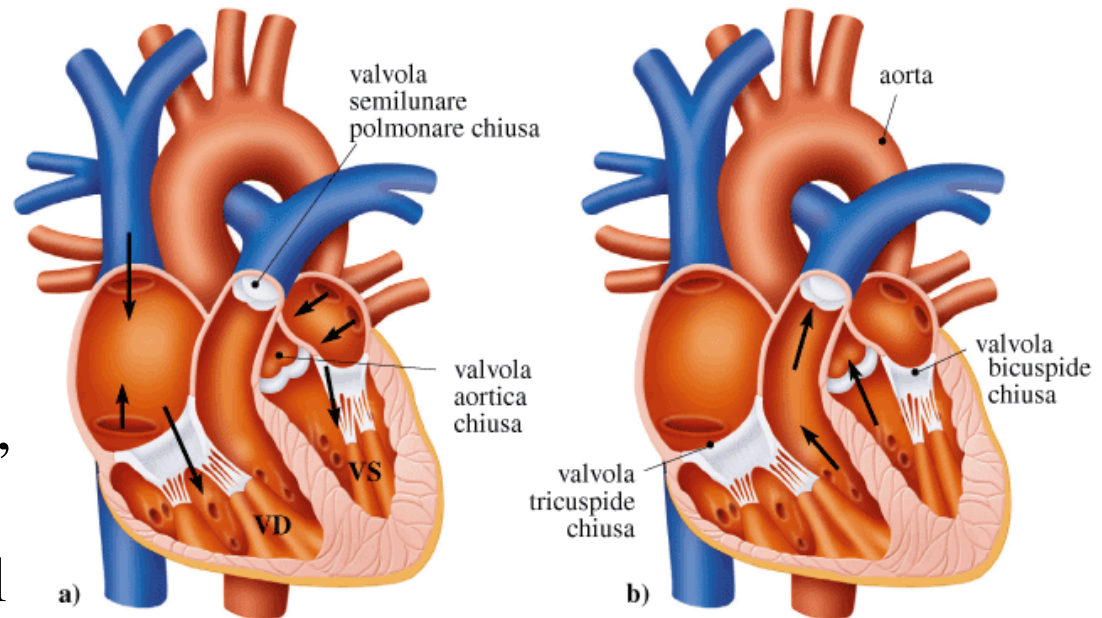
Domanda: perché la parte destra del cuore è meno sviluppata? Eppure la portata è la stessa per l'equazione di continuità!

Lavoro e Potenza Cardiaca

La frequenza cardiaca è il numero di pulsazioni al secondo:

$$v = 1/T = 1/[s]$$

Siccome la quantità di sangue in circolo è di 6 litri, quante pulsazioni (n) ci vogliono per mettere tutto il sangue in circolo?



Il tempo per far circolare tutto il sangue è allora $n \cdot T$ e la velocità media:

$$v_{media} = \frac{l}{nT} = \frac{200cm}{100s} = 2 \frac{cm}{s}$$

Nelle arterie $v=30-40$ cm/s

Nei capillari $v=0.1$ mm/s

Lavoro

Il cuore funziona come un pistone che spinge all'esterno una quantità di sangue a ogni pulsazione. Il lavoro fatto da un pistone che muove una quantità di fluido ΔV è:

$$\Delta L = p \Delta V$$

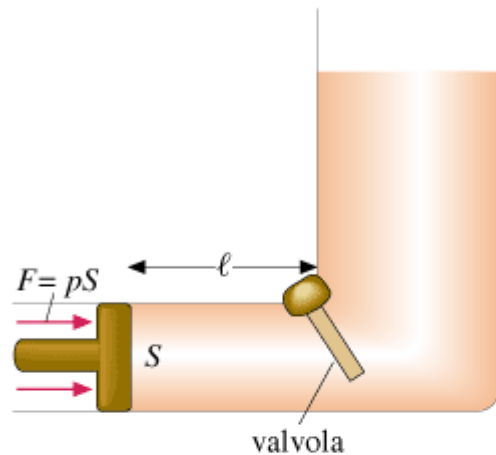


Figura 6.23

Schema di pompa che permette di descrivere il lavoro cardiaco.

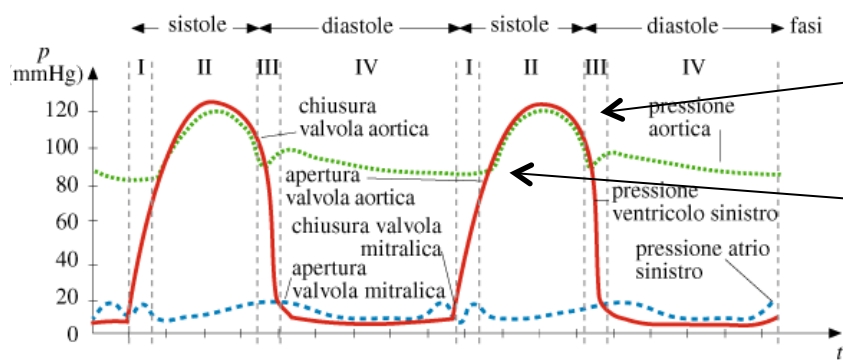


Scannicchio
Fisica Biomedica
EdISES

Se la pressione è costante allora

$$L = p * (V_2 - V_1)$$

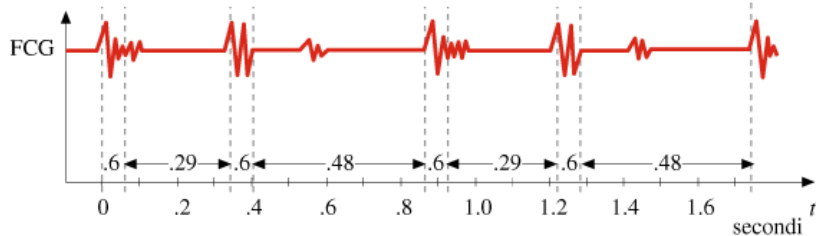
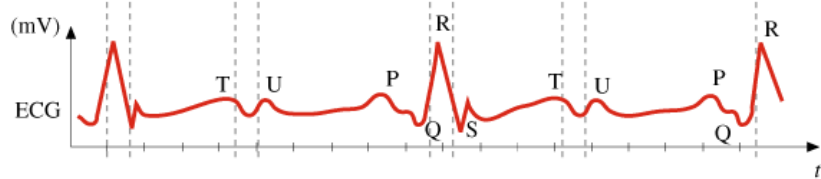
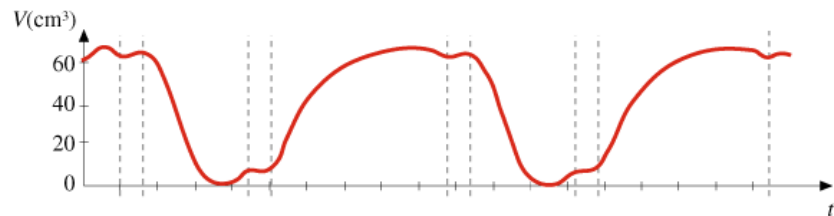
Ciclo Cardiaco



Chiusura valvola aortica

Apertura valvola aortica

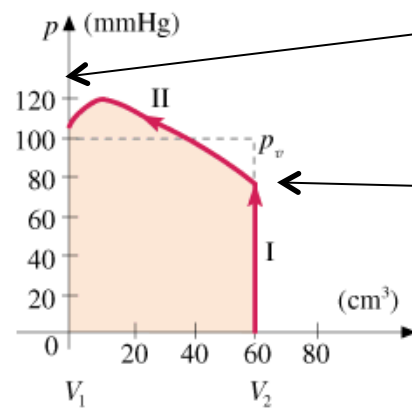
$$\Delta L = p \Delta V$$



In rosso (in alto) è riportata la pressione ventricolare, invece il lavoro va calcolato quando la valvola aortica è aperta, il sangue deve defluire altrimenti $\Delta L = 0$

Calcolo Lavoro

Chiusura valvola aortica



Apertura valvola aortica

$$\Delta L = p \Delta V$$

Anziché usare l'integrale possiamo usare la pressione media P_v :

$$L = P_v * (V_2 - V_1)$$

$$P_v = 100 \text{ mmHg} \quad (120 \text{ mmHg è la } P_{\text{max}})$$

$$V_2 - V_1 = 60 \text{ cm}^3$$

$$L = 100 \text{ mmHg} * 60 \text{ cm}^3 = 0.8 \text{ joule/ciclo}$$

$$W = L / \Delta t = 0.8 \text{ joule/s} = 0.8 \text{ watt}$$

Figura 6.24

Grafico della pressione intraventricolare in funzione del volume di sangue nel ventricolo durante le contrazioni isometrica e isotonica del cuore (fase I e II del grafico di Figura 6.22). L'area colorata rappresenta il lavoro cardiaco. La pressione p_v è la pressione ventricolare media e l'area del rettangolo rappresenta il lavoro cardiaco calcolato con la formula:

$$L = p_v (V_2 - V_1).$$

La freccia indica la successione temporale della contrazione isotonica.



Ma la fase II dura 1/3 del ciclo totale, quindi
 $W = 2.4 \text{ watt!!!}$

Calcolo Lavoro

E il resto del cuore che lavoro fa? Dalla figura si vede che la pressione atriale è molto bassa, quindi il suo lavoro è trascurabile.

Il cuore destro lavora meno perché la pressione di uscita è più bassa (25 vs 100 mmHg), e quindi il lavoro è $\frac{1}{4}$ di quello sinistro, arriviamo a 3 watt.

Pero bisogna considerare che il rendimento del cuore è di circa il 10%, quindi il lavoro effettivamente svolto per funzionare è 10 volte quello fatto sul sangue

$$P_{TOT}=30 \text{ watt}$$

Calcolare l'energia spesa dal cuore in un giorno ed esprimerla in kcal.

Effetti cinetici

Per calcolare il lavoro fatto dal cuore abbiamo usato la pressione ventricolare, che però è difficile da calcolare. Conviene quindi usare la pressione aortica che è facilmente misurabile.

In questo caso la relazione tra le due pressioni è per Bernoulli:

$$P_v = P_a + \frac{1}{2} dv^2$$

$$L = P_a \cdot (V_2 - V_1) + \frac{1}{2} dv^2 (V_2 - V_1)$$

Il termine cinetico è abbastanza basso in condizioni normali ma può essere considerevole durante l'attività sportiva e in caso di stenosi.

Qualche numero

$$P_a = 100 \text{ mmHg}$$

$$v = 50 \text{ cm/s}$$

$$d = 1.1 \text{ g/cm}^3$$

$$\Delta V = 60 \text{ cm}^3$$

$$P_v = P_a + \frac{1}{2} dv^2$$

$$L = P_a \cdot (V_2 - V_1) + \frac{1}{2} dv^2 (V_2 - V_1)$$

$$P_K = 0.5 * 1.1 * 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0.5^2 \text{ m}^2 / \text{s}^2 = 0.13 * 10^3 \text{ Pa}$$

$$P_a = 100 \text{ mmHg} = \frac{100}{760} * 1.01 * 10^5 \text{ Pa} = 13.2 * 10^3 \text{ Pa}$$

$$\frac{P_K}{P_a} \approx \frac{1}{100}$$

In caso di stenosi la superficie dell'aorta passa da 4 cm² a 1 cm², valutare la pressione ventricolare e il lavoro nei due casi.

$$\Delta V = 200 \text{ cm}^3, P = 160 \text{ mmHg}, v = 500 \text{ cm/s}$$

$$L_a = 4.2 \text{ j}; L_k = 2.5 \text{ j}$$