

Meccanica dei fluidi nei sistemi biologici

Corso di Fisica
A.A. 2024-2025



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

1

Sommario

- Introduzione
- Circuito idrodinamico del sangue
 - Portata dei vasi e velocità del sangue
 - Applicazione del Teorema di Bernoulli
 - Misure di flusso
- Viscosità del sangue
 - Composizione del sangue
 - Comportamento viscoso normale
 - Anomalie della viscosità del sangue
- Resistenza dei vasi e variazione di pressione
 - Resistenza dei vasi
 - Resistenza e regimi di moto nel sistema circolatorio
 - Effetto della pressione idrostatica



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

2

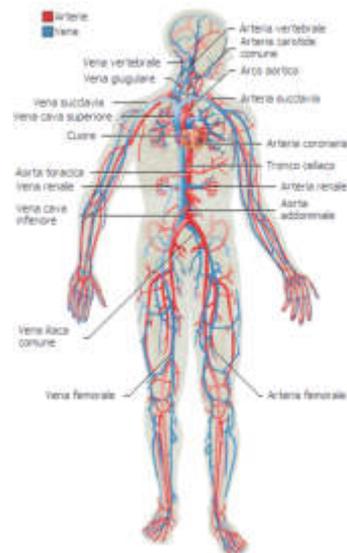
Sommario

- Lavoro e potenza cardiaca
 - Pompa cardiaca
 - Ciclo cardiaco
 - Lavoro cardiaco
 - potenza cardiaca
- Misura della pressione sanguigna
- Meccanica delle vie respiratorie



Circolazione sanguigna

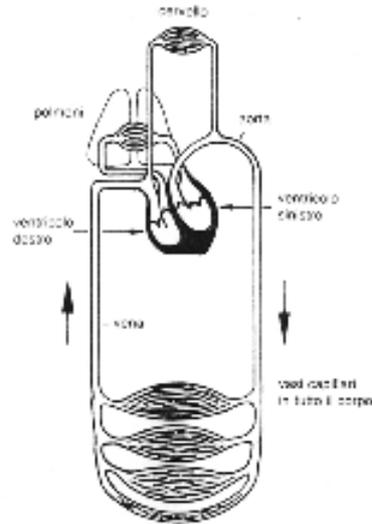
- L'apparato circolatorio trasporta il sangue a tutti i tessuti del corpo.
- Il sangue contiene
 - globuli rossi,
 - globuli bianchi e
 - piastrine
- e svolge numerose funzioni:
 - fornisce a ciascuna cellula ossigeno e sostanze nutritive,
 - elimina anidride carbonica e scorie nocive;
 - trasporta gli ormoni prodotti dalle ghiandole endocrine,
 - contribuisce alla regolazione della temperatura corporea;
 - fa circolare globuli bianchi e anticorpi, responsabili della difesa dagli agenti patogeni,
 - fa circolare e piastrine, coinvolte nella coagulazione.
- L'apparato circolatorio è costituito dal cuore, un organo muscolare suddiviso in quattro cavità che funziona come una pompa, e vasi sanguigni, arterie, vene e capillari, che conducono il sangue fino alle parti più periferiche.
- In media, il sangue completa il suo percorso nella grande e piccola circolazione in circa 30 secondi.



Circolazione sanguigna

- Poiché l'applicazione della *Statica* e della *Dinamica dei fluidi* ai fenomeni di interesse bio-med è molto complessa, affrontiamo lo studio del sistema cardio-vascolare con **tre semplificazioni**:
 - moto stazionario di un liquido reale,
 - liquido omogeneo, cioè incompressibile, e privo di viscosità,
 - condotti con le pareti (arteriose e venose) rigide.

- Rinunciando al fatto che:
 - il sangue non è un liquido omogeneo,
 - Il sangue è viscoso e non-newtoniano,
 - le pareti non sono rigide ma distensibili.
 - il moto non è stazionario ma pulsatile,



Approccio seguito

approssimazione iniziale:

**MOTO STAZIONARIO di un LIQUIDO REALE
e OMOGENEO in un CONDOTTO RIGIDO**

- a) effetti della disomogeneità del sangue**
- accumulo assiale
 - condotti capillari

- b) effetti della distensibilità dei condotti**
- forze di coesione nei liquidi
 - forze di coesione nei solidi (**condotti elastici**)
- c) effetti della pulsilità del moto**

descrizione del fenomeno: **reale (o quasi):**

**MOTO PULSATILE di un LIQUIDO REALE NON
OMOGENEO in un CONDOTTO ELASTICO**

No!

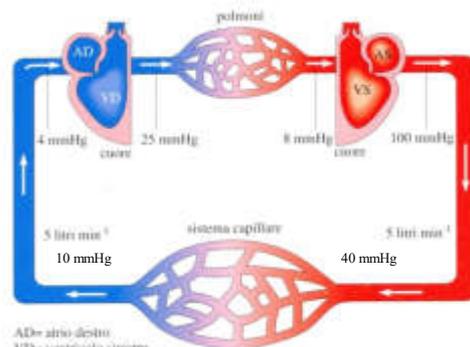


Circuito idrodinamico del sangue



Circuito idrodinamico equivalente

- Quello in figura è il circuito idrodinamico equivalente a quello del sistema circolatorio.
- Sono riportati i valori normali, mediati nel tempo, delle portate e delle pressioni in ingresso e in uscita dal cuore.



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

- **Pressione del sangue**
 - è la differenza tra la pressione esercitata dal sangue arterioso sulle pareti dei vasi e la pressione atmosferica.

- N.B.: In questo caso (così come accade per la pressione dei pneumatici) la pressione non viene determinata in modo assoluto ma rappresenta la sovrapressione che agisce nei punti considerati rispetto alla pressione atmosferica

$$p_0 = 1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 101325 \text{ Pa} = 1013.25 \text{ mbar}$$

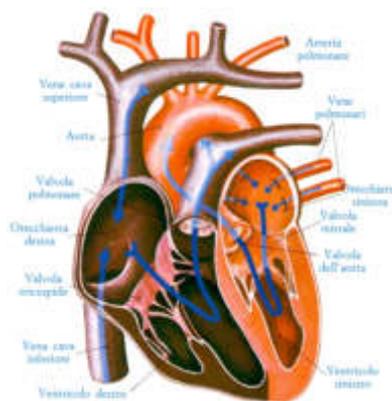


Il cuore come pompa

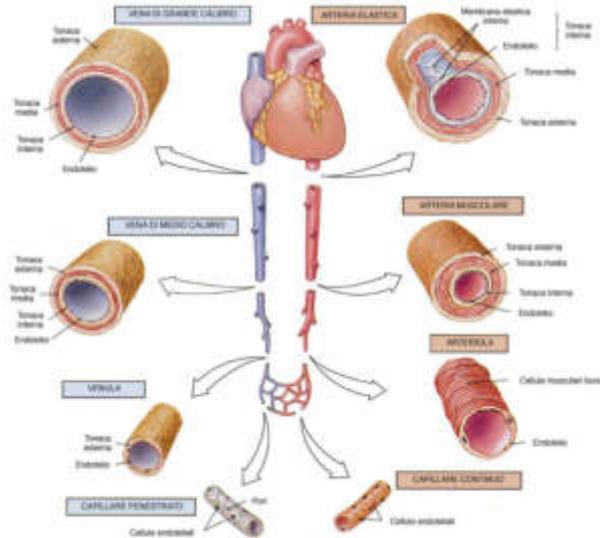


Cuore

- Il cuore è un organo muscolare che lavora in modo ciclico (*ciclo cardiaco*), alternando
 - fasi di contrazione (**sistole**)
 - fasi di rilassamento (**diastole**)
- generate da una serie di impulsi elettrici spontanei.
- In ogni ciclo cardiaco, durante la sistole il sangue è spinto ad alta pressione da cavità cardiache chiamate ventricoli (sistole ventricolare) nel sistema arterioso, formato da una ricca rete di vasi (arterie).



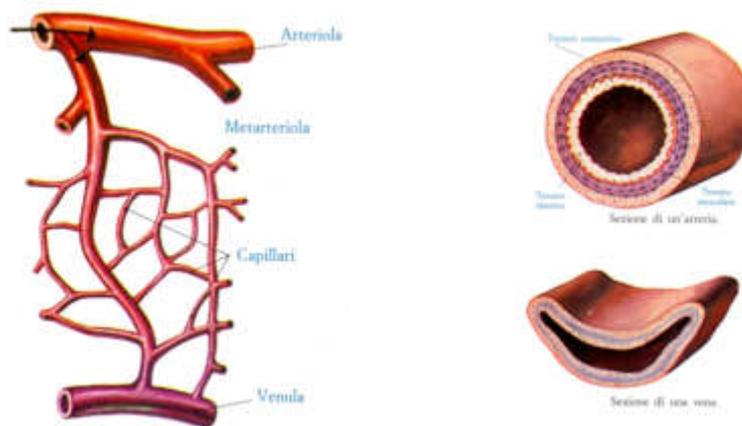
Arterie e vene



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

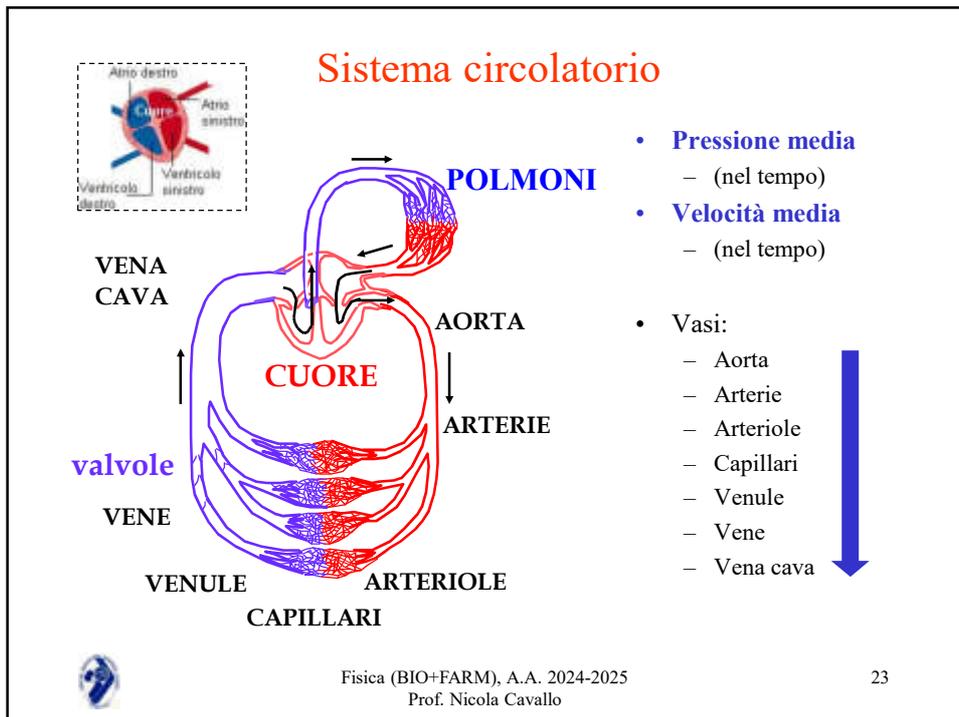
20

Arterie e vene



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

21



Portata dei vasi e velocità del sangue

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

25

Portata del sangue

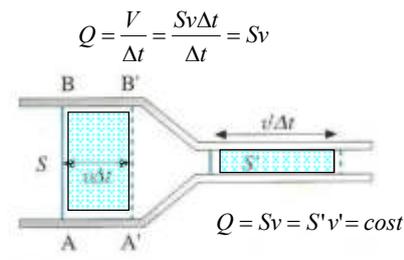
- Il volume totale di sangue di una persona adulta è di circa 6 litri.
- Questo volume di sangue viene fatto circolare dal cuore con una certa velocità.
- Nel sistema circolatorio di una persona adulta la portata media è di circa 5 litri al minuto.
- Questa portata media è costante, nel senso che la quantità di sangue che esce dal cuore nell'unità di tempo è la stessa che attraversa una sezione complessiva di un qualsiasi distretto vascolare nella stessa unità di tempo.



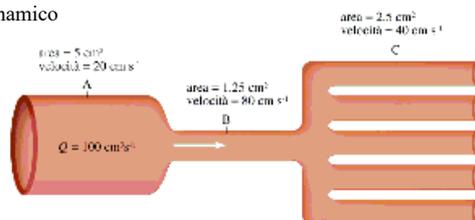
Portata del sangue

- Se la portata di un sistema idrodinamico è costante, la velocità è inversamente proporzionale all'area della sezione del condotto in cui il fluido scorre.

$$Q = 5 \frac{l}{\text{min}} = \frac{5000 \text{ cm}^3}{60 \text{ s}} \approx 85 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$



- Nel caso del circuito idrodinamico considerato (es. $Q \sim 100 \text{ cm}^3/\text{s}$):

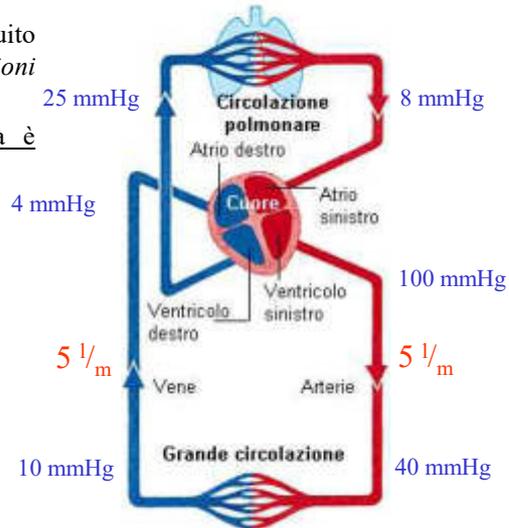


Sistema circolatorio

- Il sistema costituisce un circuito chiuso (*senza immissioni dall'esterno né perdite*).
- Per tale motivo la portata è costante.

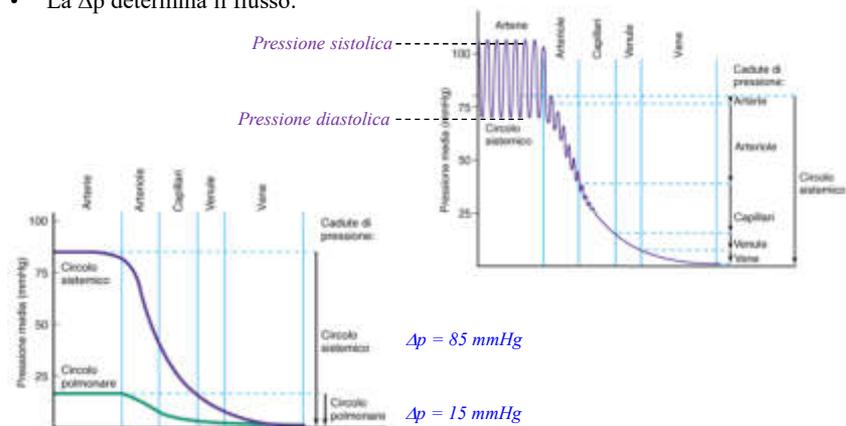
	velocità media [cm/sec]	pressione media [mmHg]
AORTA	50-40	100
ARTERIE	40-10	100-40
ARTERIOLE	10-0.1	40-25
CAPILLARI	<0.1	25-12
VENULE	<0.3	12-8
VERE	0.3-5	8-3
VENA CAVA	5-25	4

valori puramente indicativi

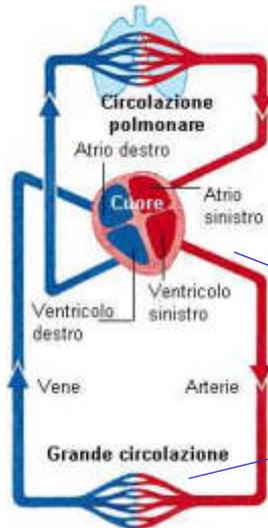


Flusso del sangue

- Tra il grande circolo (*Circolo Sistemico*) ed il piccolo (*Circolo Polmonare*) c'è una diminuzione di pressione.
- La Δp determina il flusso.



Numero dei capillari



	velocità media [cm/sec]	pressione media [mmHg]
AORTA	50-40	100
ARTERIE	40-10	100-40
ARTERIOLE	10-0.1	40-25
CAPILLARI	<0.1	25-12
VENULE	<0.3	12-8
VENE	0.3-5	8-3
VENA CAVA	5-25	4

$S_A = 3 \text{ cm}^2$
 $v_A = 50 \text{ cm/s}$

$S_c = 10^{-6} \text{ cm}^2$
 $v_c = 0.05 \text{ cm/s}$

$v_A \approx 1000$
 v_c

$S_A v_A = n S_c v_c$ (portata volumica costante)
 $n = \frac{S_A v_A}{S_c v_c} \approx 3 \times 10^9$

$\left(n = \frac{S_A}{S_c} \text{ ERRORE!} \right)$

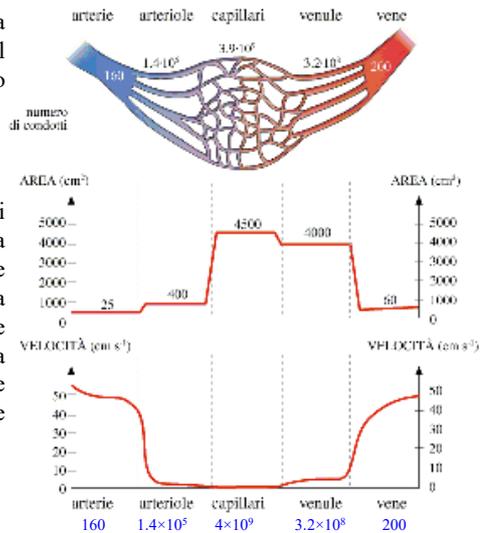


Velocità del sangue

- Nella Figura è mostrata la variazione di velocità media del sangue, conseguenza appunto dell'equazione di continuità.

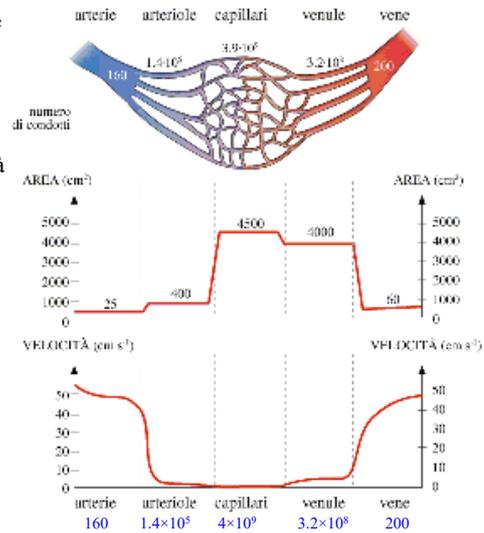
$$Q = \frac{V}{\Delta t} = \frac{Sv\Delta t}{\Delta t} = Sv$$

- Come si vede l'area totale dei vari distretti aumenta dall'aorta (qualche cm²) al distretto capillare (qualche migliaia di cm²), con una corrispondente vistosa diminuzione di velocità nei capillari (ciò facilita lo scambio di sostanze tra sangue e tessuti attraverso la parete capillare).



Velocità del sangue

- Successivamente tornando al cuore la velocità del sangue cresce progressivamente con il diminuire della sezione complessiva dei distretti attraversati, fino a tornare al cuore quasi con la stessa velocità da cui era stato espulso (*la vena cava possiede un diametro di poco superiore a quello dell'aorta*).



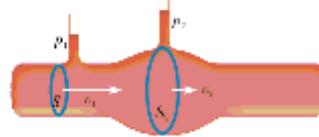
Applicazioni del teorema di Bernoulli



Aneurisma (ringonfiamento del vaso)

- Se assumiamo le pareti dell'arteria rigide, una portata dell'arteria costante implica che nella sezione dell'aneurisma la velocità del sangue è minore:

$$v_2 = v_1 \frac{S_1}{S_2} \quad (S_1 < S_2)$$



Aneurisma orizzontale
($h_1=h_2$)

- Applicando il Teorema di Bernoulli

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{cost} \quad \longrightarrow \quad \frac{p_1}{\rho g} + \frac{1}{2} \frac{v_1^2}{g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{1}{2} \frac{v_2^2}{g}$$

- Se $v_2 < v_1$ ne consegue che $p_2 > p_1$

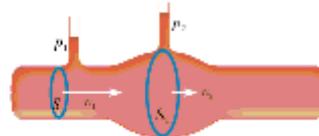
- Ipotesi:

- Flusso laminare (moto quasi stazionario su piccole distanze)
- Attriti trascurabili
- Condotti quasi rigidi



Aneurisma (ringonfiamento del vaso)

- Se $v_2 < v_1$ ne consegue che $p_2 > p_1$



- Una pressione p_2 maggiore del normale, aumenta S_2 e così via...
- La pressione laterale nell'aneurisma non si oppone al rigonfiamento dell'arteria che quindi aumenta portando ad una possibile emorragia...

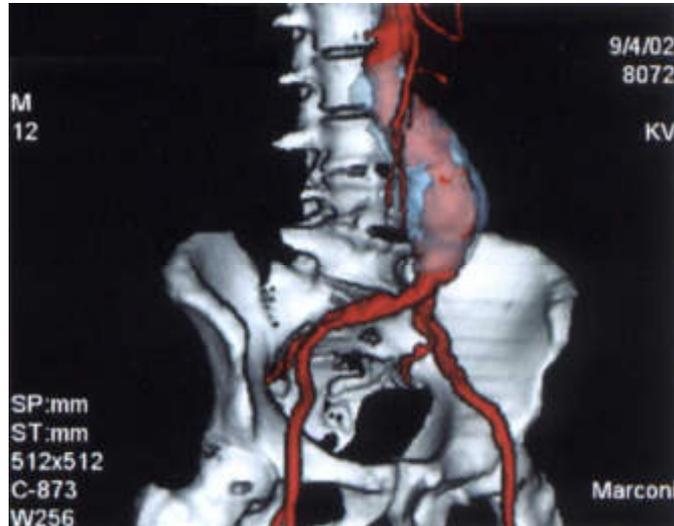
- Le *arterie* sopportano sovrappressioni ma le *vene* non sono così elastiche e ...

- Ipotesi:

- Flusso laminare (moto quasi stazionario su piccole distanze)
- Attriti trascurabili
- Condotti quasi rigidi



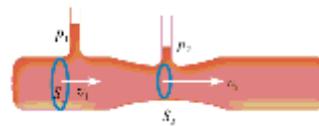
Aneurisma dell'aorta addominale



Stenosi (restringimento del vaso)

- Se assumiamo le pareti dell'arteria rigide, una portata dell'arteria costante implica che nella sezione dell'a stenosi la velocità del sangue è maggiore:

$$v_2 = v_1 \frac{S_1}{S_2} \quad (S_1 > S_2)$$



- Applicando il Teorema di Bernoulli

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{cost} \quad \longrightarrow \quad \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2}$$

- Se $v_2 > v_1$ ne consegue che $p_2 < p_1$

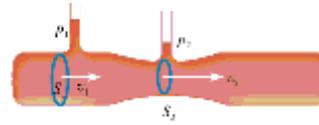
- Ipotesi:

- Flusso laminare (moto quasi stazionario su piccole distanze)
- Attriti trascurabili
- Condotti quasi rigidi



Stenosi (restringimento del vaso)

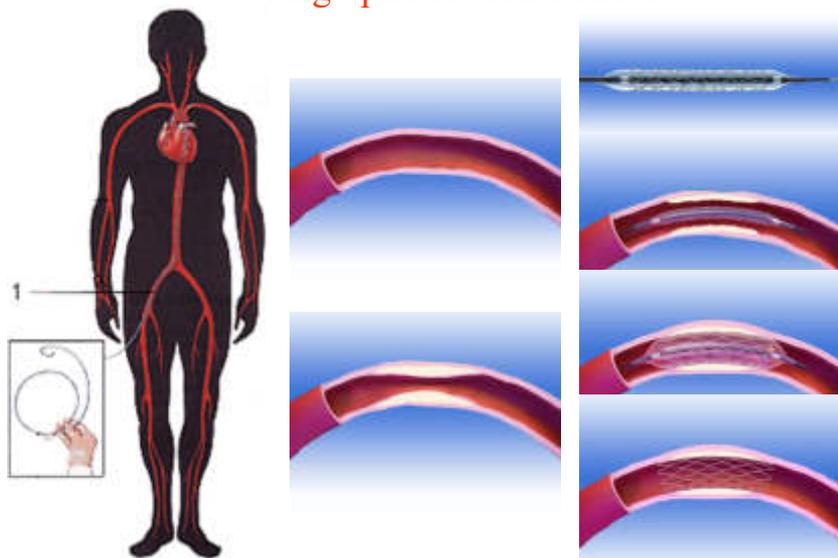
- Se $v_2 > v_1$ ne consegue che $p_2 < p_1$
- Una pressione p_2 minore del normale, riduce ulteriormente S_2 e così via...
- La pressione laterale nella stenosi non si oppone al restringimento del vaso che porta ad un mancato flusso sanguigno.



- Ipotesi:
 - Flusso laminare (moto quasi stazionario su piccole distanze)
 - Attriti trascurabili
 - Condotti quasi rigidi



Angioplastica con STENT



Iniezione a drenaggio di liquidi



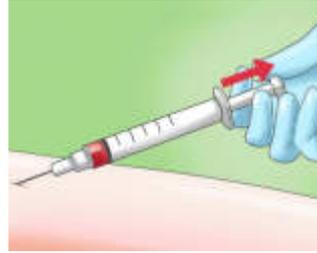
Iniezione endovena

- Per introdurre liquidi medicinali nei vasi sanguigno, è necessario vincere la pressione interna (che è maggiore di quella atmosferica).
- Si preferisce entrare in “vena” (bassa pressione, circa 10-20 mmHg) piuttosto che in arteria (alta pressione).



Iniezione endovena

- Per introdurre liquidi medicinali nei vasi sanguigni, è necessario vincere la pressione interna (che è maggiore di quella atmosferica).
- Si preferisce entrare in “vena” (bassa pressione, circa 10-20 mmHg) piuttosto che in arteria (alta pressione).



Fisica (BIO+FARM), /
Prof. Nicola Cavallo

Prelievo di sangue



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

64

Fleboclisi

- Per introdurre liquidi medicinali nei vasi sanguigno, è necessario vincere la pressione interna (che è maggiore di quella atmosferica).
- Si preferisce entrare in “vena” (bassa pressione, circa 10-20 mmHg) piuttosto che in arteria (alta pressione).
- Esempio.



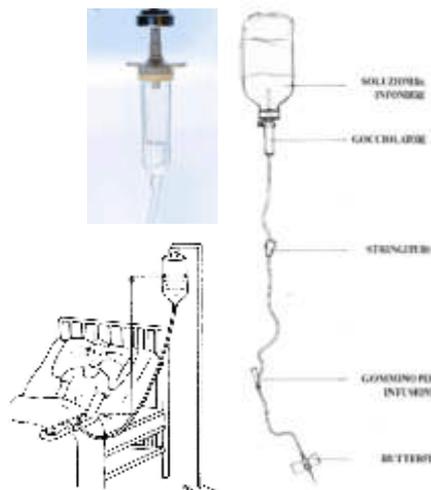
$$p_{VENA} \sim 20 \text{ mmHg} = 2700 \text{ Pa}$$

$$p_{IDRO} = \rho g h \rightarrow h = \frac{p_{IDRO}}{\rho g} = \frac{2700}{1000 \cdot 9.8} = 0.27 \text{ m}$$



Fleboclisi

- Il medicinale in soluzione, contenuto nell'ago inserito nella vena, è
 - sottoposto da una parte alla pressione (10-20 mmHg) del sangue in vena
 - dall'altra alla pressione idrostatica $\rho g h$ della soluzione contenuta nel flacone e nel tubicino sovrastante.
- Il *flacone* deve, quindi, essere posizionato ad un'altezza tale che la pressione idrostatica sia maggiore di quella del sangue in vena.
- Il *gocciolatore* regola la portata (numero di goccioline/ Δt).
- La *valvolina* consente all'aria di entrare nel flacone (cosicché la pressione interna sia sempre uguale a quella atmosferica).
- Lo *stringitubo* regola il flusso.



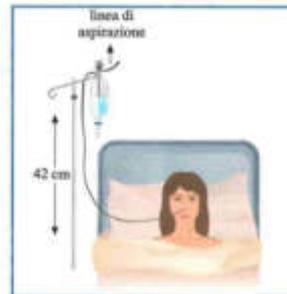
Apirazione

Una pressione negativa di aspirazione viene spesso utilizzata per eliminare liquidi dalle cavità corporee. L'aspirazione per la regione gastrointestinale è mostrata in Figura 6.4, la pressione d'aspirazione applicata al contenitore è di 100 mmHg e la parte superiore del tubo collegato al paziente si trova 42 cm sopra la parte terminale situata nel corpo. Determinare la pressione negativa applicata alla parte terminale del tubo.

Soluzione Assumendo che la densità del liquido sia uguale a quella dell'acqua, l'altezza di 42 cm comporta una pressione idrostatica che deve essere superata affinché il liquido giunga nel contenitore:

$$p = \rho g h = 1 \text{ g cm}^{-3} 980 \text{ cm s}^{-2} 42 \text{ cm} = 4.1 \cdot 10^4 \text{ barie} = 31.3 \text{ mmHg.}$$

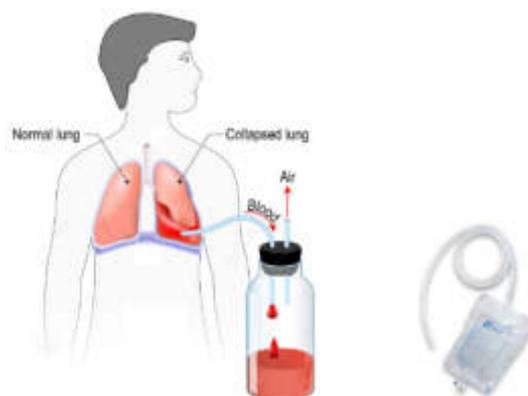
La pressione effettiva agente sulla parte terminale del tubicino risulta essere quindi di $100 - 31.3 = 68.7 \text{ mmHg}$. Questa è dunque la pressione d'aspirazione agente sul liquido da drenare dalle cavità gastrointestinali.



Dispositivo di aspirazione dei liquidi gastrointestinali.



Drenaggio

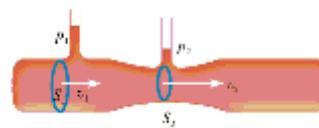


Misure di flusso



Tubo di Venturi (Venturimetro)

- Il **Tubo di Venturi** consiste in un tubicino con una strozzatura e due canne manometriche inserito in un condotto, permette di misurare la differenza di pressione p_1-p_2 e quindi di calcolare la velocità v_1 nel condotto in base alla formula:



$$v_2 = v_1 \frac{S_1}{S_2} \quad (S_1 > S_2)$$

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



$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left(\frac{S_1^2}{S_2^2} - 1 \right)$$

- Si può, così, determinare v_1 e, successivamente, v_2

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left(\frac{S_1^2}{S_2^2} - 1 \right) \rightarrow v_1 \xrightarrow{Q = S_1 v_1 = S_2 v_2} v_2 = v_1 \frac{S_1}{S_2}$$





Venturi Tube working principle

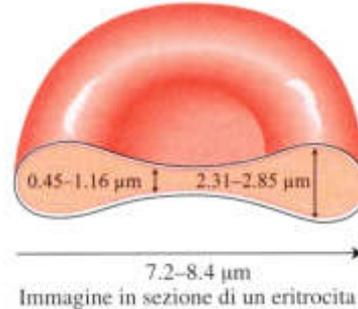


Composizione del sangue



Composizione del sangue

- Il sangue è una sospensione di cellule in una soluzione acquosa di sali e molecole organiche.
- La componente cellulare è costituita per la maggior parte da *eritrociti* o *globuli rossi*, presenti, in genere, nel sangue con una concentrazione di circa 5×10^6 per mm^3 di sangue intero.
- La funzione principale dei globuli rossi è quella di trasportare l'emoglobina, che a sua volta trasporta l'ossigeno che viene scambiato negli alveoli polmonari e nei tessuti.

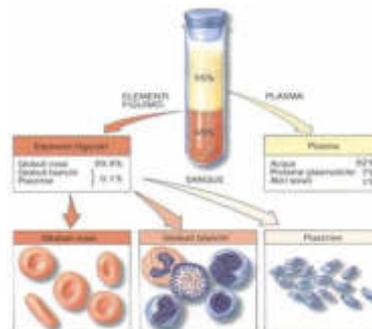


- *La forma degli eritrociti è quella di un disco biconcavo avente diametro di $8 \mu\text{m}$ e spessore variabile da $2.7 \mu\text{m}$ a $1.0 \mu\text{m}$.*



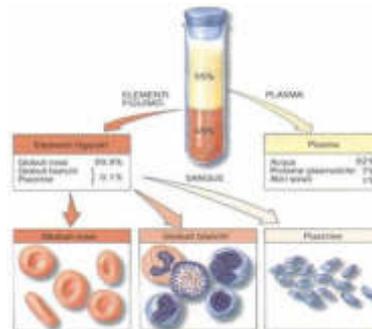
Composizione del sangue

- Altri componenti cellulari del sangue sono
 - *leucociti*, o *globuli bianchi*,
 - Concentrazione $5 \div 8 \cdot 10^3$ per mm^3
 - *Piastrine*
 - Concentrazione $250 \div 500 \cdot 10^3$ per mm^3
- Globuli bianchi e piastrine non hanno effetto sulla viscosità del sangue per
 - il numero limitato dei leucociti,
 - le dimensioni inferiori delle piastrine rispetto a quelle dei globuli rossi.



Composizione del sangue

- La soluzione acquosa nella quale le cellule sono contenute in sospensione è chiamata *plasma*.
- Il plasma contiene
 - circa il 7% in peso di proteine
 - Circa il 2% di ioni organici ed inorganici
 - il resto è acqua.
- Di seguito trascureremo il contenuto proteico e ionico del plasma, che pertanto considereremo costituito solo da molecole d'acqua.



Viscosità del sangue



Viscosità del plasma

- Le proprietà di moto del sangue sono profondamente influenzate dalla complessa struttura del sangue stesso e in particolare dalla presenza in sospensione dei globuli rossi.
- Il plasma da solo può essere considerato, con discreta approssimazione, un liquido viscoso normale, cioè che obbedisce in regime laminare alla formula di Poiseuille.

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

- La viscosità del plasma è circa una volta e mezza la viscosità dell'acqua e non dipende molto dalla concentrazione delle proteine.



Viscosità del sangue

- Il sangue intero *non* è un liquido omogeneo a causa della presenza degli eritrociti (globuli rossi).
- Se
 - velocità non è troppo bassa
 - raggio dei condotti è superiore a circa 100 μm
- il sangue obbedisce, in regime laminare, alla formula di Poiseuille

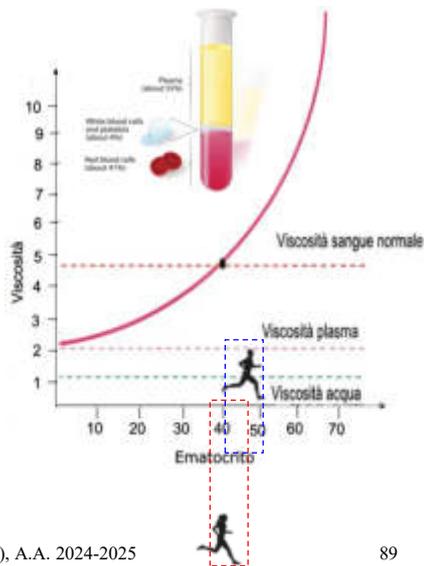
$$Q = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \Delta p$$

- Con alcune eccezioni (*vedi comportamenti anomali in seguito*)



Viscosità del sangue

- L'**ematocrito**, è un esame del sangue che indica la percentuale del volume sanguigno occupata dalla parte corpuscolata del sangue.
- La percentuale restante è occupata dalla frazione liquida, il plasma.
- Valore normale:
 - 37-47% per le donne
 - 42-52% per gli uomini
- È un indice molto importante nella valutazione di un eventuale stato anemico, per il quale il valore dell'ematocrito risulta inferiore al normale.

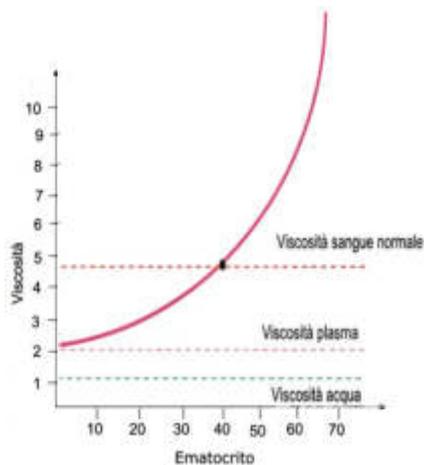


Viscosità del sangue

- Ipotesi: il sangue intero si comporta come un liquido viscoso normale.
- misurando sperimentalmente Q e Δp si ricava la viscosità η dalla formula di Poiseuille.

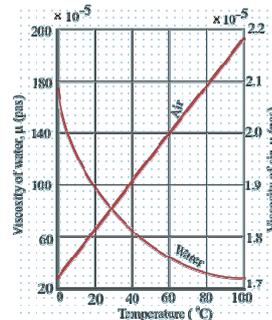
$$\eta = \frac{\pi r^4}{8Ql} \Delta p$$

- La viscosità dipende fortemente dalla concentrazione di eritrociti.



Viscosità del sangue (T)

- La dipendenza della viscosità del sangue dalla temperatura è molto marcata, essendo uguale percentualmente a quella dell'acqua.

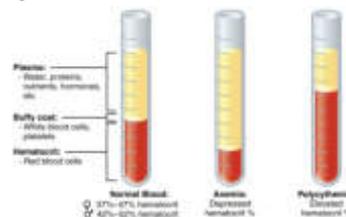


- Influenzano la circolazione:
 - la percentuale di globuli rossi,
 - la temperatura.
- se entrambi si discostano dai valori normali, influenzano la resistenza incontrata dal sangue nel fluire.



Esempi

- **Anemia** (basso valore di globuli rossi):
 - la viscosità del sangue è minore e di conseguenza la portata Q del sistema circolatorio tende ad aumentare, poiché la differenza di pressione Δp , cioè in pratica la pressione aortica media, in generale resta costante.



- **Raffreddamento degli arti:**
 - l'aumento di viscosità del sangue rende più difficile la circolazione periferica e, quindi, può portare al congelamento degli arti.



Anomalie della viscosità del sangue



Comportamenti anomali

- Finora:
 - sangue come liquido viscoso omogeneo.
- ma
 - il sangue è costituito sostanzialmente da una sospensione di cellule piuttosto grosse (*eritrociti*) nel liquido plasmatico,
 - la struttura del sangue a livello microscopico è fortemente eterogenea,
 - ciò influenza
 - la viscosità,
 - il moto nei vasi.



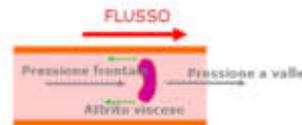
Comportamenti anomali

- Sangue in quiete
 - Il sangue costituisce una massa plastica con una struttura interna dovuta all'aggregazione degli eritrociti.
- Sangue in movimento nei vasi
 - La struttura interna si rompe e il sangue fluisce come un liquido.
 - Durante il moto le grosse molecole in sospensione e le cellule si orientano nel flusso, in particolare si osserva che i globuli rossi tendono ad ammassarsi lungo l'asse del condotto, lasciando uno strato di plasma in prossimità della parete del condotto.
 - Questo fenomeno è noto come *accumulo assiale dei globuli rossi*.

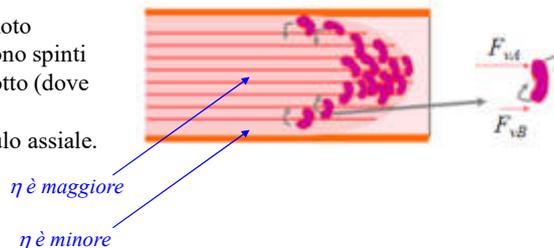


Comportamenti anomali

- Quando un eritrocito si trova all'interno del flusso, la Δp da un lato e la *forza viscosa* dall'altro lo fanno ruotare (in verso differente a seconda della posizione rispetto al bordo del condotto).

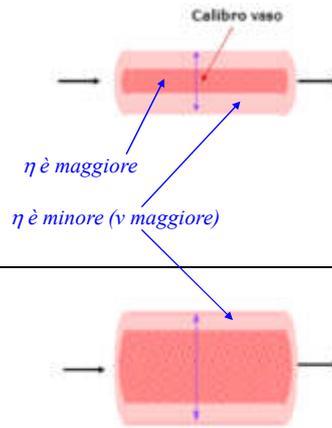


- Inoltre, all'interno del moto laminare, gli eritrociti sono spinti verso il centro del condotto (dove la velocità è maggiore), incrementando l'accumulo assiale.



Comportamenti anomali

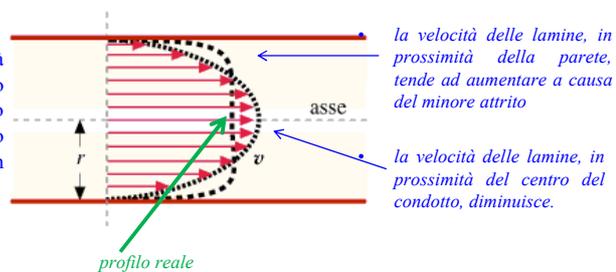
- Il profilo (gradiente) di velocità che determina l'accumulo assiale, è maggiore dei vasi più piccoli.
- Nei vasi piccoli (es: arteriole) la parte di plasma è maggiore e la zona con viscosità minore (e velocità maggiore) è inferiore.
- Ciò agevola lo scorrere nei condotti piccoli.



Comportamenti anomali

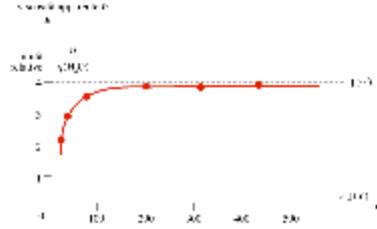
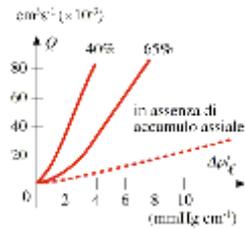
- *Che relazione c'è tra l'accumulo assiale dei globuli rossi ed il flusso del sangue?*
- In presenza di accumulo assiale, la viscosità del sangue non è più uniforme (il sangue è un liquido "non" newtoniano),
 - più grande al centro del condotto,
 - inferiore in prossimità delle pareti del condotto.

il profilo della velocità risulterà appiattito rispetto a quello esattamente parabolico che si osserva in un liquido omogeneo.



Anomalie del comportamento viscoso

- Sperimentalmente (ma anche con spiegazione complessa) si nota che la portata Q è proporzionale al gradiente di pressione $\Delta p/l$ (l =lunghezza del condotto)
- Parimenti, in capillari con sezioni al di sotto di dei $100 \mu\text{m}$ (dove il diametro dei globuli rossi è circa $6 \mu\text{m}$) la viscosità diminuisce.
- Non si può più trattare il moto in regime laminare.



- L'eliminazione dell'approssimazione del sangue come liquido omogeneo (disomogeneità causata dall'accumulo assiale dei globuli rossi), comporta che il moto non può essere più considerato in regime laminare

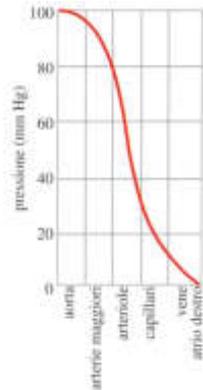


Resistenza dei vasi e variazione di pressione nel sistema circolatorio



Circuito sistemico

- Andando dall'aorta alla vena cava, la pressione del sangue diminuisce gradatamente, come mostrato nella figura.
 - (la pressione riportata è una pressione media, che non tiene conto quindi delle oscillazioni di pressione dovute all'effetto di pompaggio del cuore.
- Le pressioni sono misurate a partire dalla pressione atmosferica e si riferiscono ad un soggetto disteso in posizione orizzontale, in modo che i condotti che costituiscono il sistema circolatorio si trovino tutti approssimativamente all'altezza del cuore.



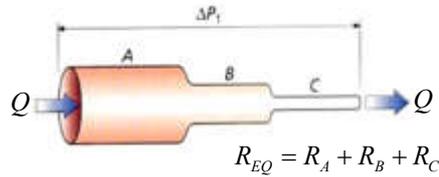
Resistenza dei vasi



Resistenza serie/parallelo

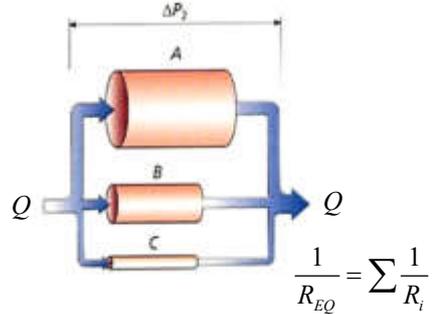
- Portata:

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



- La resistenza fluidodinamica R dipende da:

- sezione del vaso,
- disposizione del condotto,
- natura del fluido (viscosità),
- regime di scorrimento (laminare/turbolento).



Resistenza dei vasi

- Sistema arteriolare:

$$\frac{1}{R_{EQ}} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_a} + \dots = \frac{N_a}{R_a}$$

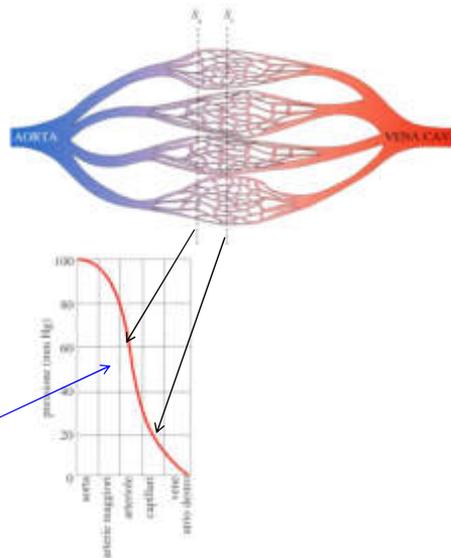
- Sistema capillare:

$$\frac{1}{R_{EQ}} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_c} + \dots = \frac{N_c}{R_c}$$

- Poiché in media $R_c > R_a$ ma $N_c \gg N_a$ ne consegue che:

$$\frac{R_c}{N_c} < \frac{R_a}{N_a}$$

- La resistenza totale del sistema arteriolare è maggiore di quella del sistema capillare.



Resistenza dei vasi

- *Soggetto sano a riposo*

$$\left. \begin{array}{l} \Delta p = 100 \text{ mmHg} \\ Q = 85 \text{ cm}^3/\text{s} \end{array} \right\} \rightarrow R = \frac{\Delta p}{Q} = \frac{100 \text{ mmHg}}{85 \text{ cm}^3/\text{s}} = 1.2 \frac{\text{mmHg} \cdot \text{s}}{\text{cm}^3}$$

- *Soggetto sano sotto sforzo*

$$\left. \begin{array}{l} \Delta p = 140 \text{ mmHg} \\ Q = 150 \text{ cm}^3/\text{s} \end{array} \right\} \rightarrow R = \frac{\Delta p}{Q} = \frac{140 \text{ mmHg}}{150 \text{ cm}^3/\text{s}} = 0.9 \frac{\text{mmHg} \cdot \text{s}}{\text{cm}^3}$$

- *Soggetto iperteso*

$$\left. \begin{array}{l} \Delta p = 200 \text{ mmHg} \\ Q = 85 \text{ cm}^3/\text{s} \end{array} \right\} \rightarrow R = \frac{\Delta p}{Q} = \frac{200 \text{ mmHg}}{85 \text{ cm}^3/\text{s}} = 2.4 \frac{\text{mmHg} \cdot \text{s}}{\text{cm}^3}$$



Rapporto tra R ed i regimi di moto

- **Aorta:**

- dalla formula della velocità critica: $v_c = 40 \text{ cm}/\text{s}$
- con una portata di $5 \text{ l}/\text{m}$ ed un raggio di 1 cm: $\bar{v} = 26 \text{ cm}/\text{s} < v_c = 40 \text{ cm}/\text{s}$
regime laminare

- All'apertura della valvola aortica, il ventricolo sinistro espelle il sangue e la velocità istantanea aumenta: $v_{ist} > v_c = 40 \text{ cm}/\text{s}$
regime turbolento

- **Vasi più piccoli:**

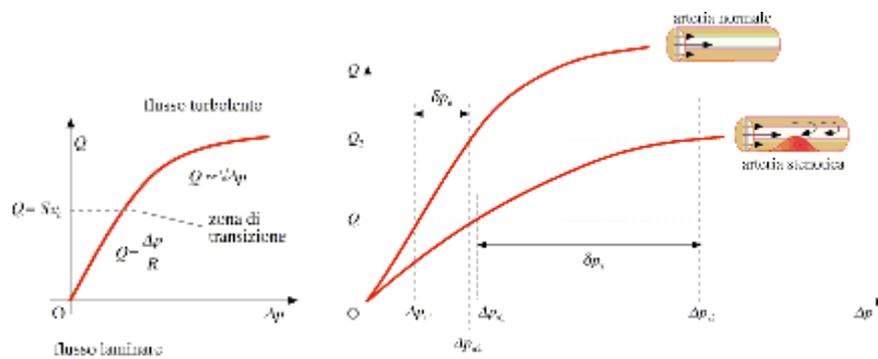
- dalla formula della velocità critica: $v_c > 40 \text{ cm}/\text{s}$
regime laminare

- **Stenosi:**

- la resistenza dei vasi aumenta a causa della maggiore dissipazione in energia necessaria al flusso
regime turbolento



Rapporto tra R ed i regimi di moto

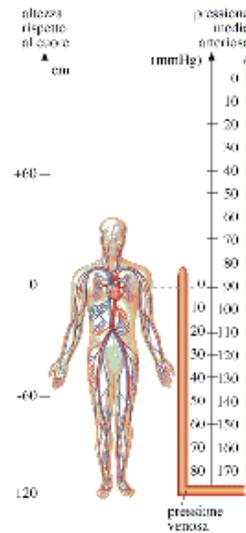


Effetti della pressione idrostatica



Effetti della pressione idrostatica

- Nelle considerazioni precedenti, trattando della pressione nei vari punti del sistema circolatorio, abbiamo sempre assunto che il soggetto fosse in posizione orizzontale.
- Quando il soggetto è in posizione eretta, la pressione del sangue nei vari distretti viene notevolmente alterata dall'effetto della pressione idrostatica.
- Ricordiamo che la pressione idrostatica è la pressione esercitata da una colonna di liquido sulla propria base per effetto della forza peso

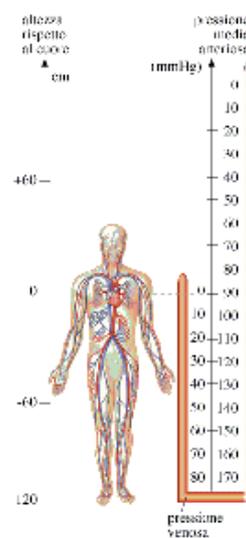


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

132

Effetti della pressione idrostatica

- La pressione del sangue nei vasi degli arti inferiori è abbastanza alta.
- Nei vasi arteriosi l'effetto ha scarse conseguenze.
 - le pareti dei *vasi arteriosi* sono costituite da tessuto elastico e tessuto muscolare in grado di sostenere agevolmente pressioni dell'ordine di 100 - 200 mmHg.
- invece
 - le pareti dei *vasi venosi* sono sottili e contengono poco tessuto elastico. La pressione idrostatica nei vasi venosi degli arti inferiori tende, quindi, a far dilatare le vene.

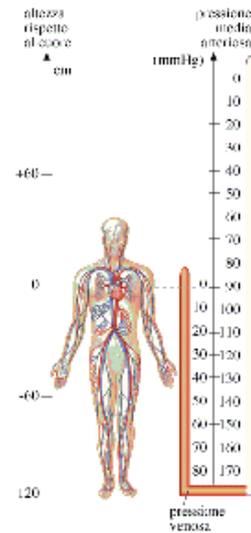


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

134

Effetti della pressione idrostatica

- Quando si passa bruscamente dalla posizione supina a quella eretta, si può verificare un temporaneo rallentamento della circolazione nelle regioni cerebrali, dovuto ad una temporanea stasi del sangue nei territori venosi degli arti inferiori, dove la pressione idrostatica aumenta bruscamente.



Lavoro e potenza cardiaca

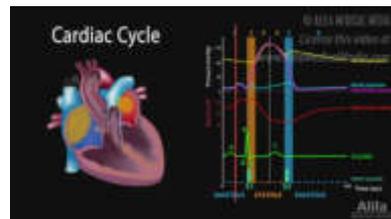


Lavoro cardiaco

- Se il sangue fosse un liquido senza viscosità propria e senza resistenza con le pareti dei vasi, per farlo circolare basterebbe una piccolissima differenza iniziale di pressione tra il ventricolo sinistro e l'atrio destro del cuore, cioè tra il punto di partenza e quello di arrivo del sangue.
- In realtà, per mantenere il sangue in moto, è necessario applicare una notevole differenza di pressione agli estremi del sistema circolatorio, a causa delle forze di resistenza fluidodinamica, che sono particolarmente intense nel sistema arteriolare e capillare.
- Artefice di ciò è la *pompa cardiaca*: il **cuore**.



Circuito Cardiaco



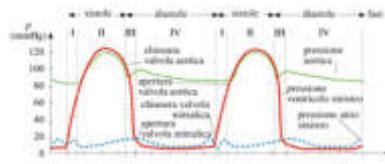
The Cardiac Cycle, Animation

<https://www.youtube.com/watch?v=IS9TD9fHFv0>



Premessa alla visione del filmato

- Il ciclo cardiaco riguarda la sequenza di eventi che accadono e si ripetono ad ogni battito cardiaco.
- Possiamo differenziarlo in 2 condizioni
 - *Sistole* (se non specificata si riferisce alla sistole ventricolare)
 - *Diastole* (se non specificata si riferisce al rilassamento ventricolare)



- Ognuna delle quali si suddivide in ulteriori fasi minori

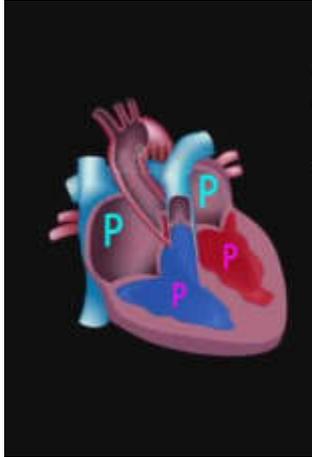


Intro

- Ciclo cardiaco
 - Sistole
 - Fase 1
 - Sistole atriale
 - Contrazione iso(volu)metrica
 - Fase 2
 - Eiezione rapida
 - Eiezione ridotta
 - Diastole
 - Fase 3
 - Rilassamento iso(volu)metrico
 - Fase 4
 - Riempimento ventricolare rapido
 - Diastasi



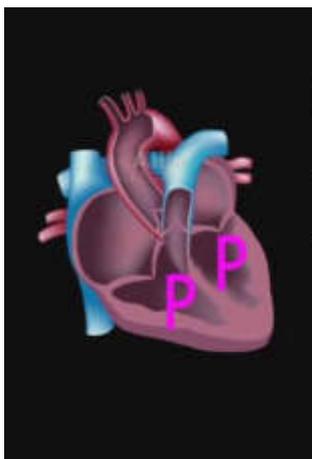
Premesse



- Il sangue fluisce dalle zone a pressione superiore a quelle a pressione inferiore.



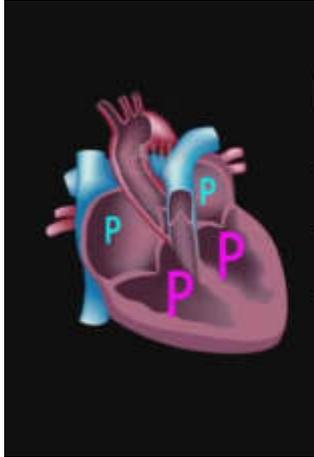
Premesse



- Il sangue fluisce dalle zone a pressione superiore a quelle a pressione inferiore.
- La contrazione incrementa la pressione all'interno di una camera (nella fig. la camera ventricolare),



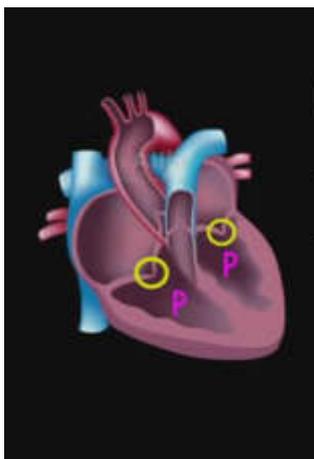
Premesse



- Il sangue fluisce dalle zone a pressione superiore a quelle a pressione inferiore.
- La contrazione incrementa la pressione all'interno di una camera (nella fig. la camera ventricolare), mentre il rilassamento abbassa la pressione.



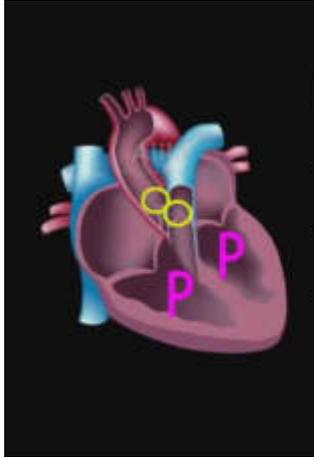
Premesse



- Il sangue fluisce dalle zone a pressione superiore a quelle a pressione inferiore.
- La contrazione incrementa la pressione all'interno di una camera (nella fig. la camera ventricolare), mentre il rilassamento abbassa la pressione.
- Le valvole si aprono/chiudono in accordo con i gradienti di pressione.



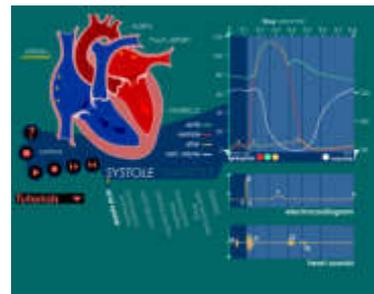
Premesse



- Il sangue fluisce dalle zone a pressione superiore a quelle a pressione inferiore.
- La contrazione incrementa la pressione all'interno di una camera (nella fig. la camera ventricolare), mentre il rilassamento abbassa la pressione.
- Le valvole si aprono/chiudono in accordo con i gradienti di pressione.



Circuito Cardiaco

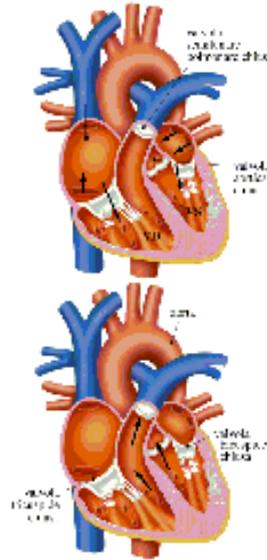


https://library.med.utah.edu/kw/pharm/hyper_heart1.html



La pompa cardiaca

- Il cuore funziona come un sistema di due pompe sincrone.
- **Fase di riempimento.**
 - i due ventricoli si riempiono di sangue, che viene spinto in essi dai corrispondenti atri.
- **Fase di espulsione**
 - le valvole atrioventricolari si chiudono e i ventricoli, contraendosi, comprimono il sangue lo espellono di forza attraverso le due valvole che immettono nell'arteria polmonare e nell'aorta.



La pompa cardiaca

- La pressione, con cui il sangue viene immesso nelle arterie, è sufficiente per spingere il sangue nella fitta rete di vasi che costituiscono il sistema circolatorio, vincendo le forze di resistenza fluidodinamica che si oppongono allo scorrimento del sangue nei vasi stessi.
- Man mano che ci si allontana dal cuore, la pressione diminuisce fino a che, al ritorno al cuore, attraverso la vena cava, essa si riduce quasi a zero ed è necessario che il cuore ricomprima il sangue al valore di pressione iniziale, per fargli compiere un nuovo ciclo.
- Nello svolgere l'azione di pompaggio, il cuore compie un certo lavoro. Questo lavoro serve per vincere quello resistente delle forze di attrito e si trasforma quindi, in ultima istanza, in calore.



Il ciclo cardiaco



Il ciclo cardiaco

- Limitiamoci a descrivere il ciclo del *cuore sinistro*, che è, delle due pompe cardiache, quella che compie la maggior parte del lavoro. I due cicli del resto sono uguali e simultanei.
- Per descrivere le varie fasi del ciclo cardiaco conviene seguire l'andamento della **pressione intraventricolare** e del **volume intraventricolare**.
- Cerchiamo anche di correlare
 - gli eventi meccanici
 - con gli eventi elettrici, così come appaiono da una registrazione elettrocardiografica, e
 - con quelli sonori (rumori cardiaci).



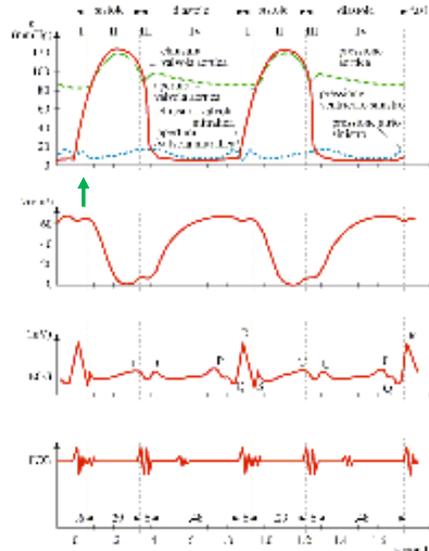
Contrazione ventricolare (sistole) - Fase I

Contrazione ventricolare o sistole.

- Questa fase di contrazione si sviluppa in due fasi ben distinte, indicate nel grafico come fase I e fase II.

Fase I

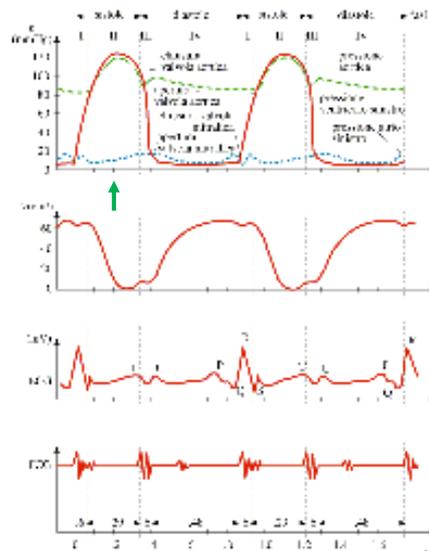
- il ventricolo si contrae isometricamente, la valvola bicuspidale si chiude e il sangue contenuto nel ventricolo viene compresso.
- La pressione intraventricolare aumenta fino a circa 80 - 90 mmHg, mentre il volume di sangue contenuto nel ventricolo non cambia, poiché le valvole sono chiuse e il sangue è praticamente incompressibile.



Contrazione ventricolare (sistole) - Fase II

Fase II

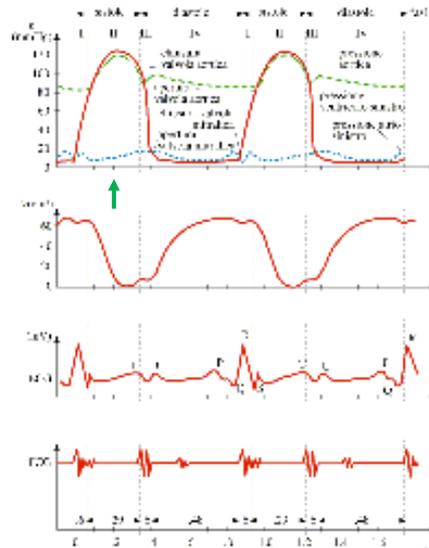
- la valvola aortica si apre e il sangue viene pompato nell'aorta.
- In questa fase la pressione prima continua ad aumentare, mentre il ventricolo si vuota rapidamente (fase di massima eiezione) e successivamente si stabilizza, iniziando a diminuire leggermente, mentre il ventricolo termina di vuotarsi (fase di eiezione ridotta).



Contração ventricular (sístole) - Fase II

- **Fase II**

- L'onda elettrica **Q-R-S** precede appena la contrazione ventricolare, mentre l'onda **T** segna l'inizio della fase di rilassamento ventricolare.
- Il rumore cardiaco è dovuto alla chiusura della valvola atrioventricolare ed alle vibrazioni conseguenti.



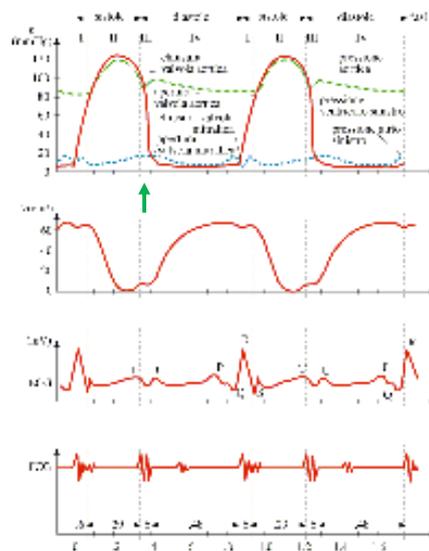
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

236

Rilassamento (diastole) – Fase III

- **Fase III (rilassamento isometrico)**

- La valvola aortica si chiude (per effetto della pressione che si è creata nell'aorta in seguito all'afflusso di sangue)
- il ventricolo subisce un rilassamento isometrico in cui il volume ventricolare non cambia apprezzabilmente (essendo le valvole chiuse)
- la tensione delle pareti del ventricolo diminuisce rapidamente e con essa diminuisce la pressione intraventricolare.
- La chiusura della valvola aortica, dovuta al riflusso di sangue, produce il secondo suono cardiaco.



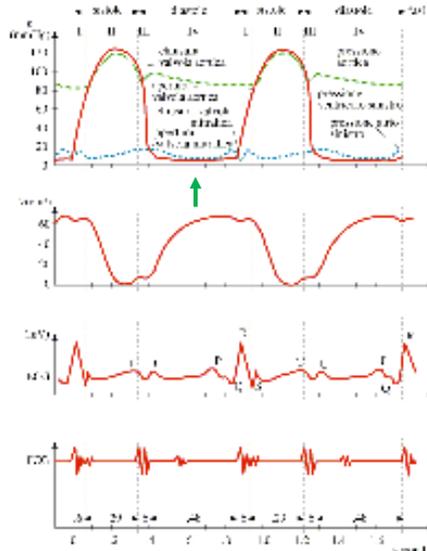
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

238

Rilassamento (diastole) – Fase IV

Fase IV (rilassamento isotonic)

- Quando la pressione del ventricolo scende al di sotto della pressione atriale, la valvola bicuspidi si apre ed il ventricolo torna a riempirsi di sangue.
- Questo riempimento avviene prima rapidamente, a causa della grande quantità di sangue accumulatosi nell'atrio durante la sistole ventricolare, poi più lentamente.
- In questa fase di riempimento più lenta, chiamata *diastasi*, il sangue entra nel ventricolo con il normale flusso circolatorio.



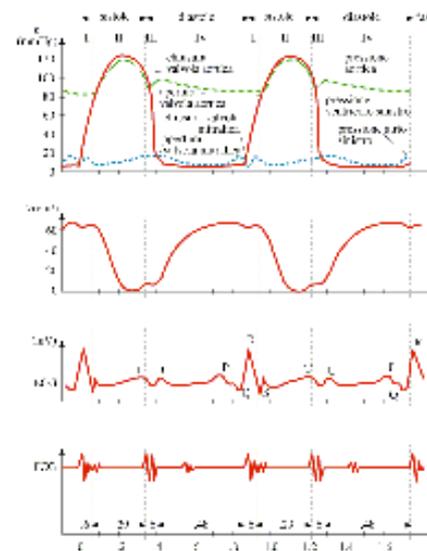
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

239

Rilassamento (diastole) – Fase IV

Fase IV (rilassamento isotonic)

- La fase IV è completata dalla sistole atriale in cui l'atrio si contrae e spinge nel ventricolo un ultimo getto di sangue.
- L'onda P del tracciato elettrocardiografico precede appena la contrazione atriale.
- Altri suoni cardiaci più deboli possono essere uditi in questa fase in determinate circostanze.



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

240

Lavoro cardiaco



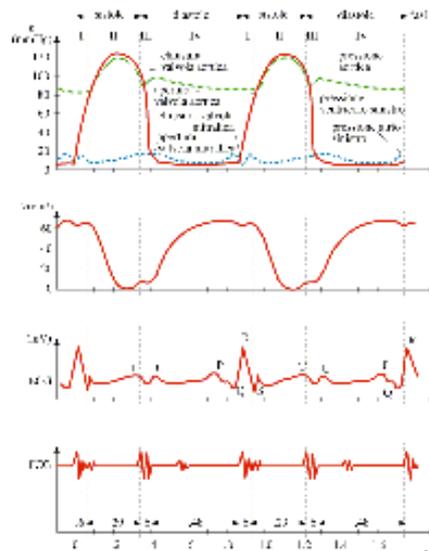
Lavoro cardiaco

Fase I (contrazione isometrica)

- non viene compiuto lavoro esterno
- viene compiuto solo lavoro interno

Fase II (contrazione isotonica)

- il volume ventricolare diminuisce
- $V_2 < V_1$
- la pressione intraventricolare varia di poco intorno al valore medio di $p_v = 100 \text{ mmHg}$.
- Gittata pulsatoria: $V_2 - V_1$
- Lavoro esterno: $L = p_v (V_2 - V_1)$



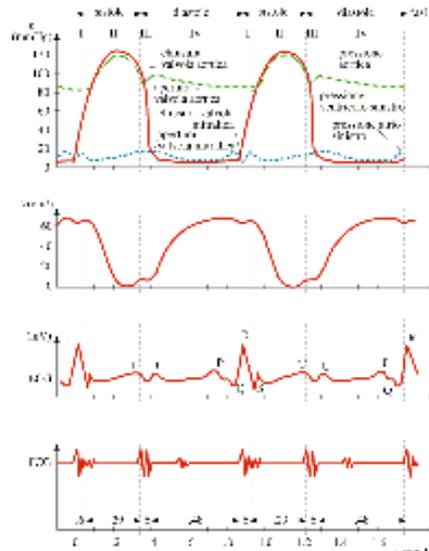
Lavoro cardiaco

Fase III (rilassamento isometrico)

- non viene compiuto lavoro esterno
- non viene compiuto lavoro interno.

Fase IV (rilassamento isotonic)

- il ventricolo si riempie di sangue,
- la pressione intraventricolare rimane molto piccola.
- il lavoro viene compiuto dall'atrio
- poiché tuttavia, la pressione sviluppata nella contrazione atriale è molto piccola, il lavoro fatto dall'atrio è trascurabile, rispetto a quello compiuto dal ventricolo.



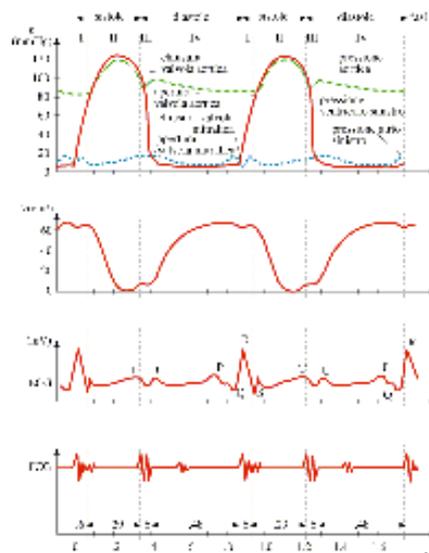
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

246

Lavoro cardiaco

- Quindi, il lavoro esterno del cuore sinistro è

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



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

247

Lavoro cardiaco

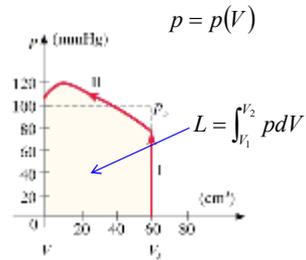
- Nella realtà, il calcolo del lavoro non può essere effettuato così

$$L = p_v(V_i - V_f)$$

- poiché la pressione intraventricolare e la pressione aortica non sono costanti.

- Occorrerebbe (ma possiamo trascurare questo aspetto)

$$L = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

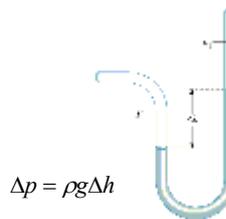
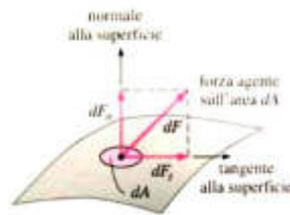


Misura della pressione del sangue



Pressione del sangue

- DEF: la **pressione** è la forza esercitata perpendicolarmente all'unità di superficie.
- La **pressione del sangue** indica la differenza tra la pressione interna e la pressione esterna (*che coincide con quella atmosferica*).
- La pressione idrostatica può essere utilizzata per costruire misuratori di pressione semplici e relativamente precisi, cioè i manometri a liquido, di cui un esempio è mostrato a destra.



Pressione del sangue animale

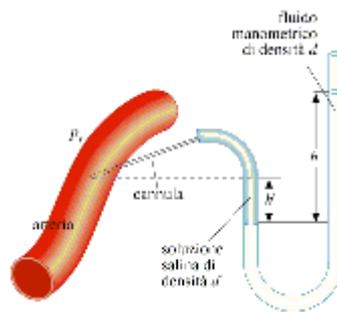
- La tecnica proposta dal fisiologo **Stephen Hales** nel Settecento per la misura della pressione sanguigna in un cavallo (evidentemente e ovviamente "molto" agitato).
- *Hales notò anche che il livello del sangue nella colonna non era costante ma variava in funzione delle pulsazioni; egli definì come valore medio della pressione arteriosa del cavallo una altezza di liquido di 9 piedi e 6 pollici (2897 mm di colonna di sangue).*



Pressione del sangue animale

- In molti esperimenti con animali anestetizzati, la pressione del sangue in un'arteria è misurata con la diretta inserzione nel vaso di una cannula, contenente una soluzione salina e un agente anticoagulante, collegata ad un manometro a liquido.
- La pressione del sangue p , relativa a quella atmosferica, è data dalla differenza delle pressioni idrostatiche della soluzione e del fluido manometrico:

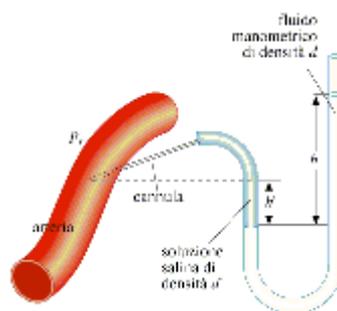
$$p = \rho g h - \rho' g' h'$$



Pressione del sangue animale

- Il mercurio è comunemente usato come fluido manometrico nella misura delle pressioni arteriose. Invece, per le pressioni venose, che sono relativamente basse, si usa la soluzione salina stessa come fluido manometrico. Il mercurio, infatti, darebbe risultati poco accurati, poiché si avrebbero altezze h molto piccole.

- La metodica è invasiva poiché si deve incidere il vaso.

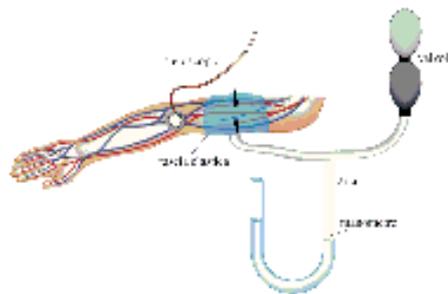


Sfigmomanometro



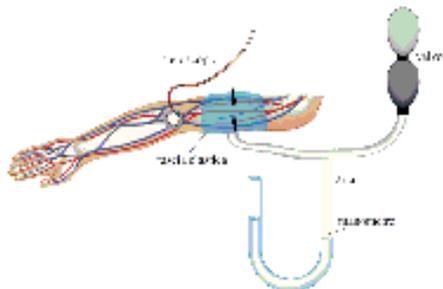
Sfigmomanometro

- Consiste in una fascia di materiale non dilatabile che nella parte interna forma una camera di gomma in cui si pompa aria e che è connessa a un manometro.
- L'aria viene immessa mediante un palloncino di gomma munito di una valvola.
- La fascia viene applicata al braccio, in modo da comprimere l'arteria sottostante, applicando una pressione p maggiore di quella sistolica, $p > p_s$, bloccando così il trasporto di sangue.



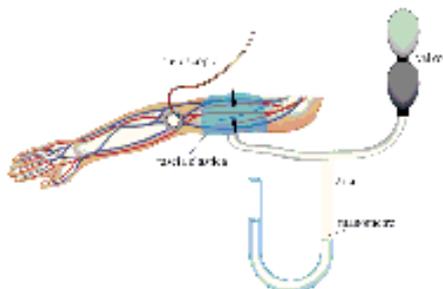
Sfigmomanometro

- L'arresto delle pulsazioni può essere rilevato con uno stetoscopio applicato sull'articolazione interna dell'avambraccio, dove l'arteria scorre superficialmente.
- Se poi si apre la valvola, in modo che l'aria esca lentamente, a un certo punto si avverte la ripresa delle pulsazioni ($p > p_s$) che consente di individuare, leggendo il manometro, la pressione sistolica (pressione massima).

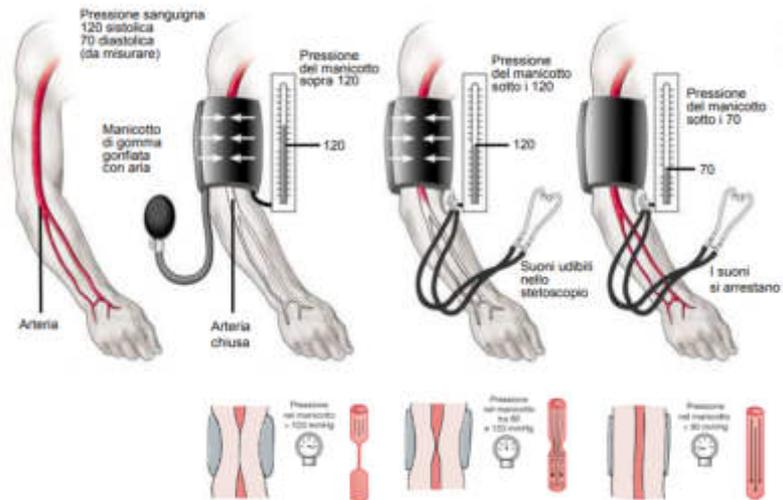


Sfigmomanometro

- Con la progressiva ulteriore diminuzione di pressione nella fascia, a un certo punto le pulsazioni, avvertite con lo stetoscopio, cessano di nuovo quando la pressione p diventa inferiore a quella diastolica ($p < p_d$), poiché ora l'arteria è completamente aperta, il flusso è laminare e quindi silenzioso.
- In questo modo si determina la pressione diastolica (pressione minima).



Misura della pressione sanguigna

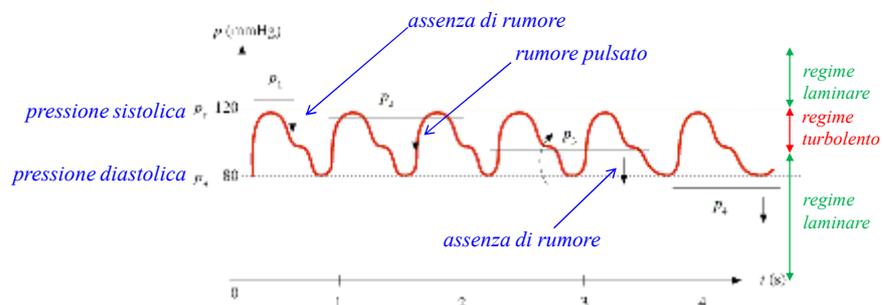


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

273

Sfigmomanometro

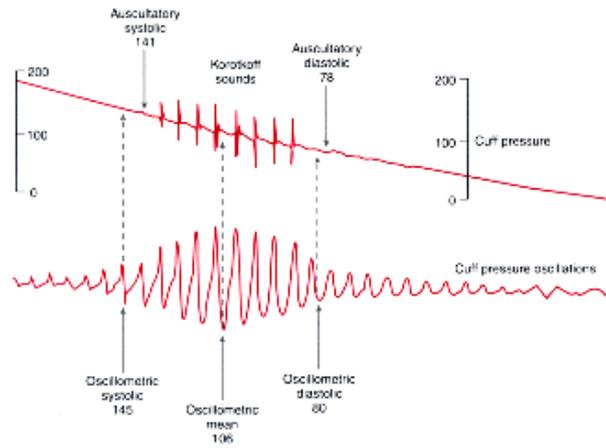
- La curva a tratto pieno indica la variazione della pressione in una grossa arteria.
- Il rumore pulsato, in regime turbolento, è determinato dalla successiva apertura e chiusura dell'arteria.



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

276

Misura della pressione sanguigna



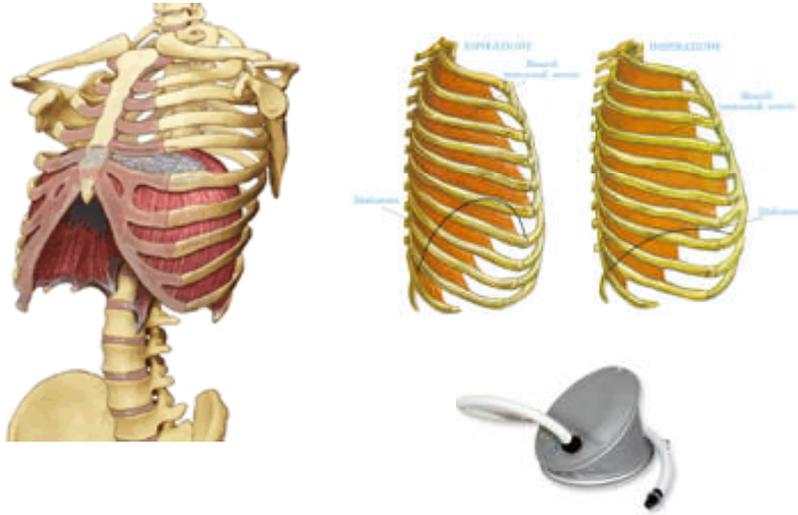
Comparison of blood pressure measurements by Korotkoff sounds and oscillometry



Apparato respiratorio



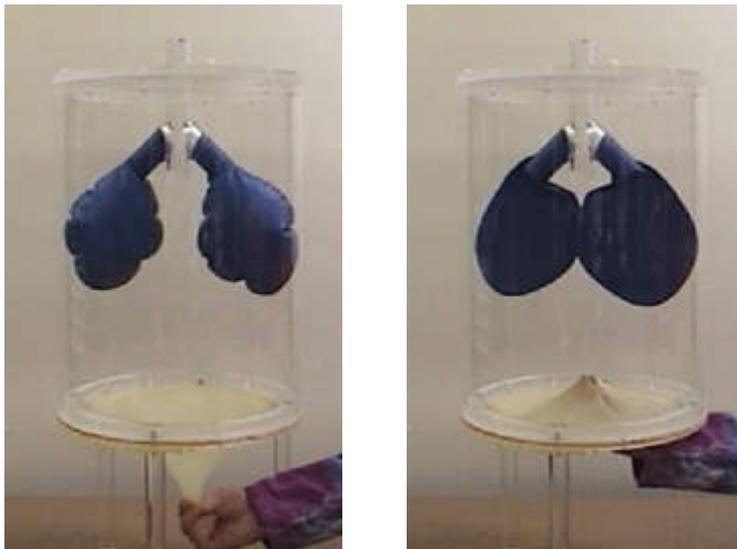
Respirazione



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-25
Prof. Nicola Cavallo

284

Respirazione



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

287