

Fisiologia della Respirazione

9.Scambi gassosi-ventilazione vent/perf

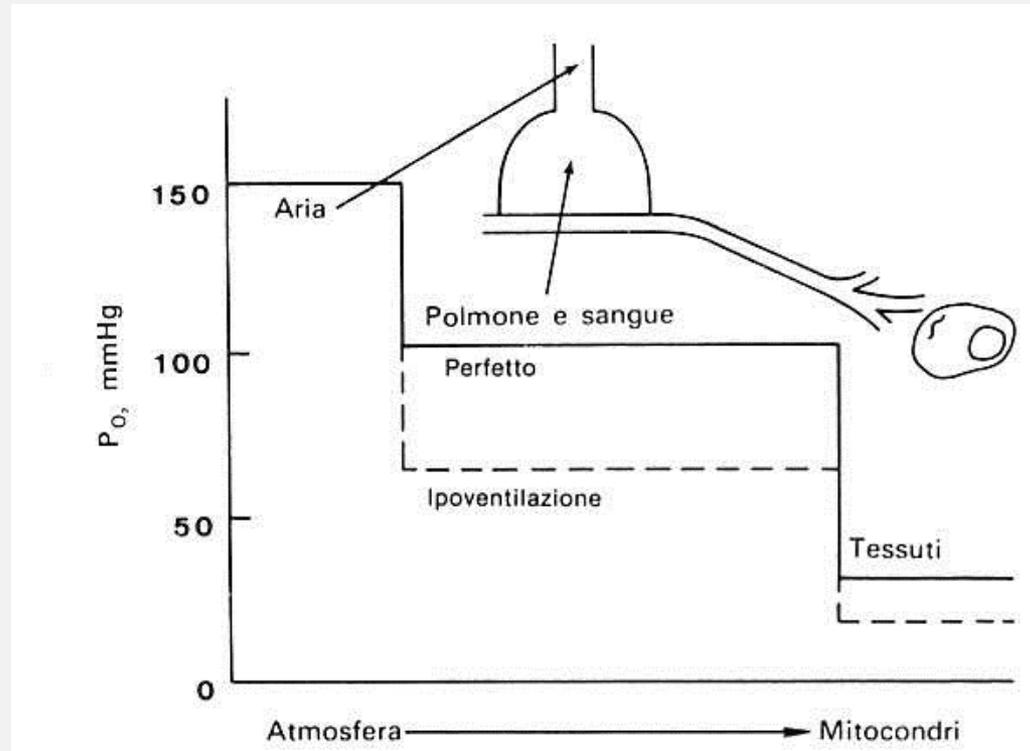
FGE aa.2015-16

Obiettivi

- Studio delle relazioni quantitative tra ventilazione, flusso di sangue nei polmoni, composizione dell'aria ambiente, $V' O_2$, $V' CO_2$ e composizione dell'aria alveolare e loro influenza sugli scambi respiratori
- La cascata dell' O_2
- Calcolo di $V' O_2$ e $V' CO_2$, RR
- La ventilazione alveolare determina la composizione dell'aria alveolare
- Equazione dell'aria alveolare
- Distribuzione zonale della ventilazione e della perfusione nel polmone
- Rapporto $V' A/Q'$ nei distretti polmonari
- Rapporto $V' A/Q'$ e scambi gassosi: RR e pressioni parziali di O_2 e CO_2 distrettuali
- La disomogenietà del rapporto $V' A/Q'$ come causa di ipossiemia
- Shunt veno-arterioso
- Spazio morto alveolare e spazio morto fisiologico

Il trasporto dell'O₂

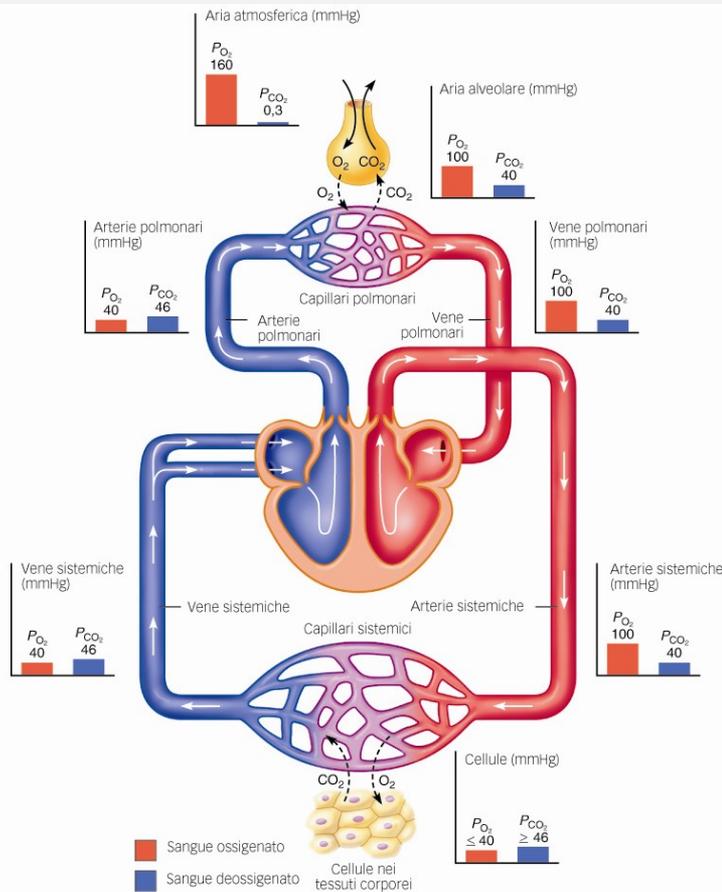
- **La cascata dell'O₂**
- **La P_aO₂ deve rimanere entro determinati limiti**
- **Cause di ipossiemia**
- Ipoventilazione alveolare (*disturbi del centro ventilatorio, aumento dello spazio morto, etc.etc*) causa la diminuzione della P_AO₂ e della P_aO₂
- Ipodiffusione
- Shunt veno-arterioso
- Maldistribuzione del rapporto V'/Q'



Pressioni parziali dei gas

L'aria alveolare, rispetto a quella atmosferica, ha un più basso tenore di O_2 e una maggiore concentrazione di CO_2 e vapor acqueo. Tali differenze sono dovute a un bilancio dinamico tra i gas inspirati/espirati e quelli assorbiti/ceduti dal sangue.

Pressioni in mmHg (e % di gas nella miscela)



GAS	ATMOSFERA	ALVEOLI	SANGUE ARTERIOSO	SANGUE VENOSO	TESSUTI
O_2	158.0 (20,8%)	100 (13,1%)	95 (12,6%)	40 (5,7)	≤ 40
CO_2	0.3 (0,04%)	40 (5,3%)	40 (5,3%)	46 (6,5%)	≥ 46
H_2O	5.7 (0,8%)	47 (6,2%)	47 (6,2%)	47 (6,7%)	47
N_2	596.0 (78,4%)	573 (75,4)	573 (75,9%)	573 (81,1)	573
TOTALE	760	760	755	706	≥ 706

$V'O_2$ e $V'CO_2$

$$\dot{V}O_2 = \dot{V}_I F_{IO_2} - \dot{V}_E F_{EO_2}$$

$$\dot{V}CO_2 = \dot{V}_E F_{ECO_2} - \dot{V}_I F_{ICO_2} = \dot{V}_E F_{ECO_2} - 0$$

$$\dot{V}N_2 = \dot{V}_I F_{IN_2} - \dot{V}_E F_{EN_2} = 0$$

$$\dot{V}_I F_{IN_2} = \dot{V}_E F_{EN_2}$$

$$\dot{V}_I = \dot{V}_E \frac{F_{EN_2}}{F_{IN_2}}$$

$$\dot{V}O_2 = \dot{V}_E \frac{F_{EN_2}}{F_{IN_2}} F_{IO_2} - \dot{V}_E F_{EO_2}$$

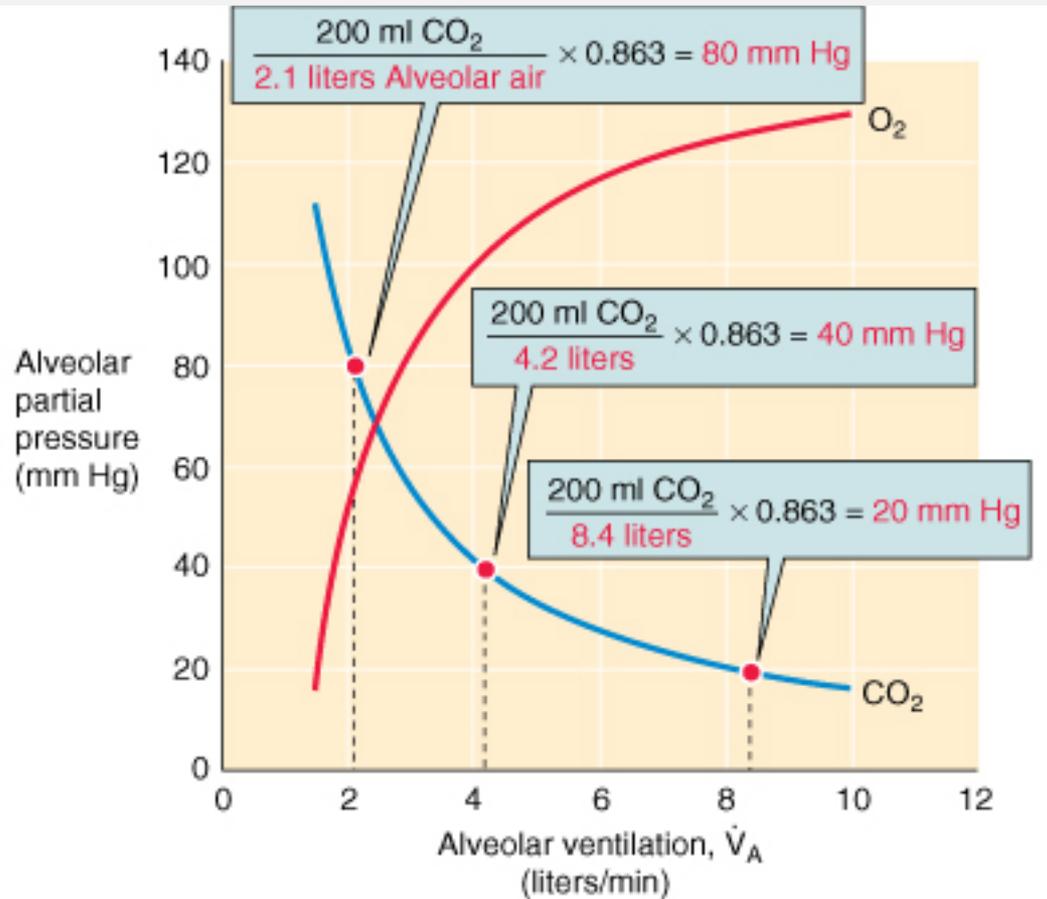
$$\dot{V}O_2 = \dot{V}_E \left(\frac{F_{EN_2}}{F_{IN_2}} F_{IO_2} - F_{EO_2} \right)$$

Rapporto di scambio respiratorio (RR)

$$R = \frac{\dot{V}CO_2}{\dot{V}O_2}$$

$$R = \frac{F_E CO_2}{F_i O_2 \frac{F_E N_2}{F_i N_2} - F_E O_2}$$

V'_A e composizione dell'aria alveolare



- $F_A CO_2 / P_A CO_2$ sono inversamente proporzionali a V'_A
- $F_A O_2 / P_A O_2$ tendono a $F_I O_2 / P_I O_2$ per V'_A che tende all'infinito
- Le relazioni tra $F_A CO_2$, $F_A O_2$ e V'_A possono essere **descritte in termini quantitativi** tenendo in debito conto il metabolismo ($V'O_2$, $V'CO_2$)

A: componente alveolare; si misura determinando la frazione del gas al termine di una espirazione forzata (Haldane-Priestley). Si può anche indicare con il pedice ET (end tidal) o E' o ac

Ventilazione alveolare equazione dell'aria alveolare per la PCO_2

- Produzione di CO_2 divisa per la frazione molare (in volume) di CO_2 dell'aria alveolare

$$\dot{V}_A^{\text{STPD}} = \frac{\dot{V}\text{CO}_2^{\text{STPD}}}{F_A \text{CO}_2}$$

$$\dot{V}_A^{\text{STPD}} = \frac{\dot{V}\text{CO}_2^{\text{STPD}}}{\frac{P_A \text{CO}_2}{(P_B - 47)}}$$

Ventilazione alveolare equazione dell'aria alveolare per la PCO_2

$$\dot{V}_A^{STPD} \bullet \frac{P_A CO_2}{(P_B - 47)} = \dot{V}CO_2^{STPD}$$

$$\dot{V}CO_2^{STPD} = \dot{V}_A^{BTSPS} \frac{P_A CO_2}{(P_B - 47)} \frac{273}{310} \frac{P_B}{760} \frac{(P_B - 47)}{P_B}$$

$$P_A CO_2 = 0.863 \frac{\dot{V}CO_2^{STPD}}{\dot{V}_A^{BTSPS}}$$

(mm HG • litri/ml)

$$\dot{V}_A^{BTSPS} = 0.863 \frac{200 \text{ ml/min}}{40 \text{ mm Hg}} = 4315 \text{ ml/min}$$

Equazione dell'aria alveolare

- Le relazioni tra V'_A , $F_A\text{CO}_2$ ($P_A\text{CO}_2$) e $F_A\text{O}_2$ ($P_A\text{O}_2$) possono essere **descritte in modo quantitativo**
- Ciò significa: i) descrivere la cosiddetta **equazione dell'aria alveolare**; ii) quindi, descrivere sul **diagramma $P_A\text{CO}_2 - P_A\text{O}_2$** le relazioni tra le pressioni parziali dei due gas in funzione di V'_A

Poniamo:

- V_A : volume di aria umida che **entra** negli alveoli ad ogni inspirazione
- $V_A\text{CO}_2$: ml di CO_2 (satturo di vapor d'acqua) **aggiunto a V_A** nei polmoni
- $V_A\text{O}_2$: ml di O_2 (satturo di vapor d'acqua) **sottratto a V_A** nei polmoni
- F_A : frazione molare dei gas negli alveoli
- F_I : frazione molare dei gas ispirati ($F_I\text{O}_2 = 0.2093$; $F_I\text{CO}_2 = 0.0003$)
- R: $V_A\text{CO}_2 / V_A\text{O}_2$ quoziente respiratorio (*respiratory ratio*)

Equazione dell'aria alveolare

Per la CO₂

$$P_A \text{CO}_2 = 0.863 \frac{\dot{V} \text{CO}_2^{\text{STPD}}}{\dot{V}_A^{\text{BTSP}}}$$

Per l'O₂

$$P_A \text{O}_2 = P_I \text{O}_2 - P_A \text{CO}_2 / R$$

(Equazione dell'aria alveolare dell' O₂)

- Se R = 1 (o F_IO₂ = 1)

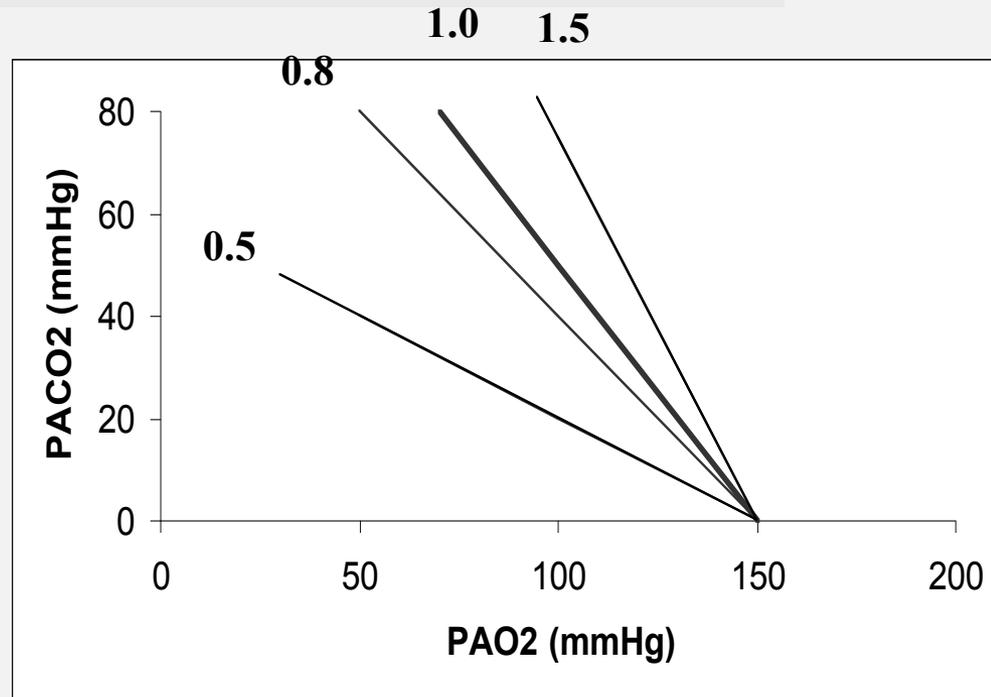
$$P_A \text{CO}_2 = P_I \text{O}_2 - P_A \text{O}_2$$

Equazione dell'aria alveolare in aria; $R \neq 1$

- Se si respira aria, la relazione tra $P_A\text{CO}_2$ e $P_A\text{O}_2$ è

$$P_A\text{O}_2 = - \left[F_I\text{O}_2 + \frac{1 - F_I\text{O}_2}{R} \right] \bullet P_A\text{CO}_2 + P_I\text{O}_2$$

- Per qualsiasi valore costante di R , di $F_I\text{O}_2$ (di $P_I\text{O}_2$) esiste una relazione lineare tra $P_A\text{O}_2$ e $P_A\text{CO}_2$ e la cui pendenza dipende da R , mentre l'intercetta a $P_A\text{CO}_2 = 0$ è rappresentata dal valore di $P_I\text{O}_2$



Gli scambi gassosi al lato capillare- Equazioni iso-R del sangue

$$\dot{V}_{O_2} = \dot{Q}_a^A C_{aO_2}^A - \dot{Q}_a^A C_{\bar{v}O_2} = \dot{Q}_a^A (C_{aO_2}^A - C_{\bar{v}O_2})$$

$$\dot{V}_{CO_2} = \dot{Q}_a^A C_{\bar{v}CO_2}^A - \dot{Q}_a^A C_{aCO_2}^A = \dot{Q}_a^A (C_{\bar{v}CO_2}^A - C_{aCO_2}^A)$$

$$R = \frac{C_{\bar{v}CO_2}^A - C_{aCO_2}^A}{C_{aO_2}^A - C_{\bar{v}O_2}}$$

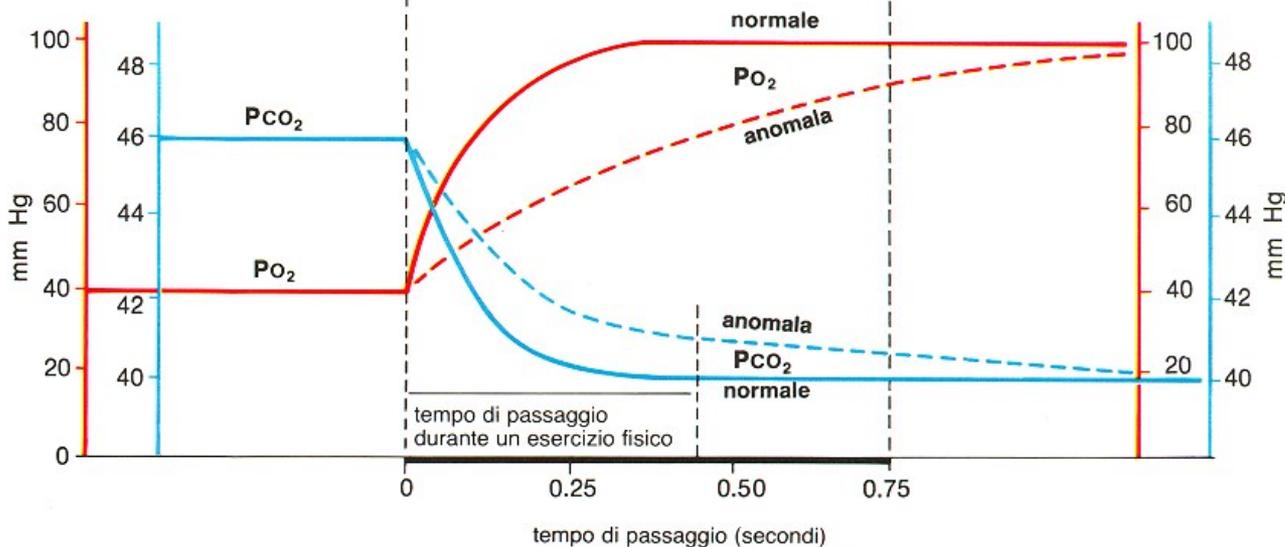
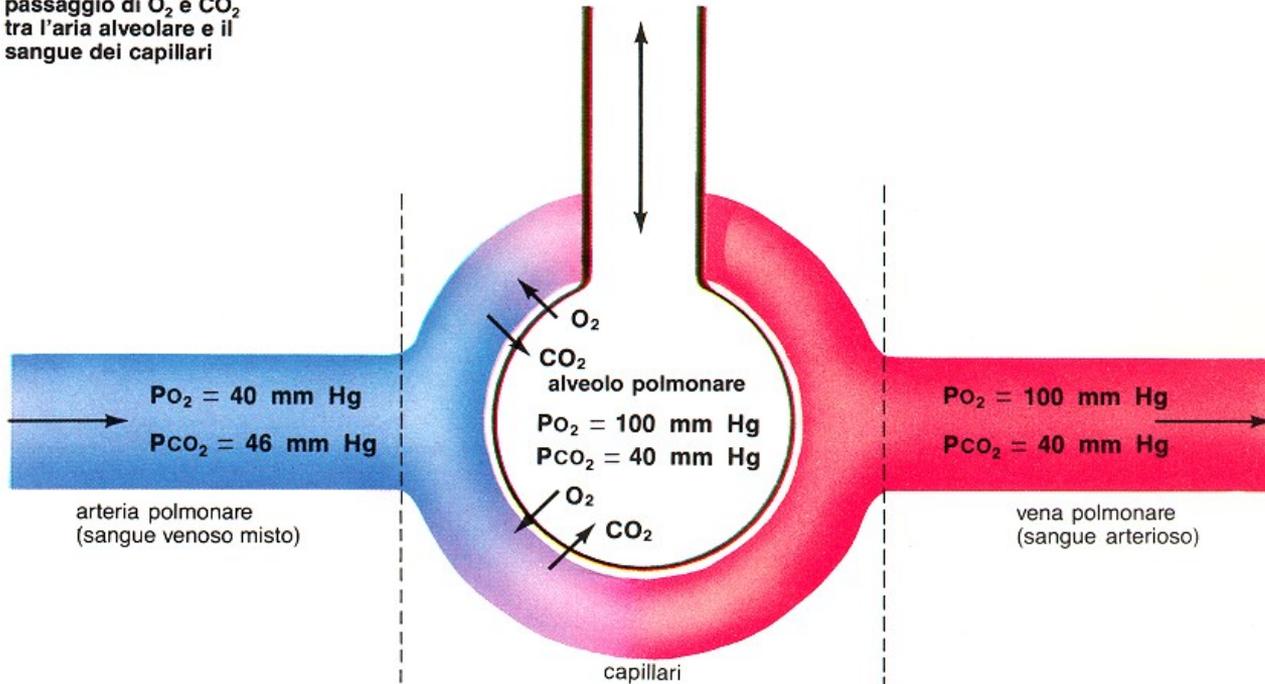
Costruzione della curva di distribuzione

Pressioni parziali dei gas al termine dei capillari e negli alveoli

1. Nel corso del tragitto lungo il capillare, le pressioni parziali di O_2 e CO_2 del sangue si equilibrano con quelle alveolari
2. Le pressioni parziali dei gas al termine del capillare polmonare **sono quindi in equilibrio** con quelle degli alveoli corrispondenti in tutti i distretti polmonari
3. L'R per il sangue deve essere uguale a quella dell'aria alveolare

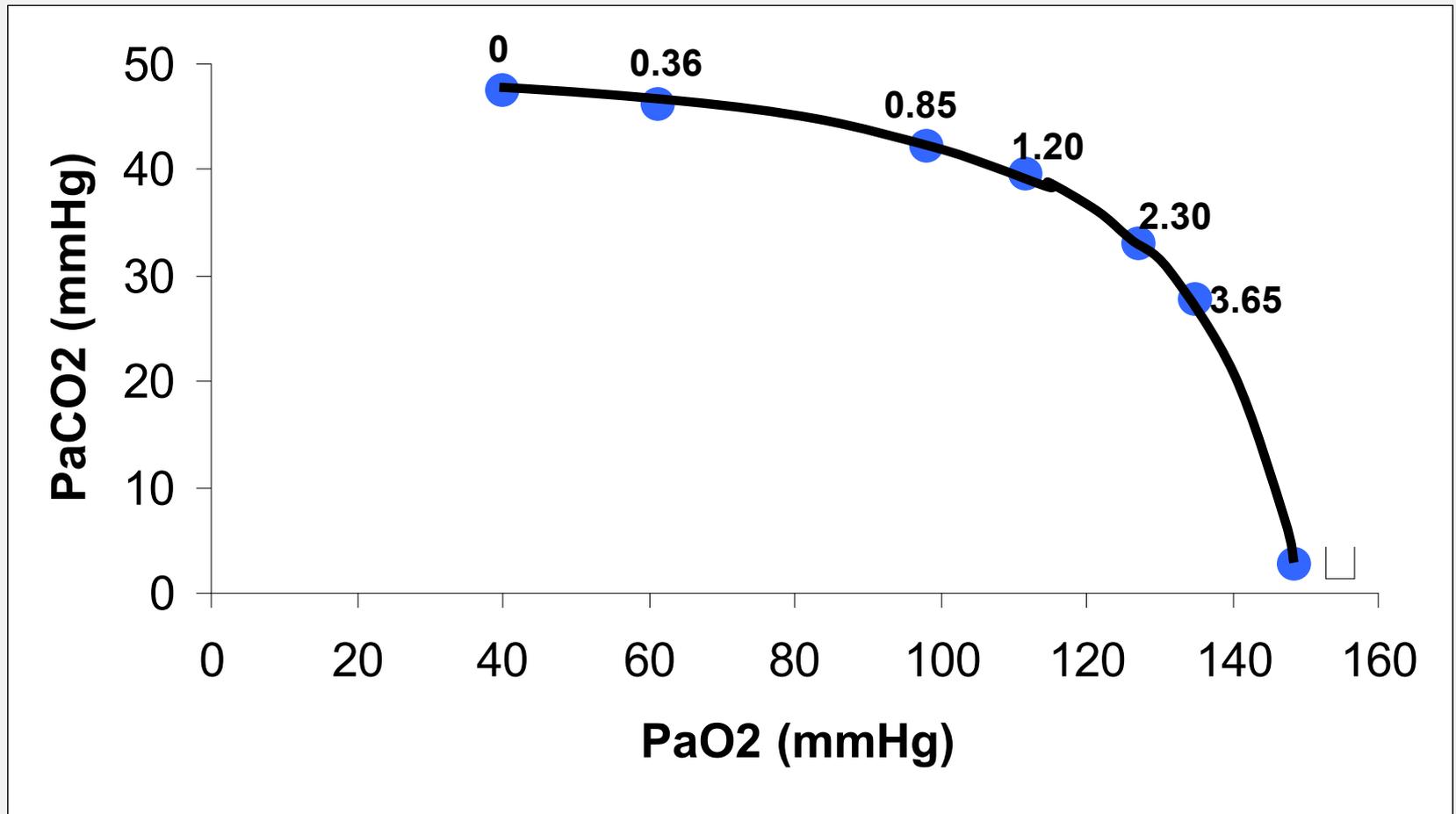
Press. Parziali estremo venoso e arterioso

passaggio di O_2 e CO_2
tra l'aria alveolare e il
sangue dei capillari



l'equilibrio alveolo-capillare delle pressioni parziali, costituendo ciò un fattore di sicurezza per gli scambi.

Rapporto vent/perf aria e sangue



P_AO_2 , P_ACO_2 e V'_A/Q'

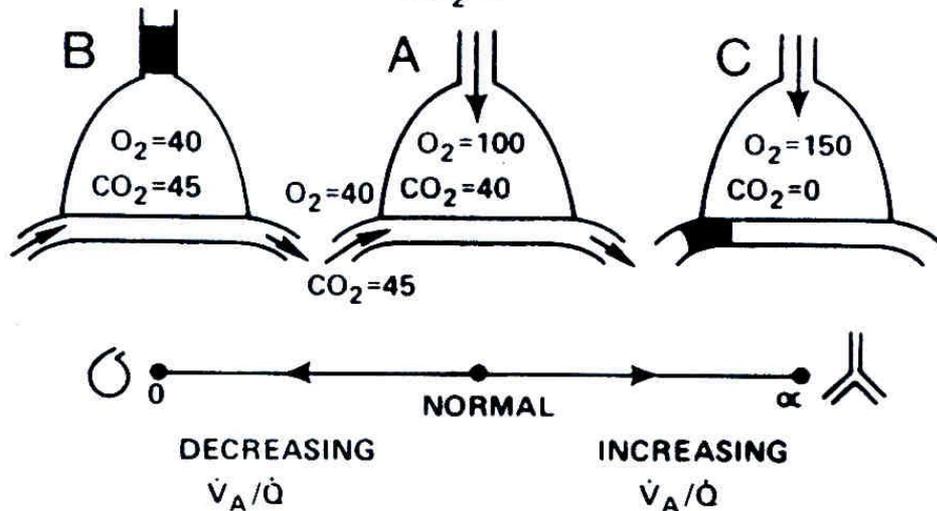
Ventilation - Perfusion Inequality

- Alveolar PO_2 depends on the balance of alveolar ventilation - fresh gas flow - and O_2 removal by the circulation.

Consider 0 Normal and $\dot{V}_A/\dot{Q} \rightarrow \infty$

$O_2 = 150\text{mmHg}$
 $CO_2 = 0$

Figure 5.6.

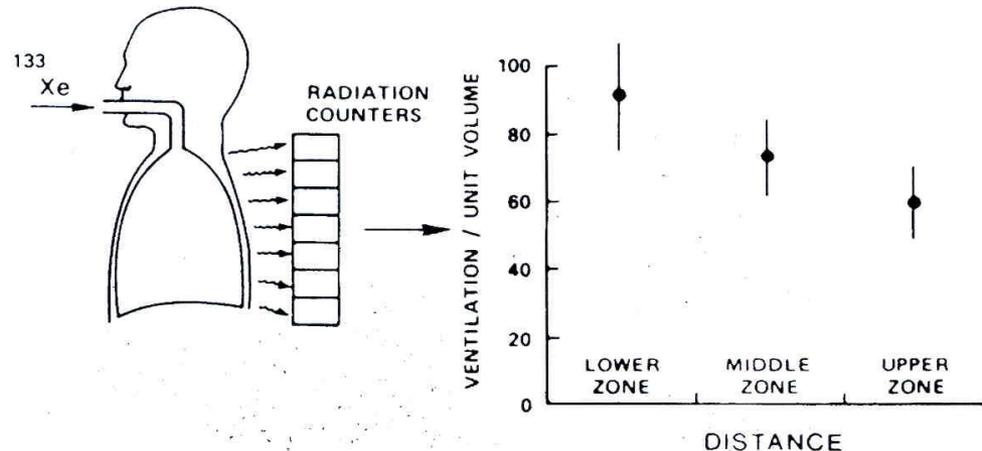


- In realtà, nel polmone i valori di V'_A/Q' sono distribuiti secondo un *continuum* di valori
- Abbiamo, cioè, una vera e propria curva di distribuzione dei valori di V'_A/Q' tra due estremi che corrispondono ad uno spazio morto (alveolare) e ad uno shunt
- La distribuzione del rapporto V'_A/Q' può essere disomogenea in un polmone patologico; estese zone con V'_A/Q' vicino a 0 o infinito

Rapporto V'_A/Q'

Distribuzione regionale della ventilazione

- Ricordiamo come è distribuita la ventilazione alveolare
- L'aria inspirata non si distribuisce uniformemente nelle varie parti del polmone;
- La ventilazione per unità di volume polmonare è maggiore nelle parti inferiori e minore in quelle superiori.

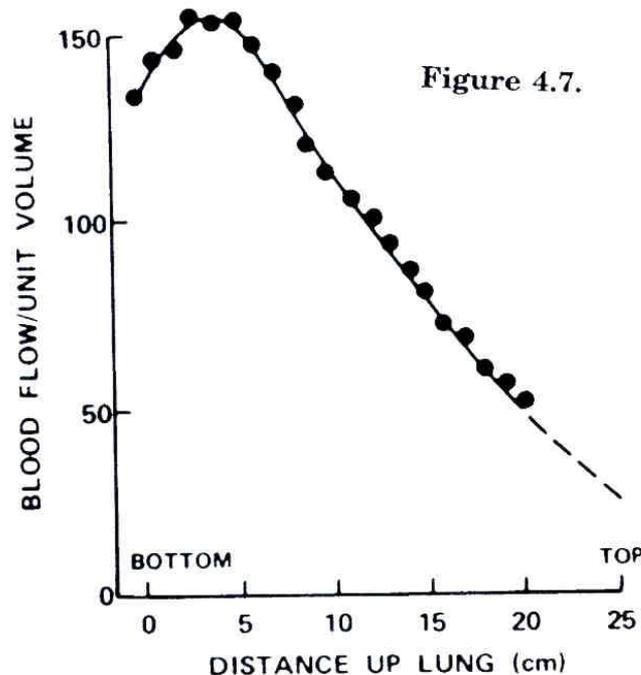


Rapporto V'_A/Q'

- Distribuzione regionale della perfusione polmonare

Where is the blood distributed?

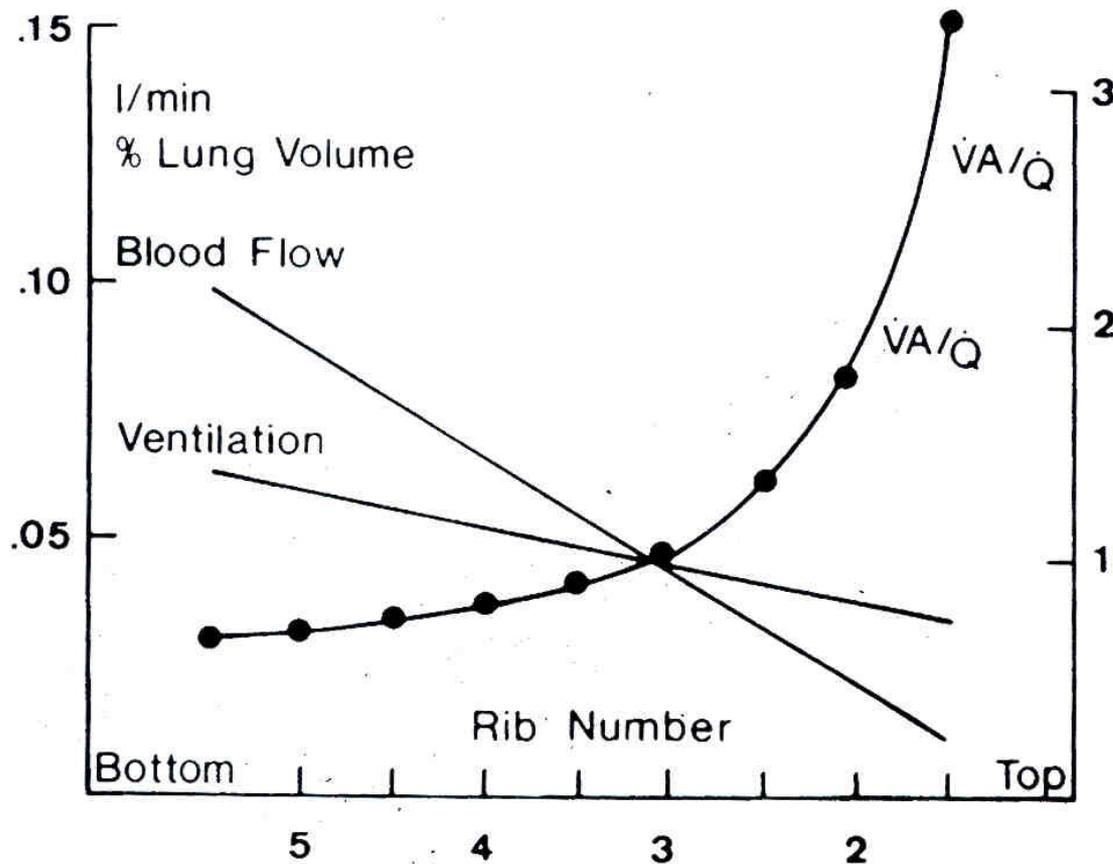
- Gravity plays a role.



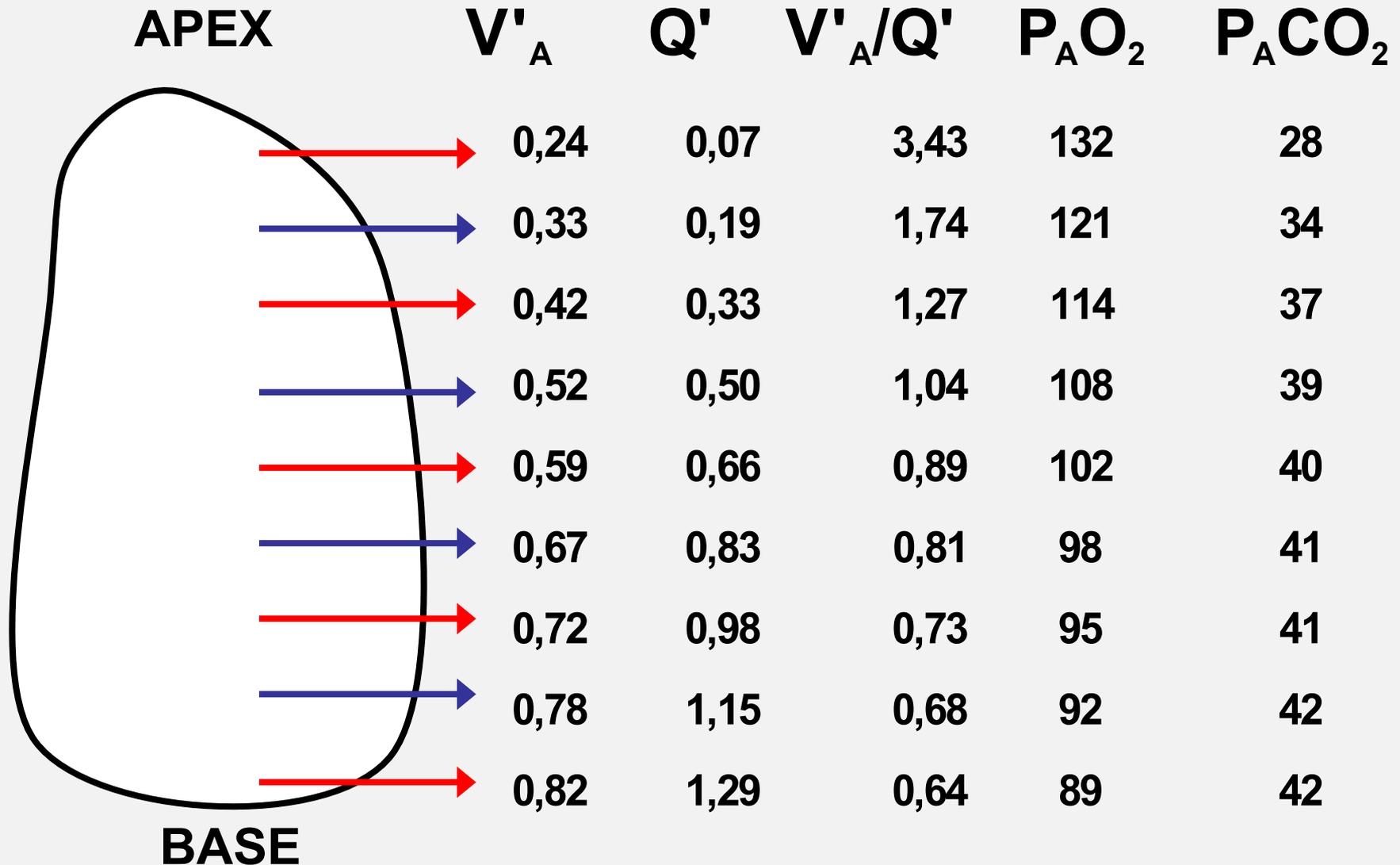
- Pulmonary pressures must pump blood up from the heart to the top of the lung.
- The top to bottom difference in vascular pressures would be approx. 20+ mmHg.

Rapporto \dot{V}'_A/\dot{Q}'

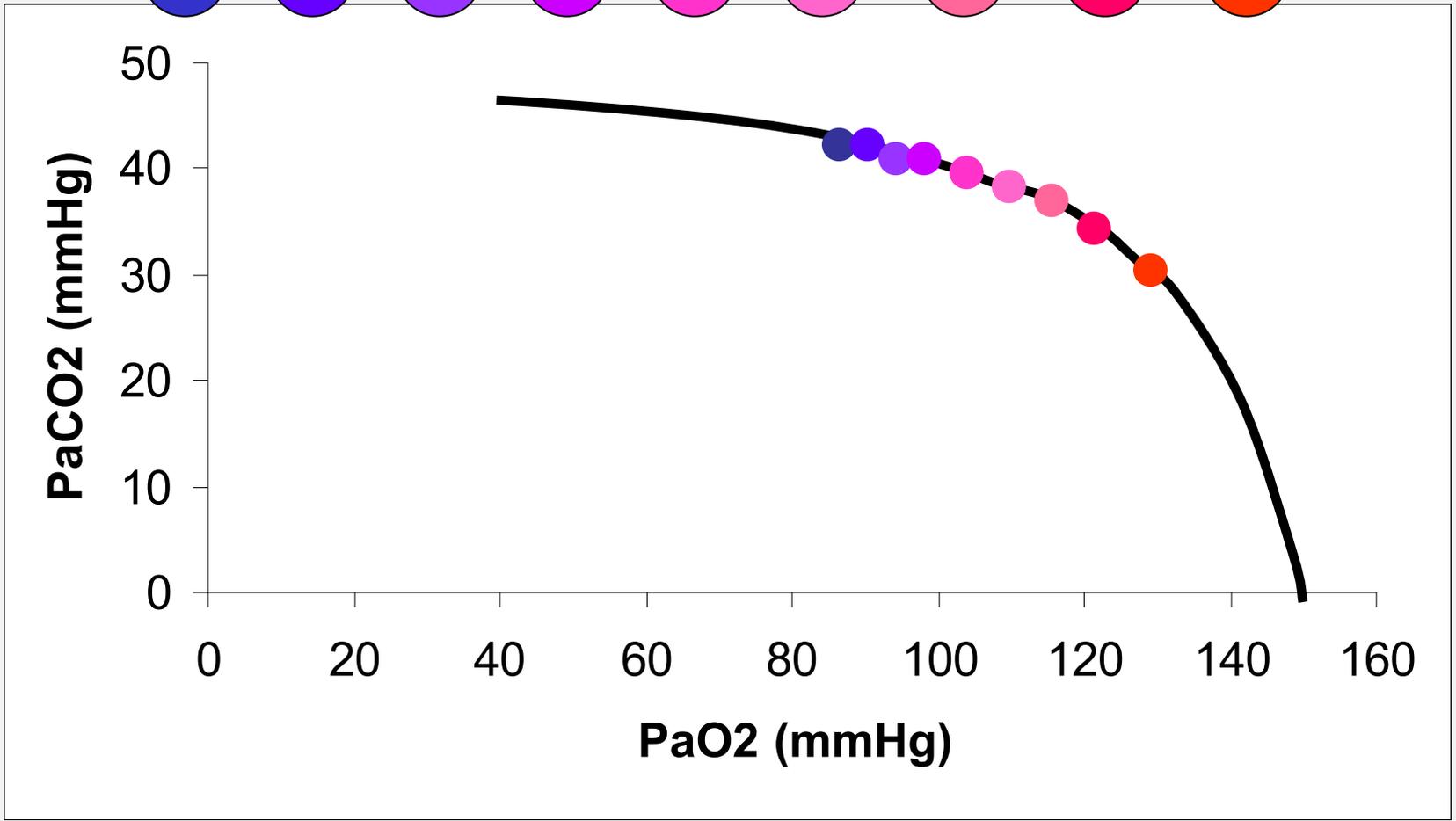
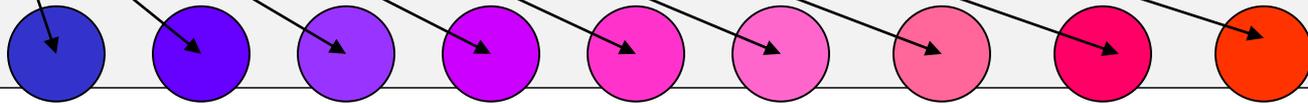
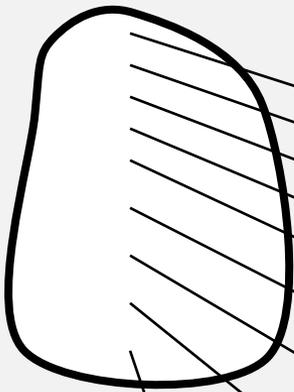
- Note Apex to base distributions of \dot{V} , \dot{Q} and \dot{V}/\dot{Q} ratios.



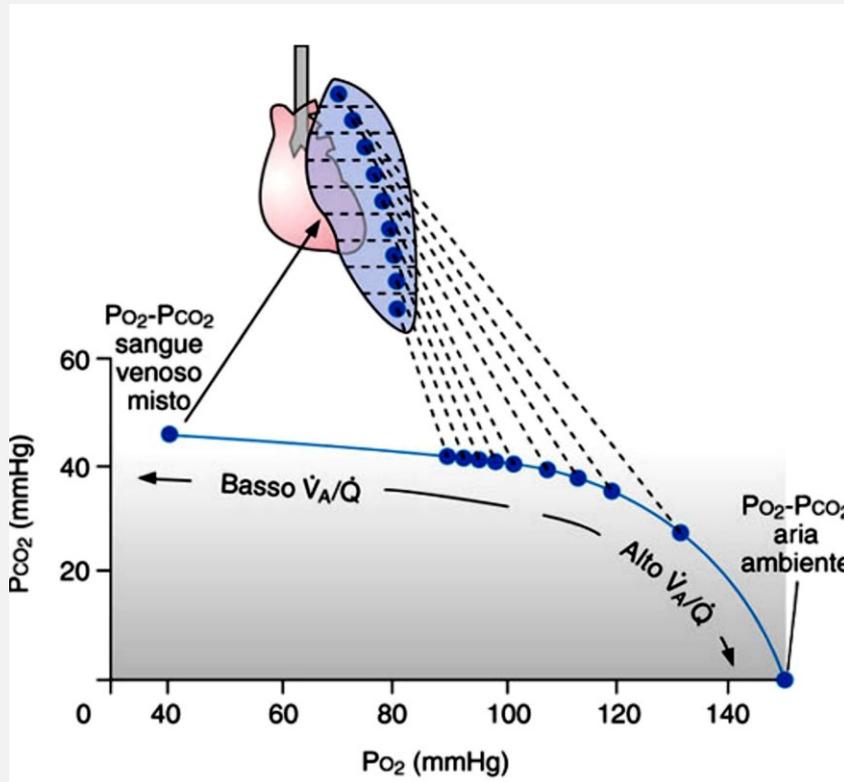
Distribuzione di V'_A/Q' , P_AO_2 e P_ACO_2 nel polmone



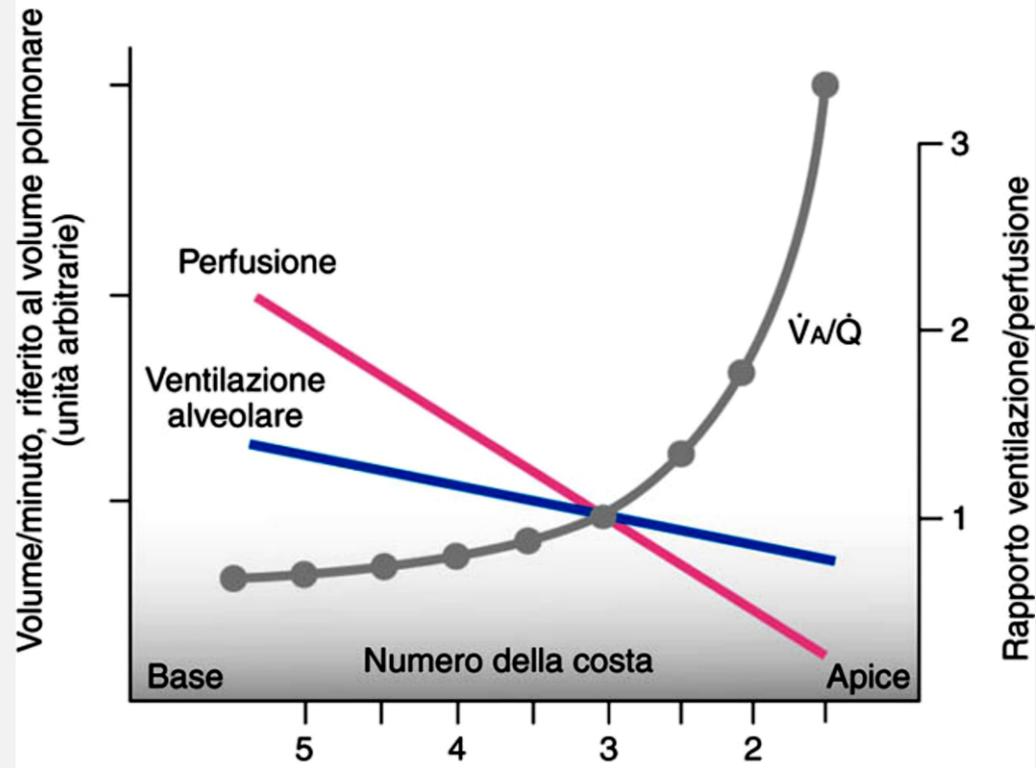
Curva di distribuzione localizzazione nel polmone



Variazioni di V'_A/Q' lungo il polmone

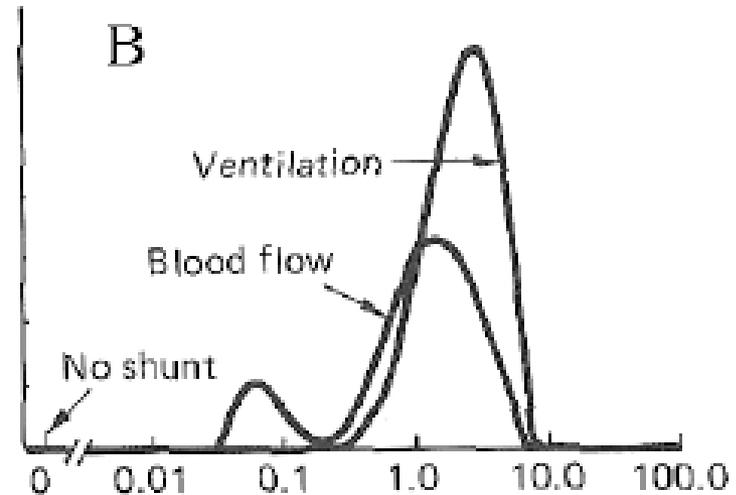
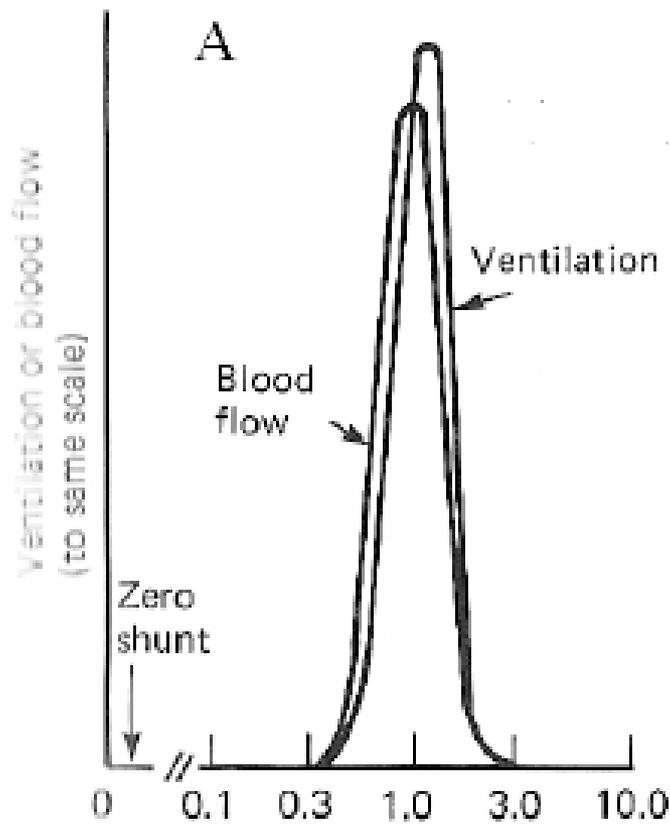


V'_A/Q' è maggiore all'apice che alla base del polmone (in ortostatismo)



V'_A/Q' aumenta andando verso l'apice del polmone sempre (in ortostatismo)

Distribuzione $V'A/Q'$ nel sano e nel patologico



Riassumendo

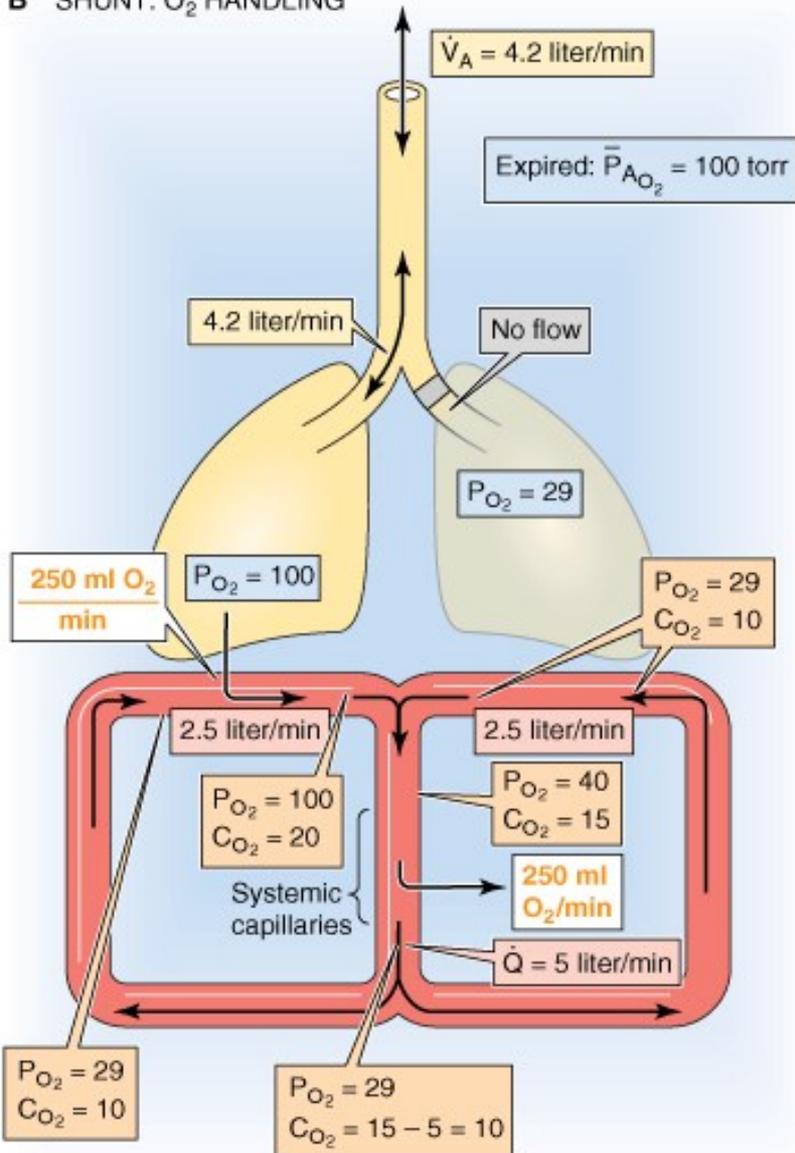
- La conclusione che si deve ricordare è la seguente: sebbene esista un **perfetto equilibrio** sia per O_2 che per CO_2 in ciascuna zona **tra aria alveolare e sangue all'uscita dei capillari**, l'aria mista alveolare espirata ha una PO_2 (P_AO_2) più alta (e una PCO_2 più bassa, $P_{AC}O_2$) del sangue arterioso a valle del polmone (P_aO_2 , P_aCO_2)
- In questo modo si instaura il cosiddetto gradiente alveolo-capillare di PO_2
- Normalmente, in presenza di scarsa maldistribuzione del rapporto V'_A/Q' è molto basso (2 - 3mm Hg)
- In vari tipi di patologie (BPCO), vi può essere una marcata maldistribuzione di V'_A/Q' ed il gradiente può essere molto ampio; si instaura iposseimia
- La maldistribuzione del rapporto V'_A/Q' è la causa prevalente (70-80 %) di ipossiemia

Shunt

- **Shunt: si riferisce al volume di sangue che entra nel sistema arterioso senza passare attraverso le aeree ventilate del polmone**
- Anche nel polmone normale un certo volume di sangue ritorna al sangue arterioso in parte impoverito di O_2 attraverso le vene bronchiali
- Un'aliquota aggiuntiva proviene dal seno coronarico (vene di Tebesio)
- In alcuni pazienti il volume di sangue venoso misto aggiunto non è trascurabile e si assiste ad una notevole caduta di P_aO_2

Shunt

B SHUNT: O₂ HANDLING



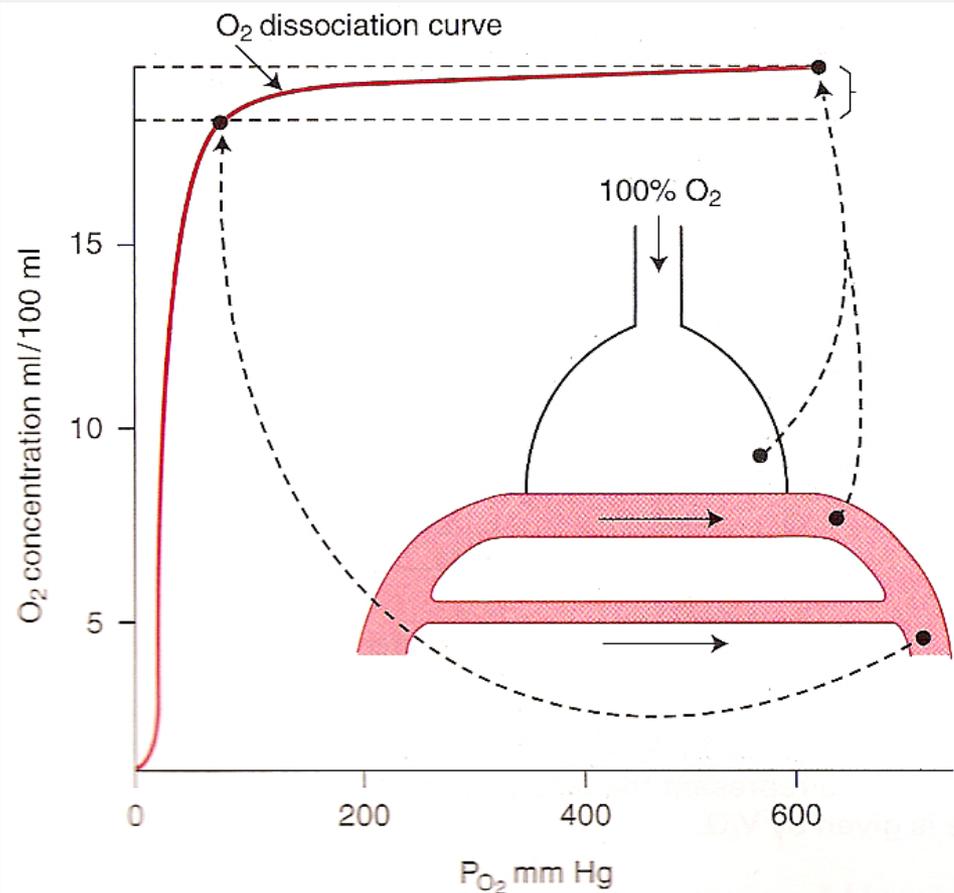
- Quando lo shunt è causato dall'aggiunta di sangue venoso misto è possibile calcolare il flusso di sangue attraverso lo shunt

$$\dot{Q}_T \cdot C_a O_2 = \dot{Q}_S \cdot C_v O_2 + (\dot{Q}_T - \dot{Q}_S) \cdot C_c' O_2$$

$$\frac{\dot{Q}_S}{\dot{Q}_T} = \frac{C_c' O_2 - C_a O_2}{C_c' O_2 - C_v O_2}$$

- Quando lo shunt è causato dall'aggiunta di sangue che non ha la stessa concentrazione di O₂ del sangue venoso misto, è possibile calcolare lo shunt come se fosse dovuto dall'aggiunta di un volume di sangue venoso misto capace di causare lo shunt osservato

Shunt



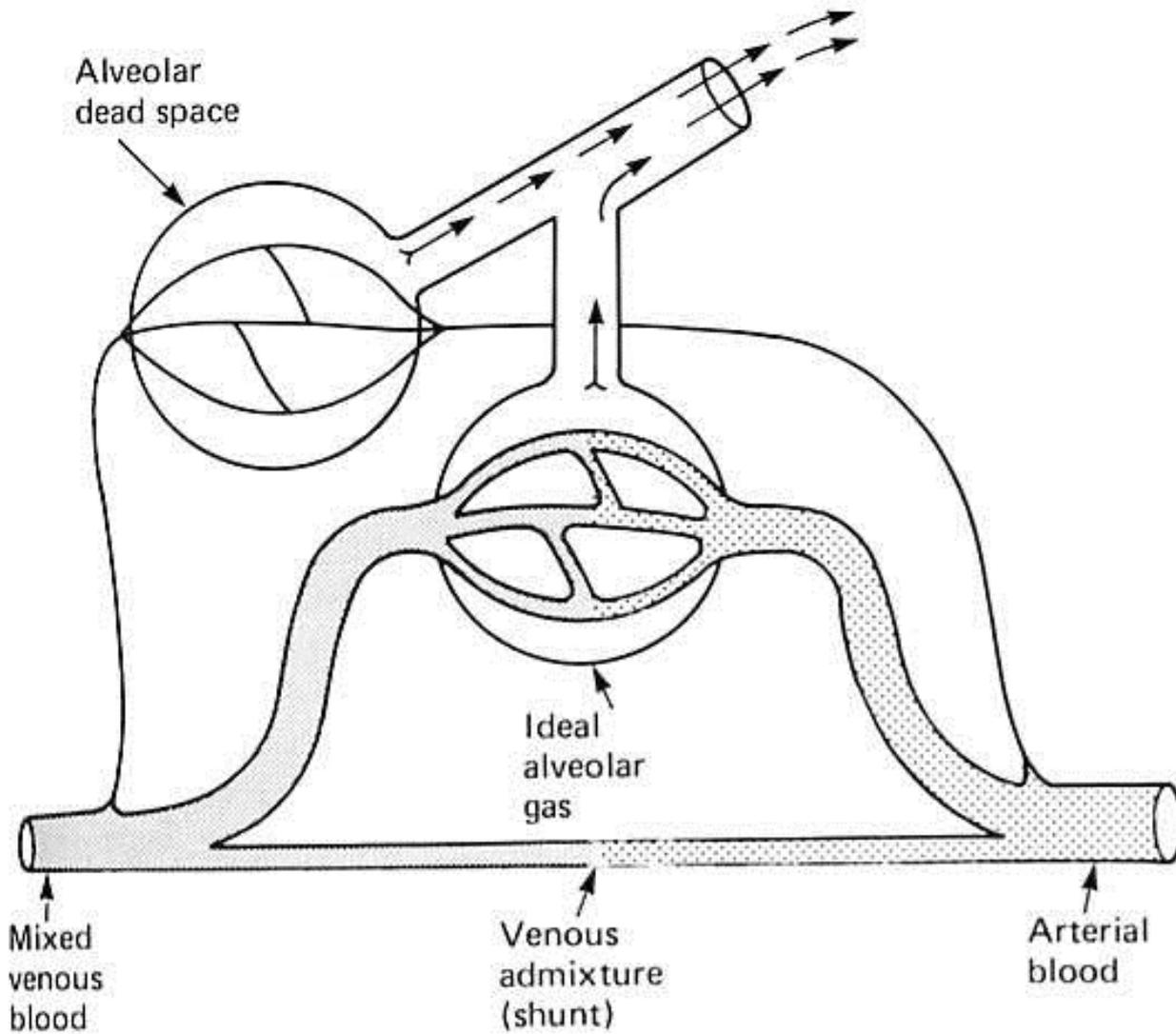
- Nello shunt, l' ipossiemia non può essere abolita nemmeno inspirando O₂ puro
- Una piccola diminuzione di C_aO₂ procura una notevole caduta di P_aO₂ a causa della non-linearità della curva di dissociazione della Hb

Quantificazione (“*semplice*”) della disomogeneità di V'_A/Q'

Modello tri-compartimentale di Riley:

1. Alveoli ventilati, ma non perfusi
2. Alveoli perfusi, ma non ventilati
3. Alveoli idealmente perfusi e ventilati

Modello di Riley



Modello di Riley (cont.)

- 1. Ventilati non perfusi**
Comprendono lo spazio morto alveolare
- 2. Perfusi non ventilati**
Rappresentano uno shunt
- 3. Gli scambi gassosi possono avvenire solo nel compartimento “ideale”** (R uguale a QR medio dell'organismo = $V'CO_2/V'O_2$)

Bibliografia

- **Fisiologia dell'Uomo, autori vari, Edi.Ermes, Milano**
- **Capitolo 12: Il polmone (Capitolo 12.7)**
- Fisiologia Medica, a cura di Conti F, seconda edizione, Edi.Ermes, Milano
 - Capitolo 51: Scambi gassosi
 - Capitolo 52: Rapporto ventilazione-perfusione
- West JB, Fisiologia della Respirazione, IV edizione italiana, PICCIN, Padova