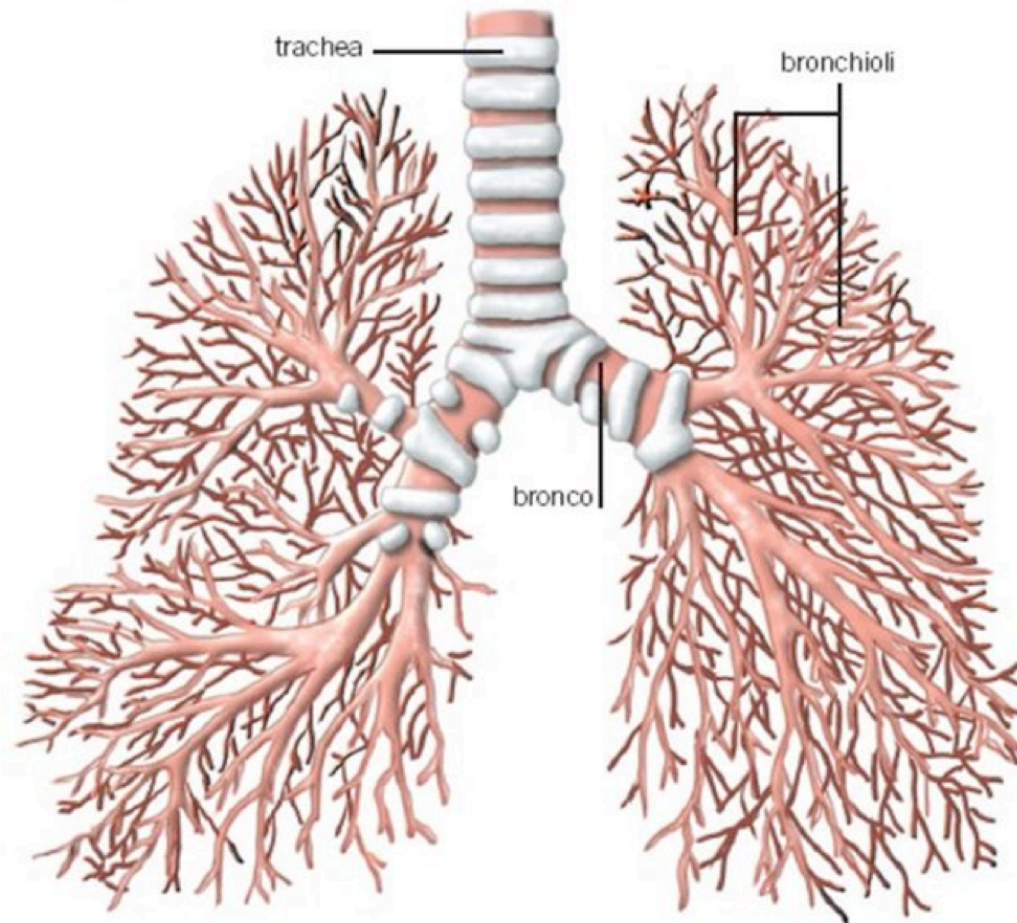


Il sistema respiratorio:

Respirazione esterna: scambio di O_2 e CO_2 tra l'ambiente esterno e il sangue

Respirazione interna: consumo di O_2 e produzione di CO_2 per il metabolismo cellulare

L'albero respiratorio



2 m² di superficie corporea vs 75 m² di superficie di scambio

Le funzioni dell'apparato respiratorio:

- Ventilazione polmonare
- Regolazione dell'equilibrio acido-base
- Vocalizzazione
- Protezione dai microbi e sostanze irritanti
- Filtrazione e dissoluzione dei piccoli coaguli che si formano in circolo

L'organizzazione dell'apparato respiratorio: Le vie aeree superiori e il tratto respiratorio

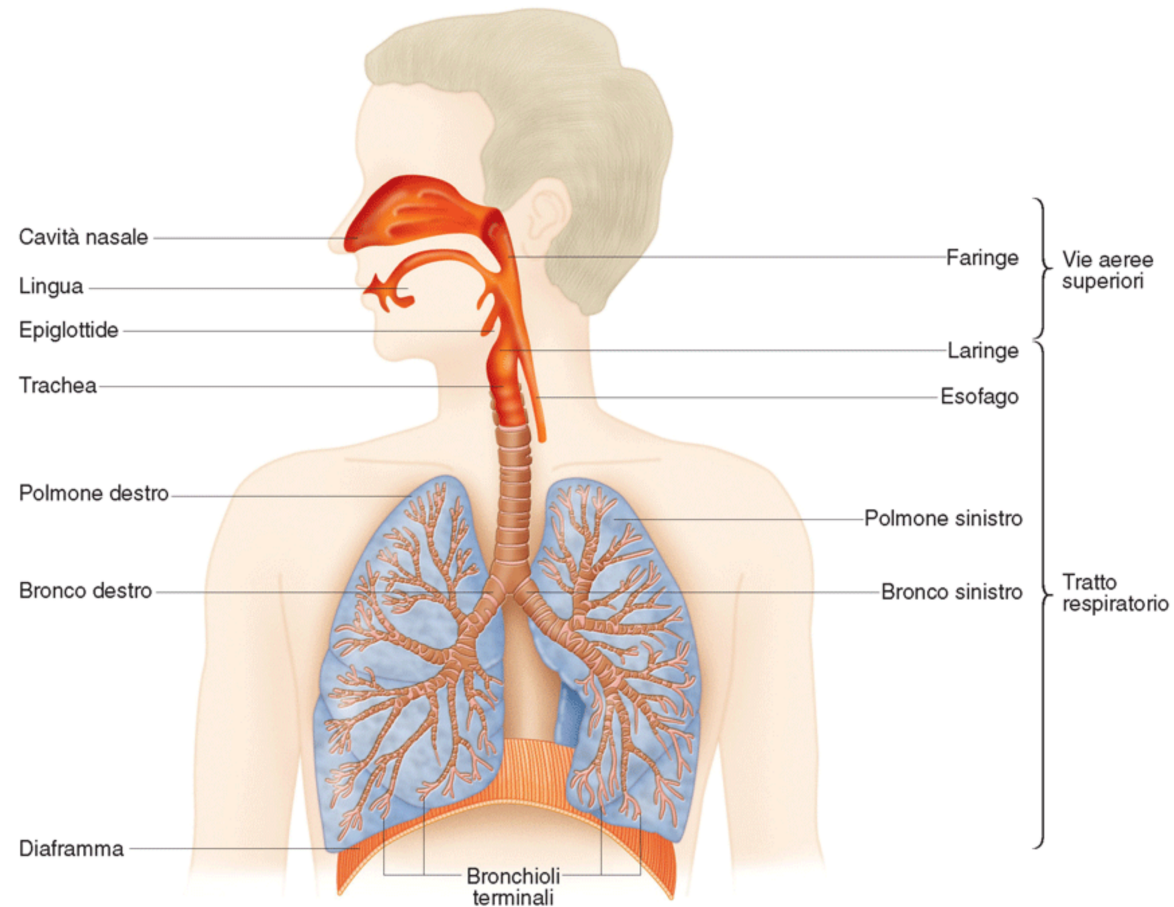
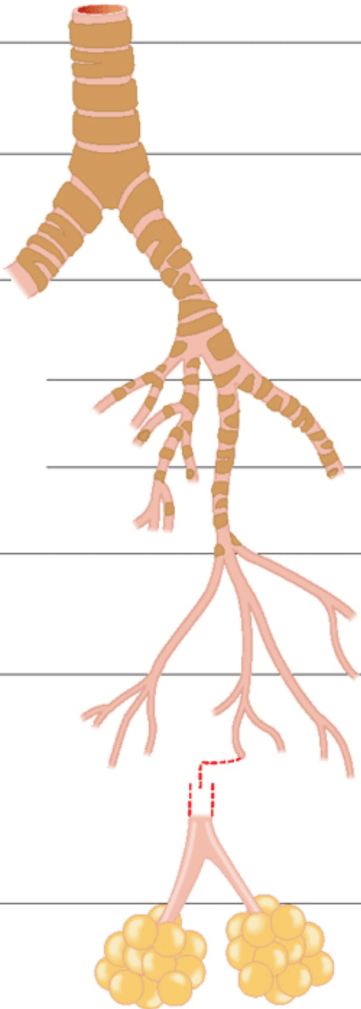


Figura 37.1 Struttura dell'apparato respiratorio: le vie aeree superiori e il tratto respiratorio che include i polmoni, le zone di conduzione e di respirazione.

La zona di conduzione e la zona respiratoria



		Divisioni	Diametro interno (mm)	Numero di unità	Area sezione trasversa (cm ²)
Zona di conduzione	Trachea	1	20 - 25	1	2,5
	Bronchi primari	2	12 - 16	2	
	Bronchi secondari	3	10 - 12	4	
	Bronchioli				
	Bronchioli terminali	12	< 0,5	$2 \cdot 10^4$	100
Zona respiratoria	Bronchioli respiratori	12 - 23	< 0,5	$8 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^3$
	Alveoli	24	0,3	$3-6 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^6$

Figura 37.2
Parametri caratteristici della zona di conduzione e zona respiratoria del tratto respiratorio.

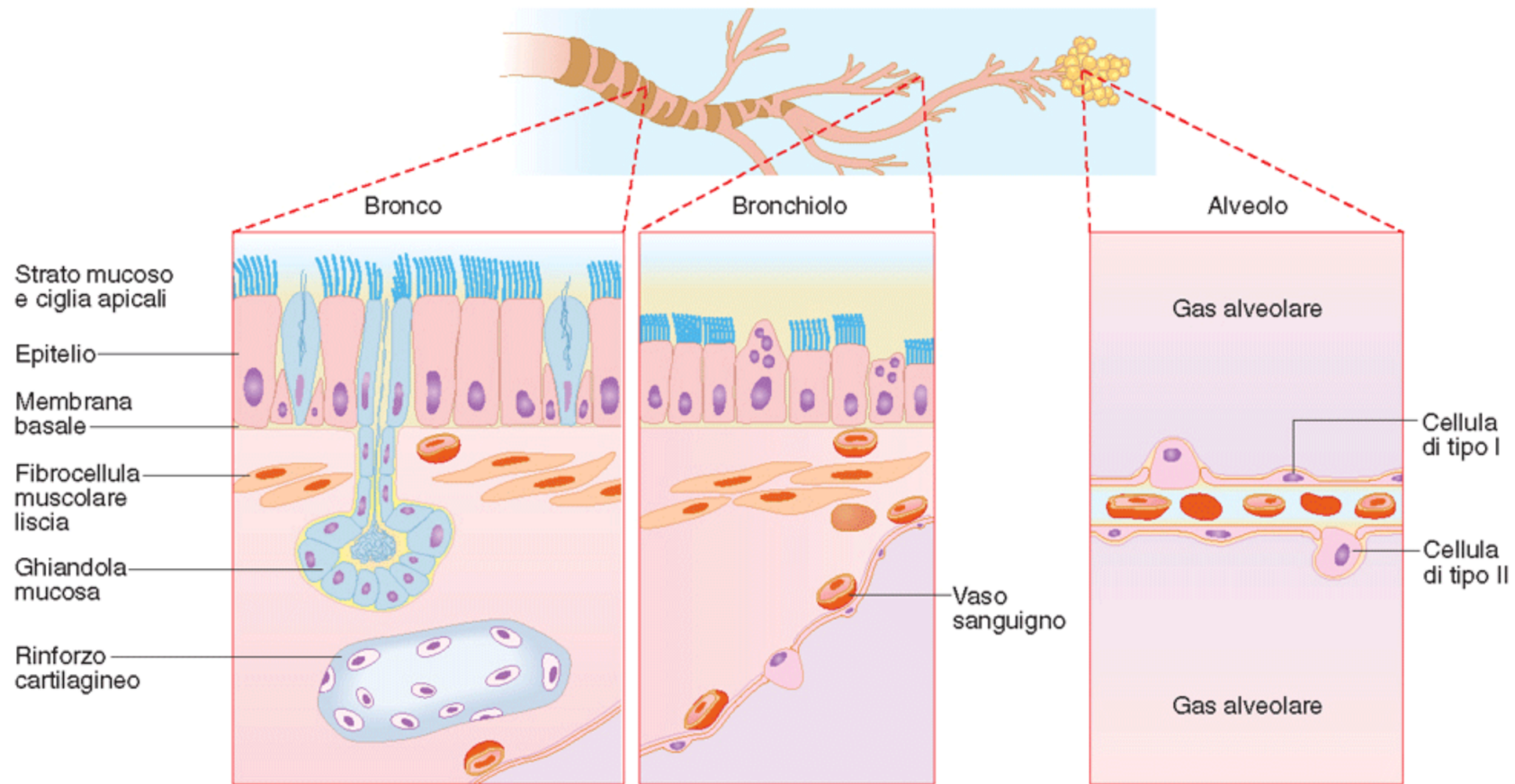


Figura 37.3 Diversità di tessuto epiteliale nei bronchi, bronchioli e alveoli. Si noti la presenza delle cellule ciliate e caliciformi di grosse dimensioni a livello dei bronchi e la loro totale assenza a livello alveolare. Nell'alveolo l'epitelio è prevalentemente costituito da cellule di tipo I (sottili e larghe) e di tipo II che producono il surfactante.

Gli alveoli

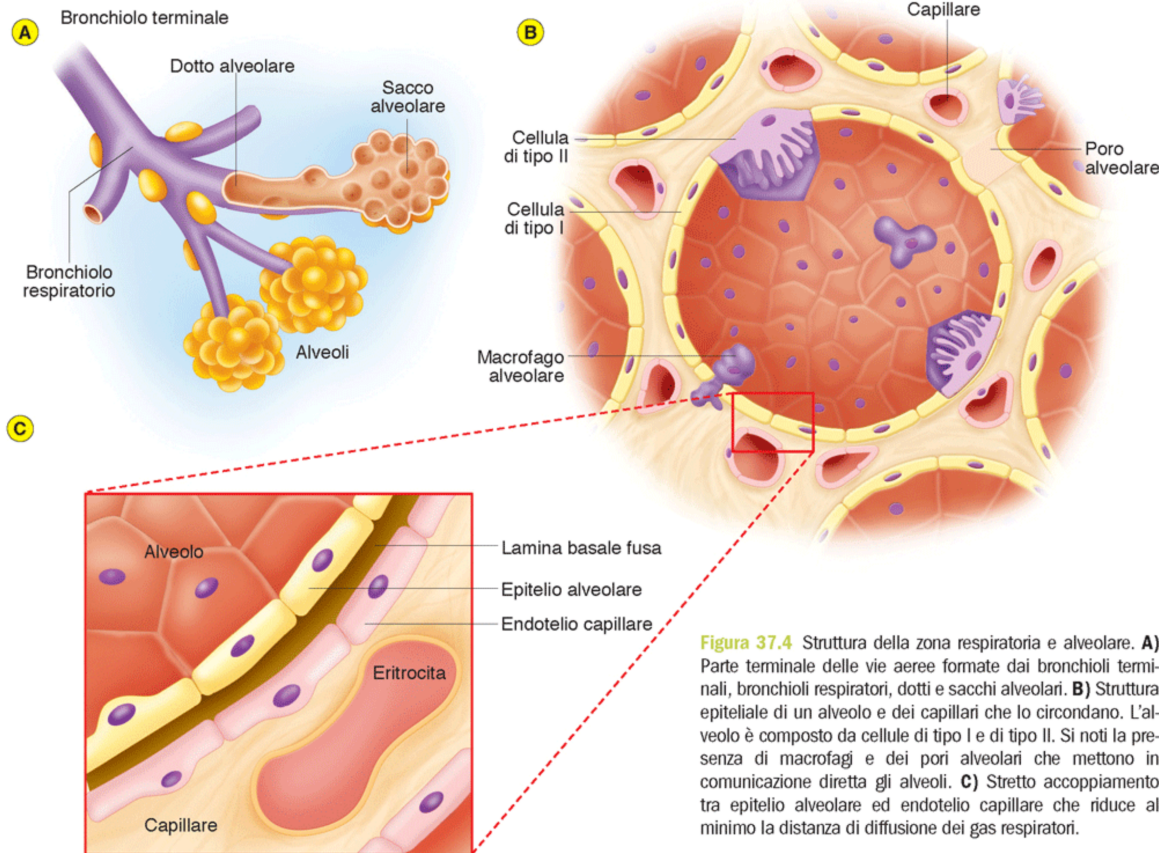


Figura 37.4 Struttura della zona respiratoria e alveolare. **A)** Parte terminale delle vie aeree formate dai bronchioli terminali, bronchioli respiratori, dotti e sacchi alveolari. **B)** Struttura epiteliale di un alveolo e dei capillari che lo circondano. L'alveolo è composto da cellule di tipo I e di tipo II. Si noti la presenza di macrofagi e dei pori alveolari che mettono in comunicazione diretta gli alveoli. **C)** Stretto accoppiamento tra epitelio alveolare ed endotelio capillare che riduce al minimo la distanza di diffusione dei gas respiratori.

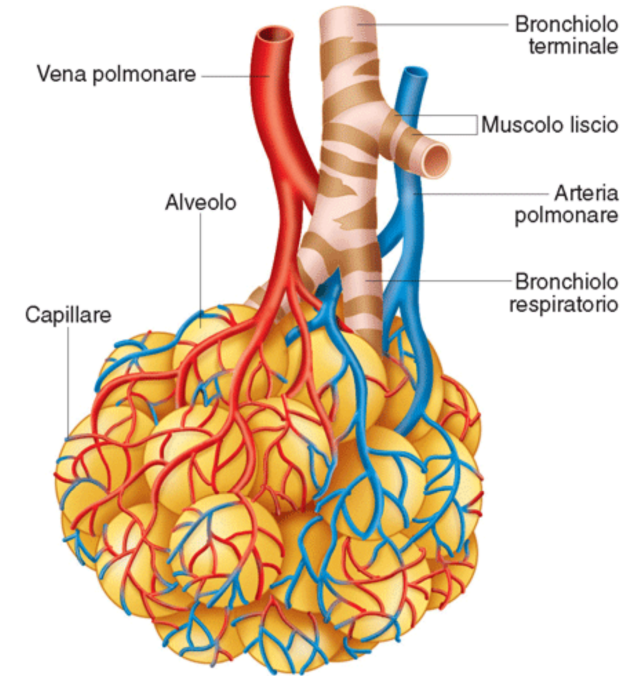


Figura 37.5 Accoppiamento alveoli-capillari polmonari. Si noti l'estesa rete di capillari polmonari che ricopre interamente tutti gli alveoli del sacco alveolare.

Il sacco pleurico

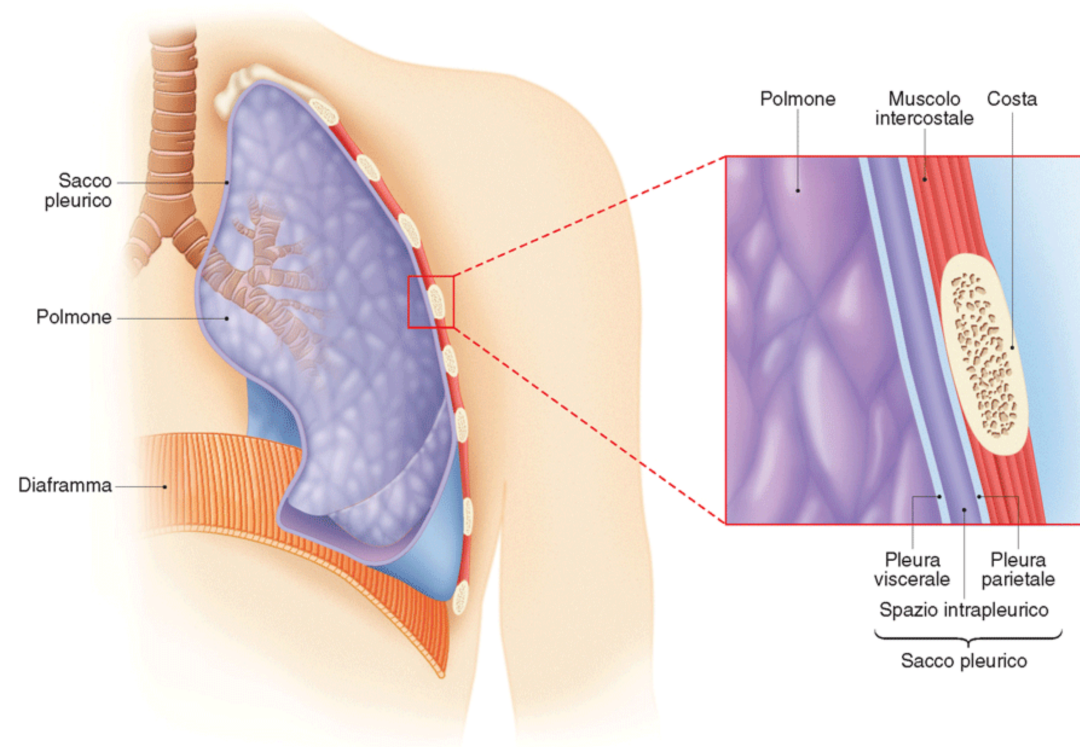


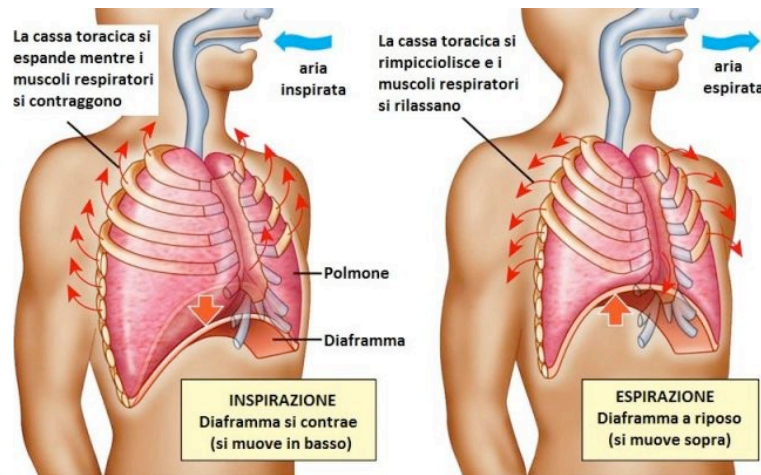
Figura 37.6 Gabbia toracica e cavità pleurica. Si noti il sacco pleurico e la stretta aderenza con il polmone e la cassa toracica formata da coste e muscoli intercostali. Nell'ingrandimento sono evidenti i foglietti viscerale e parietale del sacco pleurico e lo spazio intrapleurico contenente il liquido pleurico.

La respirazione esterna:

1. **La ventilazione polmonare**
2. Lo scambio di O_2 e CO_2
3. Il trasporto di gas nel sangue
4. Lo scambio di gas nei tessuti
5. La regolazione da parte del SNC

1. La ventilazione polmonare

“Scambio di gas tra ambiente esterno e alveoli”



$$\text{Flusso di aria (volume)} = \frac{(P_{\text{alv}} - P_{\text{atm}})}{R_p}$$

R_p = resistenza delle vie aeree

P_{atm} (760 mmHg) = 0

P_{alv} = 1 mmHg (espirazione)

P_{alv} = - 1 mmHg (inspirazione)

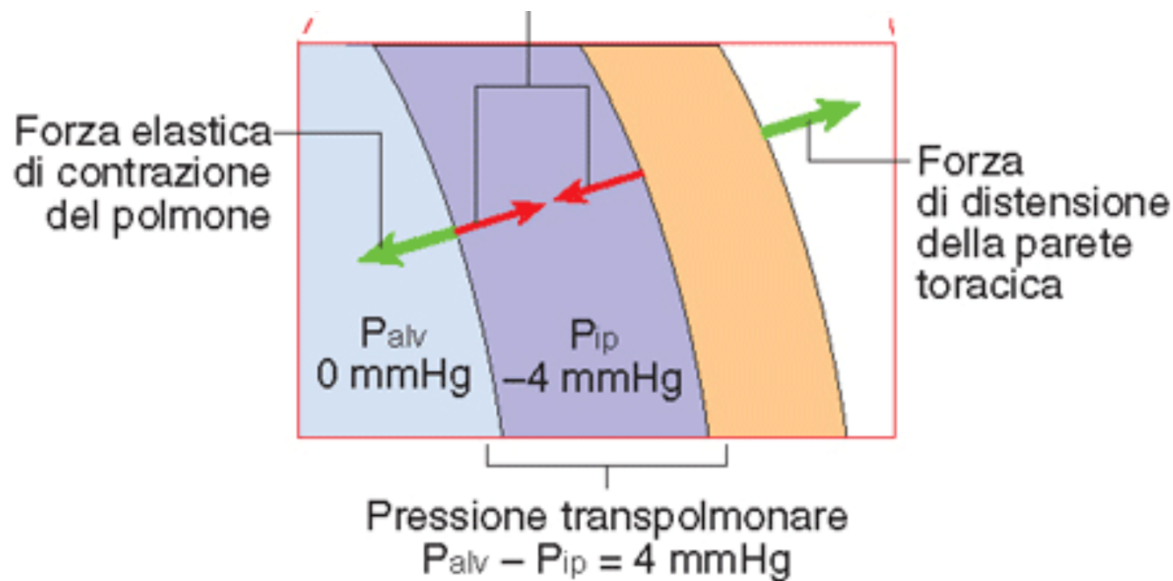
La pressione intrapleurica:

“è la pressione che si misura all’interno della cavità pleurica e dipende dalla forza di contrazione del polmone e dalle forze di distensione della parte toracica”

P_{ip} (intrapleurica): -4 -7 mmHg (durante la respirazione normale)

La pressione transpolmonare:

“è la differenza tra la pressione alveolare e la pressione intrapleurica”



In assenza di pressione intrapleurica il polmone collassa:

PNEUMOTORACE

(ad esempio in caso di enfisema, trauma o polmonite)

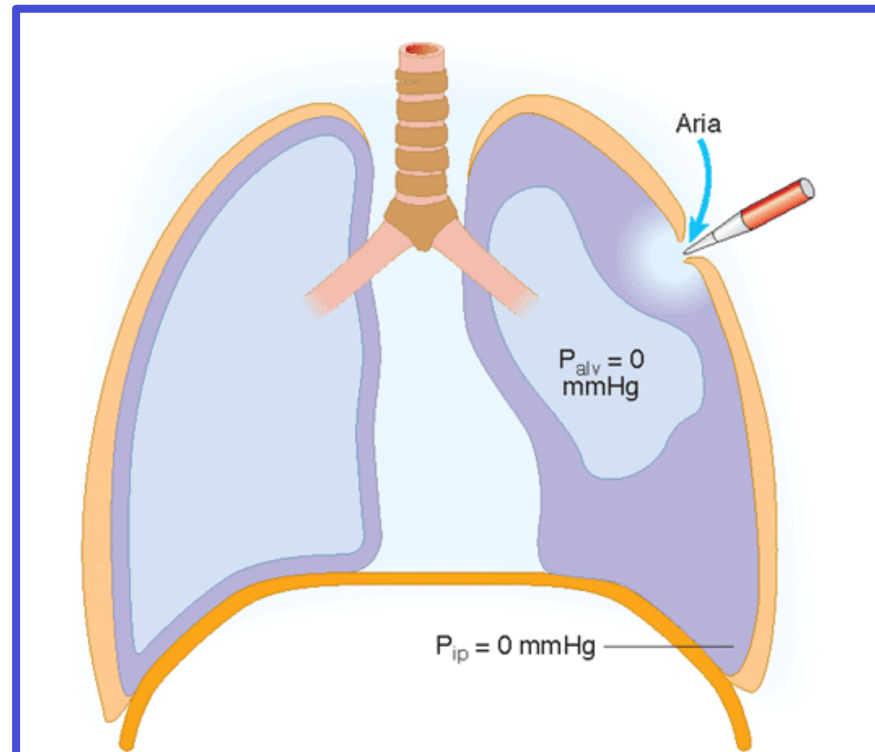


Figura 37.8 Il pneumotorace. La rottura accidentale del foglietto parietale causa l'ingresso di aria all'interno della cavità pleurica e l'azzeramento della P_{ip} . La forza elastica retrattile del polmone non è più bilanciata dalla P_{ip} negativa e il polmone collassa. La gabbia toracica tende ad espandersi.

La ventilazione polmonare è garantita dalla: **pompa respiratoria**

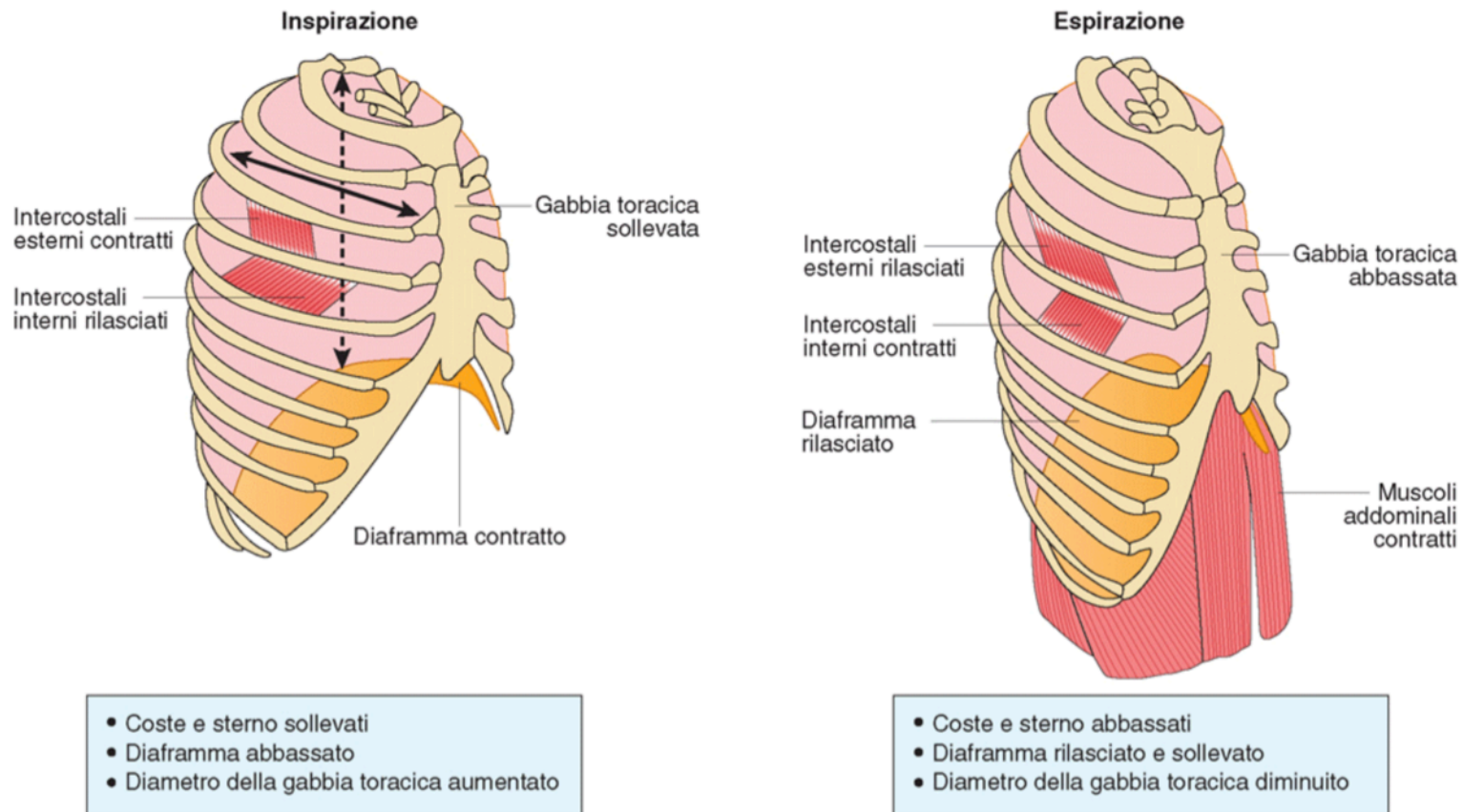
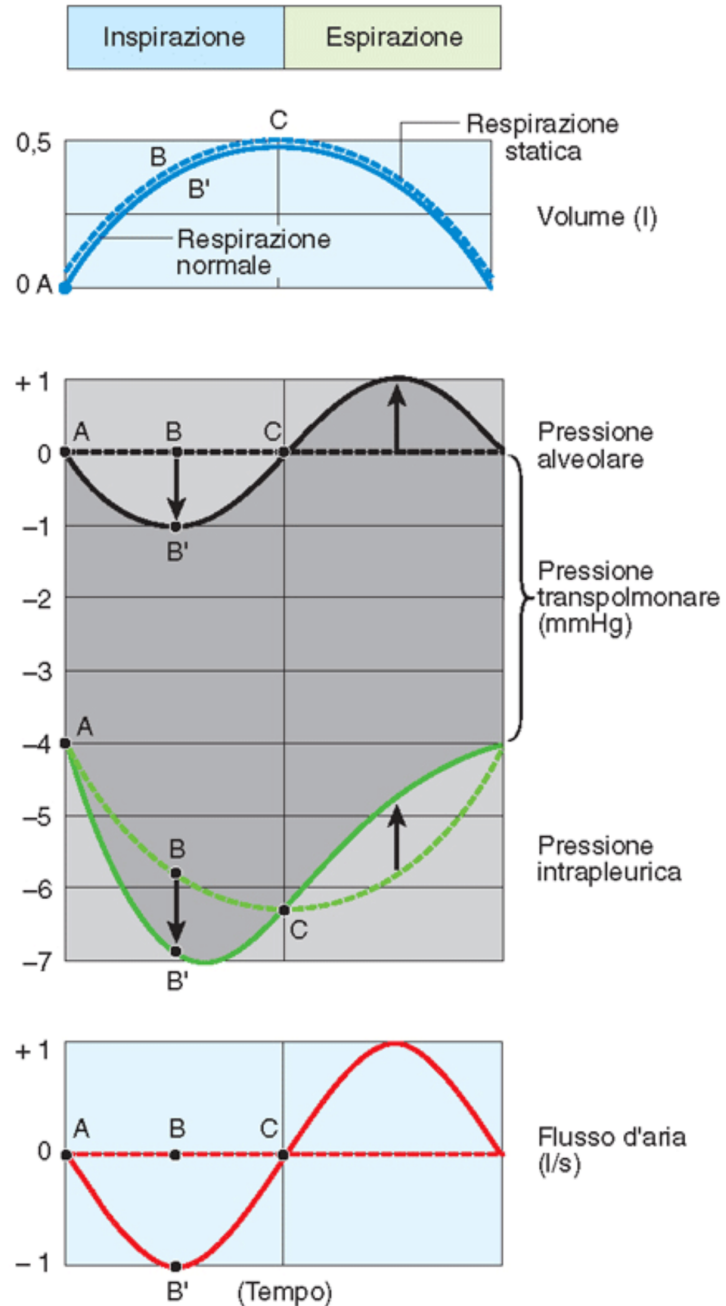


Figura 37.10 Posizioni della cassa toracica, del diaframma e dei muscoli addominali durante un'inspirazione e un'espiazione.



Le variazioni dei flussi e delle pressioni durante il ciclo respiratorio

Figura 37.12 Variazioni del volume polmonare, flusso d'aria, pressione alveolare, pressione intrapleurica e pressione transpolmonare durante due tipi diversi di ventilazione: statica (curve tratteggiate) e normale (curve continue). L'area grigia rappresenta la pressione transpolmonare ($P_{alv} - P_{ip}$) durante la ventilazione normale. Il volume è misurato in litri, il flusso in litri/secondo, le pressioni (alveolare, pleurica e transpolmonare) in mmHg. La ventilazione statica è lentissima e dura 30-40 s, mentre la ventilazione normale è completa in 4-5 s. Nel caso descritto in figura la ventilazione normale (inspirazione ed espirazione) dura solo 2 s. Le frecce indicano la variazione della P_{ip} corrispondente ad un'identica variazione della P_{alv} .

P_{transp} determina il grado di espansione del polmone (volume polmonare) che dipende dalla distendibilità delle sue pareti (**compliance**).

$$C_p = \Delta V / \Delta (P_{\text{transp}})$$

C_p dipende:

- elasticità del tessuto polmonare
- tensione superficiale

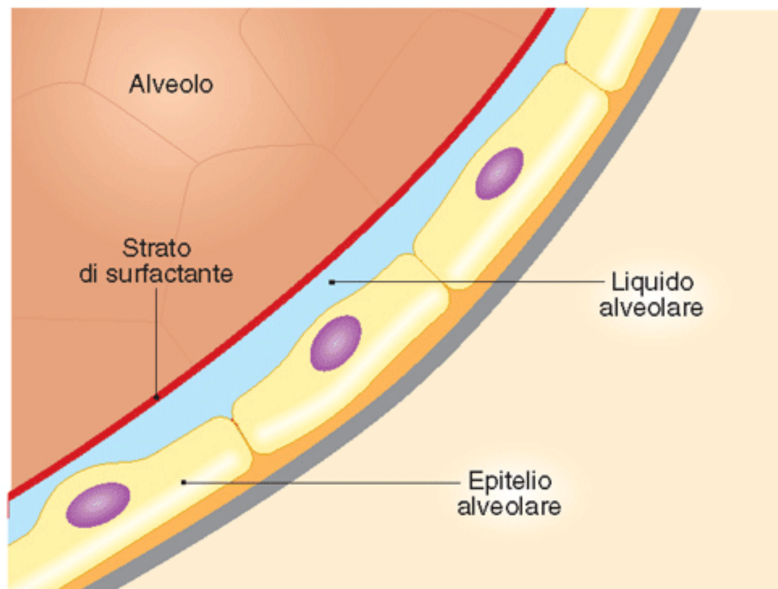


Figura 37.14 Interfaccia aria-liquido all'interno di un alveolo in presenza di surfactante. Le cellule epiteliali di tipo I che formano le pareti dell'alveolo sono ricoperte da una pellicola di liquido interstiziale sulla quale si distribuisce un sottilissimo strato superficiale di surfactante.

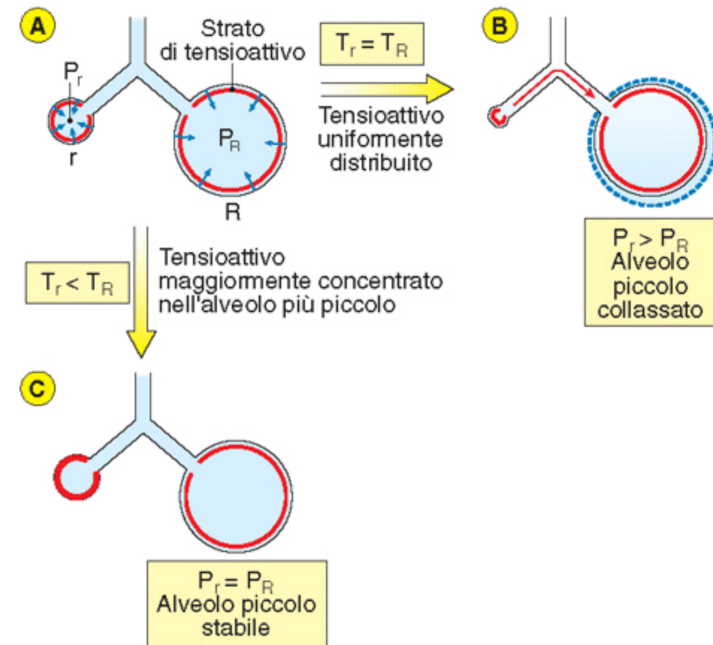
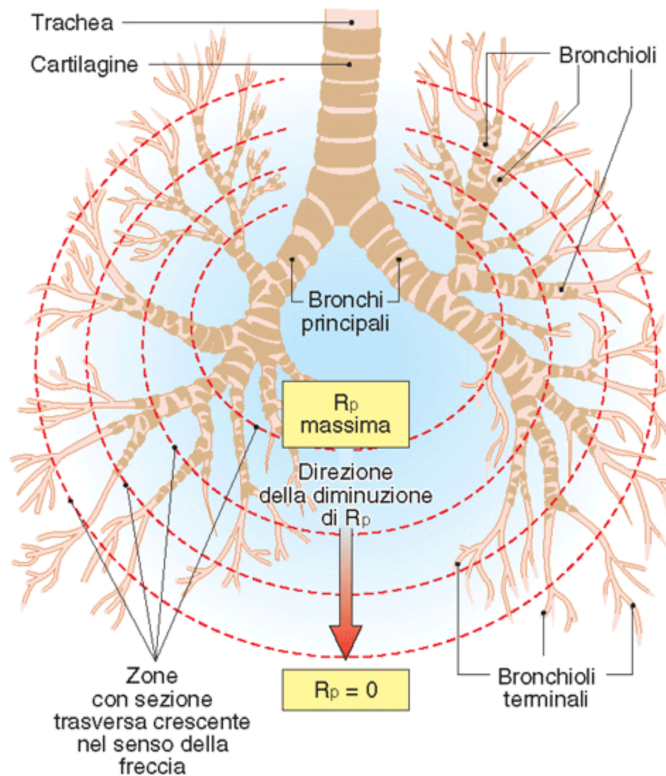


Figura 37.15 Il surfactante stabilizza la struttura degli alveoli. Due alveoli di diverso diametro (r ed R) ma con identica tensione superficiale (uguale distribuzione di tensioattivo sulle pareti alveolari) generano pressioni trasversali diverse, $P_r > P_R$. **(A)** In queste condizioni, l'alveolo più piccolo collassa in quello più grande, che aumenta di diametro (cerchio tratteggiato in **(B)**). I due alveoli possono però rimanere in equilibrio se il surfactante si concentra maggiormente nell'alveolo più piccolo diminuendo la tensione superficiale fino a che P_r eguaglia P_R **(C)**.

P_{alv} regola i flussi di aria e il suo valore dipende dalla resistenza delle vie respiratorie (R_p)

$$\text{Flusso di aria (volume)} = (P_{alv} - P_{atm})/R_p$$



$$R_p = 8\eta l / 4 r^4$$

Pressione transpolmonare
Trazione laterale del tessuto elastico

Figura 37.16 Vie aeree, sezione trasversale e resistenza periferica (R_p). I cerchi tratteggiati indicano zone in cui è determinata la sezione trasversale delle vie aeree. All'aumentare dell'ampiezza del cerchio la sezione trasversale aumenta e R_p diminuisce. R_p è massima a livello dei bronchi segmentali e si riduce a zero nei bronchi terminali.

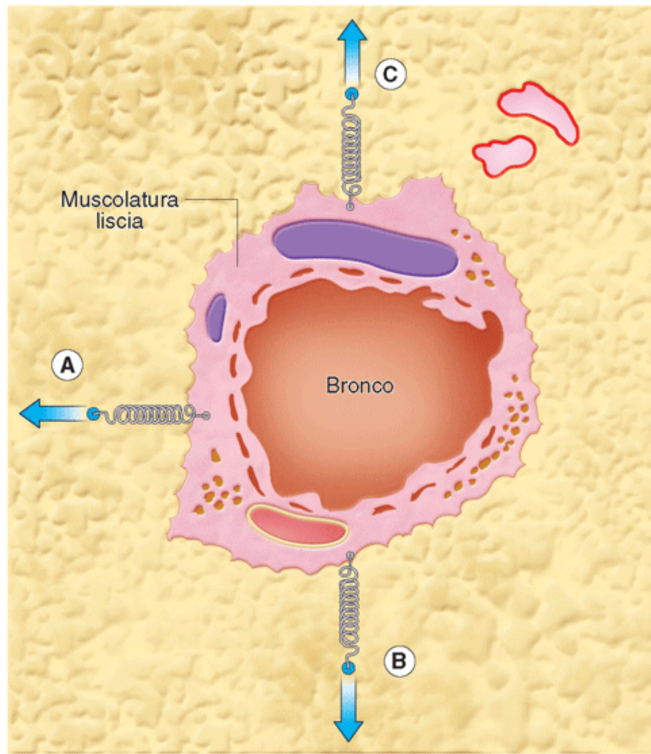


Figura 37.18 Effetti della trazione laterale elastica del tessuto polmonare sul raggio bronchiale. Le molle ancorate nei punti A, B e C rappresentano simbolicamente la forza di retrazione elastica esercitata dal tessuto polmonare sul bronco. Durante un'inspirazione il volume aumenta, i punti A-B-C si allontanano dal bronco (freccie), la molla si tira e la forza che si origina dilata il bronco diminuendo la resistenza delle vie aeree.

broncodilatazione
(inspirazione)

broncocostrizione
(espirazione)

Sistema nervoso autonomo:

- Simpatico (broncodilatazione)
- Parasimpatico (broncocostrizione)

CO₂ (broncodilatazione)

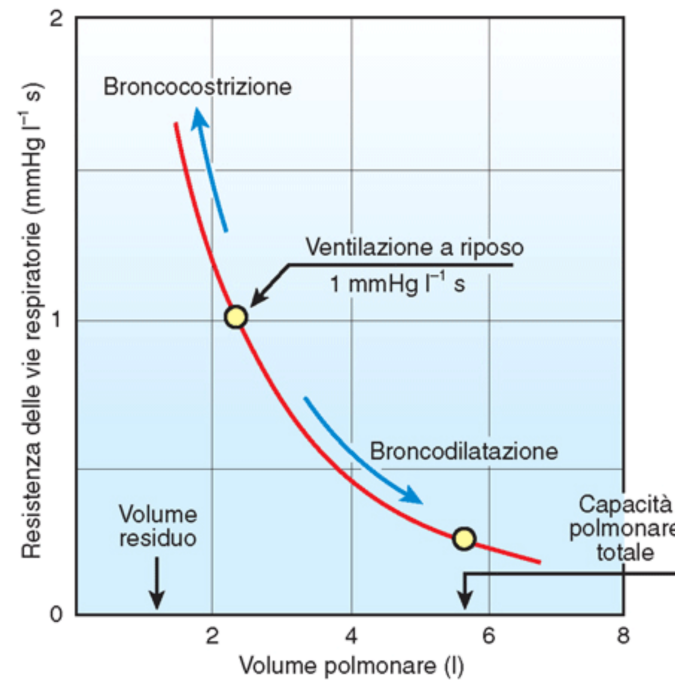


Figura 37.19 R_p in funzione del volume polmonare. A causa della forza di trazione laterale, un aumento del volume produce broncodilatazione e quindi diminuita R_p (freccia verso il basso). Diminuzioni del volume polmonare causano al contrario broncocostrizione (freccia verso l'alto).

I volumi e le capacità polmonari

Strumento di misura dei volumi di aria: SPIROMETRO

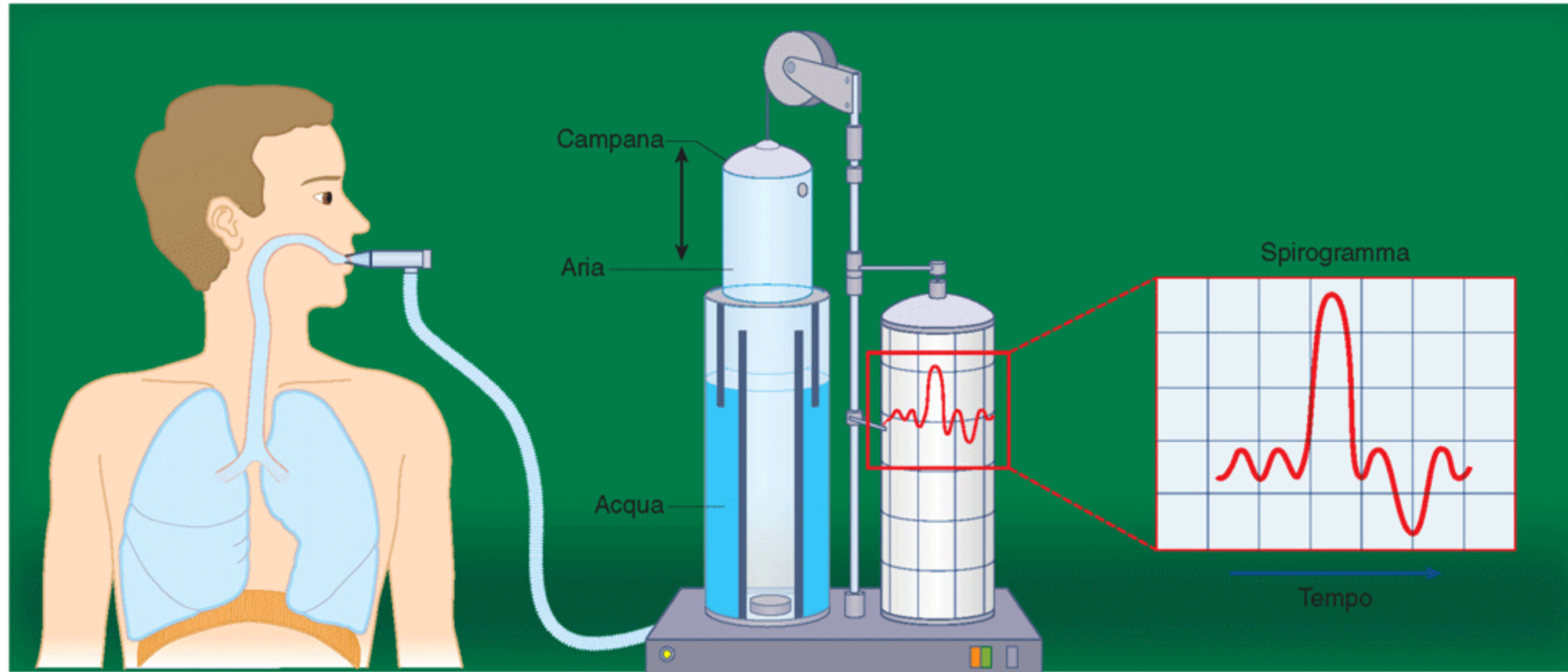


Figura 37.20 Lo spirometro. Il soggetto respira attraverso un tubo all'interno di una campana di vetro a tenuta d'aria. Lo spostamento in alto e in basso della campana durante gli atti respiratori è trasmesso meccanicamente al pennino di un registratore a carta che registra i volumi d'aria inspirati o espirati dal soggetto durante il test di funzionalità (traccia rossa).

Frequenza respiratoria: 15 - 50 atti/min
Profondità respiratoria: 500 ml (eupnoica)

Lo spirogramma e i volumi polmonari

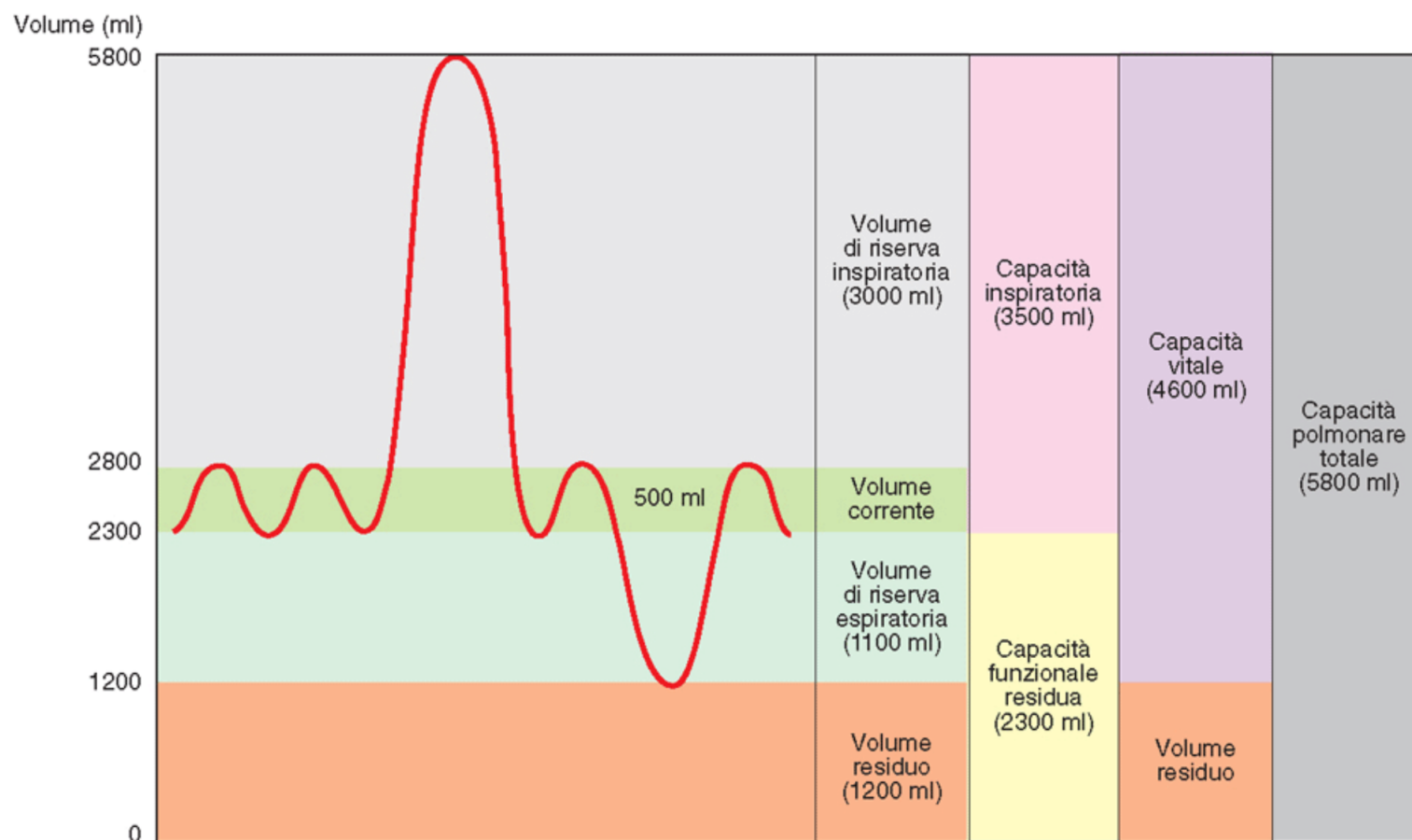


Figura 37.21 Volumi e capacità polmonari misurati con la spirometria. L'onda rossa indica i volumi misurati durante il test. A fianco sono indicati i quattro volumi che si misurano con la spirometria (VC, VRI, VRE) e con la diluzione dell'elio (VR) e le quattro capacità polmonari che si calcolano sommando volumi diversi (CI, CV, CFR e CPT).

La capacità vitale si riduce durante l'invecchiamento

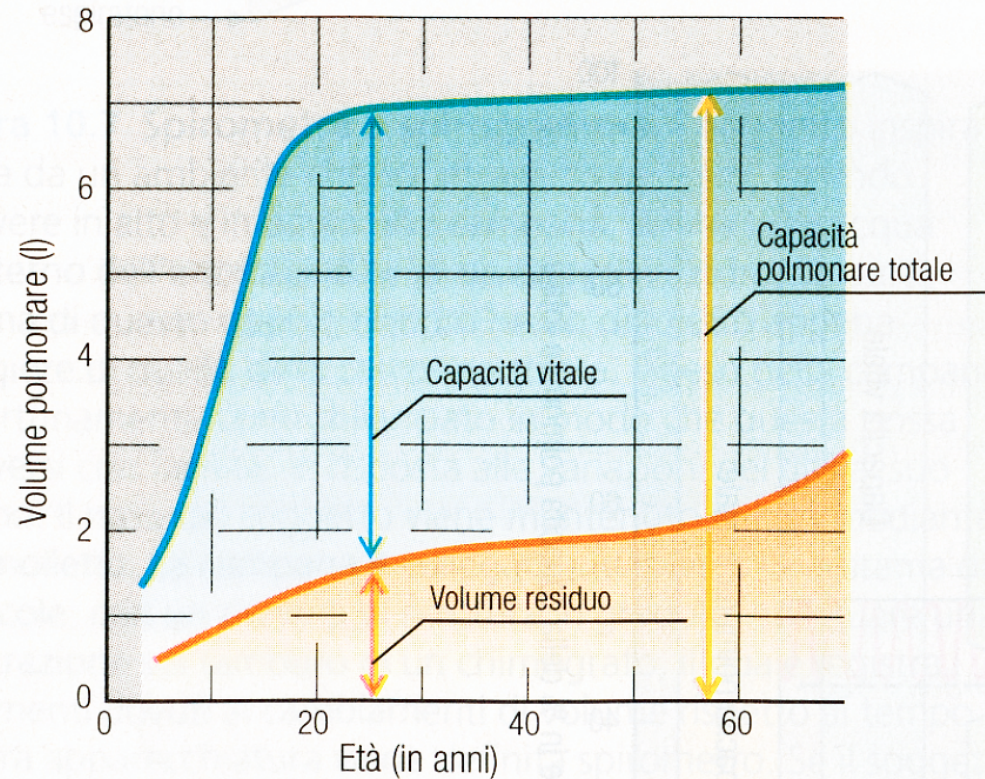


Figura 10.10 Il volume residuo e la capacità vitale (CV) cambiano con il progredire dell'età. A un aumento della capacità vitale, che si registra fino al termine della fase di crescita, segue una diminuzione della stessa e un aumento del volume residuo. La capacità polmonare totale rimane sostanzialmente invariata nell'adulto. Vengono riportati i valori medi per uomini e per donne con una statura corporea di 1,75 m.

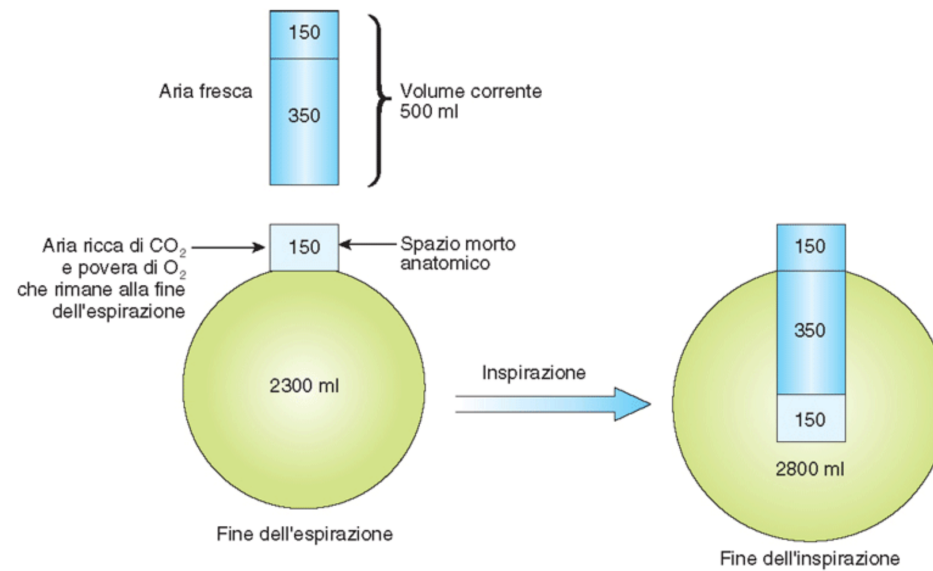


Figura 37.22 Ventilazione polmonare totale, ventilazione alveolare e spazio morto anatomico. L'esempio illustra come lo spazio morto anatomico (150 ml) riduce la quantità d'aria fresca che raggiunge la zona respiratoria durante un'inspirazione normale di 500 ml. La capacità funzionale residua del sistema è 2300 ml.

Tabella 37.1 Effetti del tipo di respirazione sulla ventilazione polmonare.				
Volume corrente medio (ml)	Frequenza respiratoria (respiri/min)	Ventilazione polmonare (ml/min)	Aria fresca alveolare (ml)	Ventilazione alveolare (ml/min)
500	12	6000	350	4200
200	30	6000	50	1500
1000	6	6000	850	5100

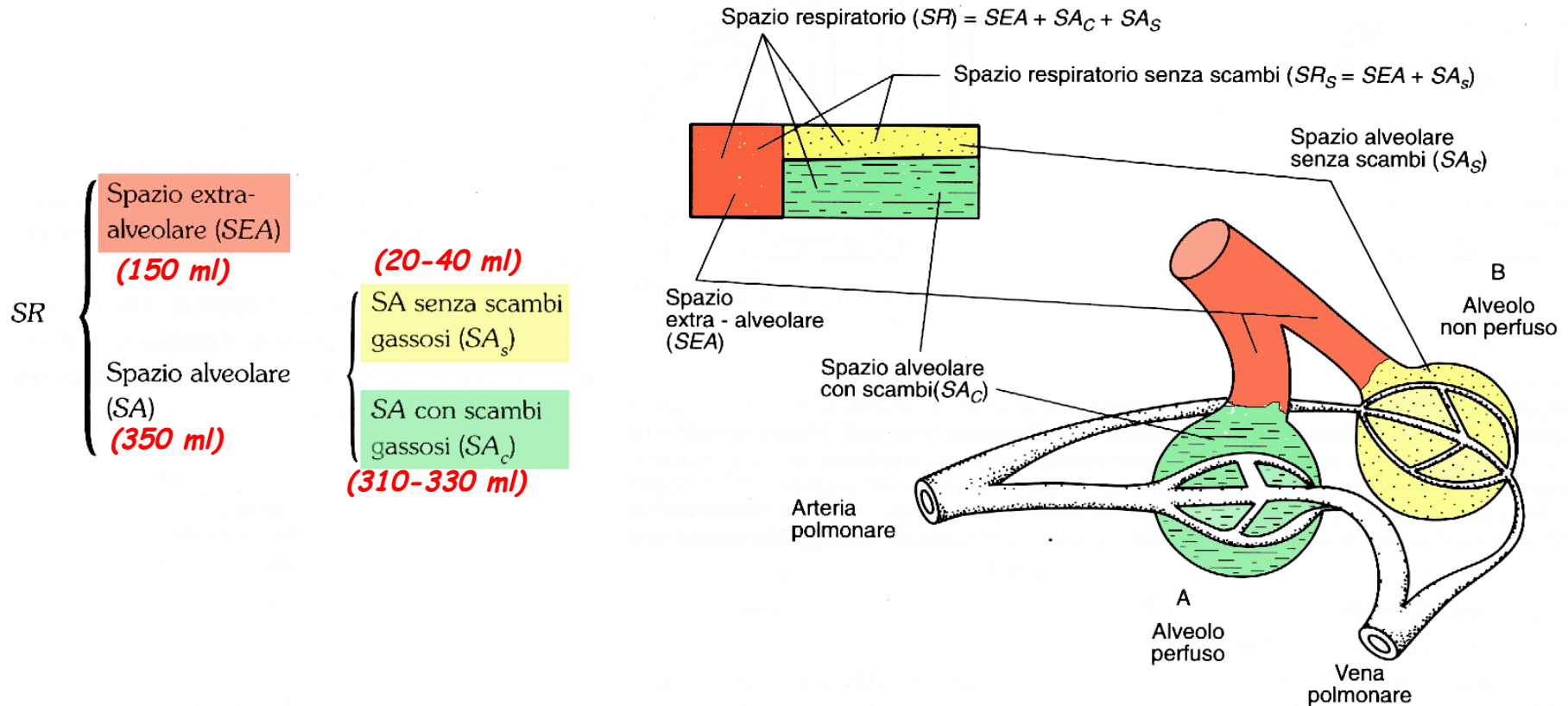
La suddivisione dello spazio respiratorio

Ventilazione polmonare:

500 ml x 12 atti resp. al min = 6 l/min

Ventilazione alveolare:

350 ml x 12 atti = 4,2 l/min



La respirazione esterna:

1. La ventilazione polmonare
- 2. Lo scambio di O₂ e CO₂**
3. Il trasporto di gas nel sangue
4. Lo scambio di gas nei tessuti
5. La regolazione da parte del SNC

2. Scambio dei gas

passaggio dei gas dagli alveoli al sangue

Consumo $O_2 = 250$ ml/min

Produzione $CO_2 = 200$ ml/min

Quoziente respiratorio: 0.8

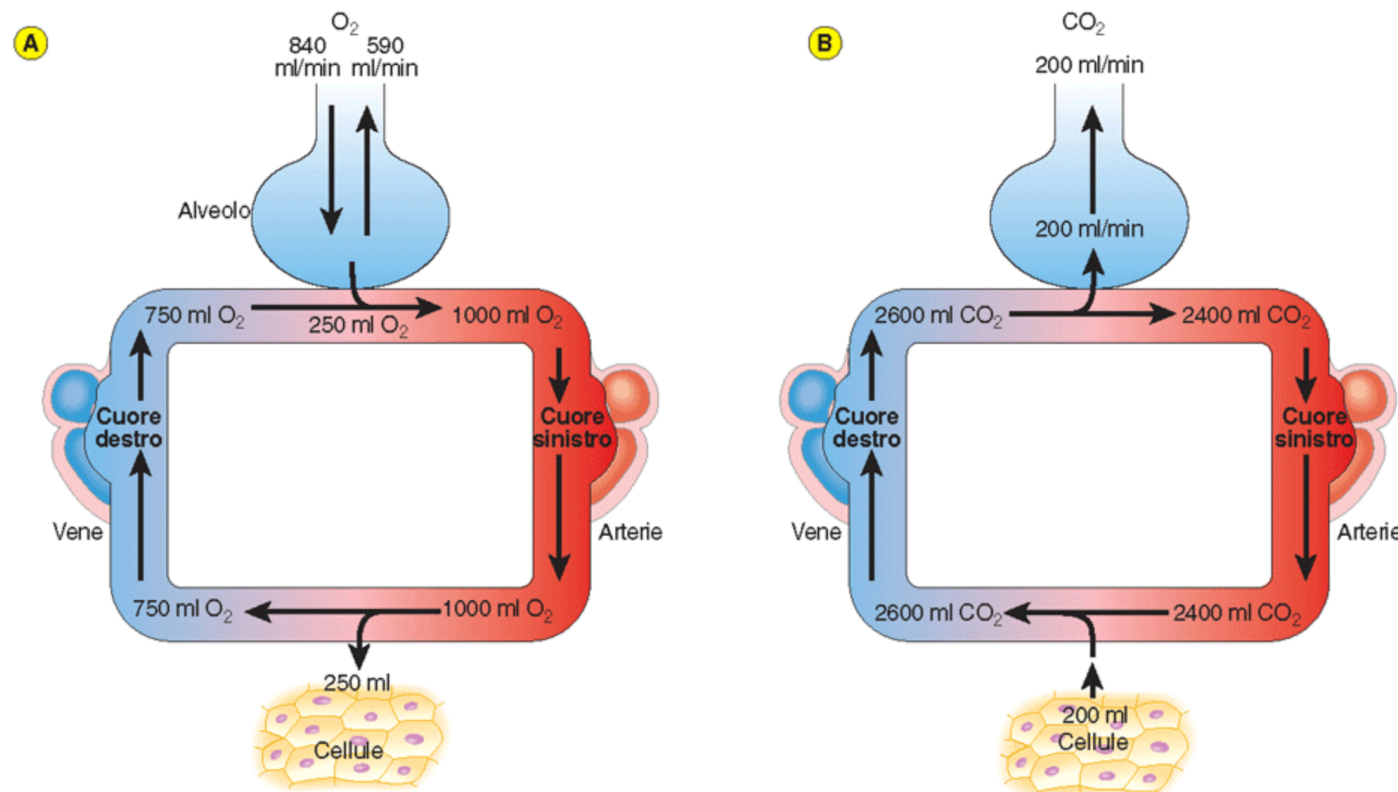


Figura 38.1 Volumi di O_2 e CO_2 scambiati in 1 minuto in condizioni di riposo tra aria atmosferica, polmoni, circolo polmonare, circolo sistemico e tessuti cellulari. Si noti che i valori indicati all'interno dei vasi sono volumi di gas trasportati al minuto e sono riferiti ad una gettata cardiaca di 5 l/min. A livello polmonare, 250 ml/min di O_2 diffondono dall'alveolo ai capillari polmonari (**A**) mentre 200 ml/min di CO_2 diffondono in senso inverso (**B**). A livello tissutale, 250 ml/min di O_2 diffondono dai capillari sistemici alle cellule circostanti (**A**), mentre 200 ml/min di CO_2 prodotta dalle cellule diffondono in senso inverso (**B**).

Tabella 38.1 Pressioni parziali dei gas ispirati, alveolari ed espirati.

	Aria atmosferica		Aria umidificata (37° C)		Aria alveolare		Aria espirata	
	P (mmHg)	%	P (mmHg)	%	P (mmHg)	%	P (mmHg)	%
N ₂	597,0	78,70	563,0	74,10	569,0	74,90	566,0	74,50
O ₂	159,0	20,80	149,0	19,70	104,0	13,60	120,0	15,70
CO ₂	0,3	0,04	0,3	0,04	40,0	5,30	27,0	7,60
H ₂ O	3,7	0,50	47,0	6,20	47,0	6,20	47,0	6,20
Totale	760,0	100,00	760,0	100,00	760,00	100,00	760,00	100,00

	Aria alveolare (mm Hg)	Sangue venoso (mm Hg)	Gradiente alveolo-capillare (mm Hg)	Gradiente capillare alveolo (mm Hg)
P_{O_2}	100	40	60	—
P_{CO_2}	40	46	—	6

Tabella 66-4 Pressioni parziali e gradienti alveolo-capillari dei gas respiratori.

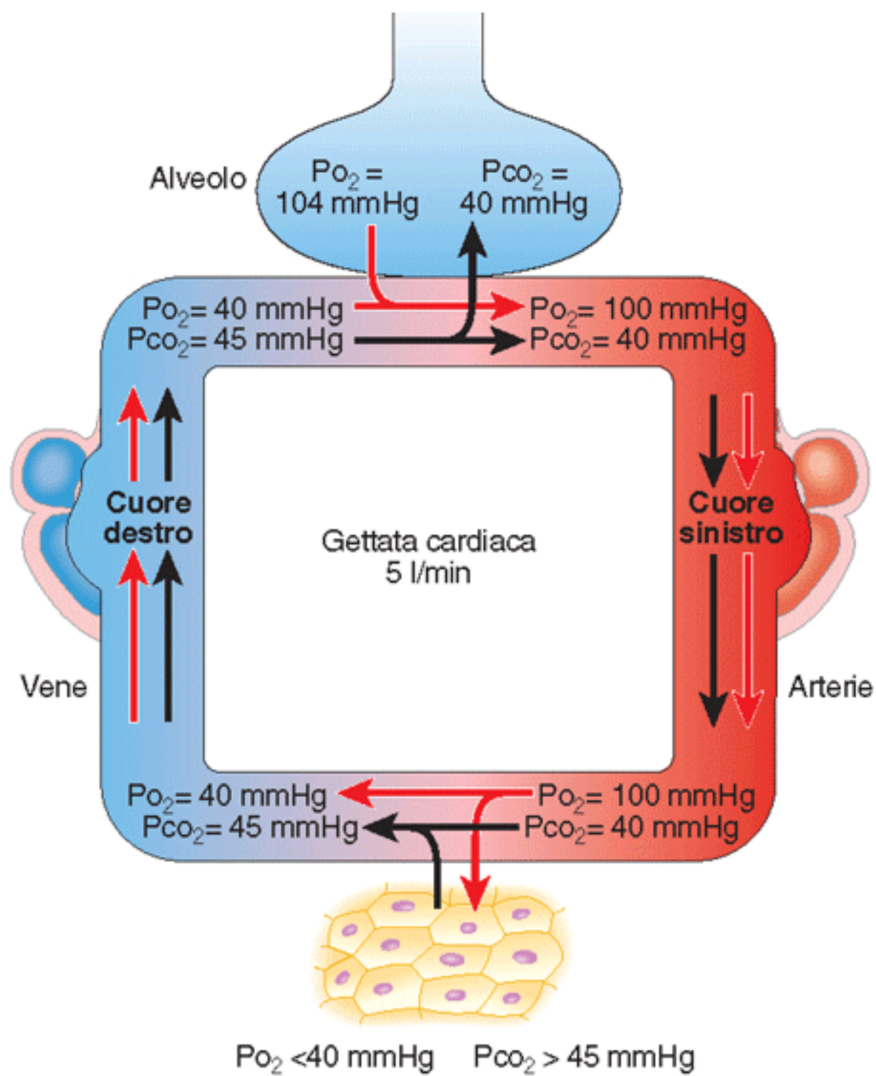
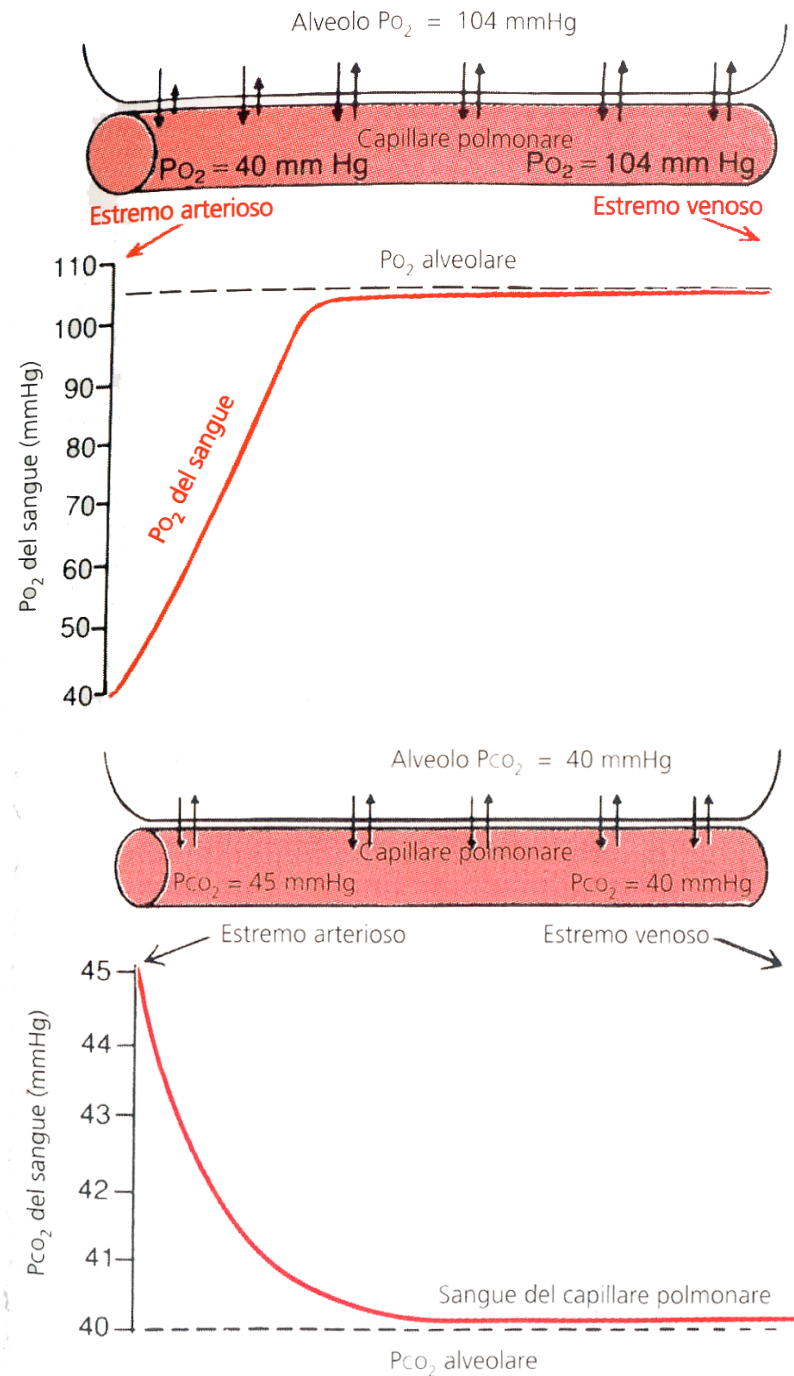


Figura 38.6 Pressioni parziali di O_2 e CO_2 , nell'atmosfera, negli alveoli, lungo il circolo polmonare e sistemico e nei tessuti, in condizioni di ventilazione alveolare e gettata cardiaca normali. Si noti che la P_{O_2} dei capillari polmonari (100 mmHg) è leggermente più bassa della P_{O_2} alveolare (104 mmHg). Le ragioni di questa riduzione sono riportate nel Par 38.4.



Rapporto VENTILAZIONE/PERFUSIONE

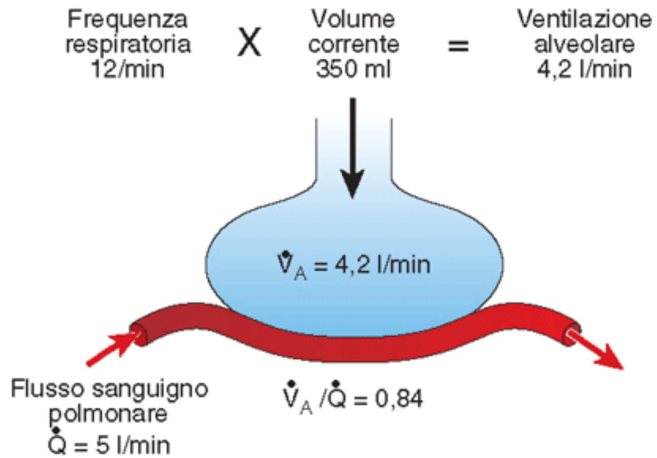


Figura 38.8 Calcolo del rapporto ventilazione/perfusione (\dot{V}_A/\dot{Q}) per un alveolo normalmente ventilato e uniformemente perfuso.

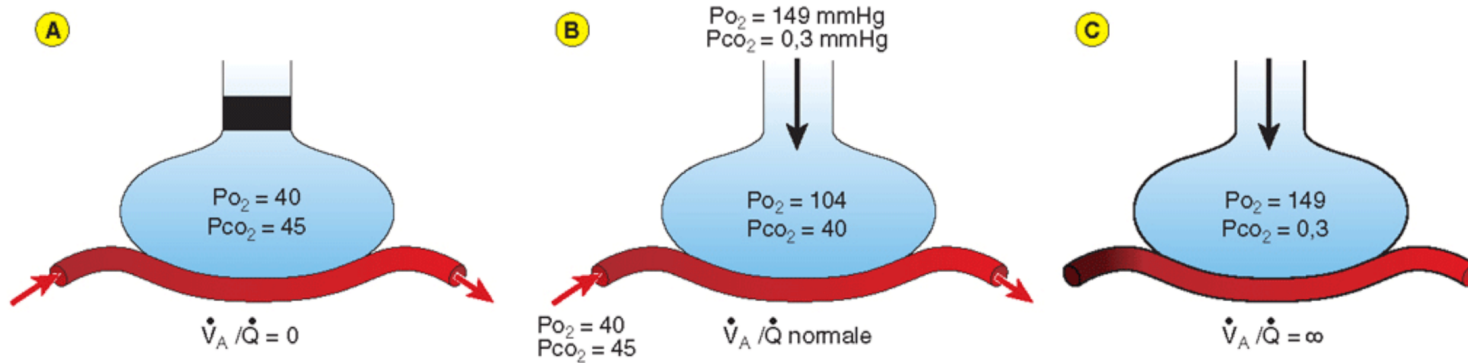


Figura 38.9 Il rapporto ventilazione/perfusione in condizioni normali (**B**) e condizioni estreme quando la ventilazione è bloccata ($\dot{V}_A = 0$) ma il circolo sanguigno è preservato (**A**) oppure quando la perfusione è bloccata ($\dot{Q} = 0$) ma la ventilazione è mantenuta normale (**C**). Si noti come cambiano i valori di P_{O_2} e P_{CO_2} nei tre casi.

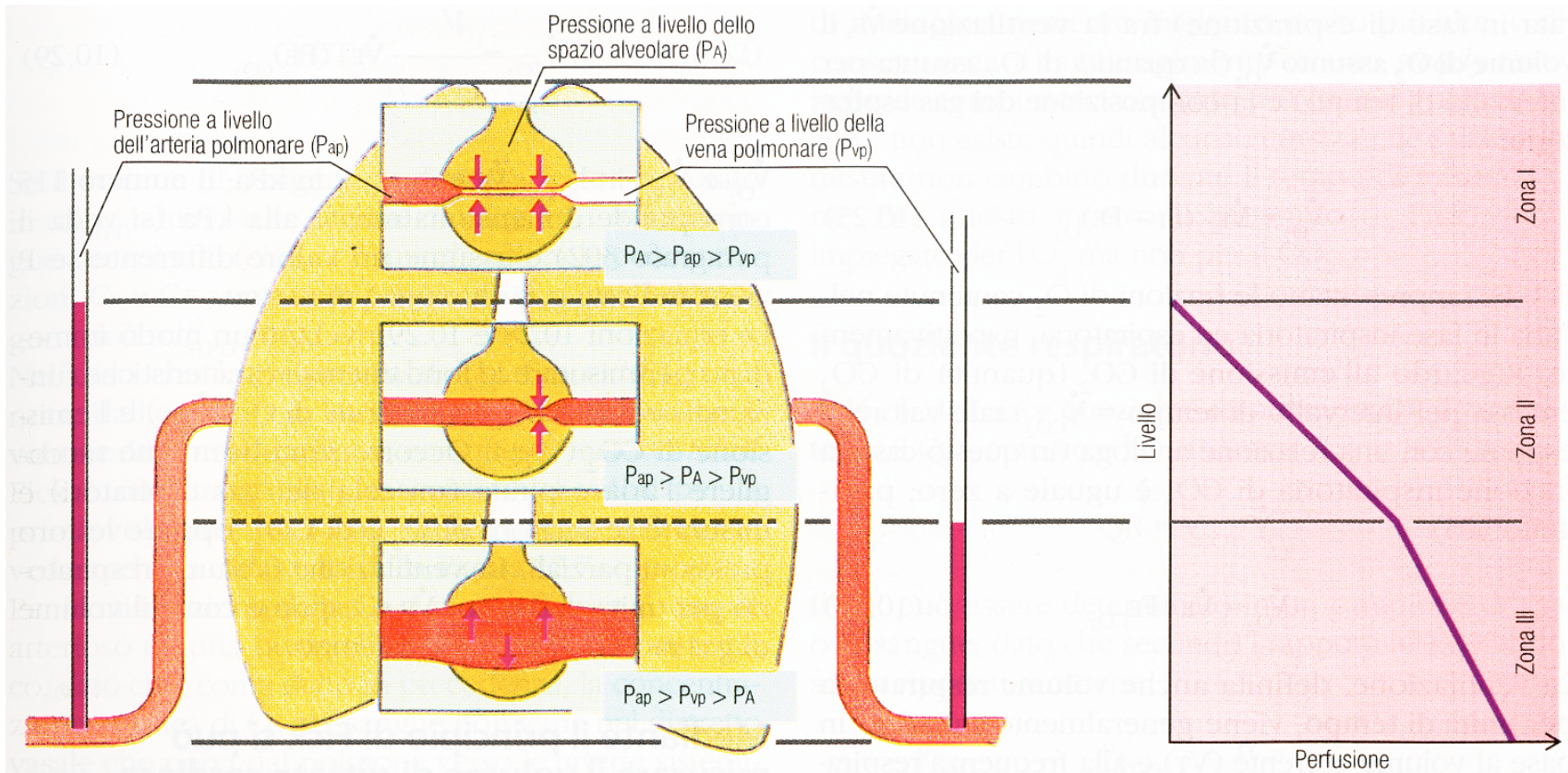


Figura 10.25 Nel polmone tenuto in posizione verticale la distribuzione della perfusione sanguigna dipende dalla forza di gravità. La pressione di perfusione non è misurabile a livello dell'apice polmonare (zona I). Nella zona II sussiste una

compressione dei capillari, in modo tale che la perfusione dipende dalla differenza ($P_{ap} - P_A$), ma risulta indipendente da P_{vp} . Nella zona III sussistono condizioni normali di perfusione; la pressione sanguigna relativamente alta porta alla dilatazione dei capillari.

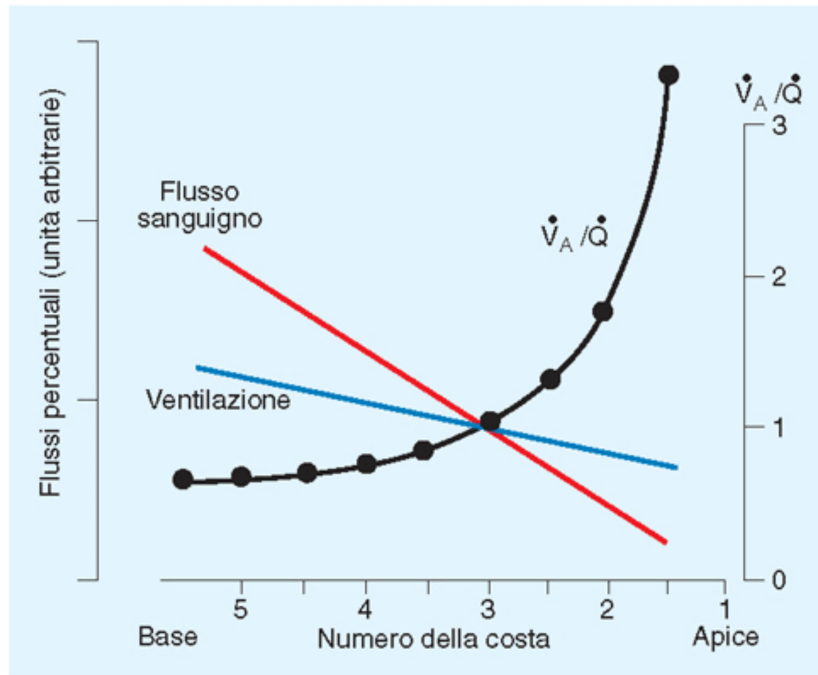


Figura 38.12 Differenze regionali di perfusione e di ventilazione in un polmone mantenuto in posizione eretta. Sia la perfusione (linea rossa) che la ventilazione alveolare (linea blu) diminuiscono linearmente dalla base verso l'apice. Ma la perfusione decresce maggiormente e, pertanto, il rapporto \dot{V}_A/\dot{Q} (curva nera) è maggiore all'apice rispetto alla base.

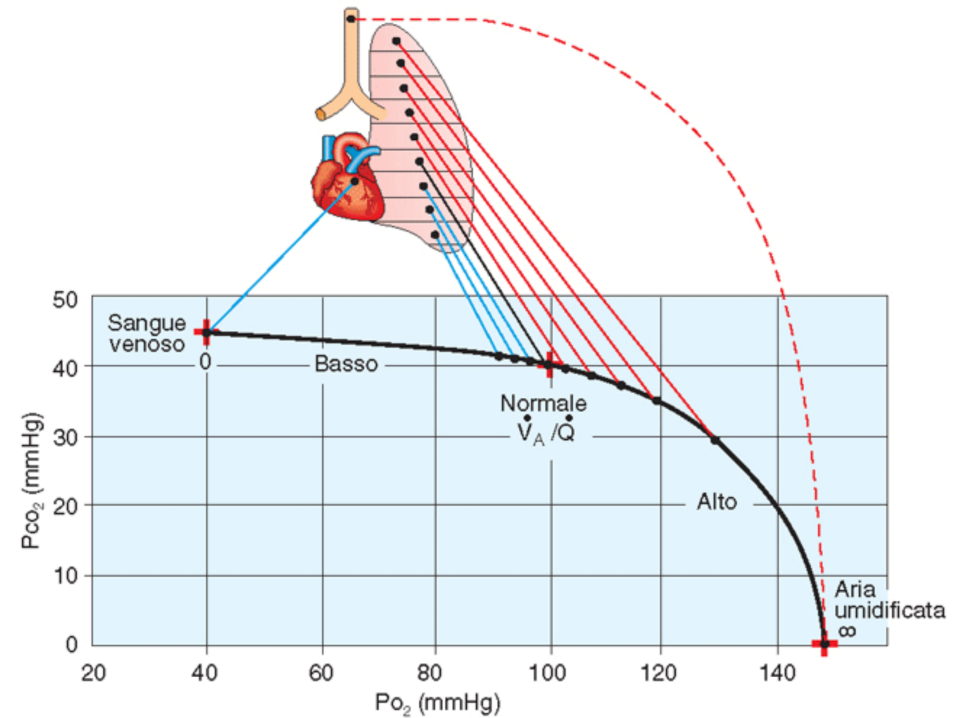


Figura 38.13 Corrispondenza tra le diverse zone del polmone (indicate con linee tratteggiate) e i valori di \dot{V}_A/\dot{Q} che derivano dalle differenze regionali di ventilazione alveolare e perfusione. Alla parte bassa sono associati valori di \dot{V}_A/\dot{Q} minori del normale (0,84); alla parte alta sono associati \dot{V}_A/\dot{Q} maggiori del normale. I valori estremi di \dot{V}_A/\dot{Q} (0 e ∞) corrispondono a due zone molto distinte: il sangue venoso e la trachea che contiene solo aria umidificata con alta P_{O_2} .

Figura 10.24 Come la resistenza presente a livello dei vasi del piccolo circolo dipende dal volume polmonare. Mentre i vasi localizzati all'esterno degli alveoli subiscono una dilatazione con l'aumentare del volume polmonare, i capillari localizzati in sede interalveolare (nei setti) vengono pressati

l'uno contro l'altro. La resistenza totale che ne risulta (curva blu) presenta di conseguenza un minimo nell'ambito dello stato di riposo respiratorio e tende ad aumentare sia che il volume polmonare aumenti sia che essa diminuisca.

