

Concetti

Fluidi

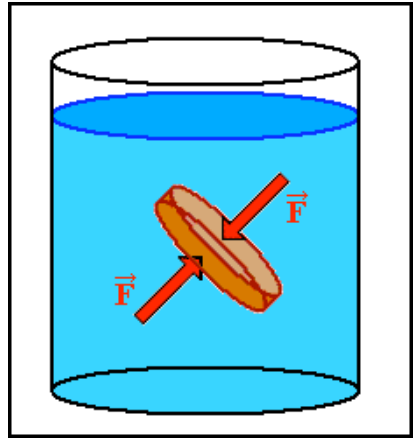
Densità

Pressione

Lavoro di una forza

Teorema dell'energia cinetica

“Si definisce fluido un corpo continuo nel quale, in condizioni di quiete, la forza che si esercita su qualunque superficie interna al fluido è sempre diretta normalmente alla superficie stessa”.



I fluidi sono corpi **continui** e la loro densità è uniforme.

$$\text{densità} = \rho = \frac{m}{V} \quad \text{nel S.I. si misura in Kg}\cdot\text{m}^{-3}.$$

La densità del sangue umano è di circa $1.056\text{-}1.060 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

A differenza dei gas, i liquidi sono **poco comprimibili**, per cui si dice che hanno volume proprio ma non forma propria. Questo dipende dal fatto che le forze di coesione tra le molecole sono superiori nei liquidi rispetto ai gas.

Un **fluido** si definisce **ideale** quando:

1. è **privo di attrito interno**, cioè le molecole scorrono liberamente le une sulle altre;
2. è **incomprimibile**

Pressione

Un fluido contenuto in un recipiente esercita una forza sulle pareti del recipiente e viceversa (principio di azione e reazione). Se consideriamo una qualsiasi superficie ideale all'interno del fluido, avviene lo stesso: ogni parte esercita sull'altra una **forza**, non applicata in un punto ma **distribuita su tutta la superficie di separazione** e sempre **perpendicolare** a questa (ricordare la definizione di fluido). La **pressione** è il rapporto tra la forza esercitata dal fluido e la superficie su cui essa agisce:

$$p = \frac{F}{S}$$

Nel caso di solidi, gelatine, ecc. (che non rispondono alla definizione di fluido!) su di una superficie può agire una forza non perpendicolare alla superficie stessa. In questo caso la pressione è data dal rapporto tra la componente normale della forza e la superficie su cui essa agisce:

$$p = \frac{F_n}{S} = \frac{F \cdot \text{sen} \vartheta}{S}$$

dove ϑ è l'angolo compreso tra la direzione della forza e la normale alla superficie.

Nel S.I. l'**unità di misura** della pressione è il **Pascal = N·m⁻²**.

Altre unità di misura della pressione sono:

bar = 10⁵ Pascal **millibar** = 10² Pascal

baria = dine·cm⁻² = 0.1 Pascal

Atmosfera = 760 mmHg = pressione idrostatica esercitata sulla propria base da una colonna di mercurio alta 76 cm.

1 Atm = 760 mmHg = 760 torr = 1.012·10⁵ Pascal = 1.012 bar = 1012

millibar = 1.012·10⁶ barie

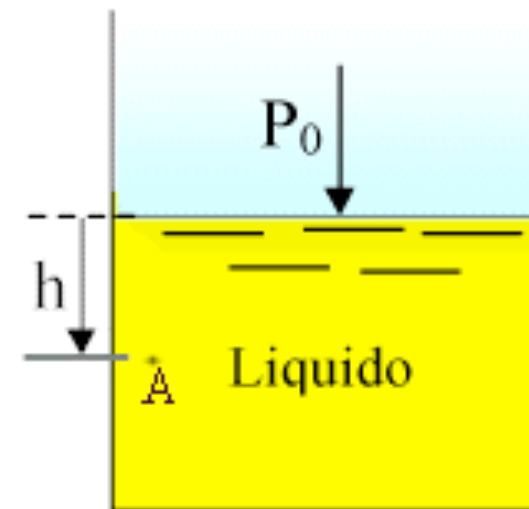
1 mmHg = 1 torr = 133.322 Pascal

Millimetri di mercurio (mmHg) o torr = pressione idrostatica esercitata sulla propria base da una colonna di mercurio alta 1mm.

legge di Stevino:

Alla **profondità h**, la pressione è data dalla **pressione P₀ agente sulla superficie libera** aumentata della **pressione idrostatica** dovuta al peso della colonna di liquido sovrastante.

Se consideriamo una superficie A orientata orizzontalmente, alla profondità h, il peso della colonna di liquido sovrastante (di densità ρ) è dato da:



$$F_p = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g = \rho \cdot A \cdot h \cdot g \rightarrow P_p = \frac{\rho \cdot A \cdot h \cdot g}{A} = \rho \cdot h \cdot g$$

$$P_{120mmHg} = 120 \cdot 10^{-3}(\text{m}) \cdot 13.6 \text{ Kg/m}^3 \cdot 9.8(\text{m/s}^2) \approx 16 \text{ Pascal}$$

$$P_{totale} = p_0 + \rho \cdot g \cdot h$$

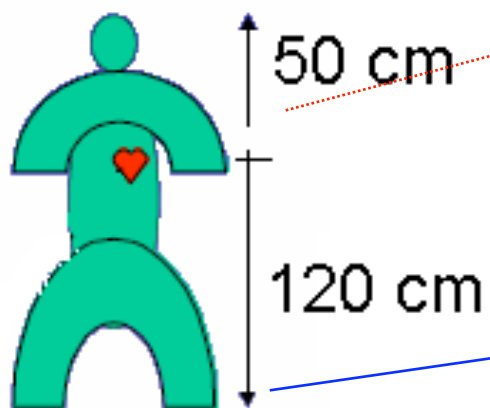
Importante che la pressione sanguigna venga misurata **all'altezza del cuore**.

In caso contrario, bisogna tener conto della pressione idrostatica.

Se l'uomo, è in posizione orizzontale, il dislivello tra il cuore e i possibili punti di misura della pressione (testa, braccio, piedi...) è trascurabile.

$$\begin{aligned} p_{testa} &= p_{cuore} + \rho \cdot g \cdot (h_{cuore} - h_{testa}) = \\ &= p_{cuore} - 1000 \frac{Kg}{m^3} \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 0.5m = p_{cuore} - 5000 \frac{N}{m^2} = p_{cuore} - 37.5mmHg \end{aligned}$$

In un soggetto in **posizione eretta**, un dislivello di circa 50 cm come quello tra il cuore e la testa di un uomo comporta una differenza di pressione idrostatica di circa **40 mm Hg**.



Un dislivello di **120 cm tra cuore e piedi** comporta una differenza di pressione di **88 mmHg**. L'effetto dell' aumentata pressione idrostatica sulle pareti delle vene degli arti inferiori è contrastato dalla presenza di valvole a nido di rondine, dalla contrazione della muscolatura liscia vasale e dall'azione contenitiva dei muscoli.

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h = 1000 \frac{Kg}{m^3} \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 0.1m = 1000 \frac{N}{m^2} = 7.6mmHg$$

Se la pressione sanguigna viene misurata 10 cm sotto l'altezza del cuore, la differenza di pressione idrostatica vale:

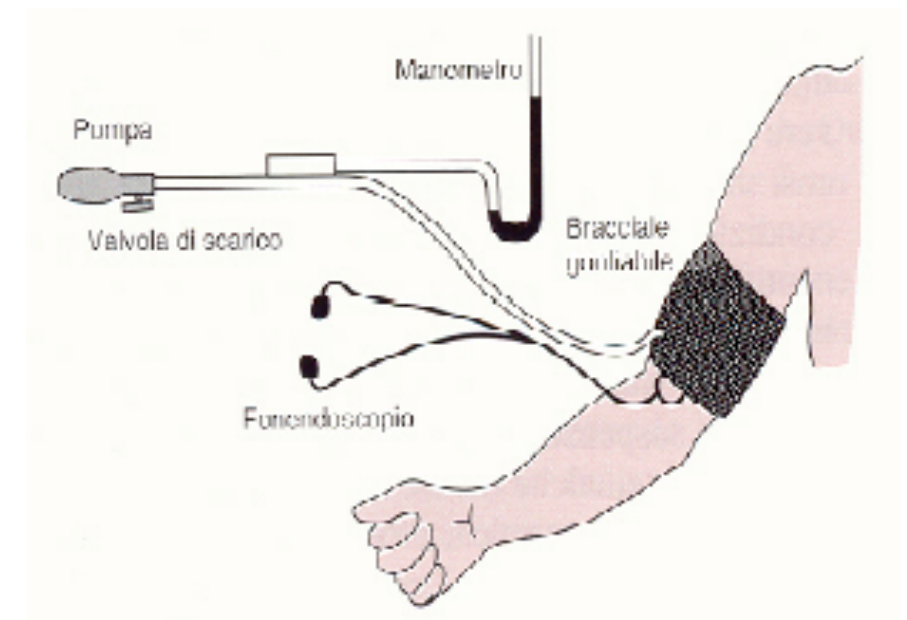
Misura della pressione

La misura della pressione del sangue, **che un liquido reale e pertanto viscoso**, è **relativa** a quella atmosferica: è data dalla differenza di pressione tra l'interno e l'esterno dei vasi (pressione intramurale).

Una pressione di 120 mm Hg corrisponde ad una pressione assoluta di $120+760=880\text{mmHg}$.

Lo strumento normalmente usato per la misura della pressione del sangue è lo **sfigmomanometro**. Un manicotto contenente una camera d'aria gonfiabile viene applicato al braccio .

La camera d'aria, connessa ad un **manometro**, viene gonfiata ad una pressione superiore a quella sistolica, in modo da interrompere il flusso ematico. Applicando uno stetoscopio all'arteria brachiale, il flusso sanguigno, interrotto, non è percettibile.



Diminuendo gradualmente la pressione nella camera d'aria, quando **questa eguaglia la pressione sistolica** i vasi cominciano ad aprirsi e si iniziano ad avvertire i suoni legati alla pulsazione cardiaca. Il sangue ha un **flusso turbolento (rumoroso)**.



Il moto turbolento è caratterizzato dalla presenza di **vortic macroscopici** che rimescolano il liquido tra la zona assiale e la periferia del condotto.

I **vettori velocità** delle singole particelle o molecole che compongono il liquido assumono **direzioni diverse**.

Anche nello stesso punto, i vettori velocità possono cambiare direzione da un istante all'altro.

Nel moto turbolento parte dell'energia cinetica del fluido si trasforma **energia di rotazione dei vortici**, che a sua volta, per effetto dell'attrito viene dissipata sotto forma di calore.

Questa è la **pressione sistolica o pressione massima**.

Diminuendo ulteriormente la pressione nella camera d'aria, l'intensità dei suoni prima cresce, poi decresce fino a scomparire quando i vasi sono completamente liberi e il flusso del **sangue diventa laminare (silenzioso)**.



Il flusso laminare può essere immaginato come il moto di tanti (infiniti) cilindri concentrici di liquido.

Per ogni sezione del condotto, i **vettori velocità** delle particelle sono tutti **paralleli** tra loro (altrimenti il moto sarebbe turbolento).

L'intensità è però massima in corrispondenza dell'asse del condotto (**$v=v_{max}$**), e nulla in corrispondenza delle pareti (**$v=0$**). Se il "cilindretto" cavo più esterno è fermo, quello immediatamente a contatto sarà molto rallentato (dall'attrito), quello ancora più interno un po' meno, ecc.

Questa è la **pressione diastolica** o **pressione minima**.

Lo sfigmomanometro permette di misurare la pressione del sangue in modo non invasivo, con una precisione di pochi mm Hg.

LAVORO DI UNA FORZA

lavoro fatto dalla forza di gravità

Avremo a che **fare col concetto di lavoro** a proposito di diversi argomenti di interesse bio-medico: lavoro motore del cuore, lavoro muscolare, lavoro delle forze elastiche dei vasi, ecc.

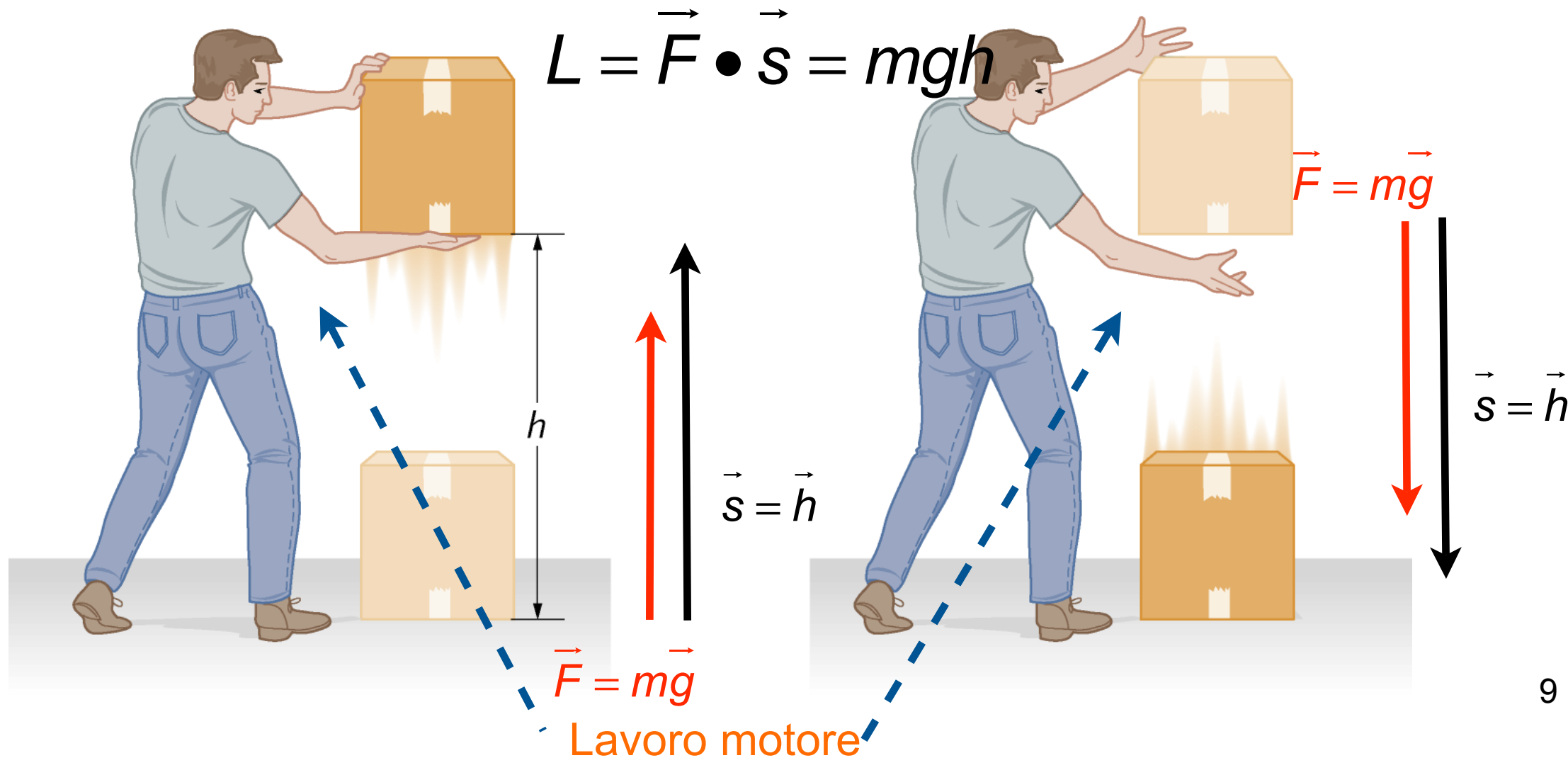
Nel S.I. l'unità di misura è il joule=N·m.

Si dice che una forza compie un lavoro quando il punto di applicazione di una forza si sposta.

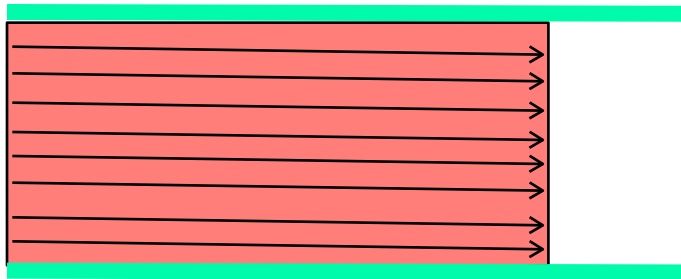
Lavoro fatto dalla persona = mgh

Lavoro fatto dalla gravità = mgh

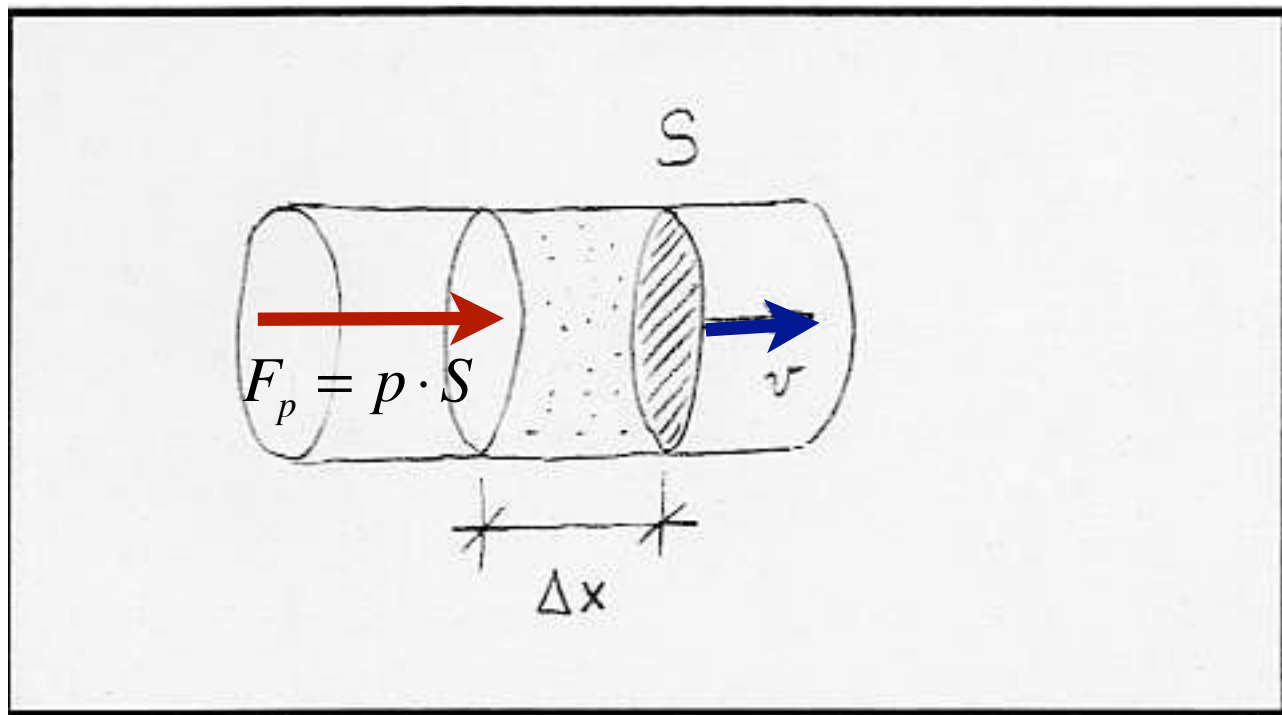
$$L = \vec{F} \bullet \vec{s} = mgh$$



lavoro fatto dalla forza di pressione



Se un liquido ideale è in **moto stazionario**, la **velocità è costante** in tutti i punti di una data **sezione del condotto**, ed è diretta parallelamente all'asse del condotto.



$$L_p = \vec{F}_p \cdot \vec{s} = p \cdot S \cdot \Delta x = p \cdot \underbrace{S \cdot v \cdot \Delta t}_{Q} = p \cdot S \cdot \Delta x = pV = \frac{pm}{\rho}$$

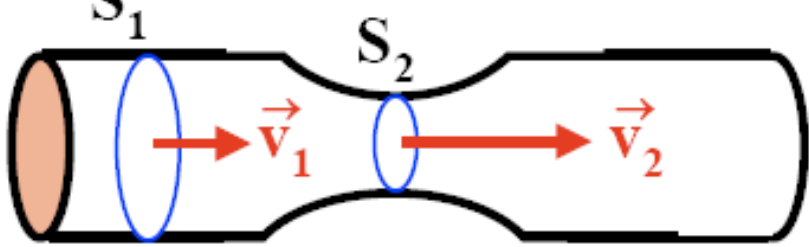
Q=Portata = costante nei fluidi ideali
in ogni sezione del condotto

Il lume di un vaso può restringersi, **stenosi**, per diverse cause: compressione esterna a causa di edemi, ematomi o neoformazioni, formazione di placche aterosclerotiche, ecc.

Se invece per qualche motivo si verifica un aumento della sezione del vaso (**aneurisma**), ad esempio per danni alla parete vasale, si verifica il fenomeno opposto: in corrispondenza della dilatazione **la velocità del sangue diminuisce**, mentre la pressione aumenta, e anche in questo caso si innesca un fenomeno cooperativo che può portare allo sfiancamento e alla rottura del vaso.

Se approssimiamo il flusso del sangue ad un moto stazionario, la portata rimane costante, quindi la velocità del sangue nel punto di strizione sarà maggiore:

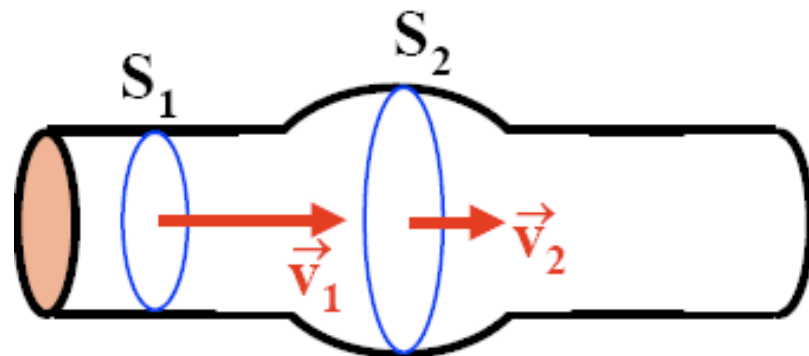
$$Q = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = \text{costante}$$



$$S_1 < S_2$$

$$v_1 > v_2$$

$$p_1 ? p_2$$



$$S_1 > S_2$$

$$v_1 < v_2$$

$$p_1 ? p_2$$

lavoro motore del cuore

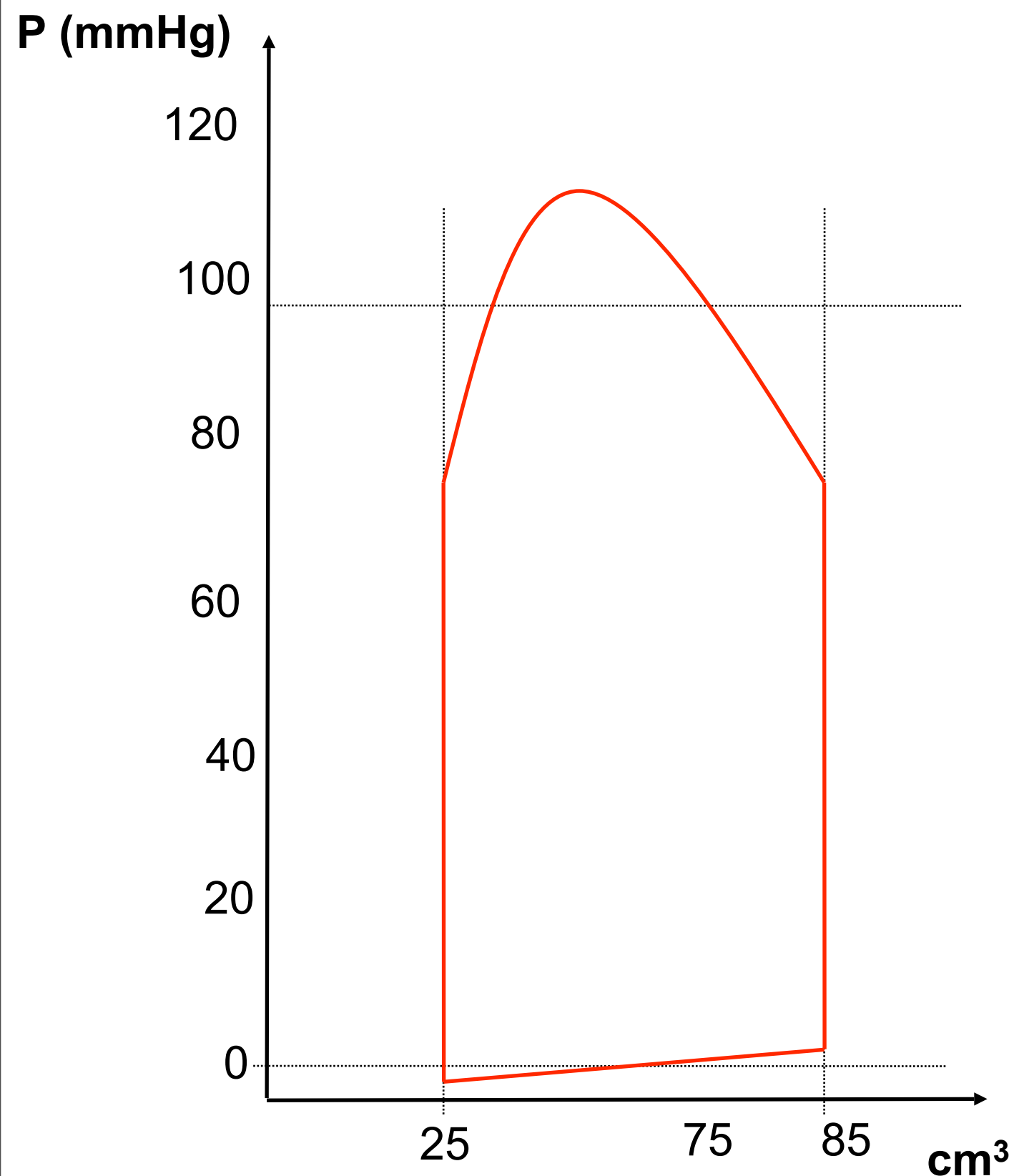
Durante la sistole, il ventricolo sinistro compie lavoro sia per conferire al sangue un'adeguata energia cinetica, sia per aumentarne la pressione.

Il sangue entra nel ventricolo sinistro ad una pressione di 5-10 mm Hg. Durante lo riempimento, il volume del ventricolo passa da circa 25 cm³ a circa 85 cm³, con un modesto aumento di pressione.

In seguito alla contrazione del ventricolo, la pressione sale a 80 mm Hg senza variazioni di volume, poi si ha l'eiezione del sangue, con pressioni che raggiungono i 120 mm Hg per poi ritornare a circa 80 mm Hg (con un volume di 25 cm³).

Quindi cessa la contrazione del ventricolo, e la pressione torna ai valori di 5-10 mm Hg.

Il **lavoro compiuto** dal ventricolo durante un ciclo è dato dall'area del poligono definito dal ciclo stesso in un diagramma pressione-volume, che può essere approssimata a quella di un rettangolo di base 60 cm^3 e altezza 100 mm Hg :



$$L = p_v \cdot \Delta V \quad \text{dove}$$

ΔV è la variazione di volume e p_v

è la pressione ventricolare.

Sperimentalmente, p_v viene determinato misurando la pressione a livello dell'aorta (p_a).

Si ottiene che **il lavoro totale durante una sistole è di circa 0.8 Joule**, di cui solo lo 0.3% viene compiuto per aumentare l'energia cinetica del sangue, mentre la gran parte è spesa per aumentarne la pressione.

Siccome il lavoro fatto dal ventricolo destro ad ogni pulsazione è circa un quinto di quello del ventricolo sinistro, il lavoro totale fatto dal cuore per ogni battito è di circa **1 Joule**, cui corrisponde una **potenza dissipata di 1 Watt**.

• Energia Cinetica



- Qualunque **corpo in movimento** possiede, in virtù del proprio moto, una certa energia cinetica. Tale energia cinetica esprime la capacità del corpo in movimento di **compiere un lavoro**. Per interrompere il moto dobbiamo opporre una forza al moto stesso, cioè dobbiamo compiere un lavoro. Se il corpo in movimento urta un oggetto, il suo moto ne risulta perturbato e il corpo compie un lavoro: può rompere l'oggetto, produrre calore, ecc.

- L'**energia cinetica E_c** di un corpo di massa **m** che si muova con velocità **v** è data da:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$



Se la velocità del corpo non è costante, anche l'energia cinetica del corpo varierà nel tempo (non la massa!): se **v1** è la velocità al tempo **t1** e **v2** la velocità al tempo **t2**, l'energia cinetica sarà:

$$E_{1c} = \frac{1}{2}mv_1^2 \quad \text{al tempo } t_1 \text{ e} \quad E_{2c} = \frac{1}{2}mv_2^2 \quad \text{al tempo } t_2$$

La corrispondente **variazione di energia cinetica** sarà:

$$\Delta E_c = E_{2c} - E_{1c} = \frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2)$$



TEOREMA DELL'ENERGIA CINETICA

<http://www.youtube.com/watch?v=zhX01toLjZs>

Consideriamo un corpo di massa m , inizialmente fermo. Se sul corpo agisce una forza F , il corpo acquisterà un'accelerazione $a=F/m$, **cioè la velocità del corpo e di conseguenza la sua energia cinetica cambieranno nel tempo.**

Per il principio di conservazione dell'energia, la variazione di energia cinetica del corpo deve essere uguale al lavoro compiuto dalla forza F che lo ha messo in moto.

Nella realtà, altre forze entrano in gioco, come le forze di attrito che si oppongono al moto (lavoro resistente), producendo un riscaldamento, e cioè energia termica.

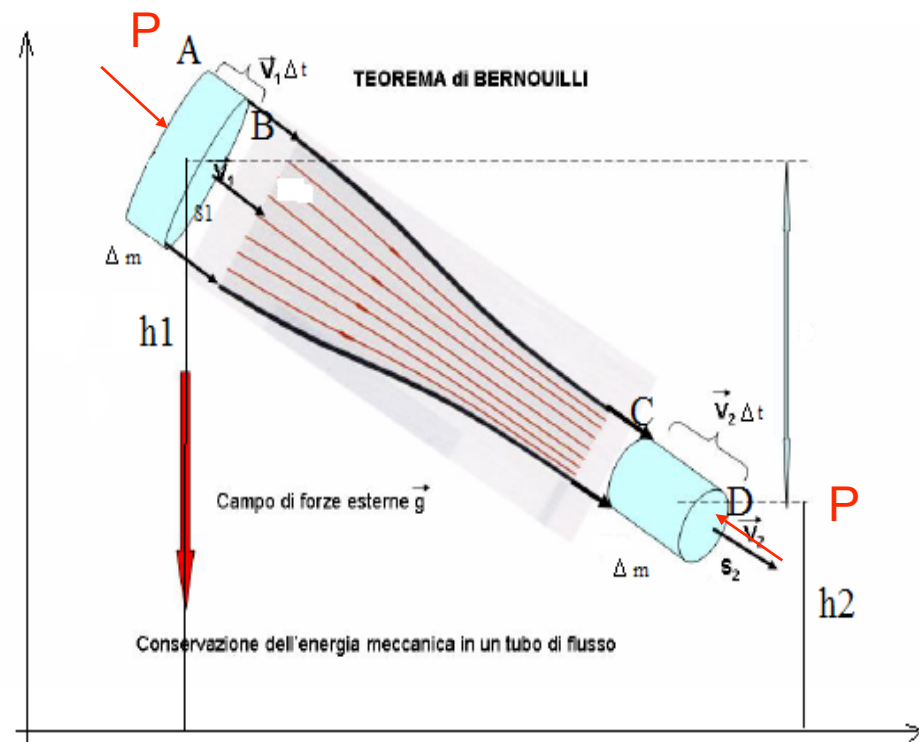
Più in generale, il lavoro compiuto dalla risultante delle forze applicate ad un punto materiale lungo un arco di traiettoria AB è uguale alla variazione dell'energia cinetica subita dalla particella nel passaggio da A a B .

$$L = E_{C_B} - E_{C_A}$$

Il lavoro è sempre indice di un **trasferimento di energia** da una forma ad un'altra

Si basa fondamentalmente sul **teorema di Bernoulli**.

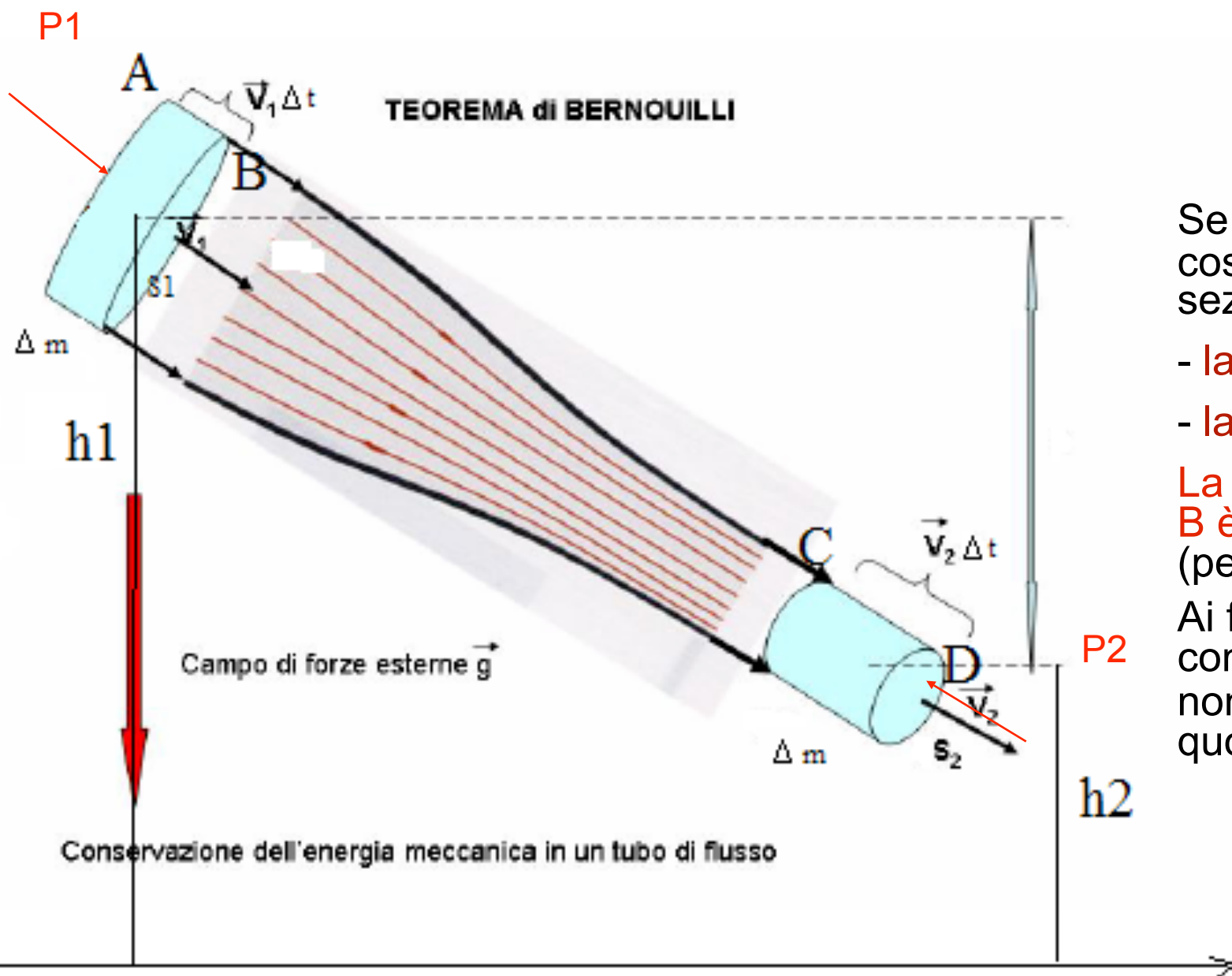
Il teorema di Bernoulli rappresenta l'**estensione ai fluidi** (ideali, in moto stazionario e irrotazionale - vedi approfondimenti -) **del principio di conservazione dell'energia**).



Per il **teorema dell'energia cinetica**, il lavoro totale compiuto dalle forze che hanno agito sulla "masserella" di liquido deve essere uguale alla variazione di energia cinetica. Il teorema di Bernoulli si dimostra eguagliando il lavoro totale compiuto dalle forze di gravità e pressione alla variazione di energia cinetica.

Il teorema di Bernoulli permette di interpretare importanti aspetti della circolazione sanguigna nei **grandi vasi**. Es: Stenosi e aneurisma

Dal teorema di Bernoulli si possono inoltre ricavare le più importanti leggi della fluidostatica, come il principio di Pascal e la legge di Stevino.



Se Δt è abbastanza piccolo da considerare costante la velocità tra le sezioni A e B ($\mathbf{v}_1$) e tra le sezioni C e D ($\mathbf{v}_2$):

- la distanza tra A e B sarà $\Delta x_1 = \mathbf{v}_1 \cdot \Delta t$;
- la distanza tra C e D sarà $\Delta x_2 = \mathbf{v}_2 \cdot \Delta t$.

La massa Δm di liquido compresa tra le sezioni A e B è uguale a quella compresa tra le sezioni B e C (perché il liquido è incompressibile)

Ai fini del lavoro compiuto dalle forze di gravità, è come se il liquido compreso tra le sezioni B e C non si fosse mosso, e Δm si fosse spostato dalla quota h_1 alla quota h_2 :

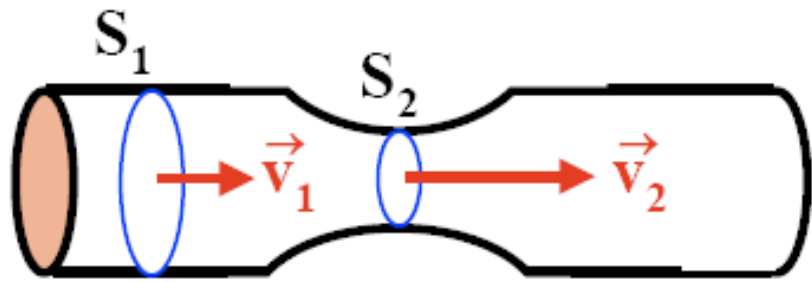
$$L_T = L_g + L_p = \Delta E_c$$

$$L_g = \Delta m \cdot g \cdot h = \Delta m \cdot g \cdot (h_1 - h_2)$$

$$L_p = L_{p_1} + L_{p_2} = F_{p_1} \cdot \Delta x_1 - F_{p_2} \cdot \Delta x_2 = p_1 \cdot S_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t - p_2 \cdot S_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t = \frac{\Delta m \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}$$

$$L_T = L_g + L_p = \Delta m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + \frac{\Delta m \cdot (p_1 - p_2)}{\rho} = \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot (v_2^2 - v_1^2)$$

$$Q = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = \text{constante}$$



$$S_1 > S_2$$

$$v_1 < v_2$$

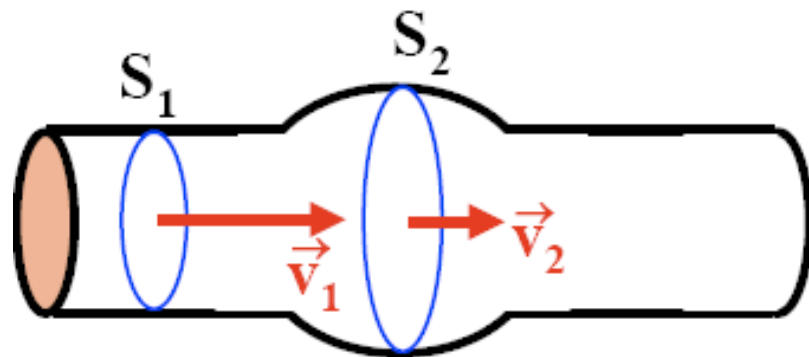
$$p_1 > p_2$$

$$L_T = L_g + L_p = \Delta m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + \frac{\Delta m \cdot (p_1 - p_2)}{\rho} = \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot (v_2^2 - v_1^2)$$

$$h_1 = h_2$$

$$L_T = \frac{\Delta m \cdot (p_1 - p_2)}{\rho} = \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot (v_2^2 - v_1^2) =$$

$$\frac{(p_1 - p_2)}{\rho} = \frac{1}{2} \cdot (v_2^2 - v_1^2)$$



$$S_1 < S_2$$

$$v_1 > v_2$$

$$p_1 < p_2$$

Teorema di Bernoulli:

Nel moto dei fluidi reali sono coinvolte **forze non conservative (attrito)**, cosicché il teorema di Bernoulli non è più applicabile: **una parte dell'energia meccanica viene trasformata in energia termica.**

Per far scorrere un liquido reale con velocità costante in un condotto orizzontale, bisogna applicare agli estremi del condotto due pressioni diverse, per poter vincere la forza di attrito.

Quindi, per ottenere una portata Q costante bisogna applicare una **differenza di pressione** $\Delta p = p_1 - p_2$ alle due estremità.

La pressione premente p_1 (quella le cui forze agiscono nella direzione del moto) deve essere maggiore della pressione p_2 resistente a valle.

La resistenza R del condotto è data dal rapporto:

$$R = \frac{\Delta p}{Q} \quad \text{che è formalmente analogo al rapporto}$$

Nel moto laminare, **la resistenza è**: direttamente proporzionale al

coefficiente di viscosità η del liquido;

direttamente proporzionale alla lunghezza l del condotto;

inversamente proporzionale alla quarta potenza del raggio r del condotto

$$R = \frac{8 \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot r^4} \quad \text{Da cui si ricava che la portata è:}$$

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

(legge di Poiseuille)

Il rapporto $\frac{\Delta p}{1}$, cioè la differenza di pressione che occorre applicare, per unità di

lunghezza del condotto, per mantenere costante la portata, prende **il nome di perdita di carico**.

Implicazioni fisiologiche.

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

La **resistenza** è direttamente proporzionale al coefficiente di viscosità. **Un aumento del valore ematocrito fa aumentare la viscosità e quindi la resistenza:** il cuore deve compiere un lavoro maggiore per spingere il sangue nei distretti periferici.

La resistenza è anche inversamente proporzionale alla quarta potenza del raggio, quindi è proporzionalmente molto alta nei piccoli vasi rispetto ai grandi.

Dalla legge di Poiseuille si può ricavare che:

$$\frac{dQ}{Q} = 4 \cdot \frac{dr}{r}$$

Ad ogni variazione percentuale del raggio di un vaso corrisponde una variazione percentuale della portata quattro volte maggiore.

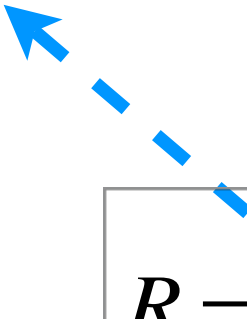
Per esempio, un farmaco vasodilatatore che aumenti del 10% il calibro del vaso fa aumentare del 40% la portata.

Viceversa, è possibile somministrare farmaci vasocostrittori e ridurre di molto l'afflusso di sangue nei distretti periferici anche con un modesto restringimento del calibro dei vasi.

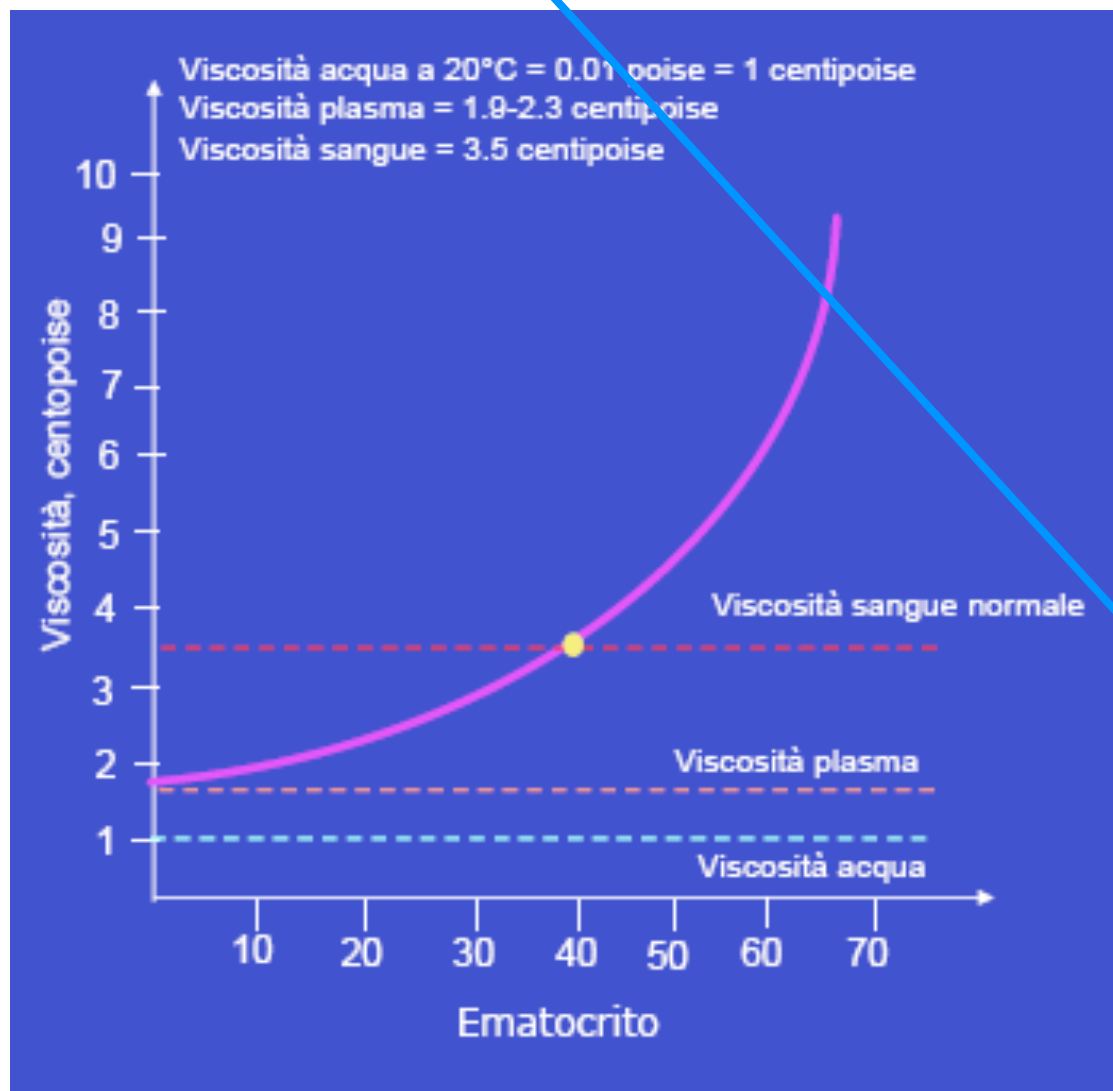
La distribuzione del sangue alle diverse parti del corpo è controllata soprattutto dalle arteriole, le cui pareti contengono muscolatura liscia.

Il controllo dello stato di contrazione di questa muscolatura, operato da impulsi nervosi od ormoni circolanti, porta a variazioni del calibro di questi vasi, con conseguente variazione di resistenza al flusso.

Rimanendo costanti gli altri fattori, una riduzione a metà del calibro, determinerà per esempio una diminuzione del flusso ad 1/16 del suo valore originale.


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

La **viscosità** del sangue dipende fortemente dalla concentrazione di eritrociti: è praticamente costante fino a valori di ematocrito intorno al 45%, poi aumenta bruscamente.



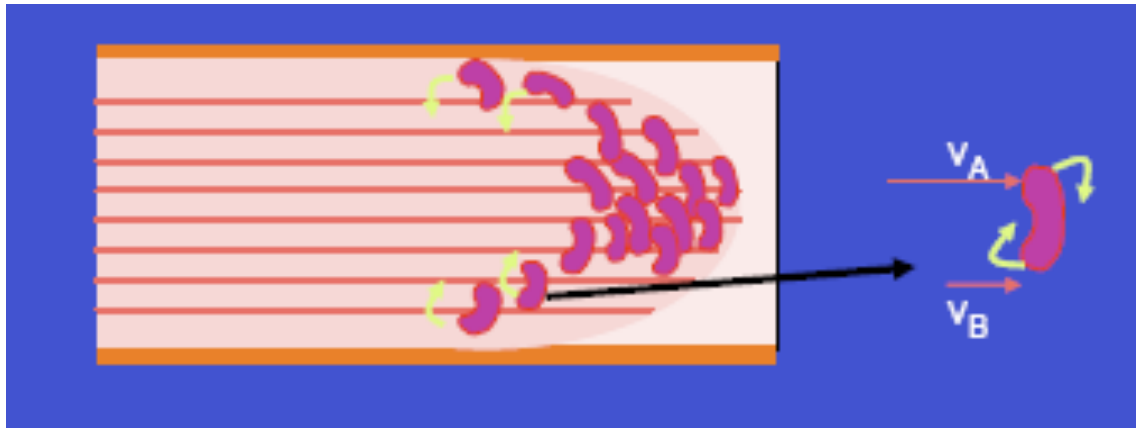
Una delle conseguenze è il drastico aumento del lavoro motore richiesto al cuore per mantenere il circolo.

In caso di anemia, invece, aumenta la portata cardiaca, perché la pressione media rimane più o meno costante.

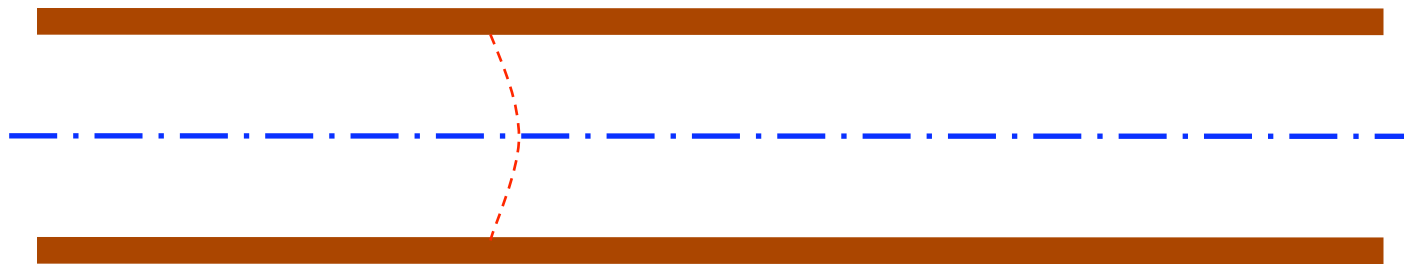
Anche le **basse temperature** fanno aumentare la viscosità del sangue, per cui la circolazione alterata a causa di un eccessivo raffreddamento delle estremità è coinvolta nella patogenesi dei danni da congelamento.

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

Accumulo assiale dei globuli rossi. Gli eritrociti tendono a concentrarsi lungo l'asse dei vasi, mentre la loro concentrazione è ridotta in prossimità delle pareti. Per questo motivo, nei capillari il valore di ematocrito è inferiore rispetto agli altri vasi (di circa un quarto).

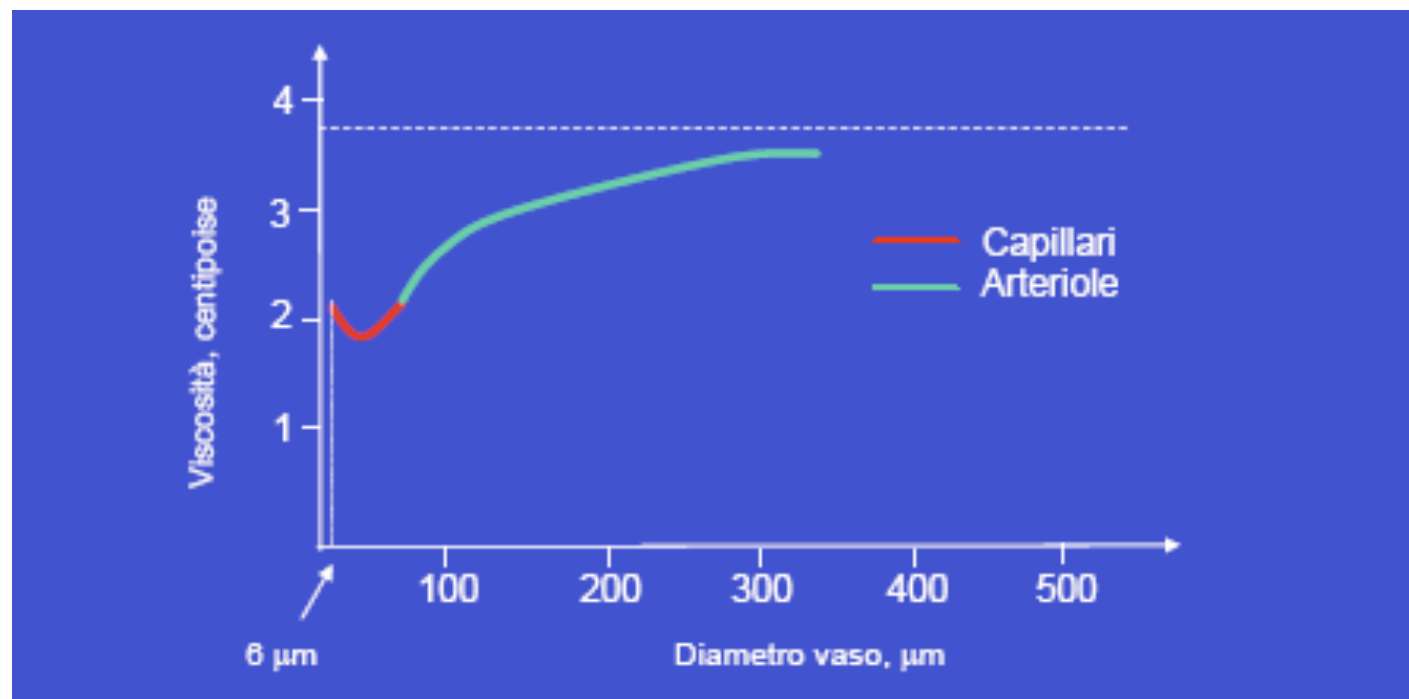


L'**accumulo assiale dei globuli rossi** determina una diminuzione della viscosità in prossimità delle pareti vasali (minore attrito) e un aumento in prossimità dell'asse (maggiore attrito).

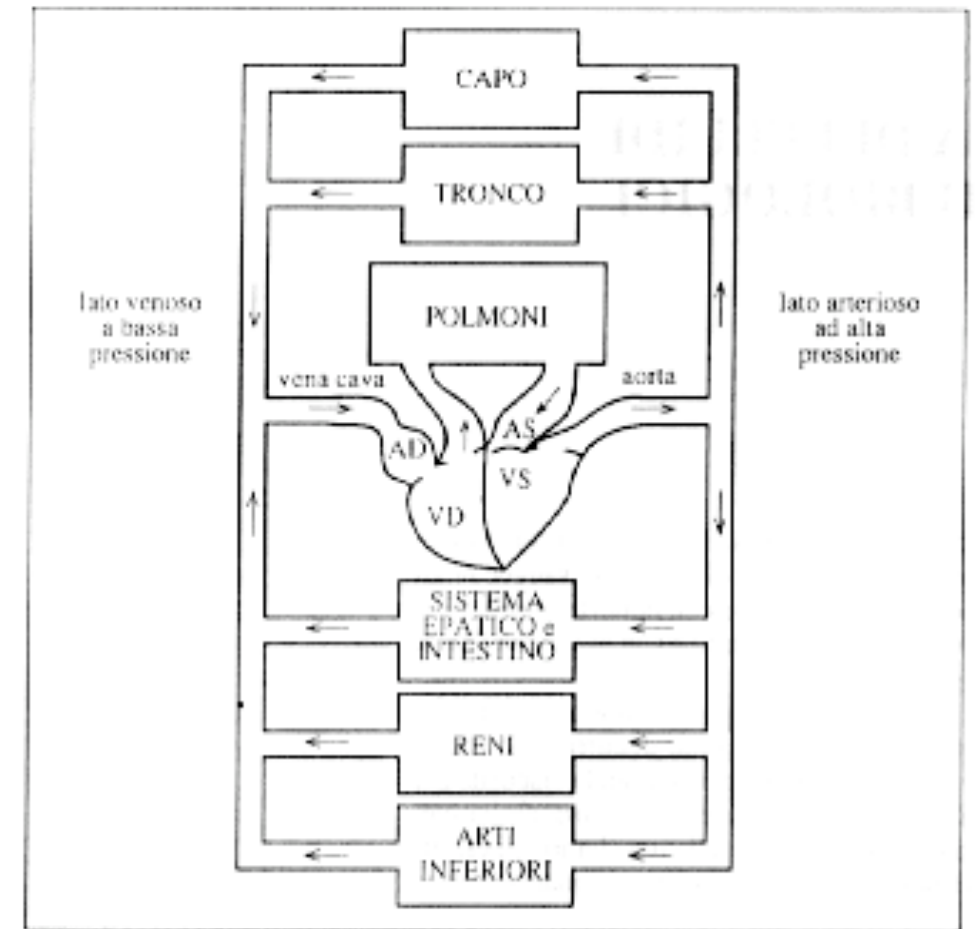
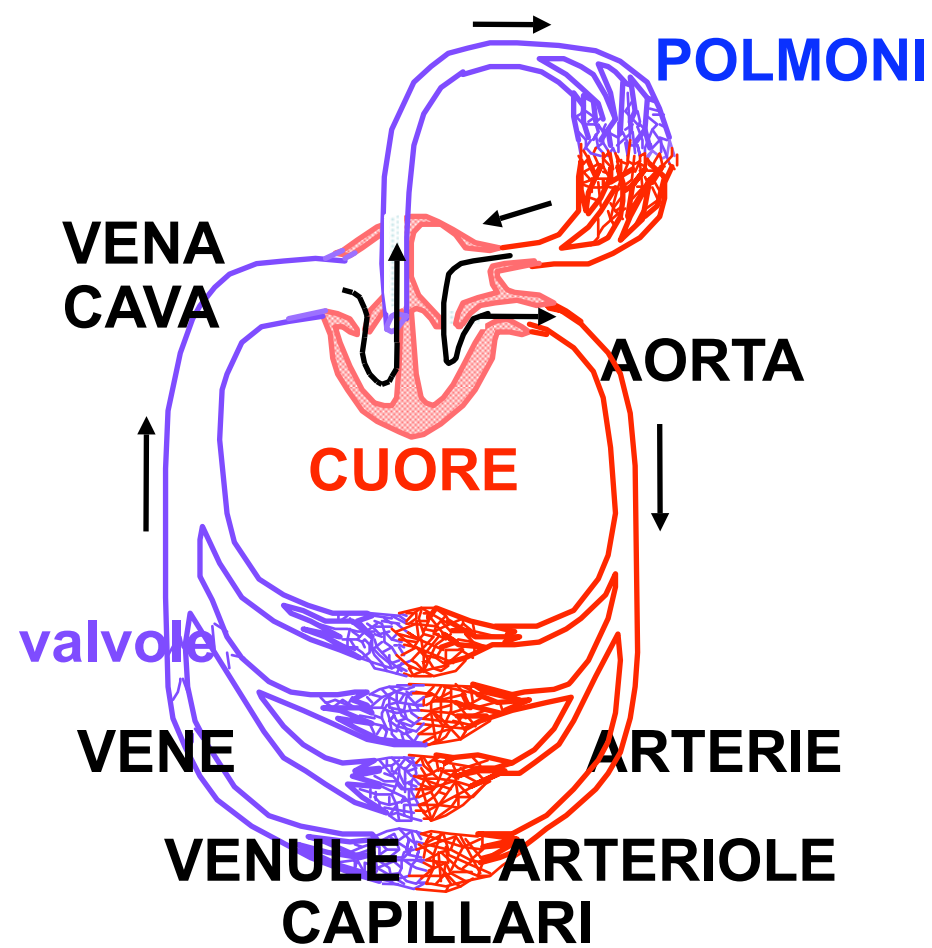


Nel complesso, il risultato è una minore viscosità del sangue e un appiattimento del profilo delle velocità lungo la sezione del vaso.

Un'altra anomalia del comportamento viscoso del sangue è data dall'**effetto sigma**: quando il raggio del vaso è dell'ordine di poche centinaia di μm , corrispondente all'ingombro di pochi eritrociti, il moto del sangue non può più essere descritto come un moto laminare, e **la viscosità apparente è inferiore** a quella che ci si aspetterebbe sulla base della legge di Poiseuille.

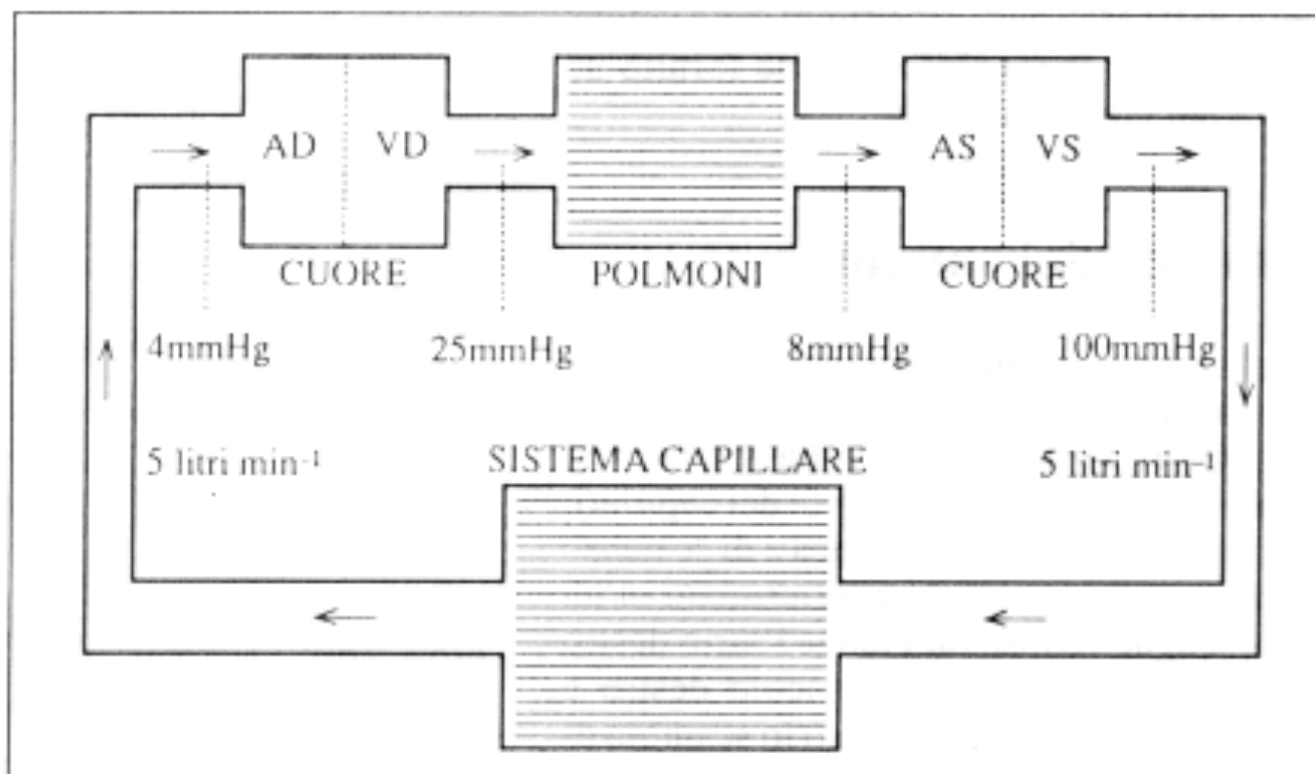


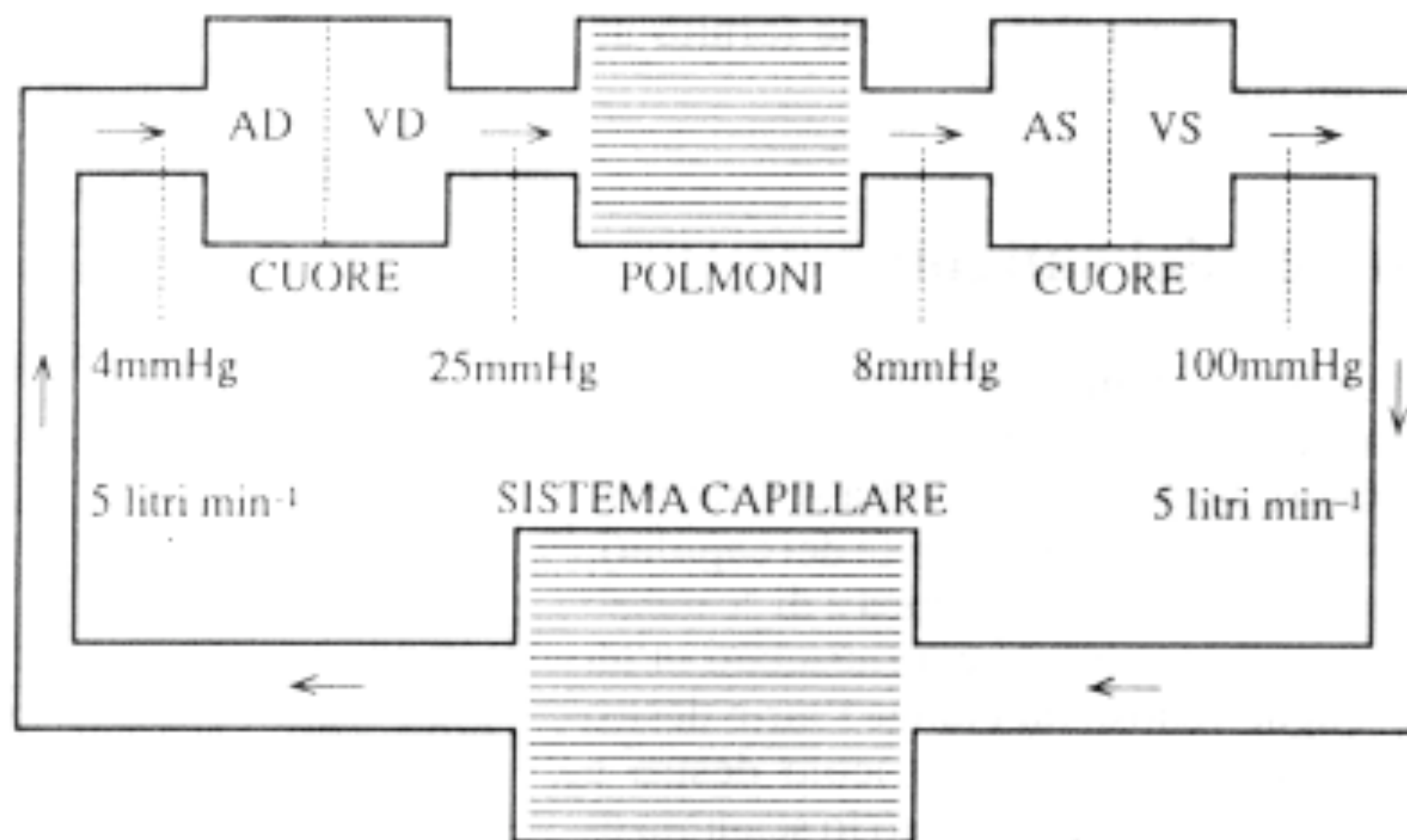
LA CIRCOLAZIONE DEL SANGUE

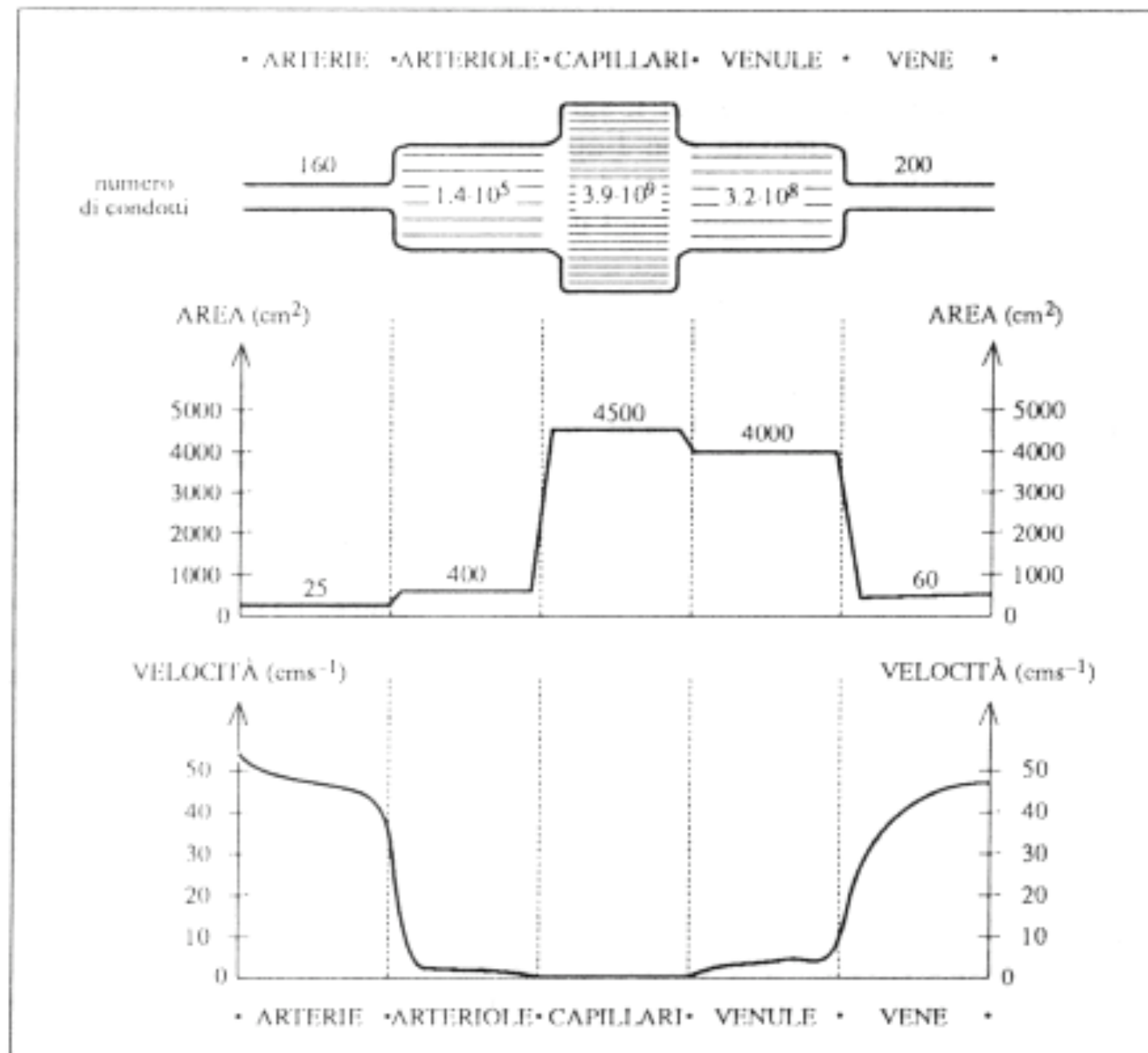


Due pompe parallele....
Di cui quella sinistra ad alta
pressione e quella destra
a bassa pressione (ca 1/5)

Che lavorano in serie.....producendo la
medesima portata







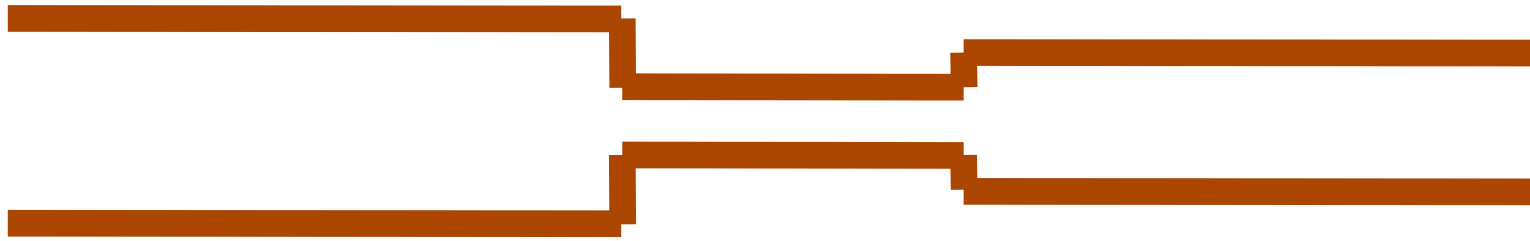
La portata rimane costante anche quando un vaso presenta delle **diramazioni**. Se la sezione totale delle diramazioni fosse uguale a quella del vaso, la velocità del sangue rimarrebbe la stessa.

In realtà, la sezione totale delle diramazioni è spesso molto maggiore di quella del vaso principale, quindi **la velocità è minore**.

La **sezione totale dei capillari** è circa 500 volte maggiore di quella dell'aorta, dove la velocità media del sangue è di 0.3 m/s (30 cm/s), e la velocità scende a $6 \cdot 10^{-3}$ m/s (0.06 cm/s).

Per le resistenze idrodinamiche, come vedremo anche per le resistenze elettriche, la resistenza

totale di due o più condotti in serie è uguale alla somma delle singole resistenze:

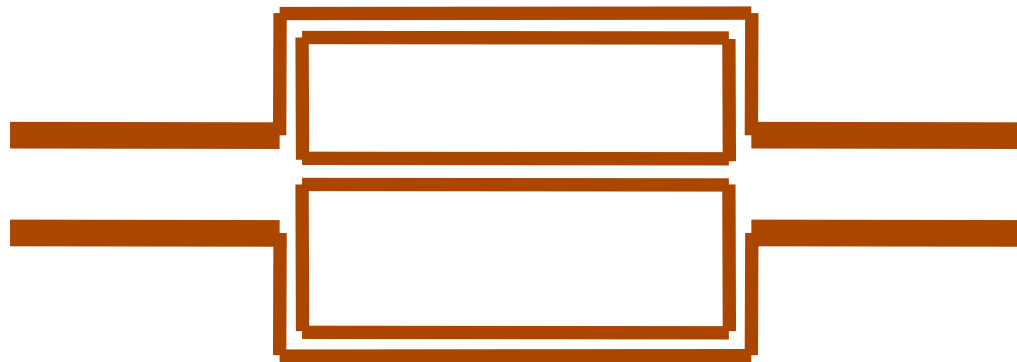


$$R_{\text{tot}} = R_1 + R_2 + R_3$$

Se i condotti sono invece in parallelo, come avviene a livello della circolazione capillare:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R$$

,



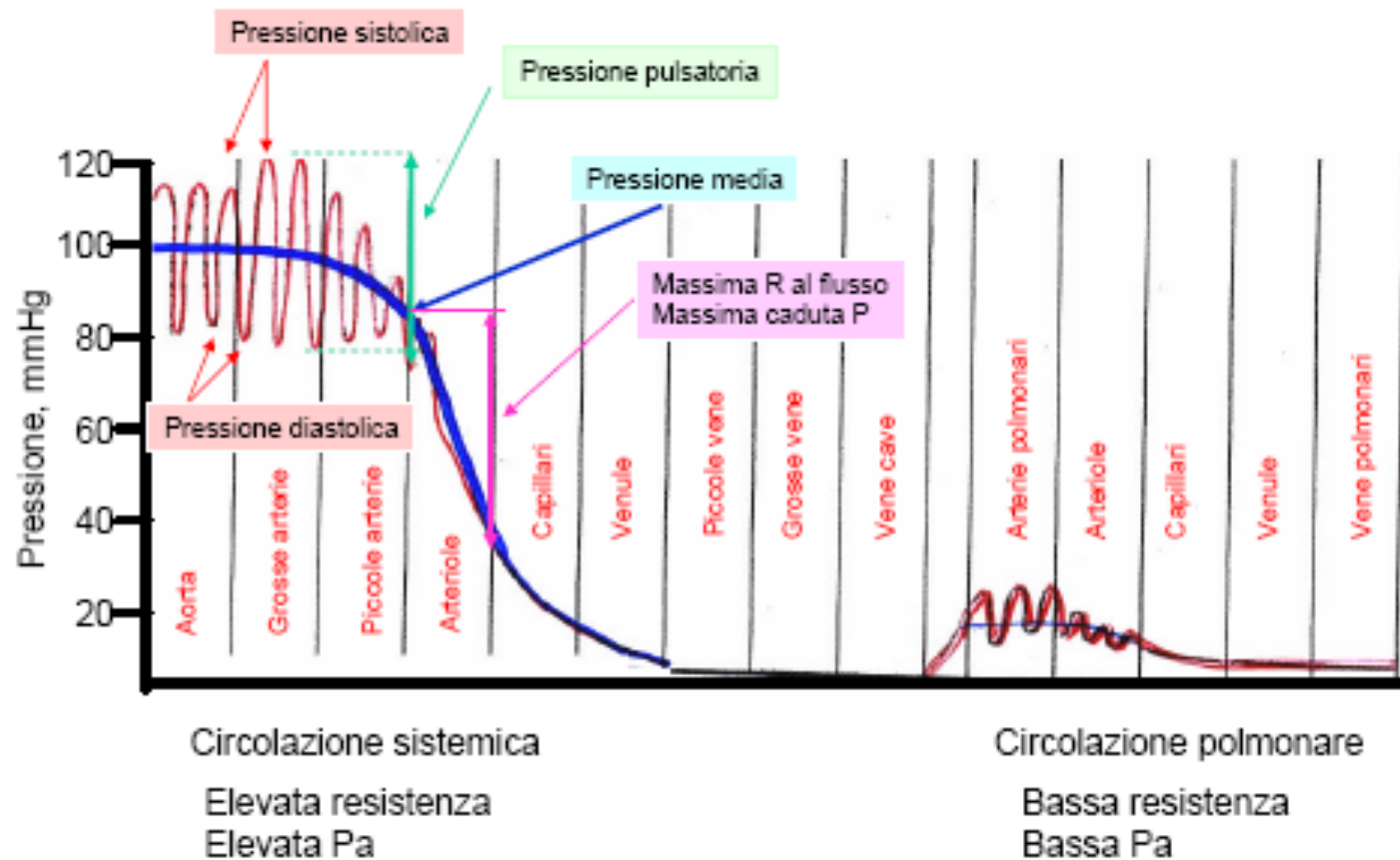
In questo caso la resistenza totale è sempre inferiore a quella dei singoli condotti. Infatti, se

$$R_1 = R_2 = R_3 = R$$

$$\frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Rightarrow \frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{3}{R} \Rightarrow R_{\text{tot}} = \frac{1}{3} R$$

$$\frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Questo compensa il forte aumento delle resistenze dovuto alla diminuzione del raggio



Il sangue esce dal ventricolo sinistro con una pressione media di 100 mm Hg, che si riduce progressivamente, a causa delle resistenze periferiche, a pochi mm Hg all'entrata nell'atrio destro.

La **massima caduta di pressione** si ha a livello delle arteriole, che individualmente hanno resistenze inferiori ai capillari, ma essendo in numero molto inferiore danno una resistenza totale più alta (**resistenze in parallelo**).

La contrattilità della parete delle arteriole permette di variare le resistenze (**vasocostrizione e vasodilatazione**), in modo da consentire, in condizioni di aumentata necessità di sangue, una maggiore portata senza implicare un aumento notevole dello sforzo cardiaco.

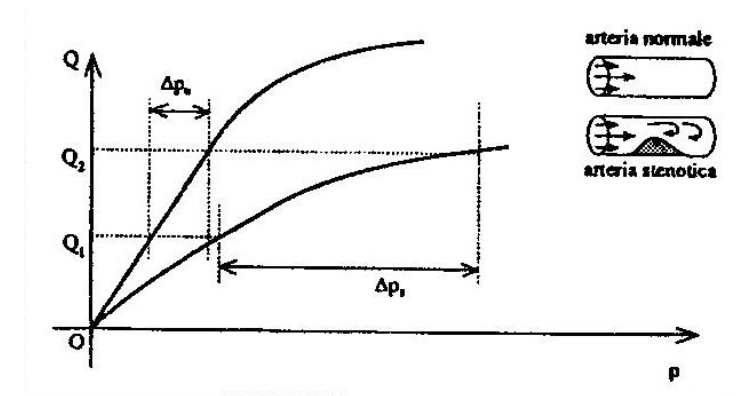
I fluidi reali possono presentare un **moto laminare**, descritto dalla legge di Poiseuille, solo se la velocità non è troppo elevata. In caso contrario, il moto diventa **turbolento** vorticoso.

Nel moto **turbolento** la legge di Poiseuille

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

non è più valida: a parità di differenza di pressione applicata agli estremi del condotto, la variazione di portata è molto minore

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



Il **passaggio** dal regime laminare a quello turbolento avviene ad una **velocità critica**

$$v_c = R \cdot \frac{\eta}{\rho \cdot r}$$

dove η è il coefficiente d'attrito del liquido, ρ la densità, r il raggio del condotto e R il numero di Reynolds.

Il numero di Reynolds

$$R = v \cdot \frac{\rho \cdot r}{\eta}$$

è un numero puro, e dipende anche dalla **forma del condotto**: brusche variazioni di sezione o di direzione facilitano il passaggio al regime turbolento (diventa minore).

Per fluidi viscosi in condotti rettilinei il passaggio dal moto laminare a quello turbolento avviene per valori di circa 1000.

Per il sangue, il valore è $= 970 \pm 80$, da cui si ricava la velocità critica:

$$v_c = R \cdot \frac{\eta}{\rho \cdot r} = 970 \cdot \frac{0.00475}{1060 \cdot r}$$

Per l'aorta ($r = 1 \text{ cm}$), la velocità critica è di circa $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, di poco superiore alla velocità media del sangue ($0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Tale limite viene superato durante l'attività fisica intensa.

Anche a riposo, il moto del sangue in corrispondenza delle valvole cardiache è turbolento, originando così i **rumori cardiaci**.

Si ha moto turbolento:

- *Nel primo tratto dell'aorta durante la fase di eiezione rapida e per aumenti della gittata cardiaca (esercizio fisico). L'aumento di gittata cardiaca determina infatti un aumento della velocità.*
- *Per stenosi di un vaso, a valle della stenosi.*
- *Nell'anemia, dove si verifica la riduzione della viscosità η per diminuzione dell'Ht, e l'aumento di v per aumento di gittata cardiaca.*

Il circolo polmonare e quello sistemico sono **in serie** tra loro.

La **resistenza idrodinamica** complessiva è molto maggiore nel circolo sistemico che in quello polmonare, quindi il ventricolo sinistro deve esercitare una pressione motrice superiore al ventricolo destro.

L'uomo ha in media 5-6 litri di sangue (circa il 7% del peso corporeo). La **portata media** è di circa 5 litri al minuto.

Poiché il sangue è incomprimibile **la portata deve essere costante**:

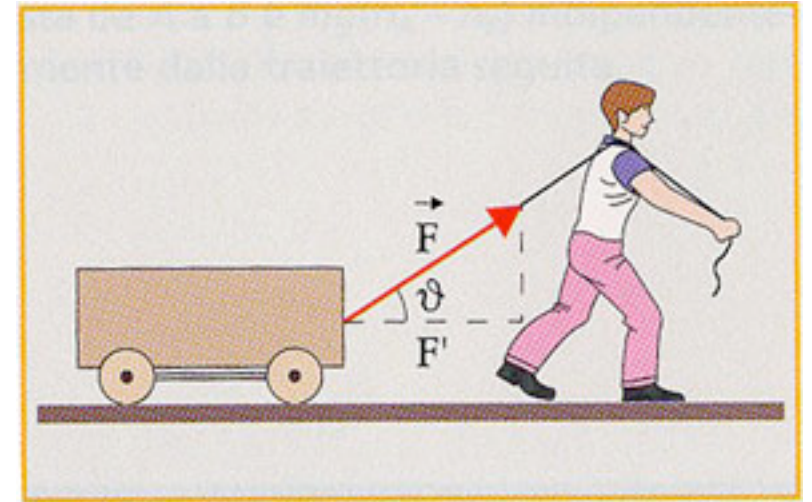
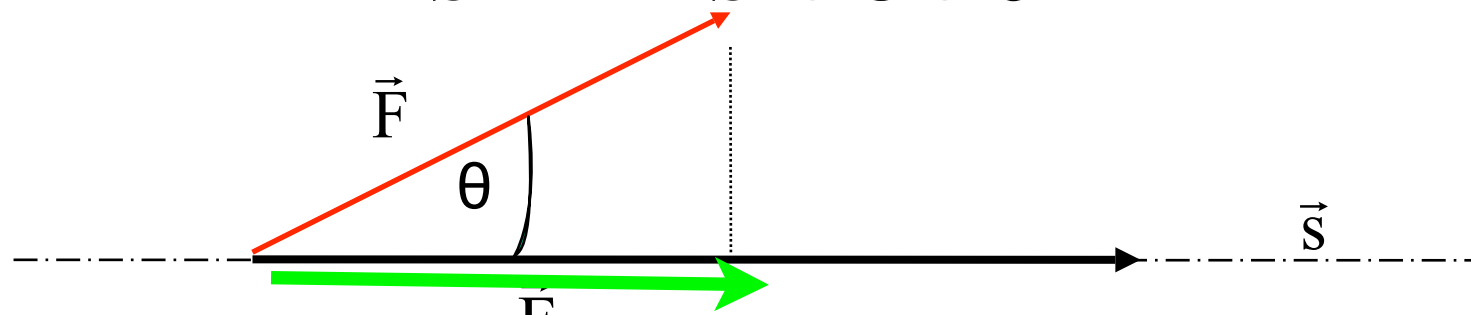
$$Q = S \cdot v_m = \text{costante}$$

quindi la velocità media del sangue dipende solo dalla sezione del vaso (approssimativamente: in realtà la parete dei vasi è deformabile).

Approfondimento - lavoro di una forza

Il lavoro e' il prodotto (scalare) della forza che agisce su un corpo per lo spostamento prodotto:

$$L = \vec{F} \cdot \vec{s} = Ls \cos \theta$$



$\vec{F}_s$ = **componente** del vettore lungo la direzione dello spostamento

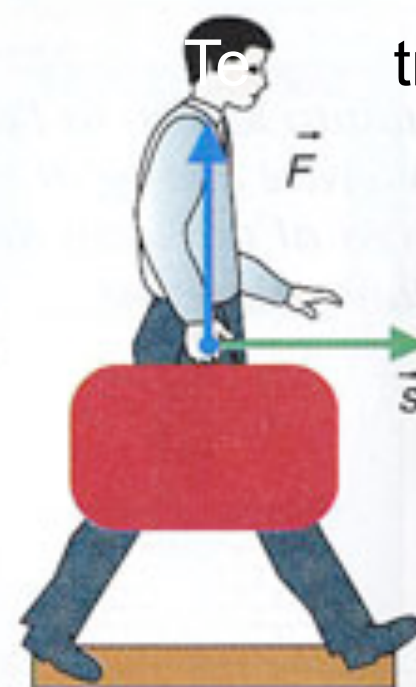
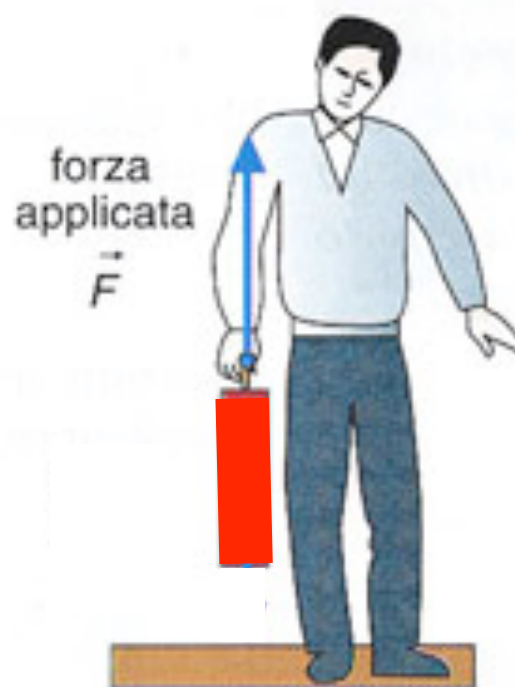
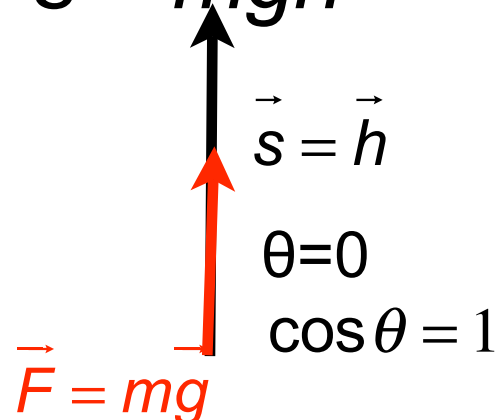
Se l'angolo è acuto il lavoro è positivo (**motore**), se è ottuso il lavoro è negativo (**resistente**).

Lavoro della forza peso

$$L = \vec{F} \cdot \vec{s} = m\vec{g} \cdot \vec{s} = mgs \cos \theta$$

Es.: solleviamo una valigia

$$L = \vec{F} \cdot \vec{s} = mgh$$



trasportiamo la valigia parallela al terreno.

$$\begin{aligned} \vec{F} &= m\vec{g} \\ \theta &= 90 = \frac{\pi}{2} \\ \cos \theta &= 0 \\ \vec{s} &= \vec{l} \\ L &= \vec{F} \cdot \vec{s} = 0 \end{aligned}$$