
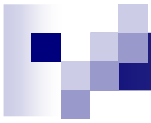


Le leggi dell'idrostatica e dell'idrodinamica permettono di comprendere i principi fisici che sono alla base del funzionamento del sistema cardio-vascolare, anche se le caratteristiche particolari di questo sistema non consentono una descrizione quantitativa precisa.

$$F = \Delta P / R$$

- 
- Il sistema cardio-circolatorio è più complesso:
 - Condotti elastici e non rigidi
 - Tratti (capillari) che consentono la fuoriuscita e l'ingresso di liquido
 - Una pompa con attività intermittente a ritmo variabile
 - Variazioni della pressione esterna ai condotti da distretto a distretto e da momento a momento, variazioni che, essendo i condotti elastici, modificano il calibro del condotto
 - Il sangue non è un fluido newtoniano, cioè è caratterizzato da una viscosità che varia al variare della velocità



$$S = 1\text{cm}^2$$

FLUSSO e VELOCITA' DI FLUSSO



A 1cm B
Tempo = 1 s

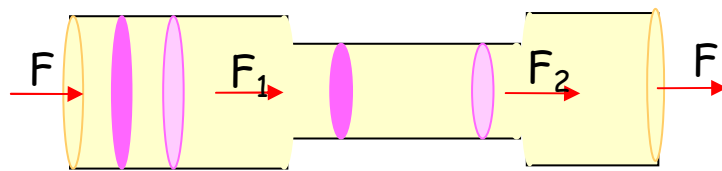
$$V = F/A$$

$$F = V \cdot A = (1 \text{ cm/sec}) \cdot 1 \text{ cm}^2 = 1 \text{ cm}^3 / \text{sec}$$

Secondo la legge della continuità, in un sistema di tubi a sezione diversa, il flusso deve essere costante in qualsiasi sezione totale, indipendentemente dalla sezione del singolo tubo. Questo comporta variazioni della velocità in funzione della sezione trasversale.

$$S = 1\text{cm}^2$$

$$S = 0.25 \text{ cm}^2$$



1cm/s

4 cm/s

$$F_1 = 1\text{cm}^3/\text{s}$$

$$V_1 = 1\text{cm}^3/\text{s} / 1\text{cm}^2$$

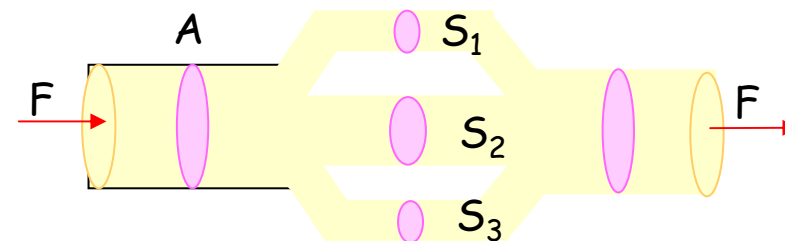
$$V_1 = 1\text{cm/s}$$

$$F_2 = 1\text{cm}^3/\text{s}$$

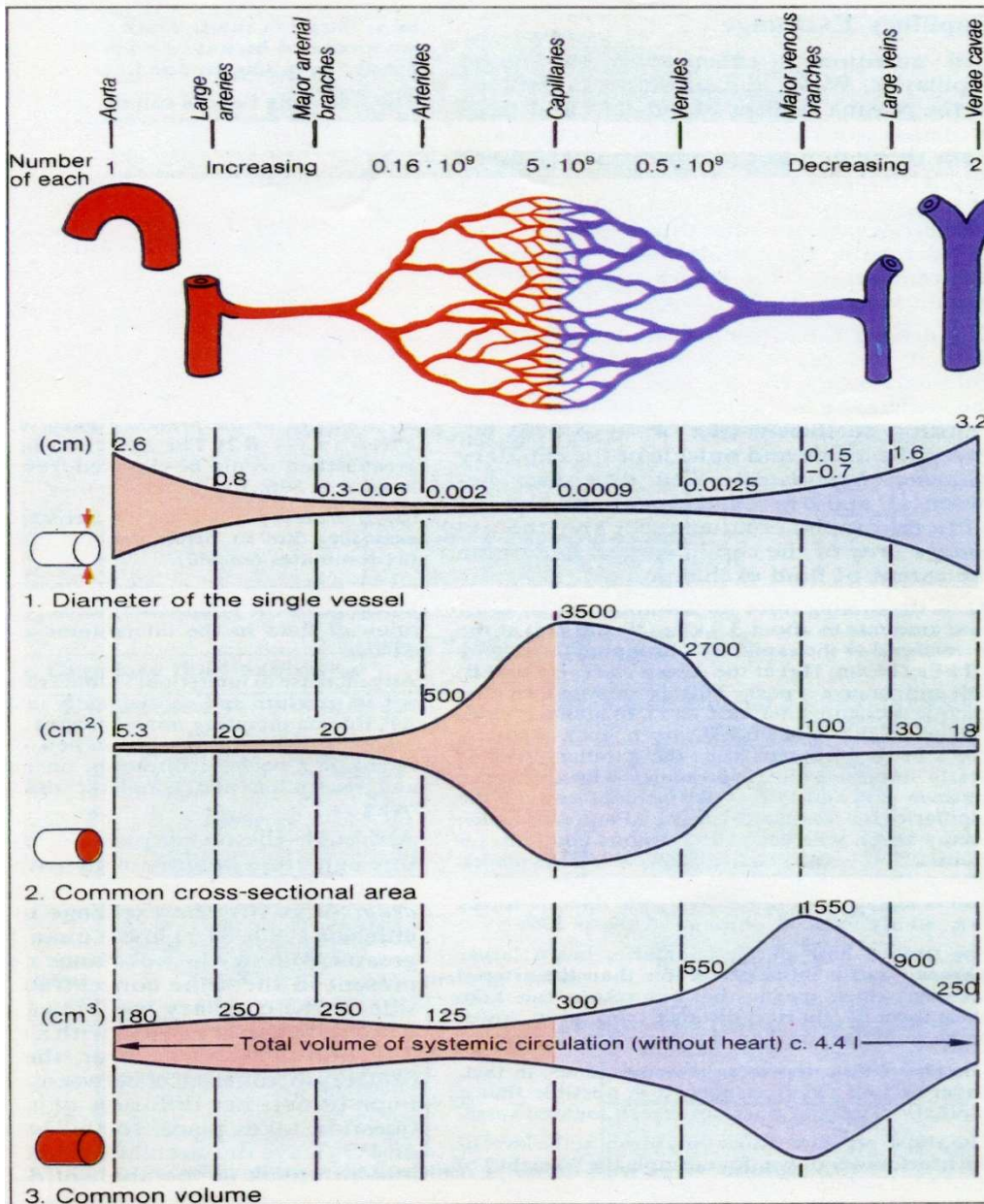
$$V_2 = 1\text{cm}^3/\text{s} / 0.25 \text{ cm}^2$$

$$V_2 = 4\text{cm/s}$$

B



In B la sezione trasversale attraversata dal flusso è la somma di $S_1 + S_2 + S_3$ quindi la v risulta minore che in A



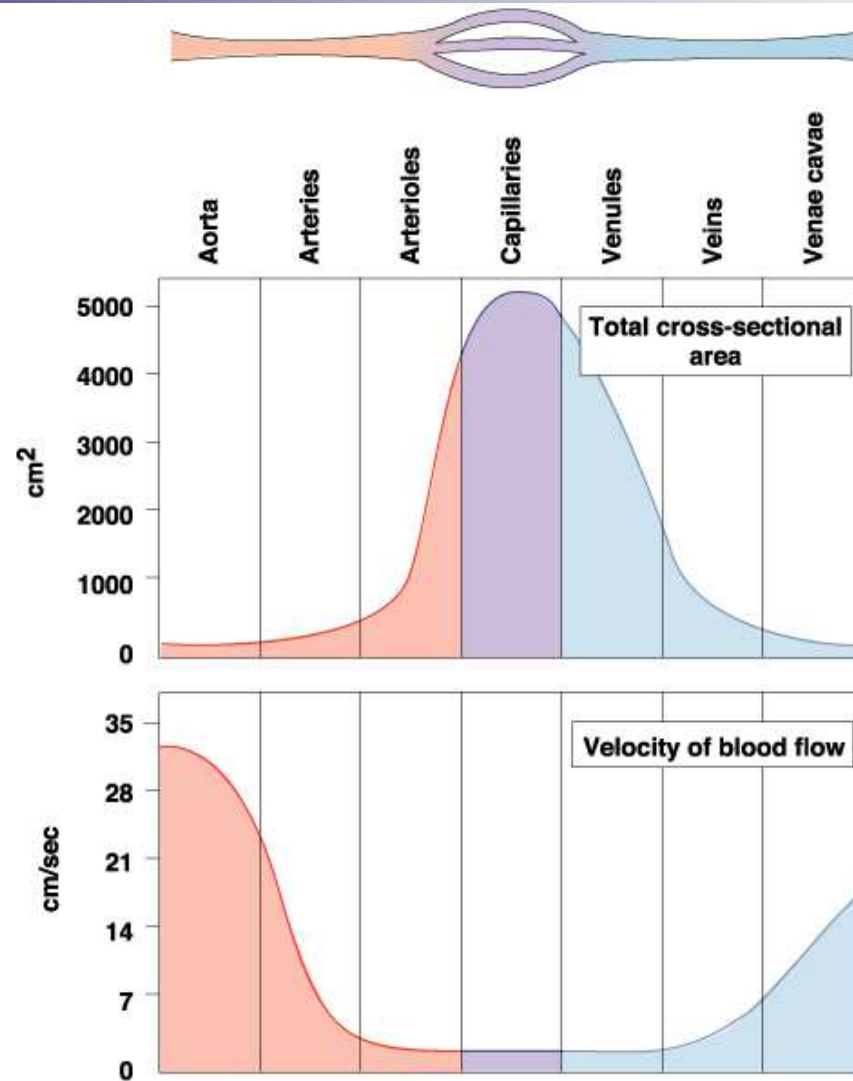
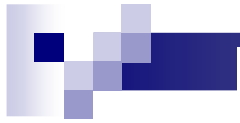
Numero vasi

Letto vascolare

Diametro del singolo vaso

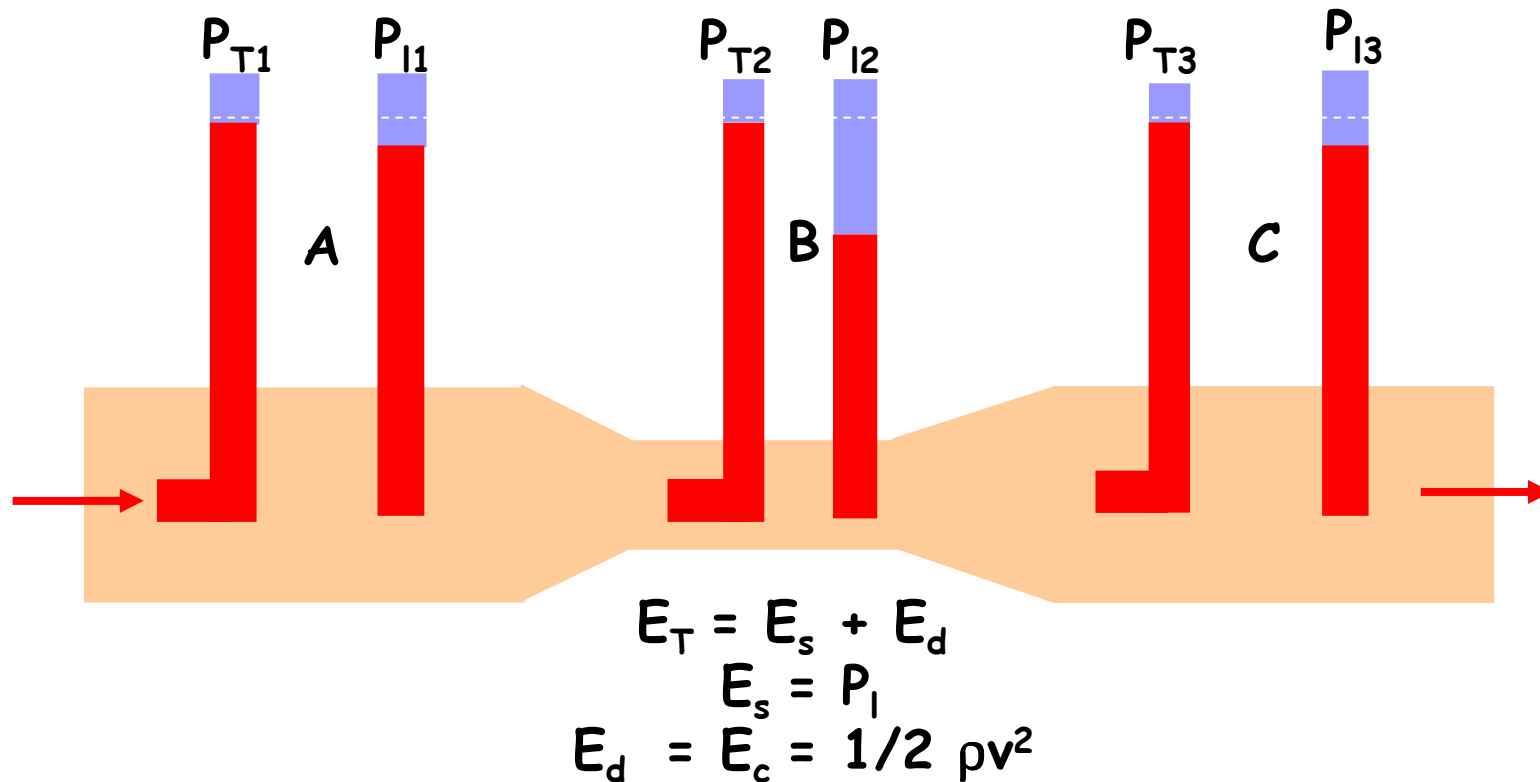
Sezione trasversa totale

Volume totale



Con l'aumentare della sezione trasversa, la velocità del sangue diminuisce. Essa pertanto sarà minima a livello dei capillari. Questo favorisce i processi di scambio.

PRINCIPIO di BERNOULLI




Nella sezione del condotto a diametro minore (B), la velocità lineare v , e pertanto la componente dinamica dell'energia $\frac{1}{2} \rho v^2$, è maggiore rispetto a quella delle sezioni con diametro maggiore (A, C).

Se l'energia totale E_T , rimane costante lungo il condotto ($P_{T1} = P_{T2} = P_{T3}$) nella sezione B, l'aumento di E_d comporta una riduzione della P_I rispetto alle sezioni A e C ($P_{I2} < P_{I1} = P_{I3}$).



Quale interesse?

- un restringimento provoca aumento di velocità e riduzione di Pressione
- ma questo se l'energia totale resta costante
- questa costanza è teorica
- in realtà diminuisce l'energia totale per gli attriti e quindi tutta l'energia può diminuire e così anche la velocità
- tuttavia è importante l'incremento di velocità per fenomeni di turbolenza (Misura della pressione)



La **legge** che descrive il flusso attraverso tubi cilindrici è stata ricavata **da Hagen-Poiseuille**. Questa legge è valida per il flusso laminare e stazionario di un liquido omogeneo in un tubo rigido:

LEGGE DI HAGEN-POISEUILLE

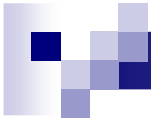
Per un fluido newtoniano che scorre con flusso laminare lungo un tubo cilindrico si applica la LEGGE DI HAGEN-POISEUILLE, ottenuta integrando la velocità di tutti gli anelli concentrici di fluido in scorrimento e moltiplicando per le loro aree.

Dall'equazione del flusso $F = \Delta P / R$ si ricava:

$$R = 8\eta l / \pi r^4$$

$$F = \pi \Delta P r^4 / 8\eta l$$

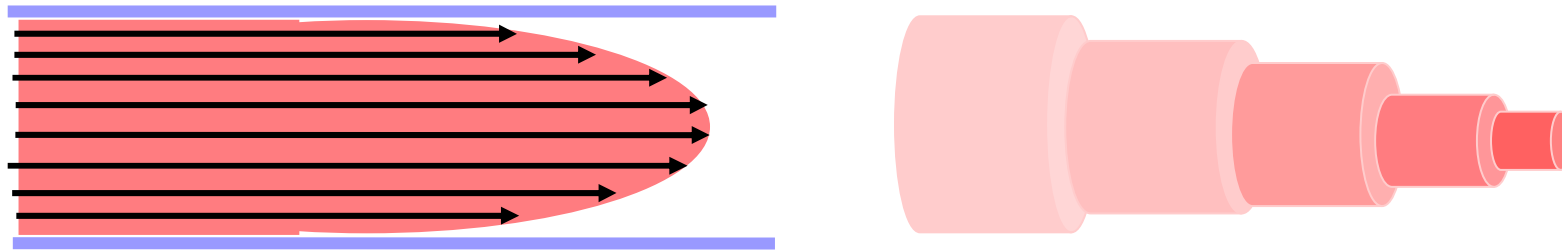
Il raggio del vaso che compare nell'equazione alla quarta potenza, rappresenta il parametro le cui variazioni incidono maggiormente nel determinare variazioni di flusso e di resistenza.



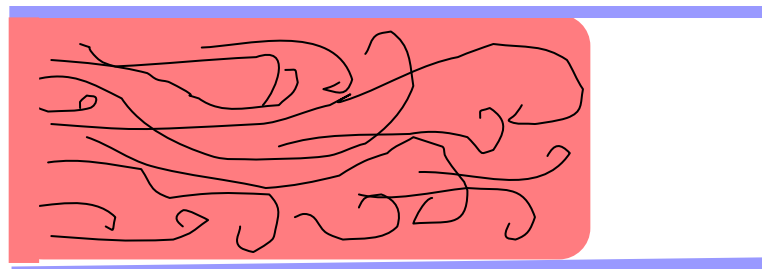
$$R = 8\eta l / \pi r^4$$

Lo scorrimento del sangue: moto laminare e moto turbolento

Moto laminare

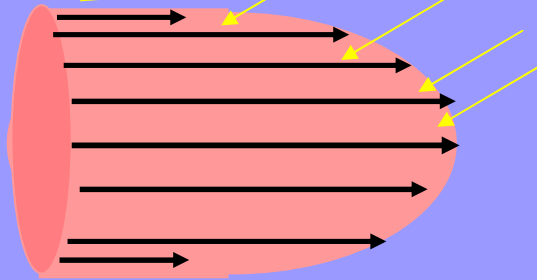


Moto turbolento

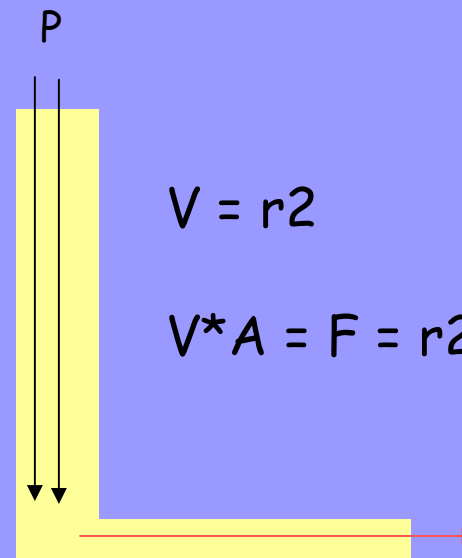
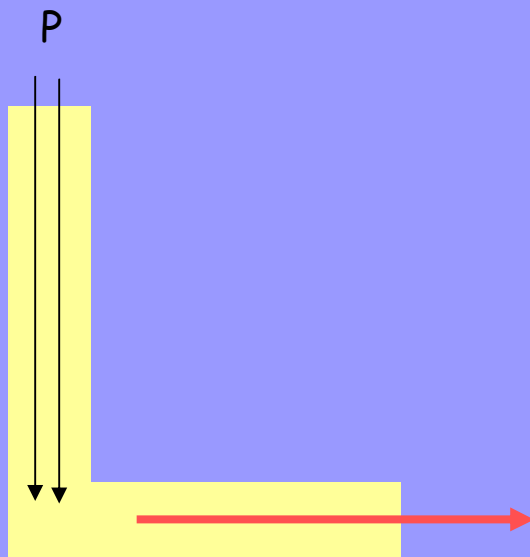


Resistenze al fluire del sangue

Attrito : resistenza

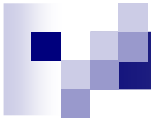


Esperimento

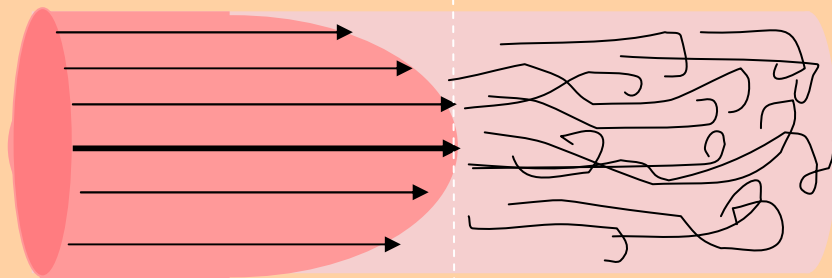


$$V = r^2$$

$$V \cdot A = F = r^2 \cdot \pi r^2 = \pi r^4$$

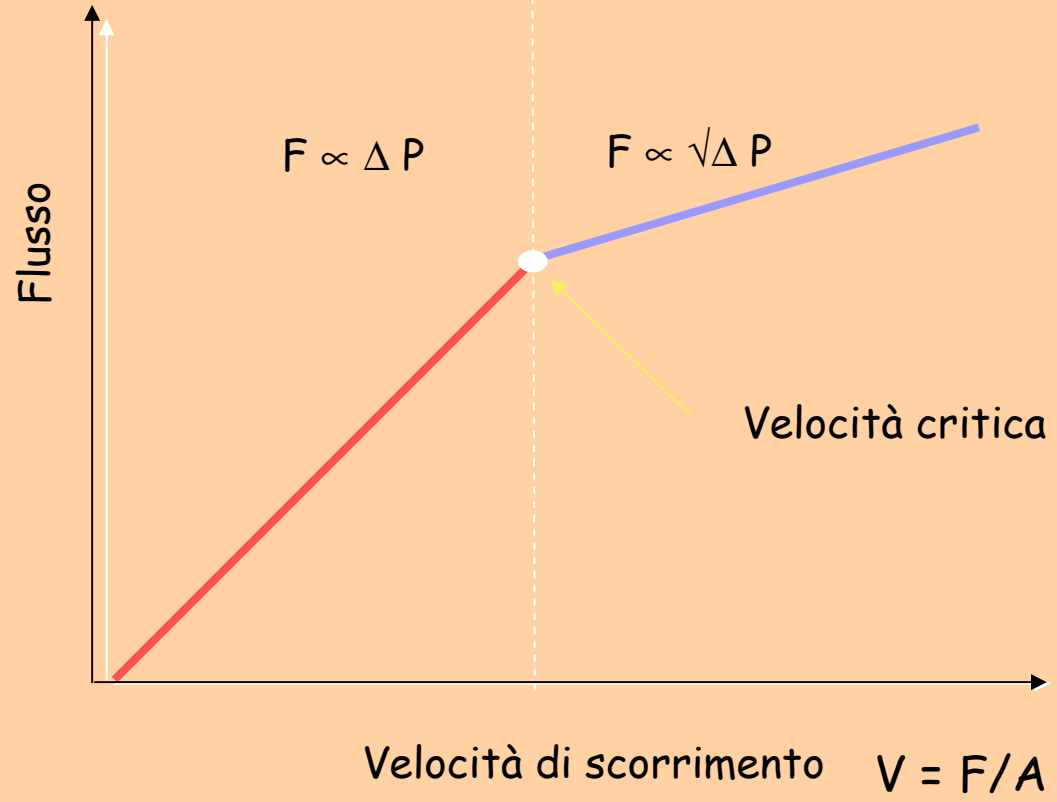


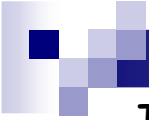
$$R = 8\eta l / \pi r^4$$



Flusso laminare

Flusso turbolento





Il passaggio da moto laminare a turbolento dipende dalle caratteristiche del condotto, dalla velocità di scorrimento e dalla natura del liquido (viscosità, η e densità, ρ). L'espressione che lega le diverse grandezze che influenzano il tipo di scorrimento è:

$$N_R = r v \rho / \eta$$

N_R è una costante adimensionale detta **numero di Reynolds**.

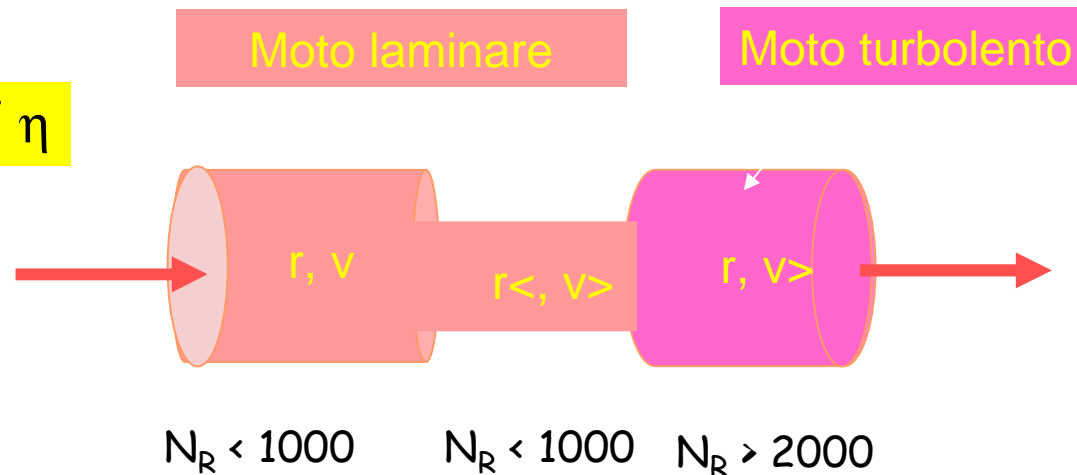
Per un liquido che scorre in un condotto cilindrico:

si ha moto laminare per $N_R < 1000$ e moto turbolento per $N_R \dot{e} > 2000$

L'aumento della velocità di scorrimento v , al di sopra di una certa velocità critica v_c l'aumento del raggio r o la diminuzioni della viscosità η determinano aumenti di N_R con conseguente turbolenza.

In due condotti in cui scorre lo stesso liquido, in uno con moto laminare e nell'altro con moto turbolento, per lo stesso incremento di ΔP l'aumento di flusso, F , è maggiore nel primo che nel secondo caso. Infatti nel moto laminare $F \propto \Delta P$, mentre nel moto turbolento $F \propto \sqrt{\Delta P}$ a causa dei vortici che dissipano una maggior quota di energia negli urti tra le molecole di liquido.

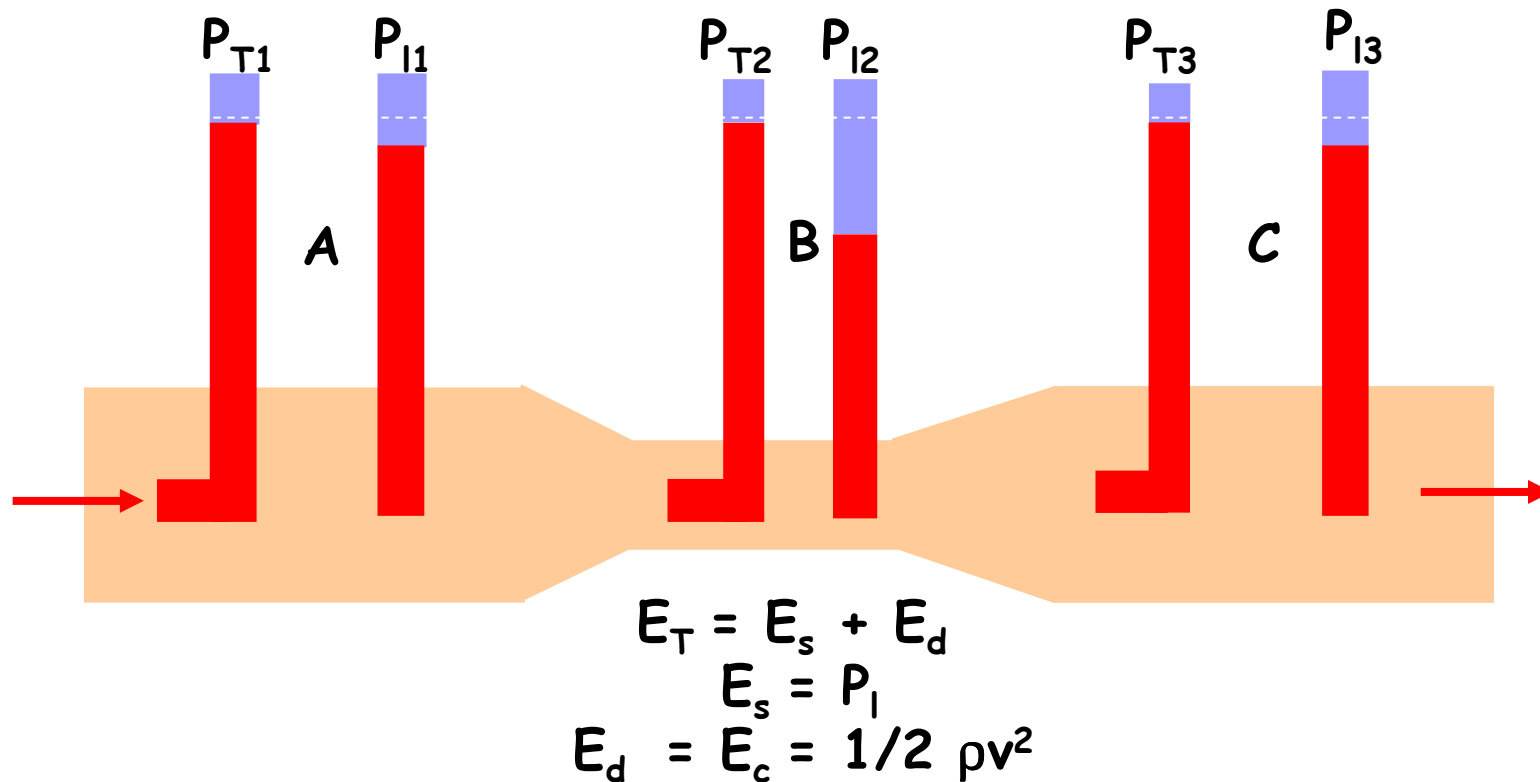
$$NR = r v \rho / \eta$$



A livello di una stenosi (B), la velocità, v , aumenta ($v = F/A$). La contemporanea riduzione del raggio r , fa in modo che $N_R = r v \rho / \eta$, rimanga inferiore a 2000 e il flusso rimanga laminare come in A.


A valle della stenosi (C), la velocità, che risulta ancora elevata per inerzia e l'aumento di r , contribuiscono a rendere $N_R > 2000$ con conseguente turbolenza.

PRINCIPIO di BERNOULLI



Nella sezione del condotto a diametro minore (B), la velocità lineare v , e pertanto la componente dinamica dell'energia $\frac{1}{2} \rho v^2$, è maggiore rispetto a quella delle sezioni con diametro maggiore (A, C).

Se l'energia totale E_T , rimane costante lungo il condotto ($P_{T1} = P_{T2} = P_{T3}$) nella sezione B, l'aumento di E_d comporta una riduzione della P_I rispetto alle sezioni A e C ($P_{I2} < P_{I1} = P_{I3}$).

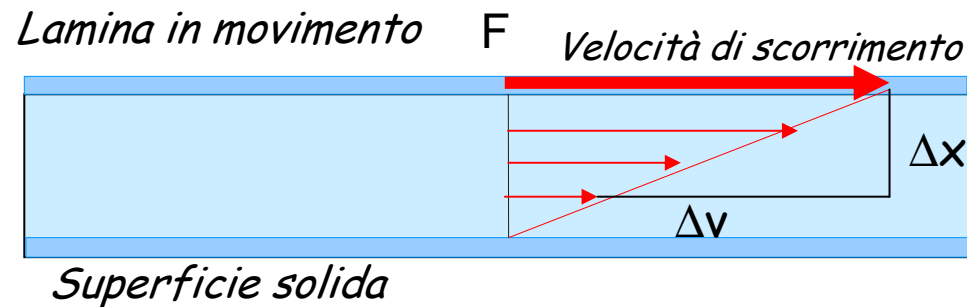
- 
- Il sangue scorre nel sistema circolatorio con moto laminare. In condizioni fisiologiche si ha turbolenza solo a livello delle valvole cardiache.
 - Si ha moto turbolento in un **vaso stenotico**, a valle della stenosi.
 - Il moto turbolento essendo rumoroso, può essere rilevato mediante **auscultazione**.
 - Il moto turbolento aumenta il lavoro cardiaco e favorisce la formazione **di trombi**.

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.


$$R = 8\eta l / \pi r^4$$

VISCOSITA'



Gradiente di velocità tra due laminae, $G = \Delta v / \Delta x$
 Δv = differenza velocità tra le due laminae
 Δx = distanza tra le due laminae

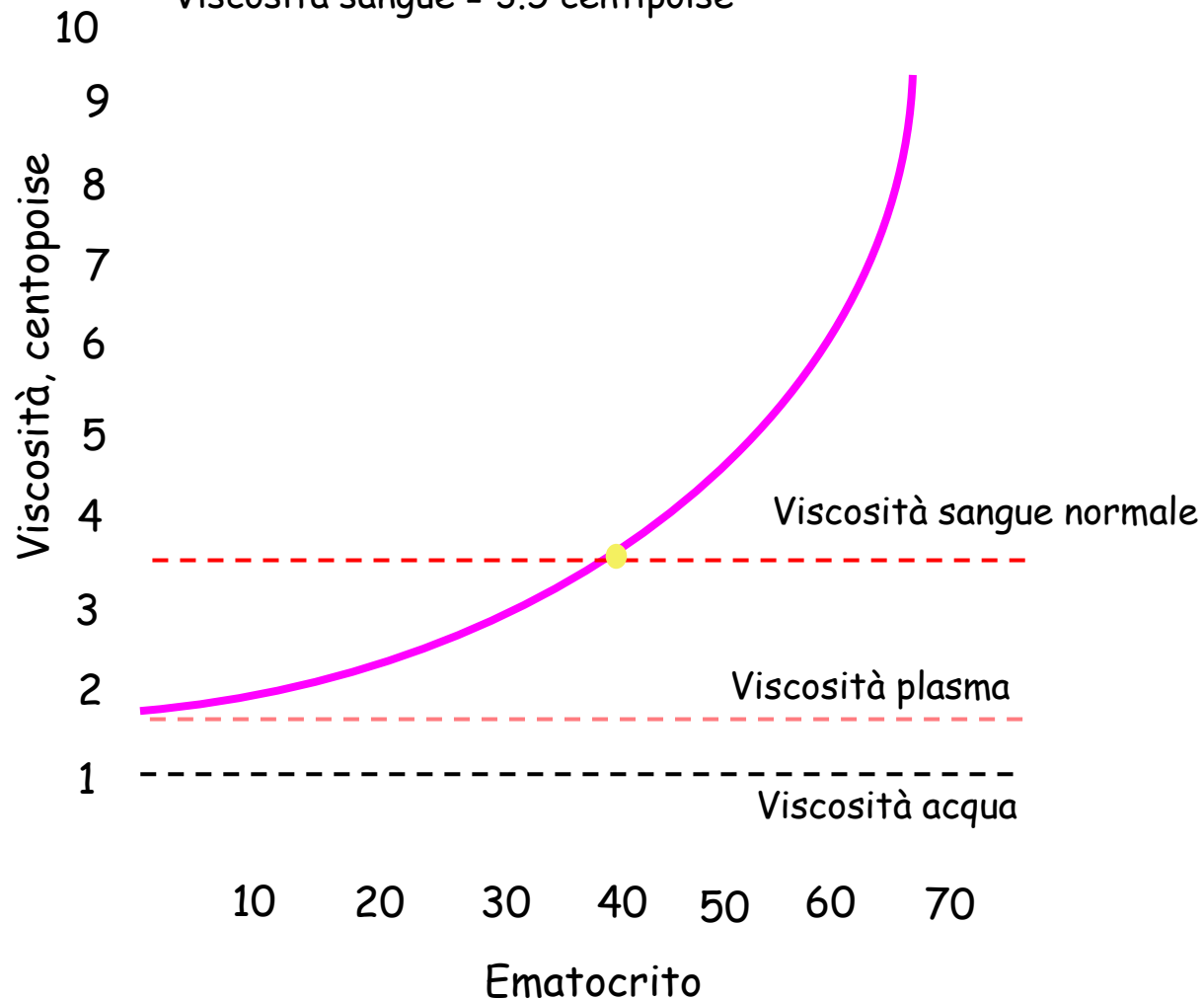
La viscosità viene definita dalla Legge di attrito di Newton. La forza tangenziale di attrito (F) che si oppone allo scorrimento di due laminae di liquido adiacenti l'una sull'altra, espressa per unità di superficie della lamina (A), è proporzionale al gradiente di velocità (G) secondo l'equazione:

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{Dv}{Dx}$$
$$\eta = (F/A) / (Dv/Dx)$$

η è la viscosità e rappresenta la resistenza che si oppone allo scorrimento di strati adiacenti di liquido. Si misura in **poise**.

LA VISCOSITA' DEL SANGUE DIPENDE DALL'EMATOCRITO

Viscosità acqua a 20°C = 0.01 poise = 1 centipoise
Viscosità plasma = 1.9-2.3 centipoise
Viscosità sangue = 3.5 centipoise

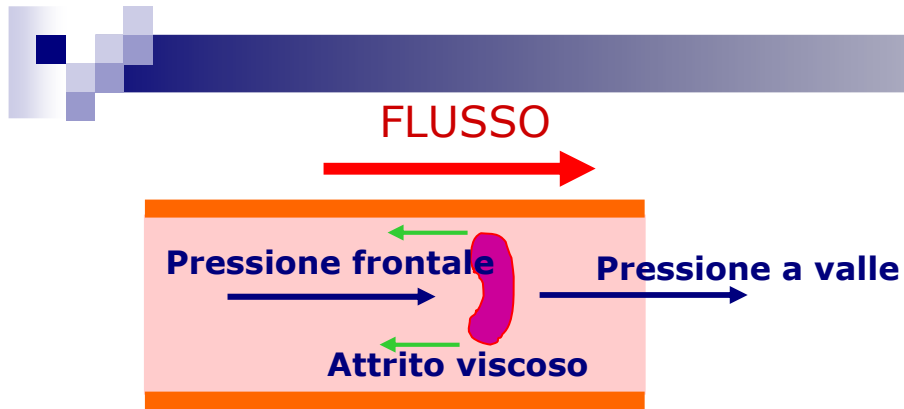


La viscosità del sangue, η , aumenta all'aumentare dell'**ematocrito** (Ht, percentuale del volume di un campione di sangue occupato dai globuli rossi).

La relazione non è lineare, infatti la η cresce rapidamente per valori di Ht > 45%.

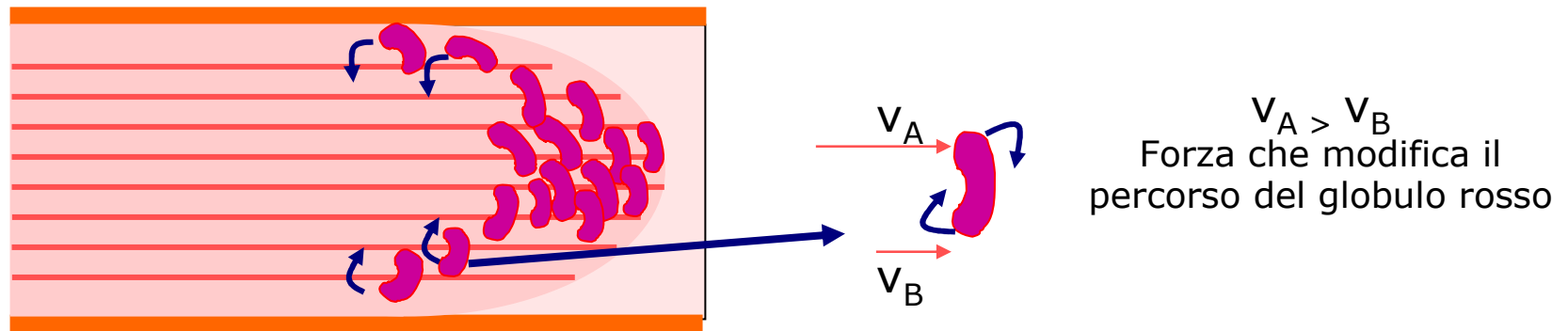
L'aumento di η (per esempio nella **policitemia**) determina un aumento della resistenza al flusso, con conseguente aumento del lavoro cardiaco.

Viceversa nelle **anemie** la η tende a ridursi



La risultante delle forze propulsive e viscosi provoca la rotazione del globulo rosso, che avviene in senso antiorario, nella parte superiore del vaso, ed in senso orario nella parte inferiore.

ACCUMULO ASSIALE DEI GLOBULI ROSSI



$V_A > V_B$
Forza che modifica il percorso del globulo rosso

I globuli rossi dispersi in un fluido, che scorre con **moto laminare** a velocità sufficientemente elevata, sono spinti verso l'asse centrale del vaso, dove la velocità di scorrimento è maggiore (**accumulo assiale**).

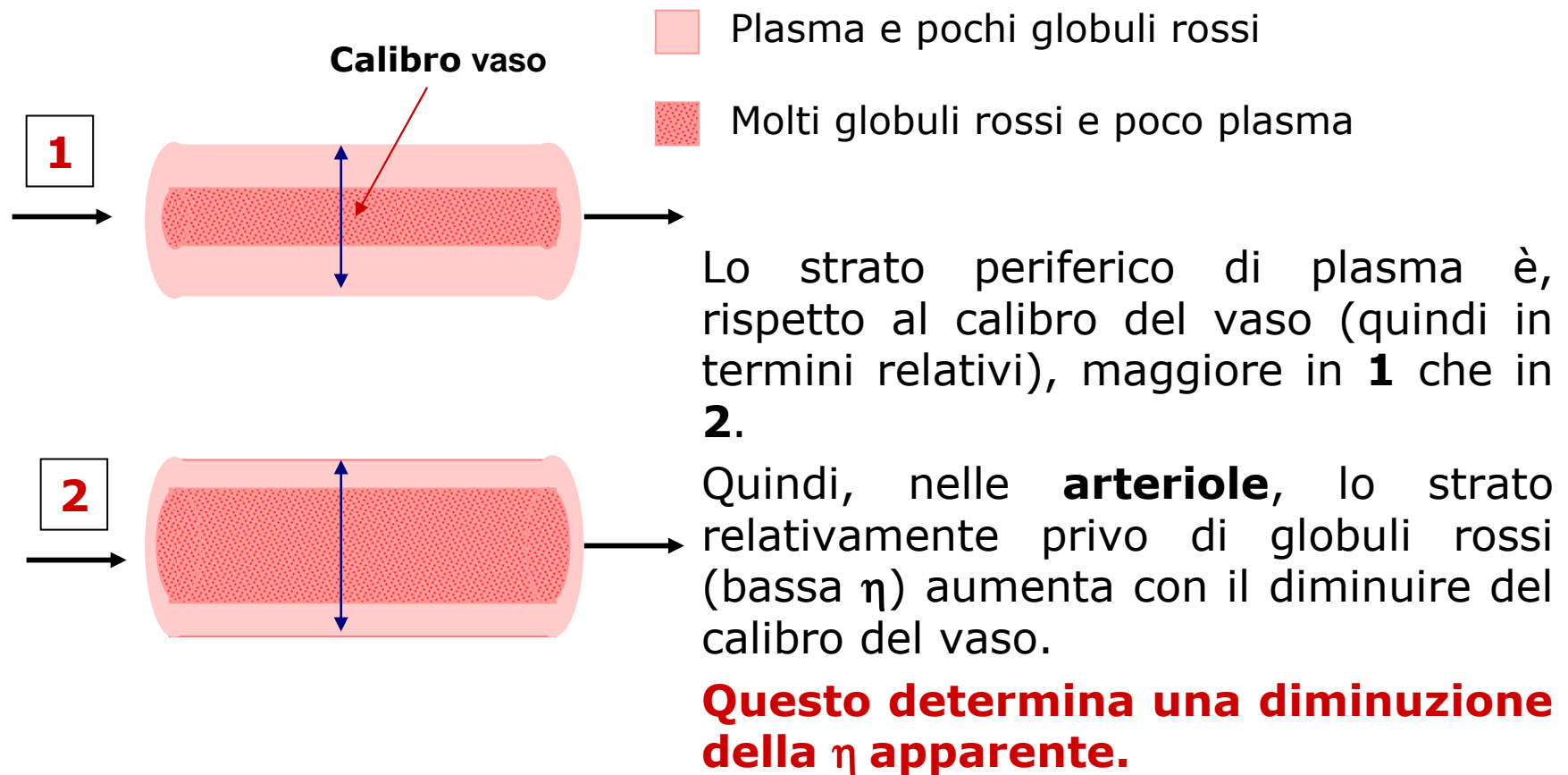
Velocità migrazione globulo rosso è proporzionale al gradiente di velocità $\Delta V / \Delta X$.

Gradiente di velocità diminuisce dalla periferia verso il centro del vaso, determinando **accumulo dei globuli rossi al centro del vaso**.

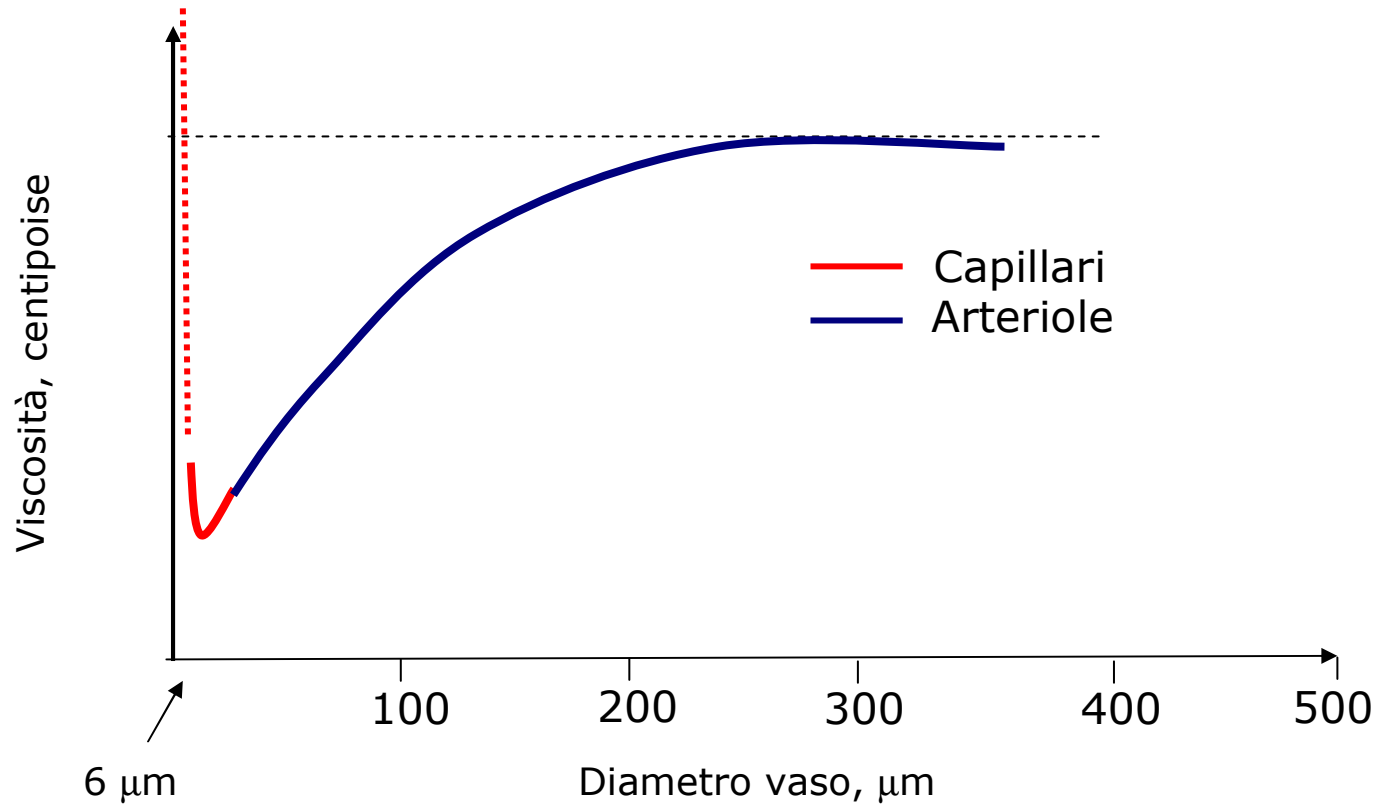
Per **accumulo assiale** la viscosità relativa del sangue è **maggiore** al centro del vaso (elevato ematocrito) e **minore** alla periferia. **La viscosità media risulta così inferiore a quella attesa dal valore dell'ematocrito.**

La viscosità del sangue si riduce con il calibro del vaso

Il gradiente di velocità che determina accumulo assiale dei globuli rossi è maggiore nei vasi piccoli rispetto a quelli più grandi, perché Δx è minore. Nei vasi piccoli, quindi, la porzione periferica di sangue, privata di globuli rossi, è percentualmente maggiore.



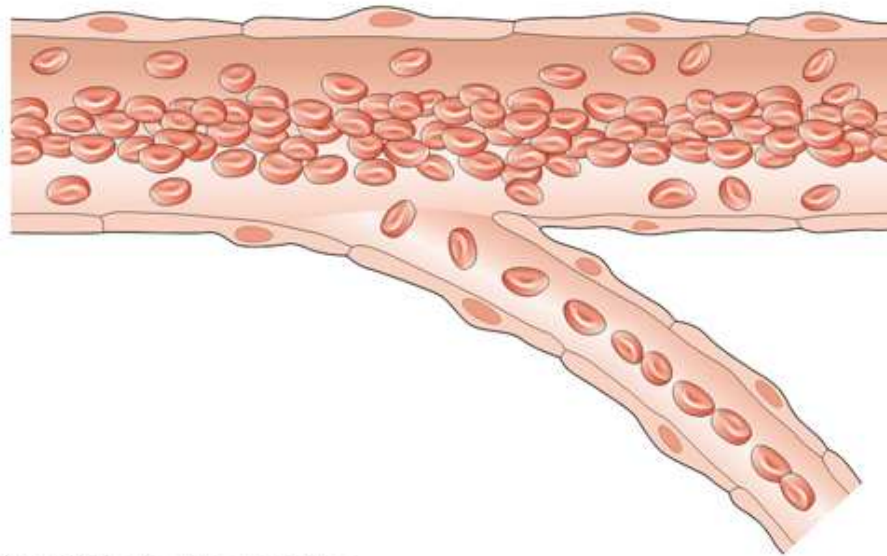
LA VISCOSITA' DEL SANGUE DIPENDE DAL CALIBRO DEL VASO



La viscosità del sangue diminuisce con il calibro del condotto (**Effetto Fahraeus-Lindqvist**).

Il fenomeno si osserva per calibri inferiori ai 300 μm (arteriole).

La η apparente tende nuovamente ad aumentare nei vasi con diametro vicino a quello dei globuli rossi (7-8 μm).



© 2005 edi.ermes milano

- La riduzione di viscosità nei vasi con diametro $< 300 \mu\text{m}$, è anche dovuta ad un decremento dell'ematocrito legato alla diversa distribuzione degli eritrociti in questi vasi.
- A livello delle biforcazioni delle arteriole, infatti, le linee di scivolamento degli eritrociti fanno sì che la maggior parte di essi rimanga al centro del vaso di diametro maggiore.
- Solo una minoranza di eritrociti imbocca le diramazioni più piccole, determinando così una riduzione dell'ematocrito.

LA VISCOSITÀ DEL SANGUE DIPENDE DALLA VELOCITÀ DI SCORRIMENTO

↑ **velocità** → ↓ η (riduzione di attrito tangenziale) aumenta la tendenza dei globuli rossi ad accumularsi nelle lamine assiali.

↓ **velocità** → ↑ η (aggregazione globuli rossi, forma a rouleaux o pila di monete).

Aggregazione a basse velocità di flusso dipende dalla concentrazione nel plasma del **fibrinogeno**.

Nelle condizioni di stasi circolatoria:

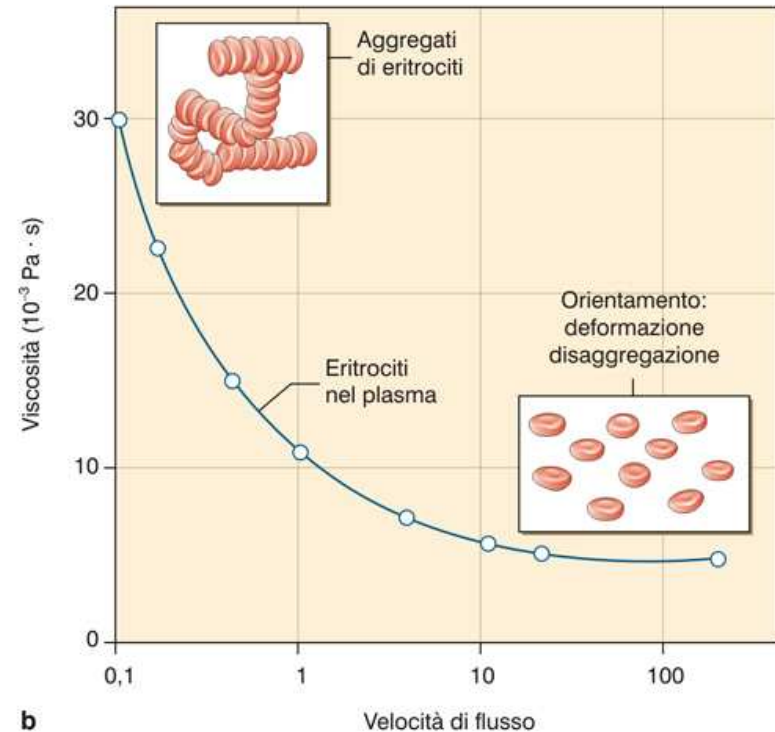
↑ η → ↑ **resistenza al flusso**.


Nei capillari, gli eritrociti (molto flessibili) attraversano il vaso deformandosi. ↓ velocità → aggregati che ostruiscono i capillari.


La deformabilità degli eritrociti è modificata da variazioni del pH ematico.

Alcalosi → ↑ deformabilità

Acidosi → ↓ deformabilità

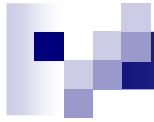


- 
- ↓viscosità microcircolo → ↓**resistenza al flusso**.
Il flusso è garantito da pressioni propulsive minori.
 - ↓viscosità per accumulo assiale → mantenimento fluidità sangue anche con ematocriti superiori al 60% (policitemie).
 - ↓elasticità dei globuli rossi (anemie emolitiche: anemia falciforme) → ↓accumulo assiale →
↑**viscosità** → ↑**resistenza al flusso**.



Le Resistenze al flusso nel sistema circolatorio dipendono quindi da::

- Calibro dei vasi
- Tipo di scorrimento (laminare o turbolento)
- Viscosità del sangue
-



Circoli in serie e in parallelo

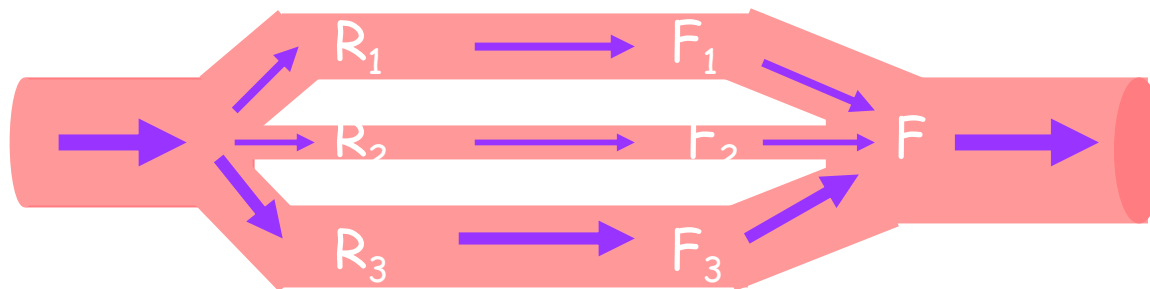
RESISTENZE IN CONDOTTI POSTI IN SERIE



$$R_t = R_1 + R_2 + R_3$$

La caduta di pressione attraverso l'intero sistema, DP ($P_i - P_u$), è la somma delle cadute di pressione attraverso ogni resistenza. Il flusso F , in condizioni di equilibrio, è uguale in tutti i condotti, per cui la resistenza totale risulta dalla somma delle singole resistenze.

RESISTENZE IN CONDOTTI POSTI IN PARALLELO



$$1/R_t = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$$

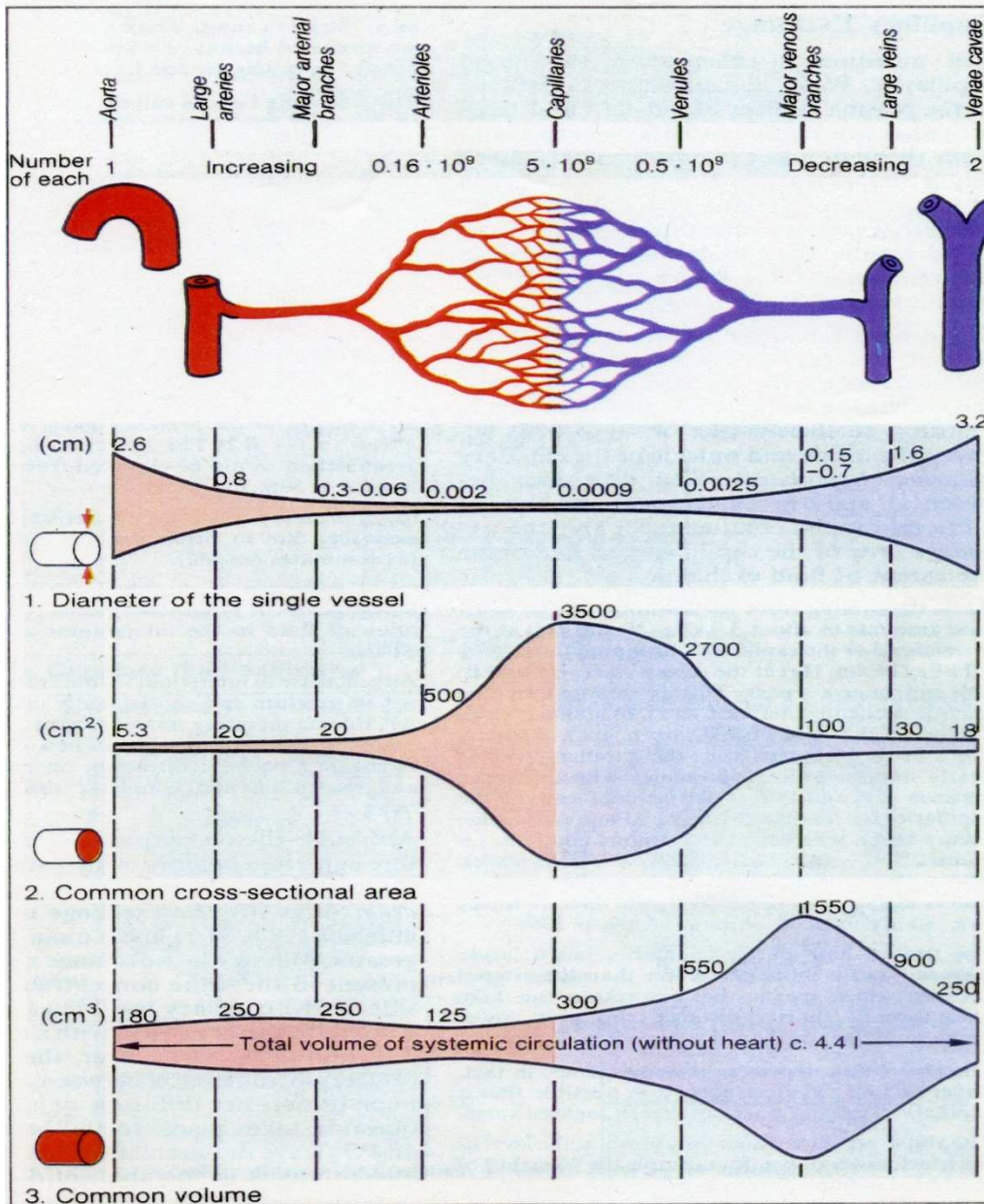
La caduta di pressione, DP ($P_i - P_o$), è uguale in tutti i condotti. In condizioni di equilibrio, il flusso F è la somma dei flussi attraverso i singoli elementi, per cui si sommano le conduttanze $1/R$. Risulta quindi che la resistenza totale è minore di ogni singola resistenza.



Nel sistema circolatorio, la Resistenza maggiore al flusso si incontra a **livello delle arteriole**, che hanno un calibro ridotto rispetto alle arterie.

I capillari pur avendo calibro inferiore a quello delle arteriole non offrono elevata Resistenza perché in numero molto elevato e disposti in parallelo.

Misurando la **caduta pressoria** che si verifica nei vari distretti si ha un indice della R complessiva che il flusso di sangue incontra nel passare da un distretto all'altro.



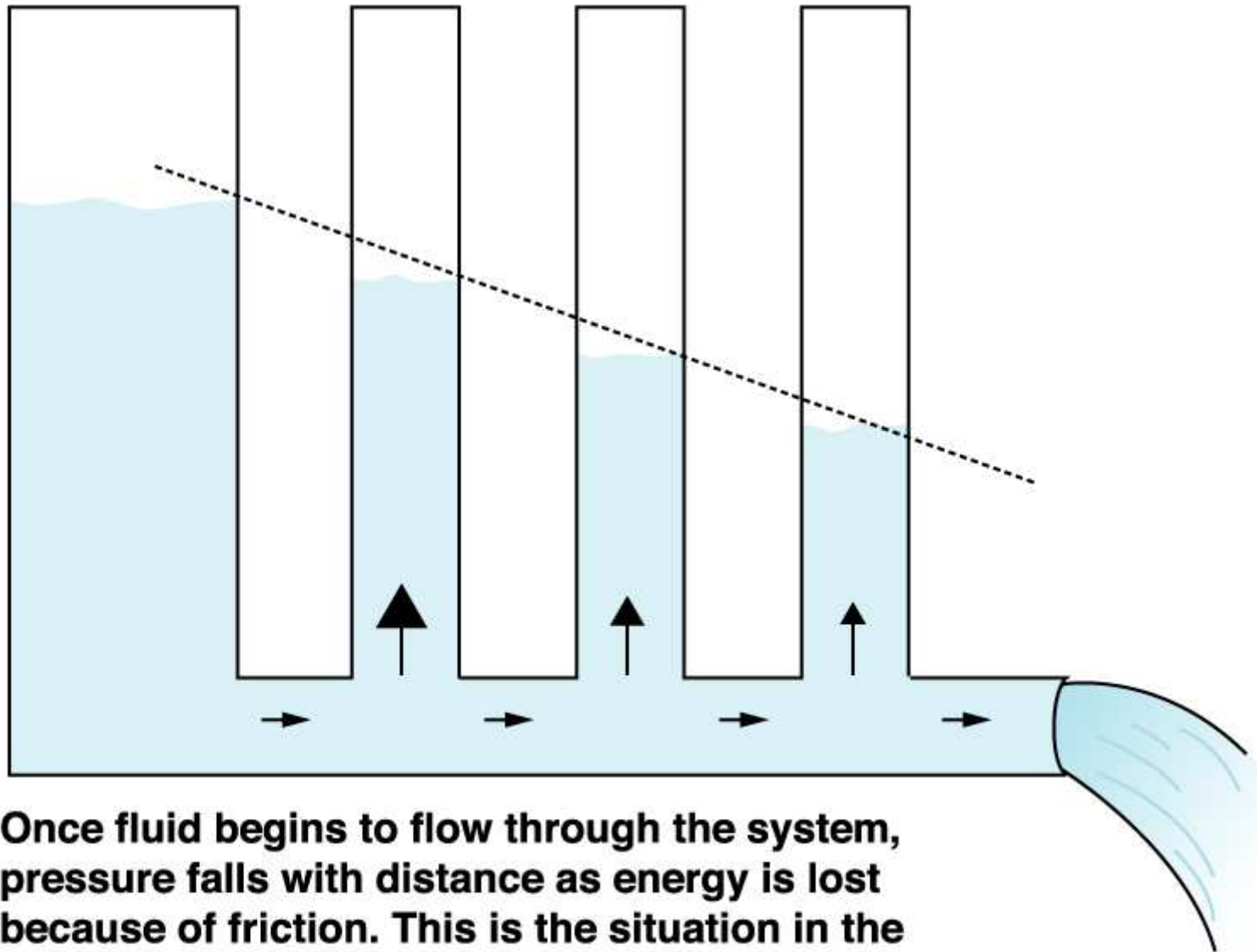
Numero vasi

Letto vascolare

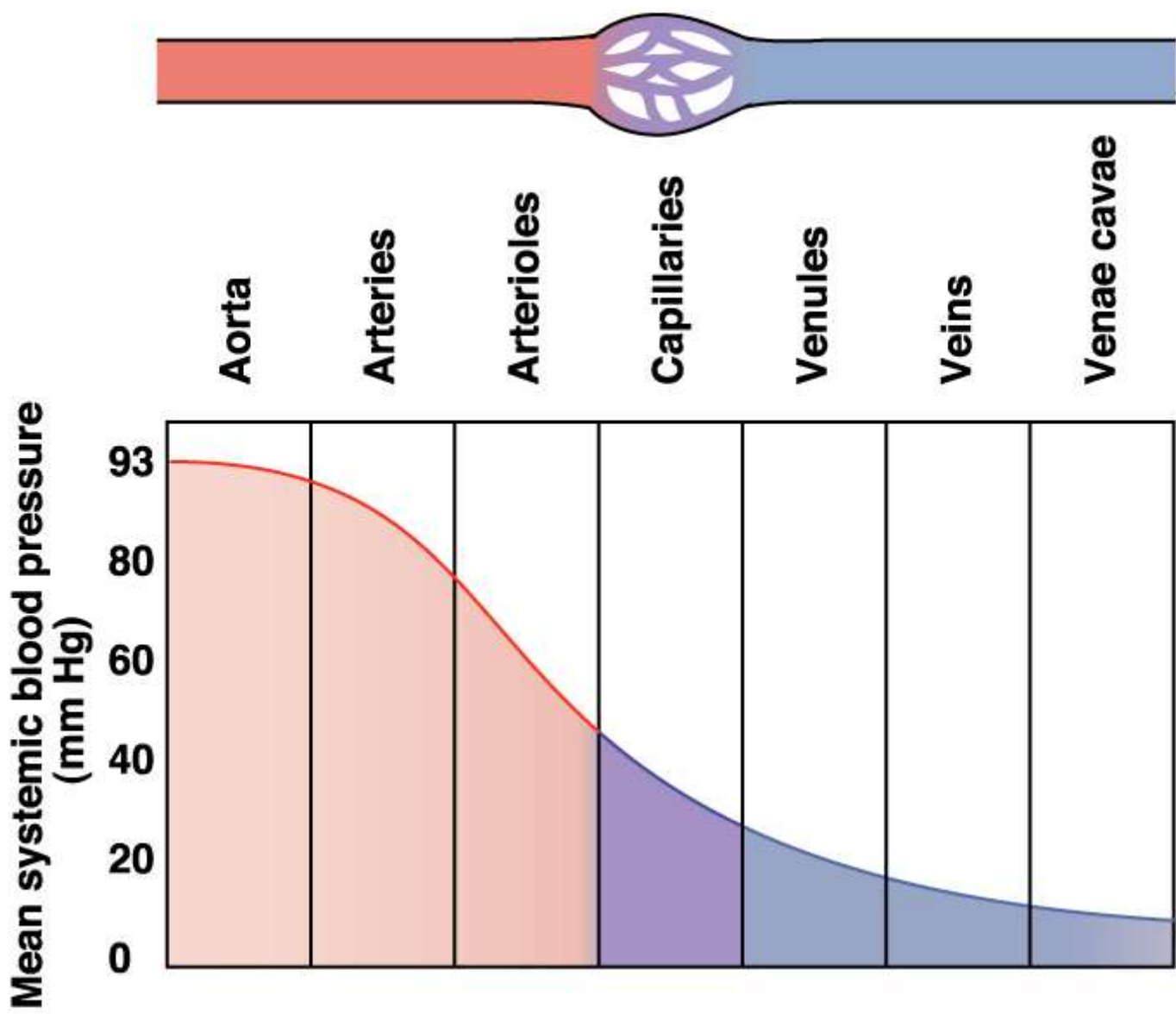
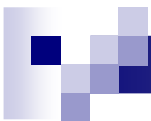
Diametro del singolo vaso

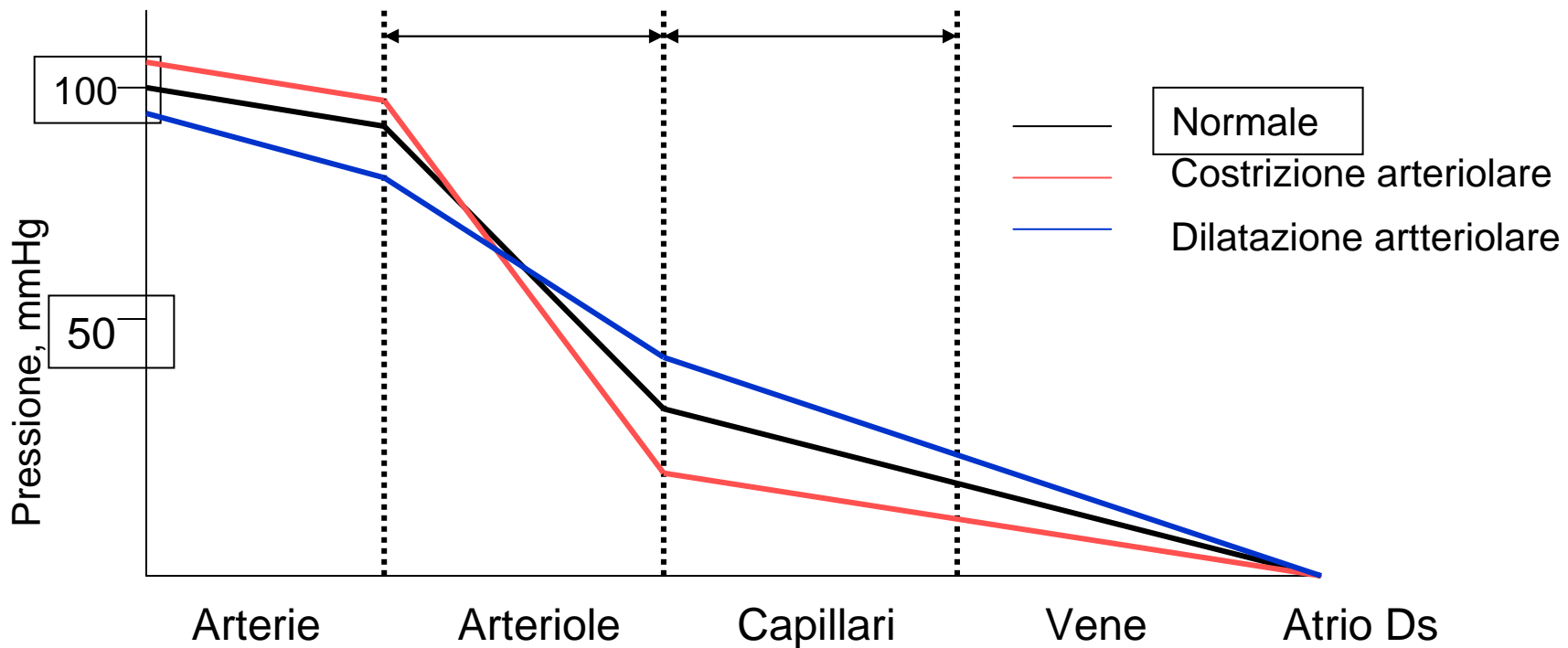
Sezione trasversa totale

Volume totale



Once fluid begins to flow through the system, pressure falls with distance as energy is lost because of friction. This is the situation in the circulatory system.





La R totale è dovuta per circa:

- 25% all' aorta e alle grandi arterie
- 40% alle arteriole
- 20% al letto capillare
- 15% al letto venoso



Le Pressioni in emodinamica sono:

- Pressione di propulsione $P_a - P_v$, responsabile del flusso
- Pressione trasmurale (P_{tm}). Poiché i vasi sono distensibili la P_{tm} può influenzare il fattore geometrico della Legge di Poiseuille e modificare la resistenza al flusso.



LEGGE DI LAPLACE

- In contenitori (organi cavi, vasi), con parete distensibile, il riempimento deforma la parete, che sviluppa una tensione in risposta all'allungamento.
- Secondo la **LEGGE DI LAPLACE**, la tensione parietale, T , dipende dalla pressione trasmurale, P_{tm} , dallo spessore della parete, d e dal raggio del contenitore, r secondo l'equazione:

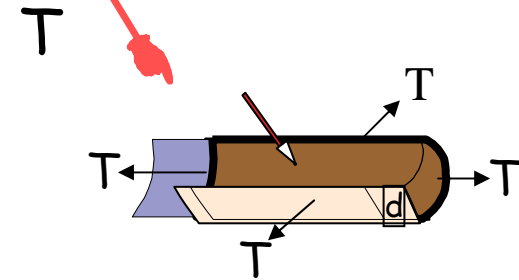
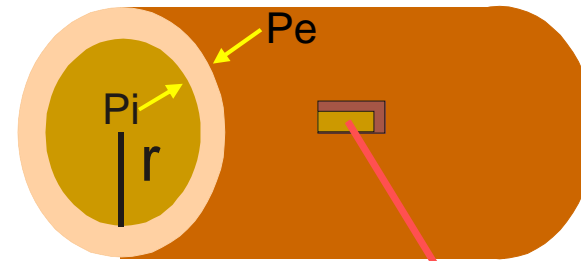
$$T = P_{tm} \cdot r / d$$

LEGGE DI LAPLACE

$$T = (P_{tm} \cdot r) / d$$

Tensione parietale:
forza distendente

Pressione trasmurale
forza che tende a
dilatare il vaso



Porzione della parete del
vaso vista dall'interno

La P_{tm} è sostenuta in parte dalla tensione passiva, dovuta all'elasticità del vaso, e in parte dalla tensione attiva, sviluppata dalla contrazione della muscolatura liscia della parete.

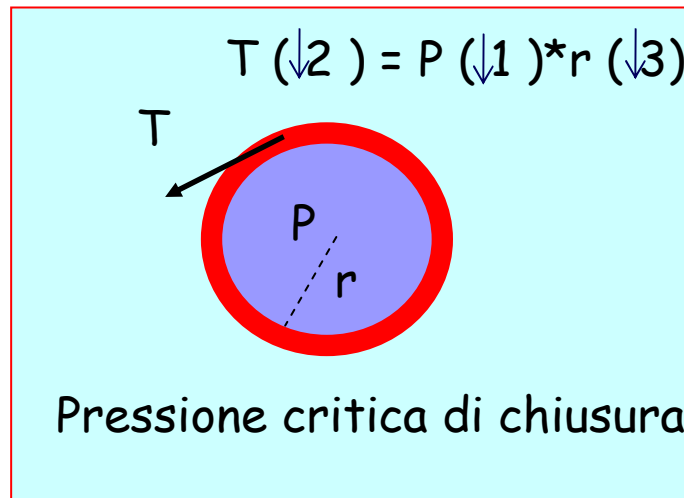
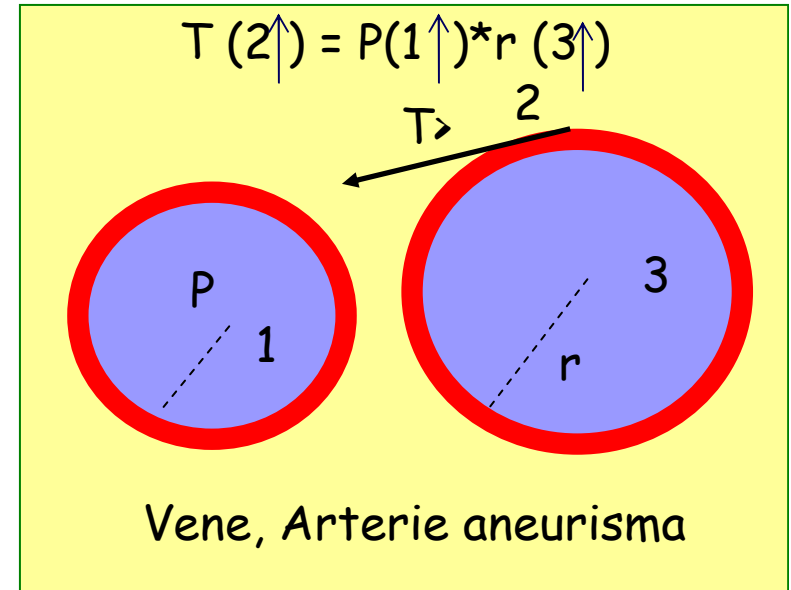
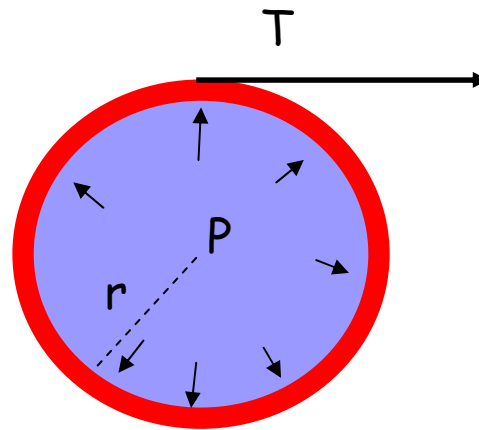
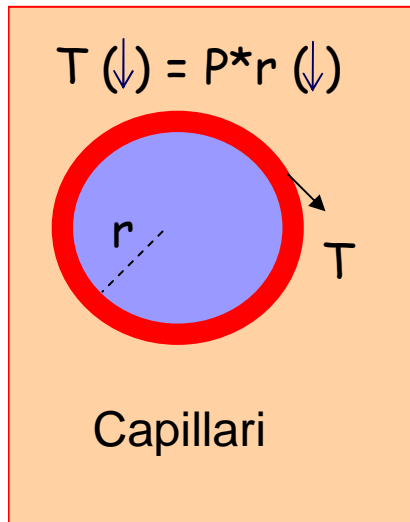
Legge di La Place

$$P = 2T \cdot d / r$$

$$P = T \cdot d / r$$

$$T = P \cdot r / 2d$$

$$T = P \cdot r / d$$





Questa legge spiega perché:

Vasi di calibro ridotto, come i capillari, sono in grado di sostenere pressioni intravasali relativamente elevate, senza rompersi.

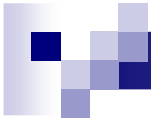
Si può verificare rottura di un aneurisma arterioso.

- Nell'aneurisma arterioso la tensione parietale non riesce più a controbilanciare la P_{tm} , con conseguente dilatazione del vaso.

- L'aumento di diametro del vaso accompagnato da riduzione dello spessore della parete, rende l'aneurisma permanente.

- La tensione parietale diventa sempre più insufficiente a contrastare la pressione interna e il vaso va incontro a rottura.

- I vasi venosi degli arti inferiori sono sottoposti a pressione maggiore a motivo della forza di gravità. Se si verifica una dilatazione del vaso, o un aumento della pressione per rottura delle valvole, si va incontro ad una progressiva dilatazione del vaso.



LA DISTENSIBILITÀ DELLE PARETI DEI VASI
RENDE IL CIRCOLO DIPENDENTE DALLA FORZA
DI GRAVITÀ

La pressione esercitata da una colonna di liquido aumenta con l'altezza di questa, secondo la relazione:

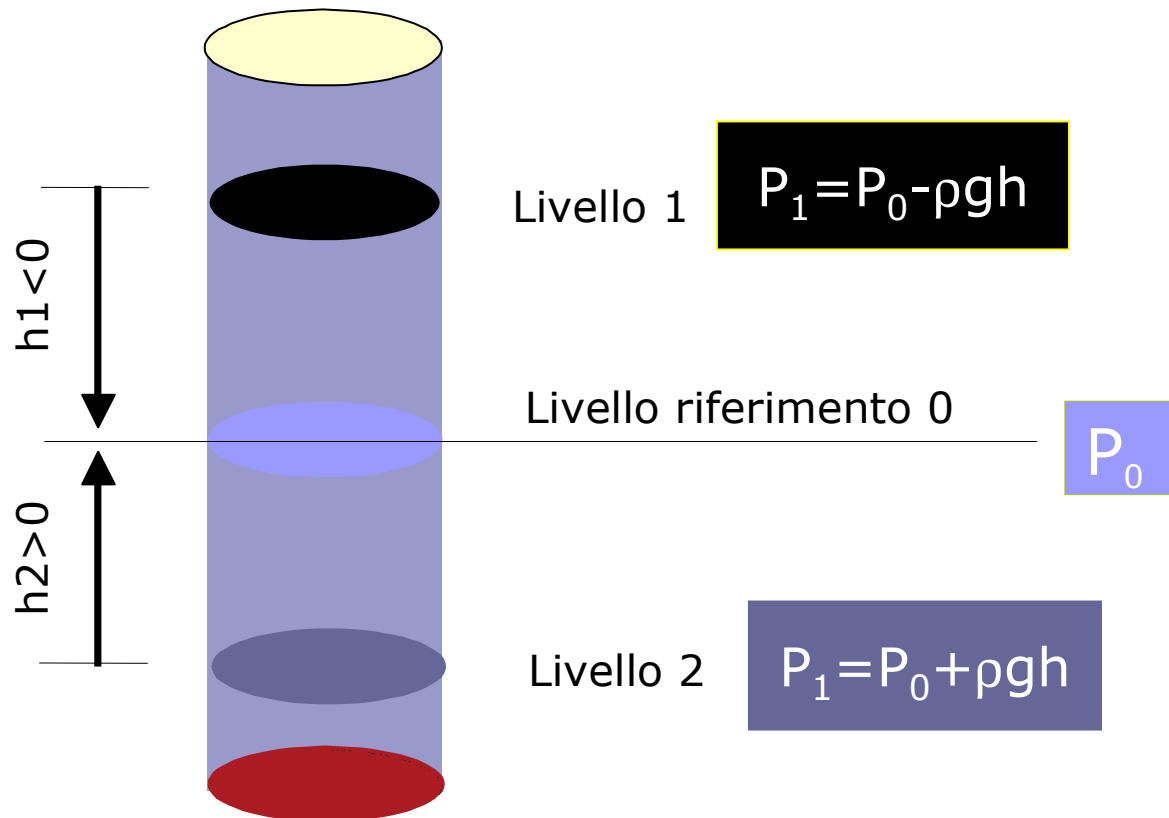
$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h$$

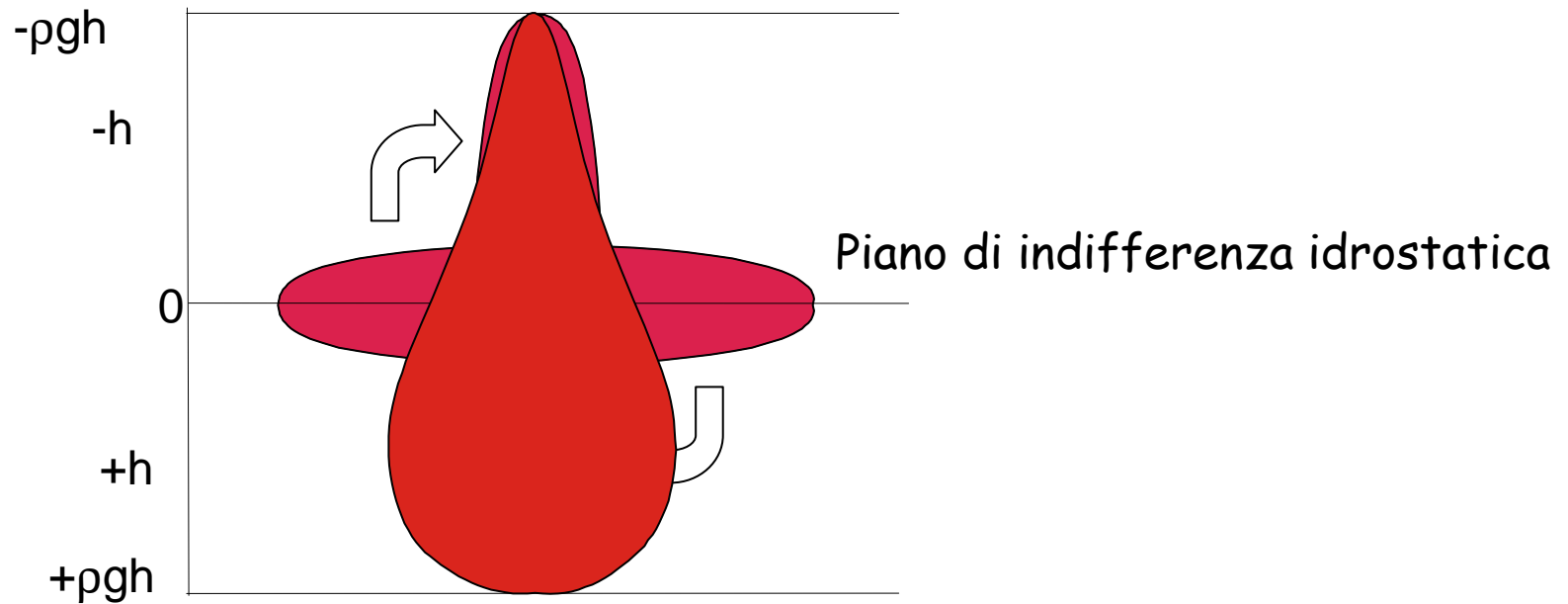
La pressione idrostatica (P_i) esercitata da una colonna di acqua è $1/13.6 = 0.74$ volte quella esercitata da una colonna di mercurio di uguale altezza.

colonna acqua 1 cm, $P_i = 0.74$ mmHg

poiché sangue=acqua

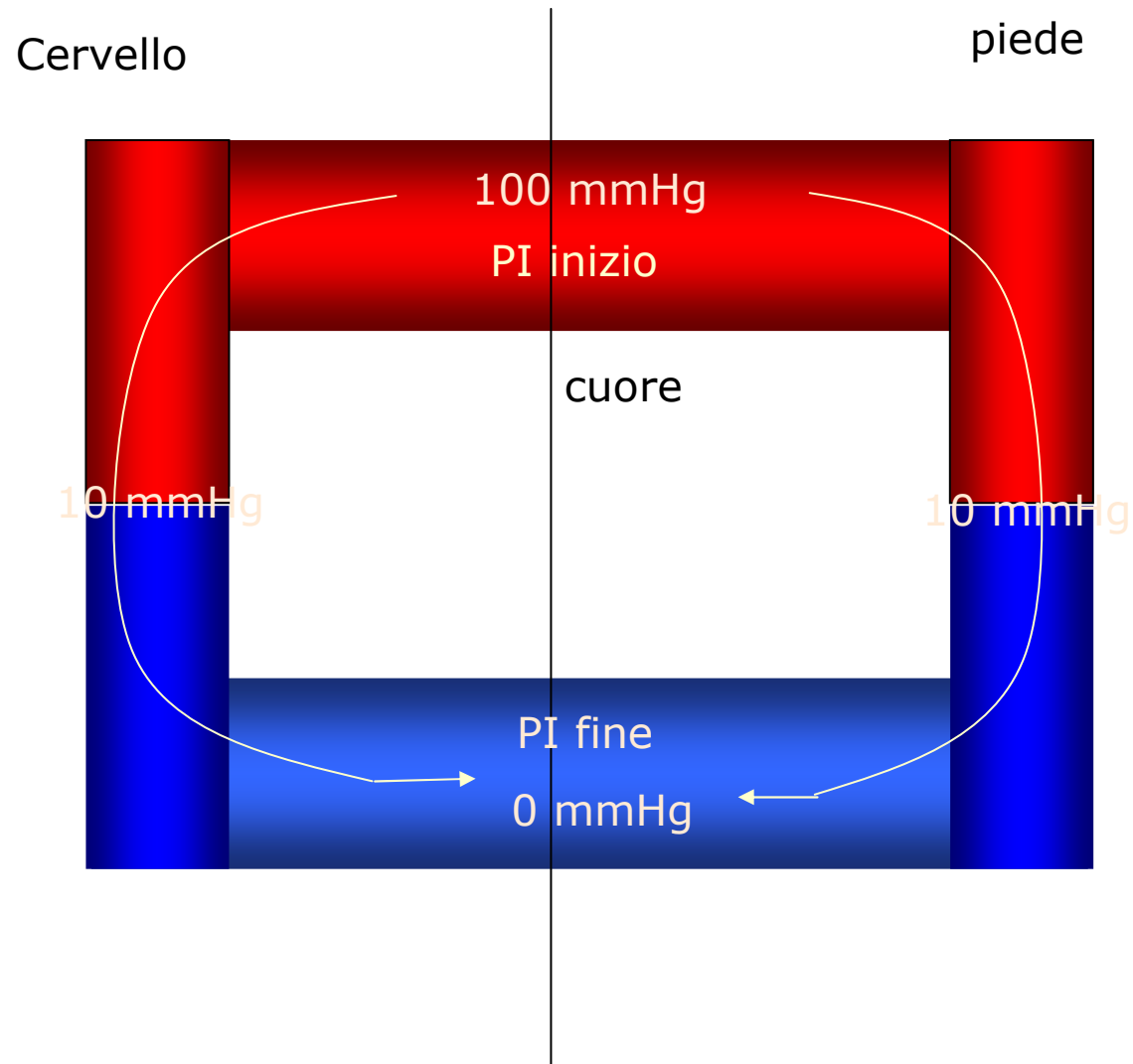
$$P_i = [(h \text{ cm}) * 0,74] \text{ mmHg}$$





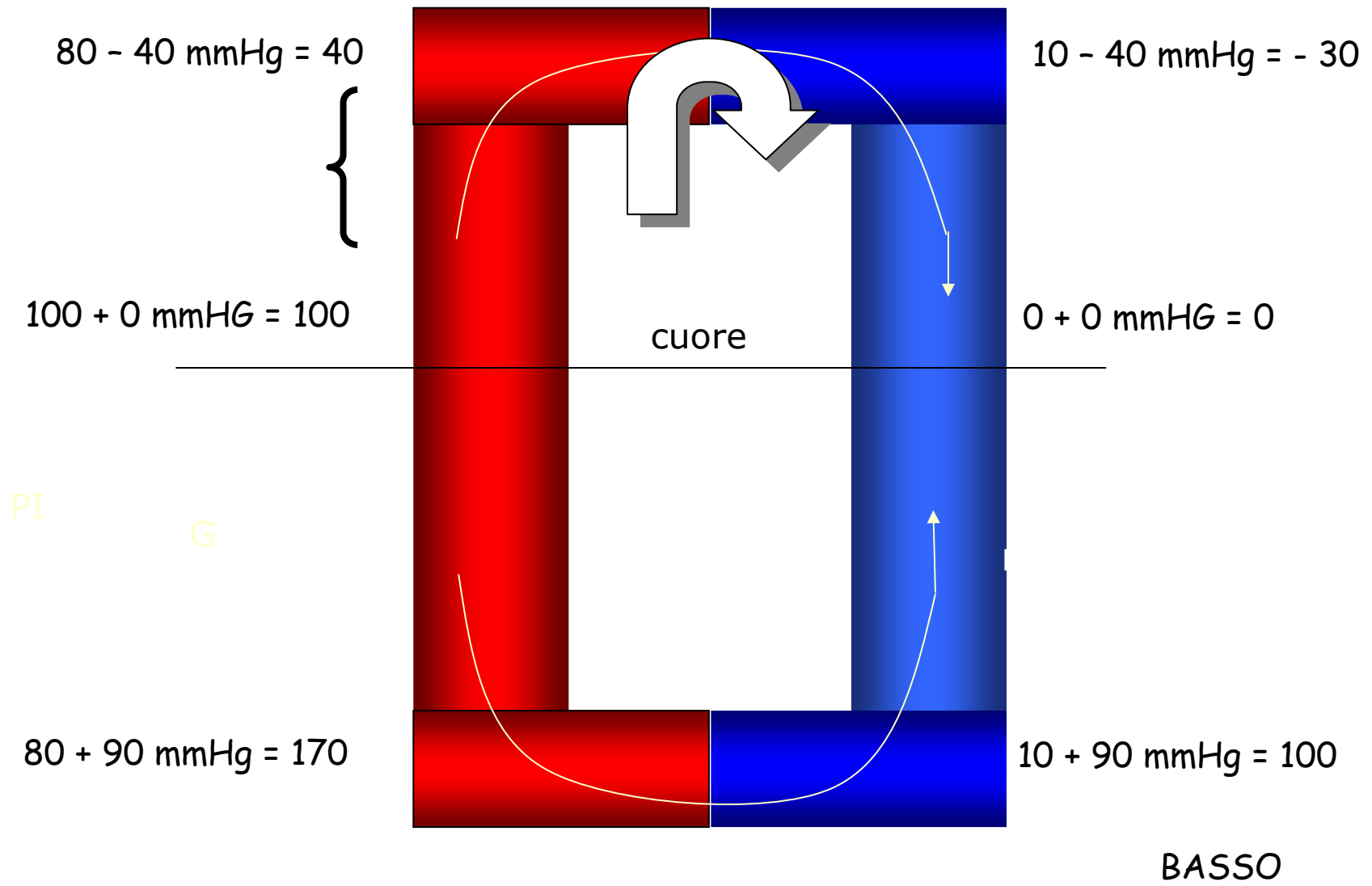
In un recipiente pieno di liquido a parete rigida, il passaggio dalla posizione orizzontale a quella verticale determina variazioni di P al di sopra e al di sotto del piano di indifferenza idrostatica di un valore pari alla P_i di una colonna di liquido di altezza $h \cdot \rho g$.

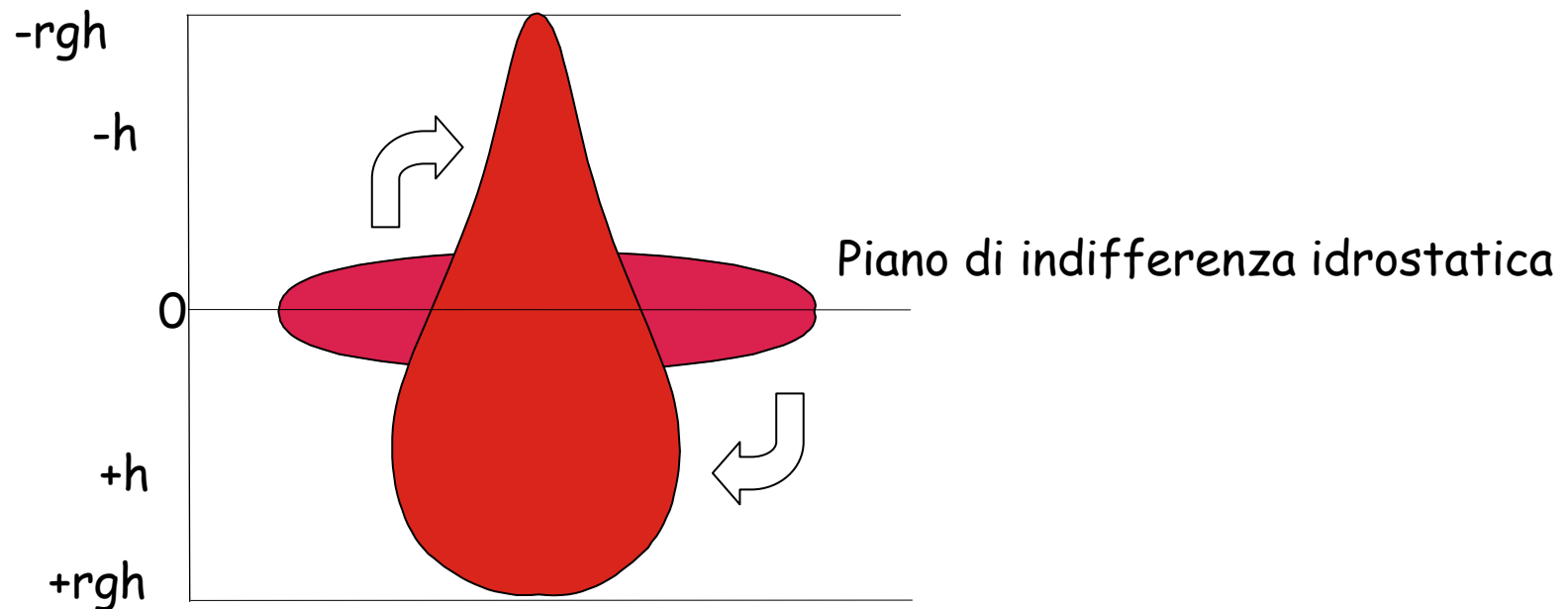
Effetti sulla pressione dei vasi: clinostatismo



Effetti sulla pressione dei vasi: ortostatismo

ALTO





In un recipiente a pareti distensibili, come quelle dei vasi sanguigni, le variazioni di P determinate dalla gravità comportano uno spostamento di volume dalle porzioni superiori a quelle inferiori rispetto al piano di indifferenza idrostatica.



Effetti della Pressione idrostatica in ortostatismo

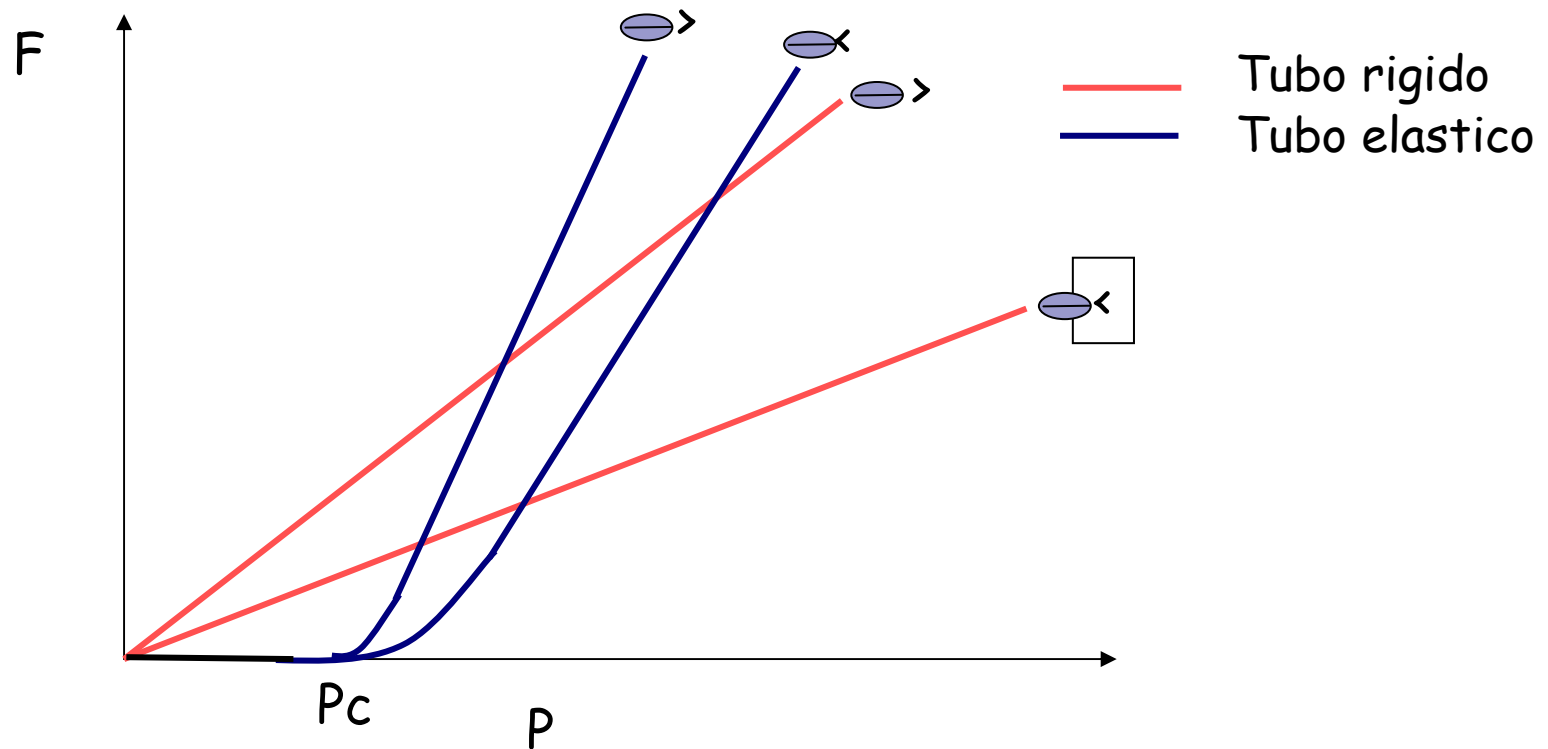
Aumento della P al di sotto del cuore (piano di indifferenza idrostatica), per effetto della P_i causata dalla colonna di sangue che gravita verso il basso. **Accumulo di sangue nelle vene**, dotate di elevata distensibilità.

Il ritorno venoso è assicurato da presenza **valvole venose, pompa muscolare e venocostrizione**.

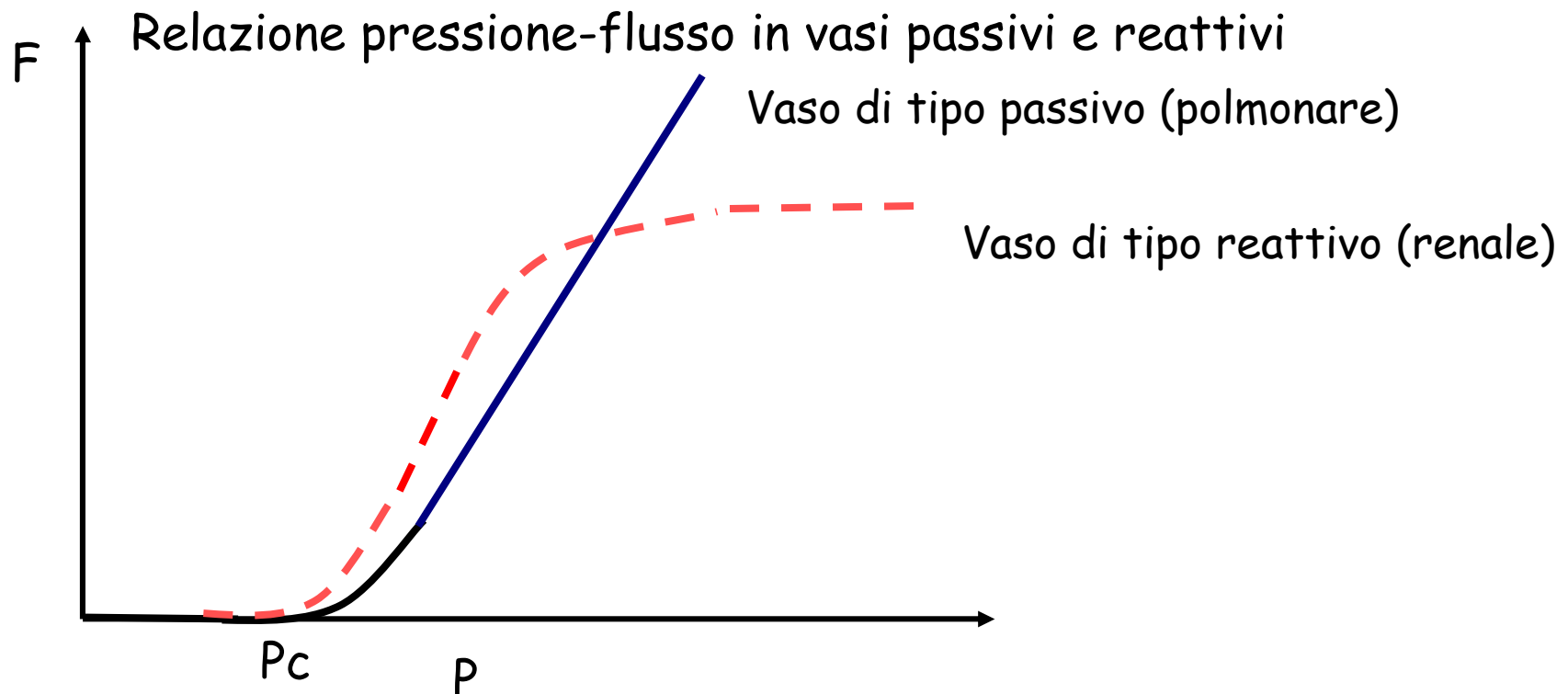
Riduzione della P al di sopra del cuore (piano di indifferenza idrostatica), **riduzione dell'apporto di sangue al cervello**.

Il **flusso è assicurato da aggiustamenti cardio-circolatori**.

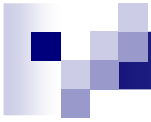
Per un fluido che scorre in un tubo rigido, la relazione $\Delta P/F$ è lineare



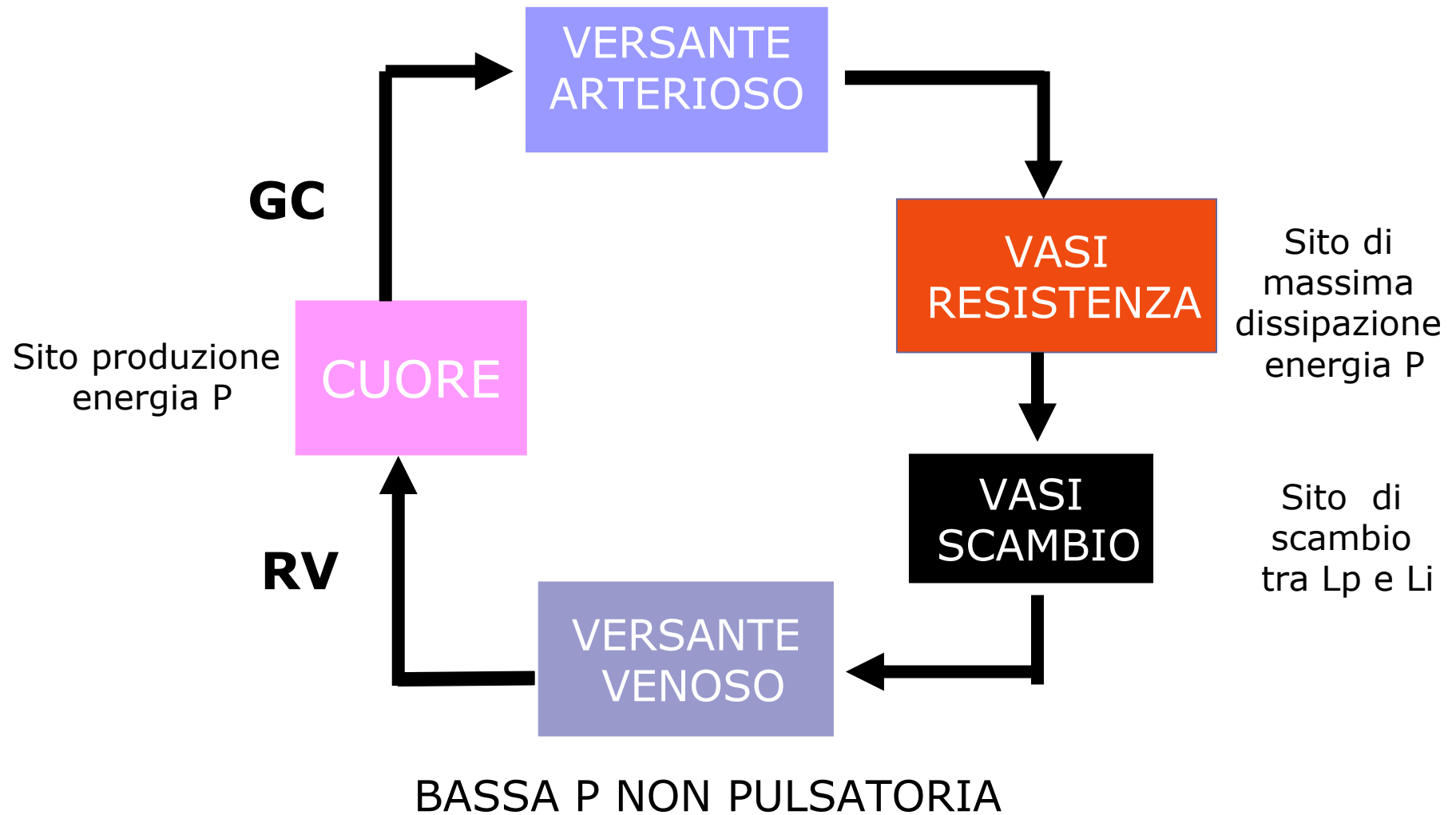
Nei tubi elastici (vasi) la relazione $\Delta P/F$ non è lineare, esiste un valore minimo di $P = P_c$ (pressione critica di chiusura), al di sotto della quale il vaso tende a chiudersi. Quando il vaso è aperto, l'aumento di P determina un aumento di flusso maggiore rispetto ad un vaso rigido dello stesso diametro, perché le pareti del vaso si distendono con conseguente riduzione della resistenza al flusso.

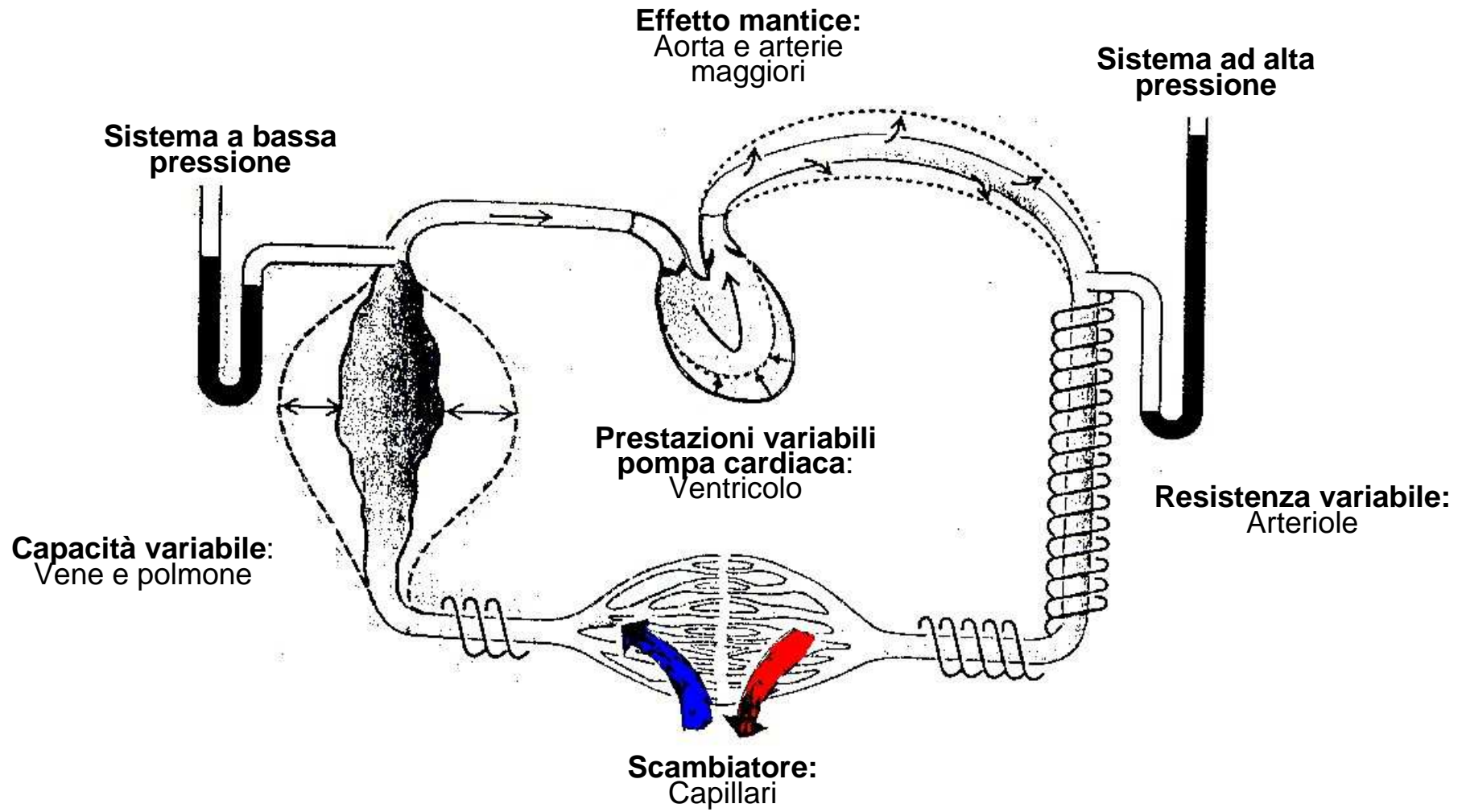
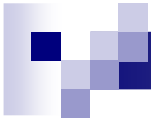


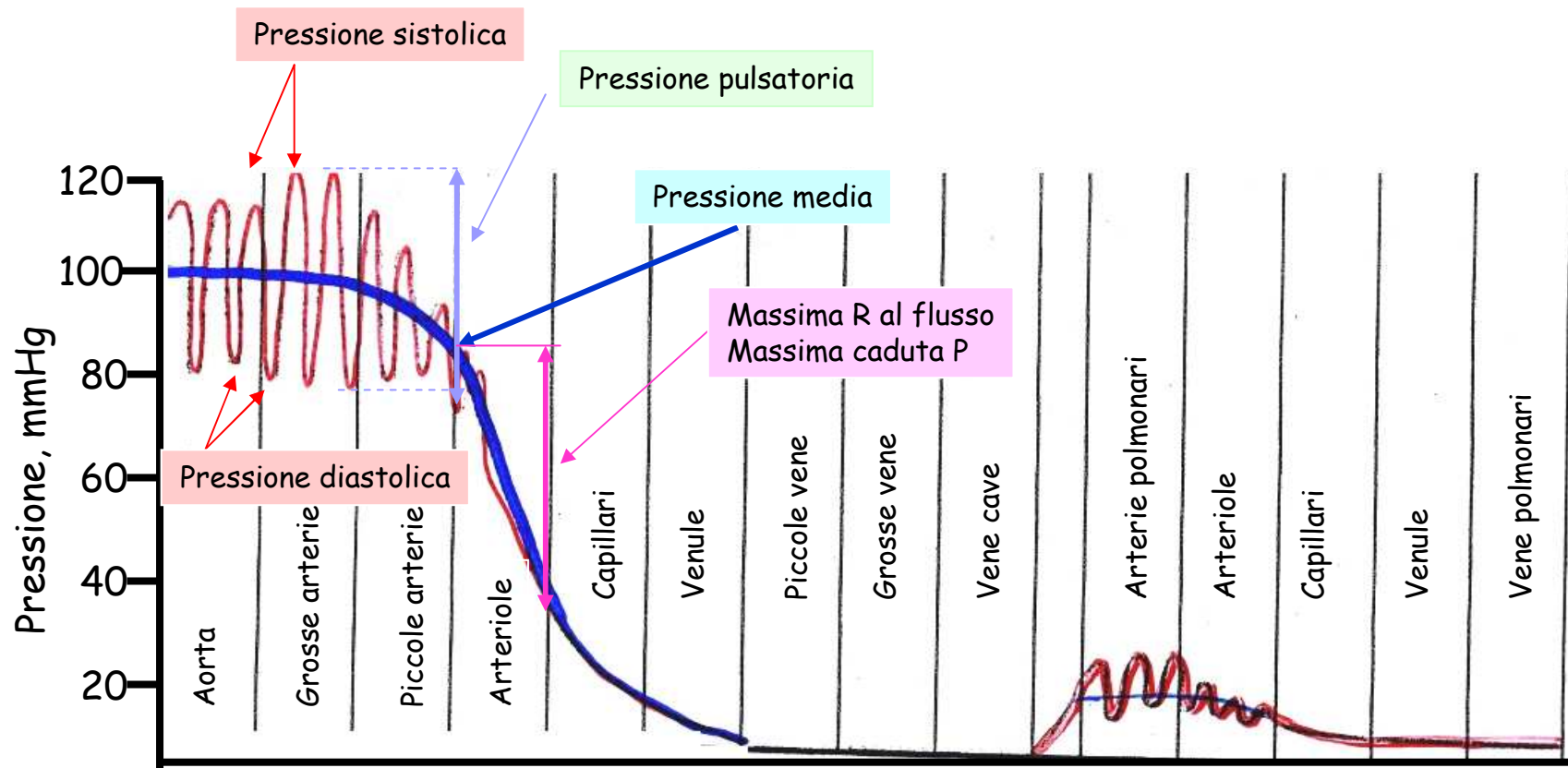
La relazione $\Delta P/F$ è diversa nei vasi di tipo passivo e reattivo. Nei vasi di **tipo passivo**, (esempio, vasi polmonari) il flusso F aumenta all'aumentare della P con l'andamento tipico dei vasi elastici. Nei vasi di **tipo reattivo** (esempio, vasi renali) F dopo un iniziale aumento, provocato dall'aumento di P , tende a rimanere costante. In questo caso infatti, il vaso reagisce restringendosi. La conseguente riduzione di diametro incrementa la resistenza, mantenendo il flusso costante.



ALTA PRESSIONE PULSATORIA







Circolazione
sistemica


Elevata resistenza

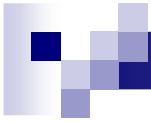
Elevata Pa

Circolazione polmonare

Bassa resistenza

Bassa Pa

- 
- Le RPT a livello del circolo sistemico ammontano a 20 mmHg/l/min
 - Per assicurare un Flusso = 5 l/min
 - Deve esistere un ΔP tra sistema arterioso e venoso di 100 mmHg
 - Questo valore è creato perché il cuore immette sangue nel sistema arterioso e lo sottrae dal sistema venoso
 - La Pressione arteriosa rappresenta una riserva di energia potenziale disponibile immediatamente per spingere il sangue in periferia.

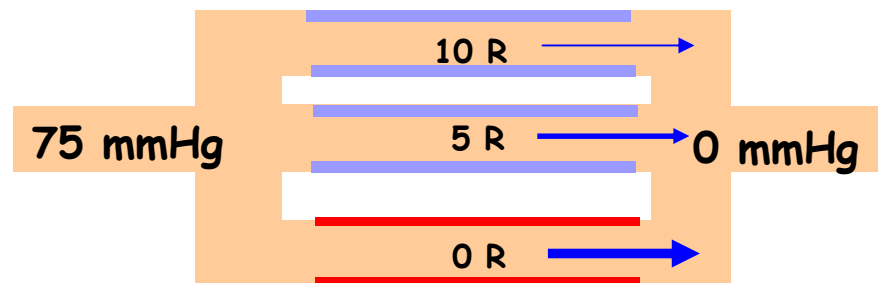
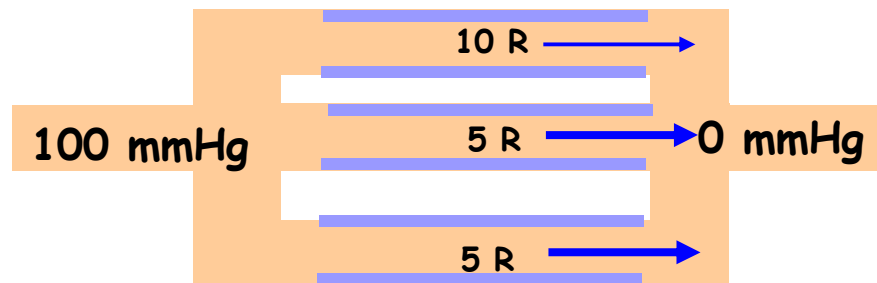


⑩ VARIARE LE RESISTENZE PERIFERICHE SISTEMICHE
SIGNIFICA VARIARE TUTTO IL FLUSSO IN PERIFERIA

⑩ VARIARE LE RESISTENZE AI SINGOLI DISTRETTI
SIGNIFICA VARIARE IL FLUSSO IN QUEL DISTRETTO.

Questo meccanismo consente la redistribuzione della gittata
cardiaca

Ridistribuzione del flusso: $F = \Delta P/R$
 $5 = 100 \text{ mmHg}/20$





Logica della redistribuzione:

- Riduzione della resistenza di un distretto ed aumento del flusso del distretto
- Riduzione di sangue a monte - Riduzione della pressione centrale
- Riduzione del flusso organi vitali che non hanno variato la resistenza
- Costrizione delle arteriole di distretti a flusso variabile - riduzione del flusso a questi distretti
- Accumulo del sangue a monte
- Aumento della pressione centrale
- Restituzione del flusso agli organi vitali



RIEPILOGO

☐ VELOCITA' DI FLUSSO: Dipendenza dalla sezione trasversa

☐ Cambiamenti di velocità nelle diverse sezioni del sistema circolatorio

☐ RELAZIONE PRESSIONE VELOCITA':

- Principio di Bernoulli

☐ DEFINIZIONE DI FLUSSO LAMINARE E TURBOLENTO:

- Numero di Reynolds e passaggio dal flusso laminare al turbolento

☐ EQUAZIONE DI POISEUILLE:

- Fattori che determinano la resistenza al flusso

- Importanza del raggio del vaso

☐ VISCOSITA' DEL SANGUE:

- Dipendenza dall'ematocrito

- Variazioni della viscosità con la velocità e il diametro del vaso

☐ COME LE RESISTENZE IN SERIE E IN PARALLELO DETERMINANO LA RESISTENZA TOTALE AL FLUSSO



📁 Variazioni della pressione nelle diverse sezioni del sistema circolatorio

☰ LA LEGGE DI LAPLACE APPLICATA AI VASI

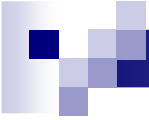
📁 La tensione di parete dipende dalla pressione transmurale e dal raggio

📁 **PRESSIONE IDROSTATICA:**

- Influenza sul sistema circolatorio

☰ **RELAZIONE PRESSIONE-FLUSSO IN VASI ELASTICI:**

- Diverso comportamento nei vasi passivi e reattivi

- 
- Per il flusso di sangue nei vasi valgono le leggi dell'emodinamica, per cui il flusso dipende dalla pressione di propulsione diviso la resistenza.
 - In vasi a sezioni diverse la velocità di flusso aumenta con la diminuzione del diametro del vaso
 - Secondo la Legge di Hagen-Poiseuille la resistenza al flusso è direttamente proporzionale alla viscosità del liquido e alla lunghezza del vaso e inversamente proporzionale alla 4^a potenza del raggio.
 - Anche se l'applicazione di questa legge al flusso ematico è limitata, essa spiega comunque il perché della localizzazione della resistenza principale al flusso nelle arteriole.
 - Il flusso laminare diventa turbolento quando il Numero di Reynolds supera il valore critico di 2000
 - La viscosità del sangue aumenta al diminuire della velocità del sangue per formazione di aggregati di globuli rossi.
 - Nei vasi sanguigni di diametro inferiore a 300 μ si ha una netta diminuzione della viscosità per effetto Fahraeus-Lindqvist (accumulo assiale dei globuli rossi).