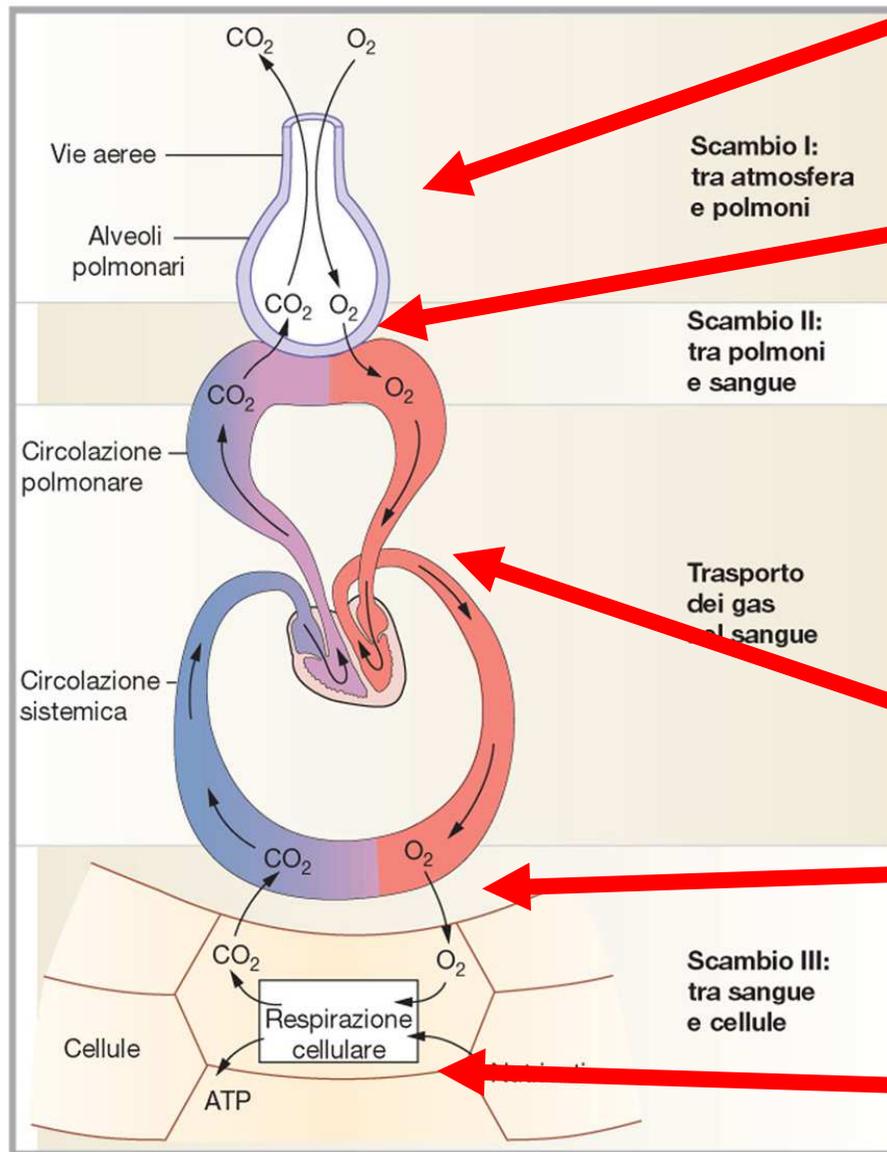


SISTEMA RESPIRATORIO

Funzione della respirazione

Fornire ossigeno ai tessuti ed eliminare dall'organismo l'anidride carbonica, che si forma in seguito al metabolismo

EVENTI COINVOLTI NEL PROCESSO DI SCAMBIO GASSOSO



- **Ventilazione polmonare**
movimento di aria dall'esterno all'interno del polmone e viceversa
- **Diffusione alveoli - sangue**
movimento O_2 e CO_2 attraverso la membrana respiratoria
- Un rapporto Ventilazione- Perfusion polmonare normale è indispensabile perché gli scambi avvengano in maniera ottimale
- **Trasporto O_2 e CO_2 nel sangue**
- **Diffusione sangue-tessuti** movimento di O_2 e CO_2 a livello tissutale
- **Utilizzazione O_2 e produzione CO_2 nelle cellule**

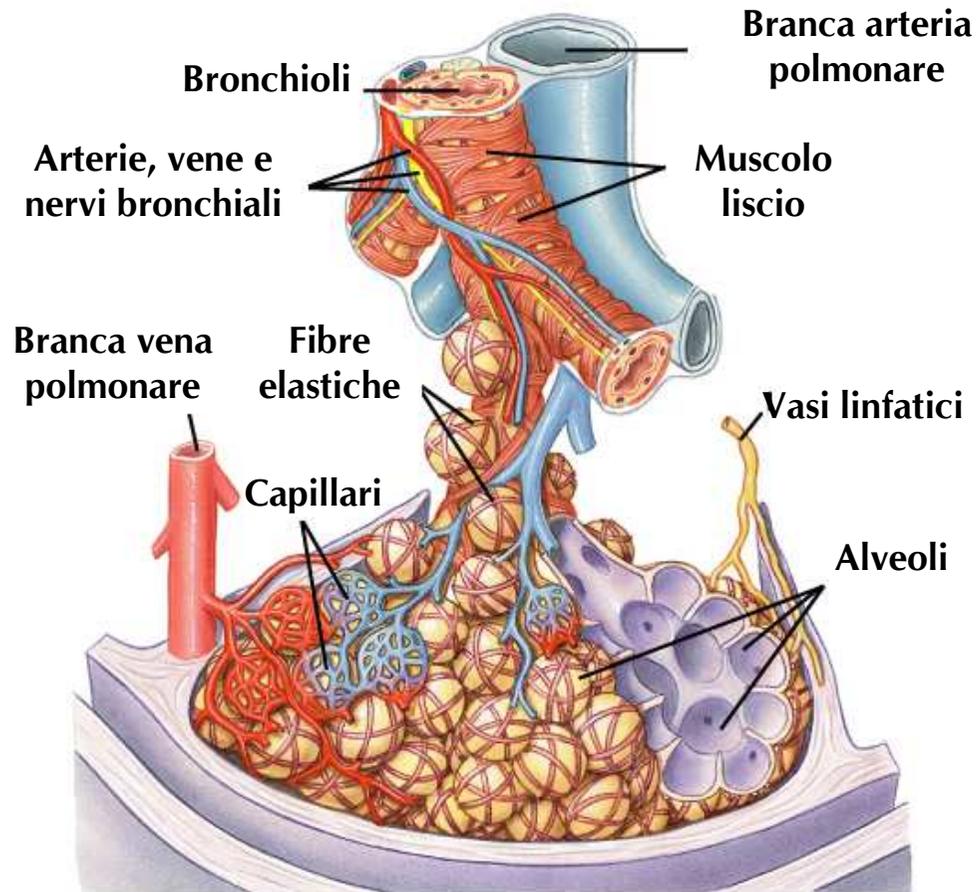
FENOMENI ASSOCIATI

MECCANICA RESPIRATORIA

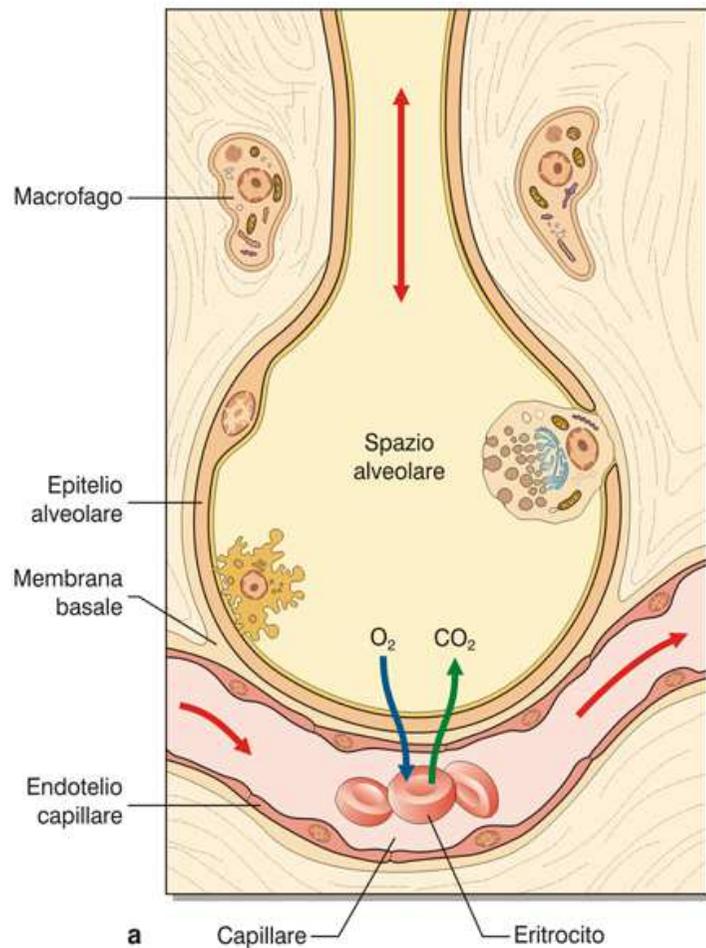
Forze implicate nel mantenere in posizione il polmone e la gabbia toracica e nel determinarne il movimento durante l'atto respiratorio

CONTROLLO DELLA VENTILAZIONE

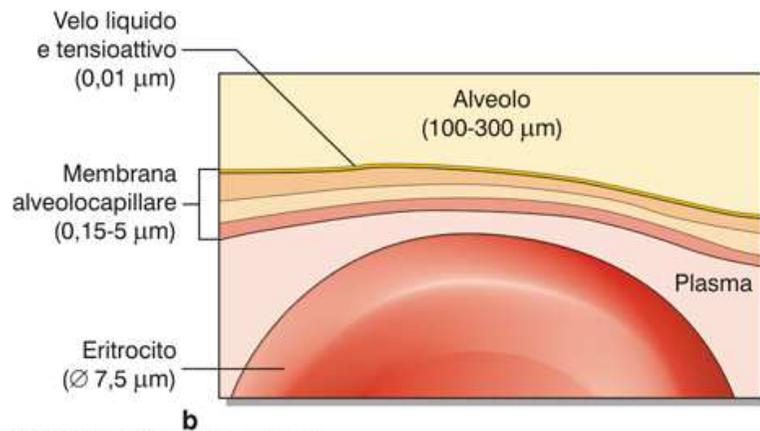
Meccanismi che regolano la funzione degli scambi gassosi nel polmone



- ✓ Lo scambio dei gas respiratori avviene a livello dell'unità **alveolo-capillare**. Gli alveoli sono circa $300 \cdot 10^6$ e formano una superficie di scambio totale di circa $100 - 140 \text{ m}^2$.
- ✓ La circolazione capillare polmonare è la più estesa dell'organismo e copre una superficie di circa 80 m^2 .

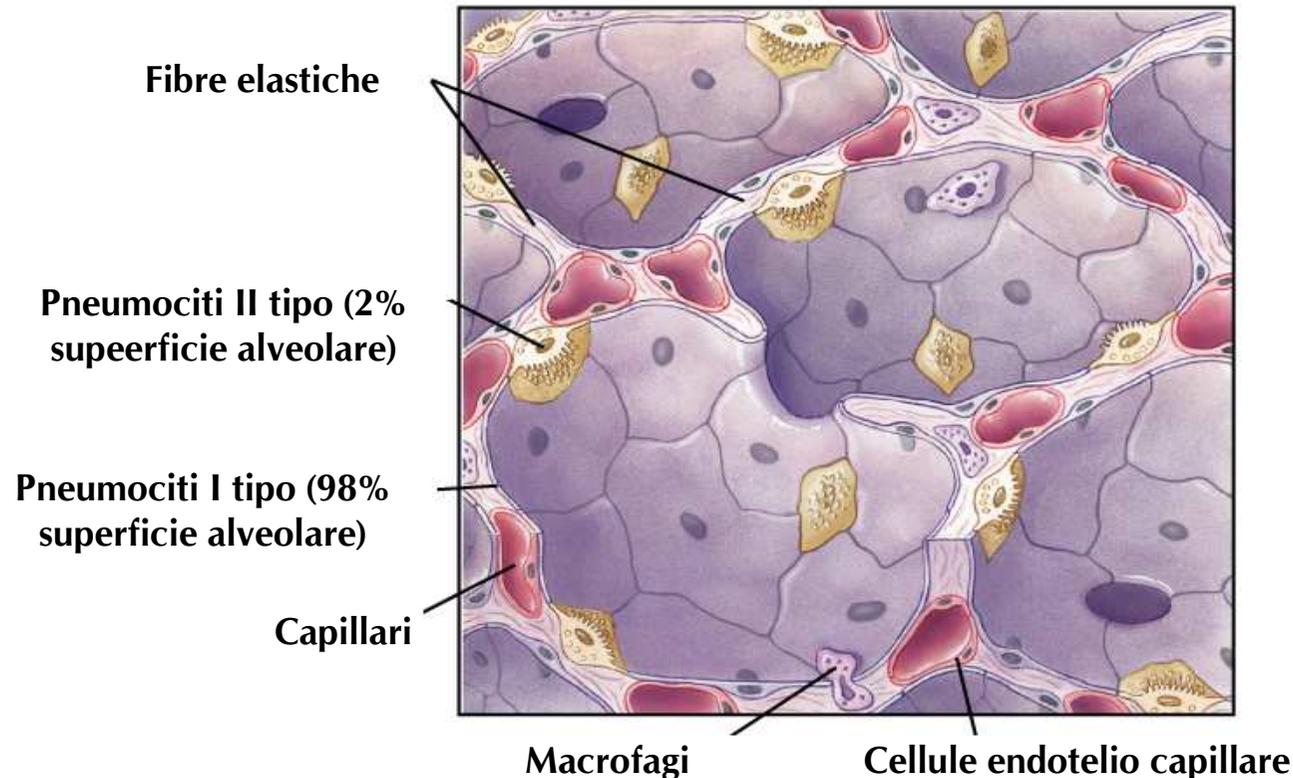


Gli scambi gassosi avvengono per **diffusione** attraverso la membrana respiratoria (alveolo-capillare) il cui spessore ridotto (0.15 – 5 μm) facilita gli scambi.

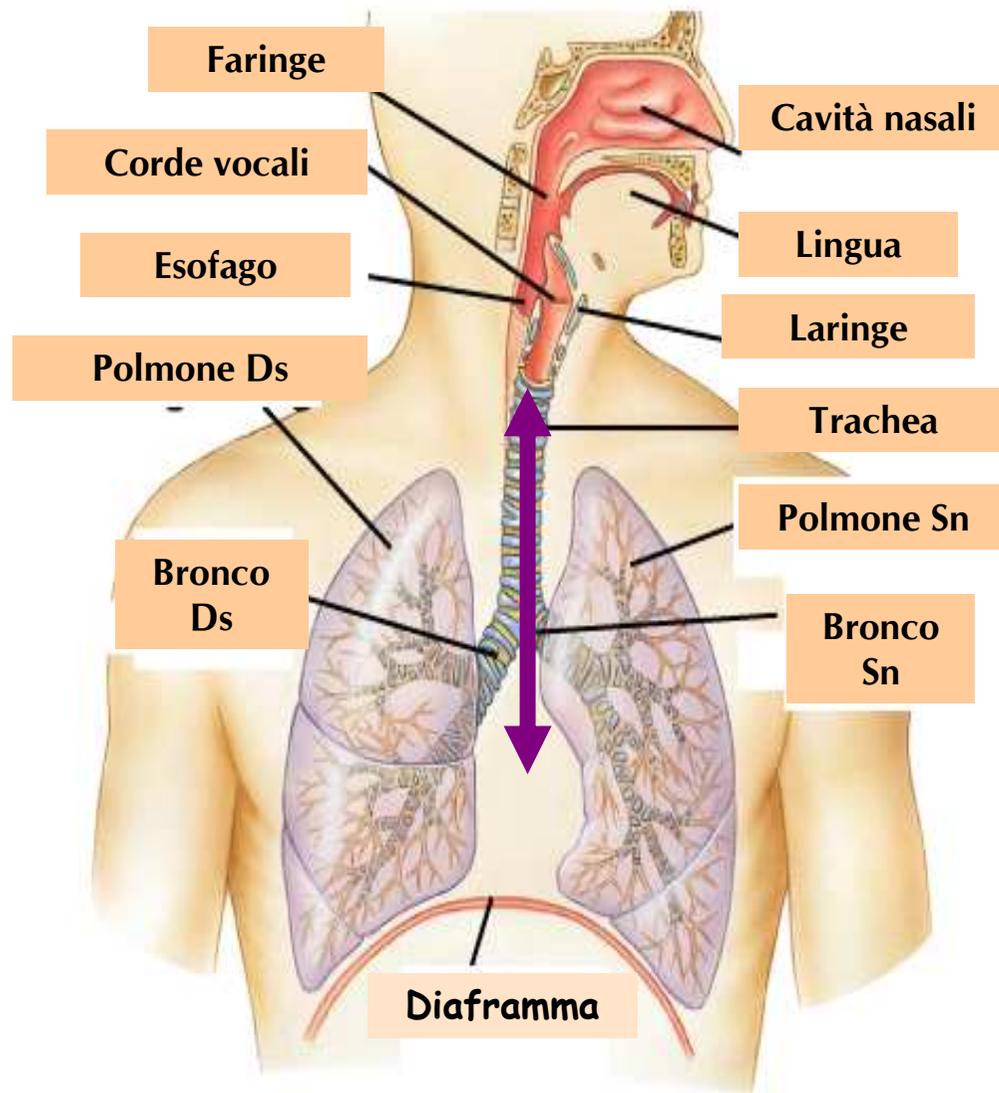


Struttura alveolare

Gli alveoli sono costituiti da **pneumociti di tipo I** (98% superficie alveolare) coinvolti negli scambi gassosi e **pneumociti di tipo II** (2% superficie alveolare) che sintetizzano il surfattante polmonare (tensioattivo).



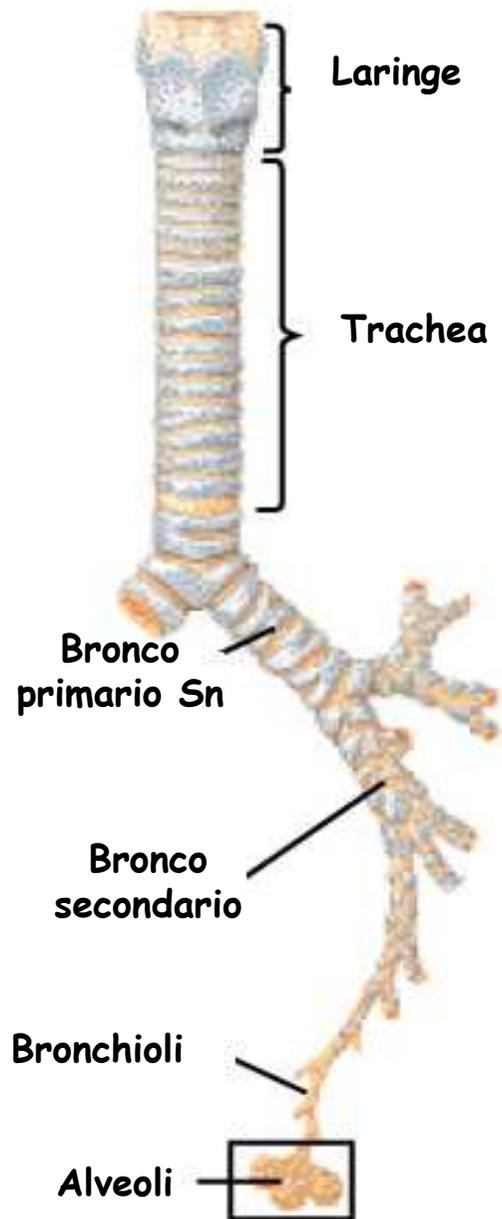
In caso di lesione dei pneumociti di tipo I, il tipo II li sostituisce e poi si trasforma in tipo I



Il ricambio di aria alveolare è un processo intermittente legato al ciclo respiratorio (frequenza 12/min).

In condizioni normali, ad ogni inspirazione entrano 500 ml di aria (**volume corrente**) che si diluiscono in un volume (2.3 litri) già contenuto nel polmone (**capacità funzionale residua**).

Il ricambio completo necessita di 12-16 atti respiratori



Il movimento di aria avviene attraverso le vie aeree di conduzione:

trachea e **bronchi** (dotati di anelli cartilaginei per evitare il collasso)

Bronchi primari danno origine a 23 generazioni di condotti secondari fino agli alveoli

L'aria si muove con movimento di massa fino ai bronchioli terminali e poi per diffusione

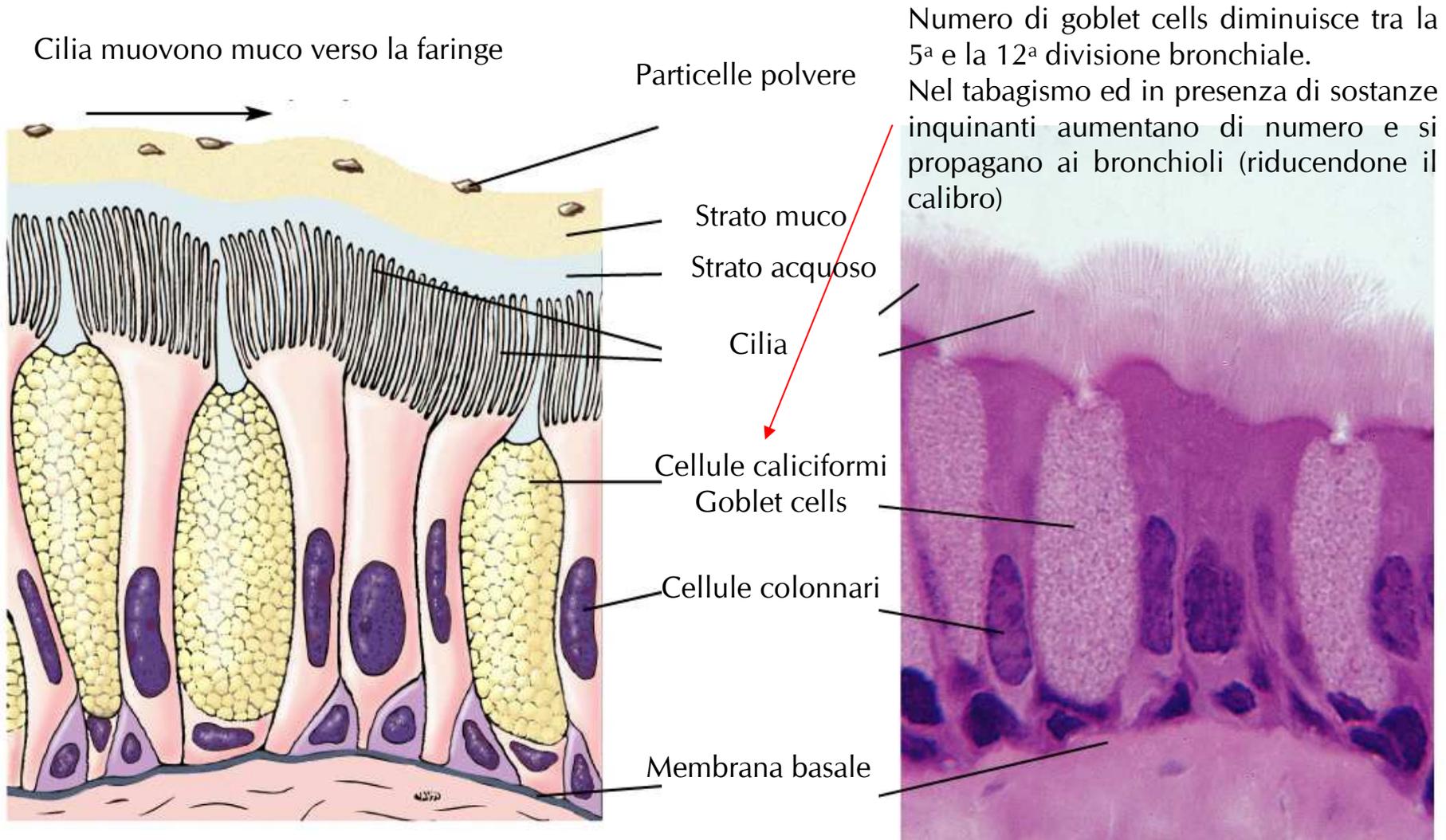
		Generazione	Calibro (cm)	Lunghezza (cm)	Numero	Sezione trasversa totale (cm ²)
Zona di conduzione	Trachea	0	1,80	12,0	1	2,54
	Bronchi	1	1,22	4,8	2	2,33
		2	0,83	1,9	4	2,13
		3	0,56	0,8	8	2,00
	Bronchioli	4	0,45	1,3	16	2,48
Zona di transizione e respiratoria	Bronchioli terminali	5	0,35	1,07	32	3,11
		16	0,06	0,17	6×10^4	180,0
	Bronchioli respiratori	17	↓	↓	↓	↓
		18	↓	↓	↓	↓
		19	0,05	0,10	5×10^5	10^3
	Dotti alveolari	T ₃	20	↓	↓	↓
		T ₂	21	↓	↓	↓
T ₁		22	↓	↓	↓	
Sacchi alveolari	T	23	0,04	0,05	8×10^6	10^4

© 2005 edi.ermes milano

Le vie aeree, fino alla 17^a generazione (**vie di conduzione**), non partecipano agli scambi gassosi (**spazio morto anatomico**).

Scambi dalla 17^a generazione in poi. Il progressivo aumento della sezione trasversa totale delle vie aeree, in parallelo, determina progressiva riduzione velocità dell'aria.

Nelle vie **aeree di conduzione**, l'aria viene preriscaldata, umidificata (per contatto con il secreto che bagna la mucosa) e depurata (muco trattiene la polvere, che viene eliminata attraverso il meccanismo di scala mobile muco-ciliare).



Meccanismi di difesa

Cellule cigliate vie aeree (naso - bronchioli terminali) ~ 200 ciglia per cellula con movimento continuo (frequenza 10-20 battiti/sec) spingono muco verso la faringe (velocità 5-20 mm/min).

- **Particelle dimensioni $> 10-15 \mu\text{m}$** : rimosse nel naso (vibrisse e precipitazione per turbolenza). Le sporgenze delle cavità nasali (turbinati) deviano la direzione dell'aria, ma le particelle, con massa ed inerzia maggiore dell'aria, non sono deviate e urtando contro i turbinati sono intrappolate nel muco e spinte dalle ciglia in faringe. L'irritazione delle vie nasali provoca il riflesso dello starnuto.
- **Particelle dimensioni $\cong 10 \mu\text{m}$** : arrivano in trachea e nei bronchi dove sono intrappolate nel muco ed eliminate dal movimento cigliare. Stimolano broncocostrizione e il riflesso della tosse.
- **Particelle dimensioni $2-5 \mu\text{m}$** : sedimentano nei bronchioli terminali per precipitazione gravitazionale causando malattie (minatori di carbone).
- **Particelle dimensioni $< 2 \mu\text{m}$** : arrivano agli alveoli e sono rimosse dai macrofagi alveolari o allontanate dai linfatici polmonari. Un eccesso di particelle provoca proliferazione di tessuto fibroso nei setti alveolari con danno polmonare permanente (asbestosi, silicosi).

Modificazione calibro vie aeree

- Sistema nervoso parasimpatico (vago, Ach-recettori M_3):

Broncocostrizione (riflessi attivati da agenti irritanti, stimoli meccanici, CO_2)

- Adrenalina circolante (recettori β_2)

Broncodilatazione

- Sistema nervoso simpatico (NA-recettori α)

Broncocostrizione (effetto scarso), agisce prevalentemente su arterie bronchiali e ghiandole

- Fattori locali rilasciati durante infiammazioni o reazioni allergiche: Istamina (dai mastociti durante reazioni allergiche) e PG (durante infiammazioni)

Broncocostrizione

Movimento aria **Esterno** \leftrightarrow **Interno** determinato da gradiente pressorio (ΔP).

Esterno (**P atmosferica**)

Interno (**P intrapolmonare**)

- P intrapolmonare $<$ P atmosferica = ventilazione a P negativa (condizione naturale)

- P atmosferica (pressione alla bocca) $>$ P intrapolmonare = ventilazione a P positiva (respiratori)

Per la **Legge di Boyle**

$$P \cdot V = K$$

La pressione (P) intrapolmonare si modifica attraverso cambiamenti del volume (V) polmonare.

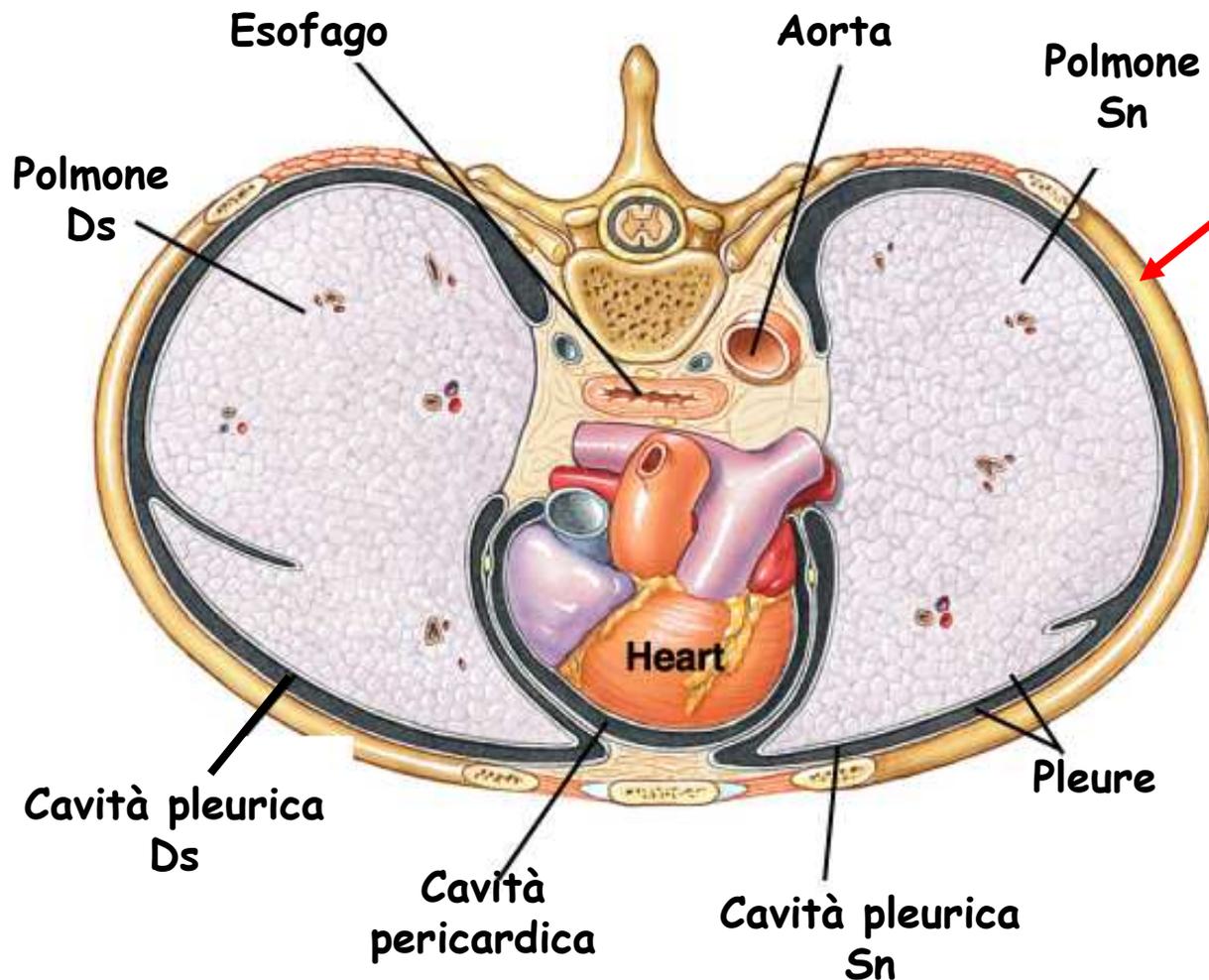
Inspirazione:

↑V polmone → ↓P intrapolmonare → aria entra

Espirazione:

↓V polmone → ↑P intrapolmonare → aria esce

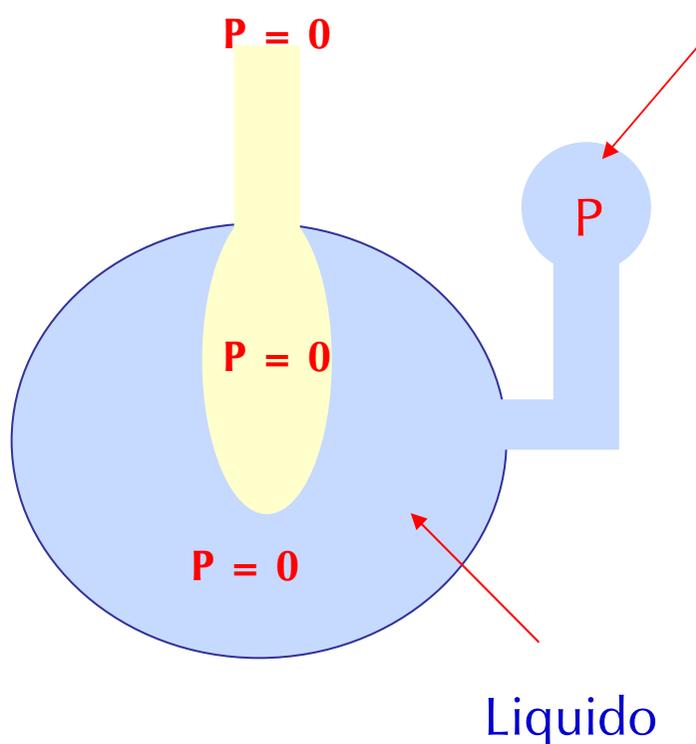
- Polmone, privo di strutture di sostegno o muscolari, aderisce alla gabbia toracica attraverso la pleura (parietale e viscerale).
- Le variazioni di V polmonare dipendono da variazioni di V della gabbia toracica.



La cavità pleurica contiene liquido (~2 ml) che mantiene aderenti i foglietti pleurici consentendone lo scivolamento.

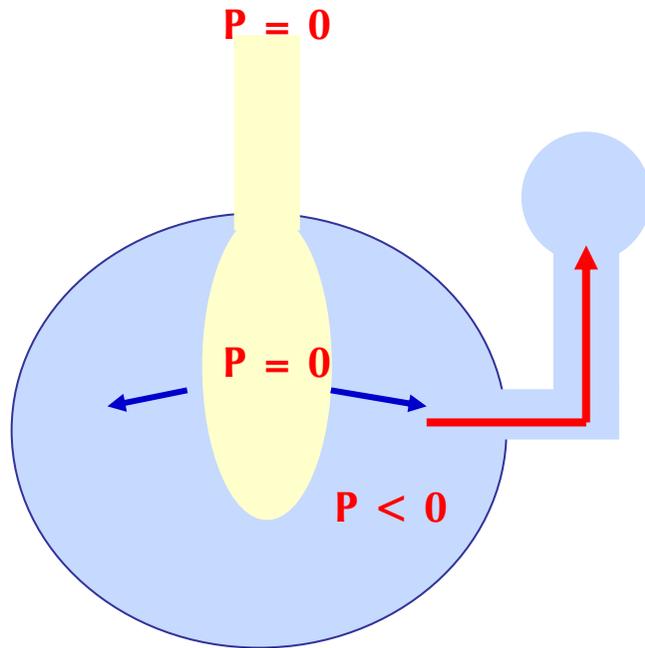
Nella cavità pleurica esiste una pressione (**P endopleurica**) negativa (subatmosferica).

Modello per spiegare l'esistenza di P negativa nello spazio pleurico



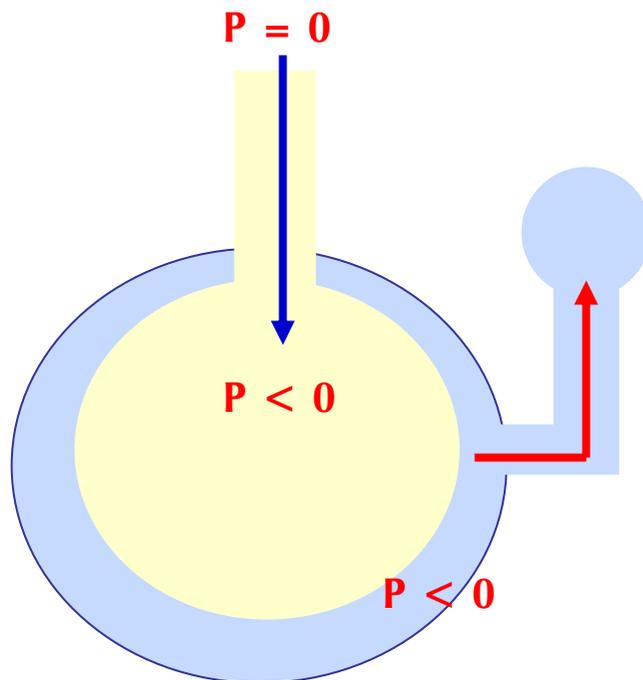
Pompa aspirante

A pompa ferma esiste equilibrio tra P esterna (P di riferimento considerata = 0), P intra-palloncino e P contenitore.

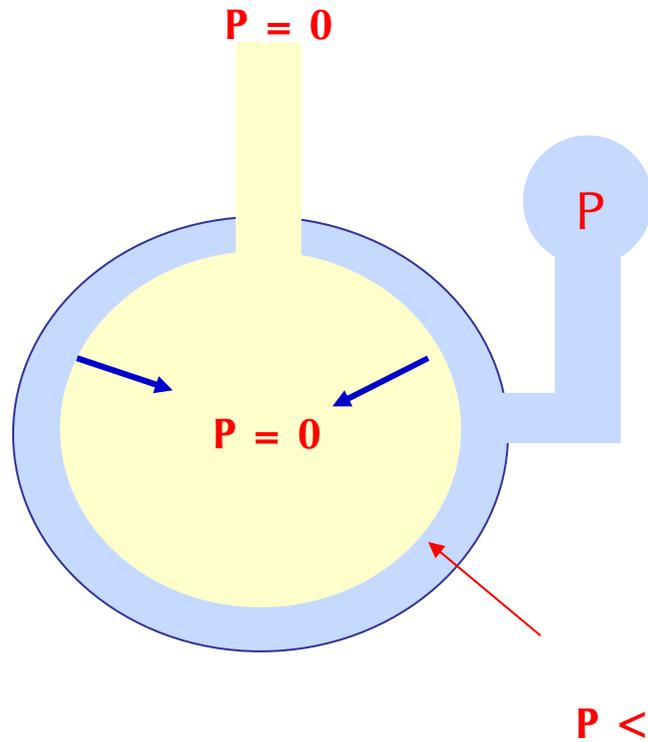


La pompa aspira liquido:

- P contenitore diventa < 0
- Si crea ΔP tra interno ed esterno del palloncino (pressione trasmurale positiva) che determina espansione palloncino.



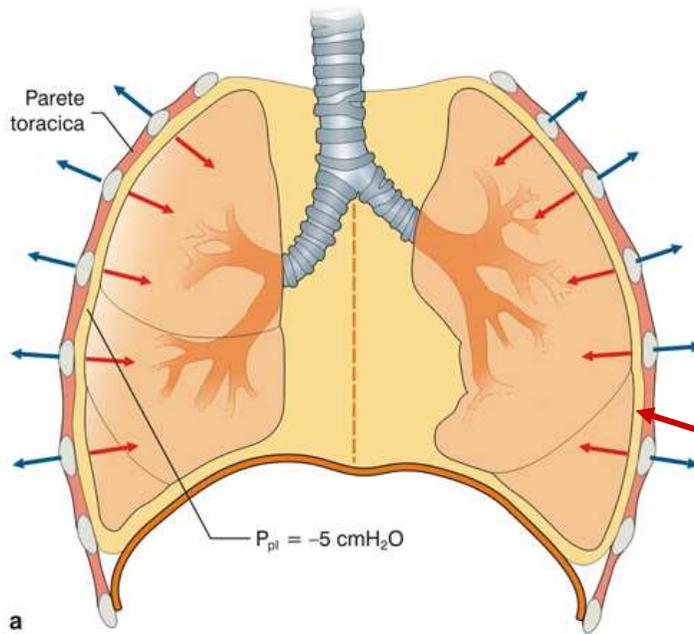
L'aumento di volume del palloncino determina diminuzione della P al suo interno, il palloncino si riempie di aria grazie al ΔP esterno-interno.



Condizione finale:

- Volume palloncino \cong volume contenitore
- P intra-palloncino = P esterna
- P intercapedine è negativa ed è espressione della tendenza del palloncino a tornare alla situazione di equilibrio, sgonfiandosi.

Il **polmone** (struttura elastica) aderisce alla **gabbia toracica** grazie alle pleure. Non è mai in equilibrio elastico, ed è quindi sottoposto continuamente ad una forza di retrazione, espressa dalla negatività dello spazio pleurico (**P endopleurica negativa**). L'adesione tra polmone e gabbia toracica è mantenuta dalla continua aspirazione del liquido pleurico da parte dei linfatici, che impedendo lo scollamento del polmone dalla parete toracica, contribuisce al mantenimento della negatività endopleurica.



© 2005 edi.ermes milano

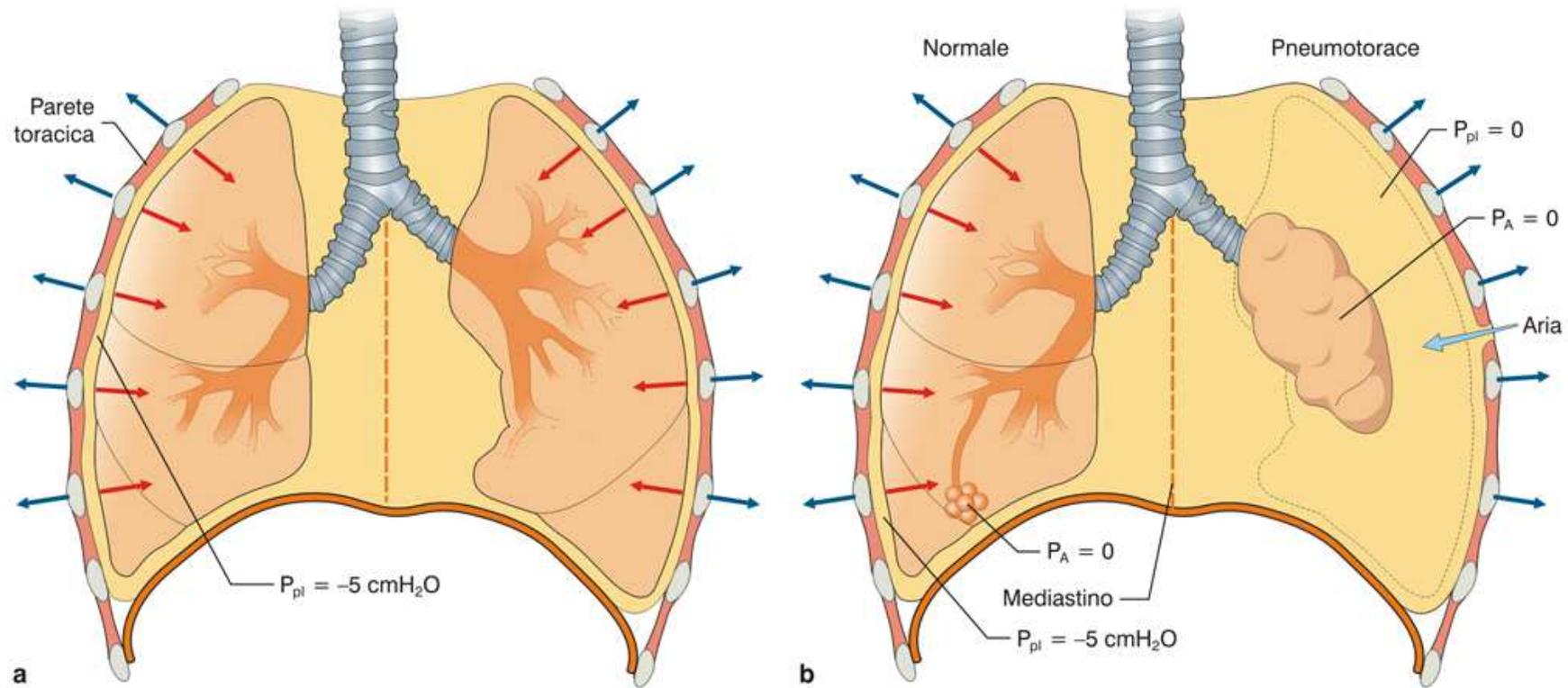
Condizione di equilibrio per polmone e gabbia toracica

La **P_{ep} negativa** è espressione delle forze opposte di retrazione del polmone e della gabbia toracica, che tendono a dilatare lo spazio pleurico.

Polmone e gabbia toracica sono strutture elastiche che aderiscono attraverso le pleure. Il **polmone**, normalmente espanso rispetto alla sua condizione di equilibrio, è sottoposto ad una forza di retrazione verso l'interno e la **gabbia toracica**, normalmente compressa rispetto alla sua condizione di equilibrio, è sottoposta ad una forza di retrazione verso l'esterno.

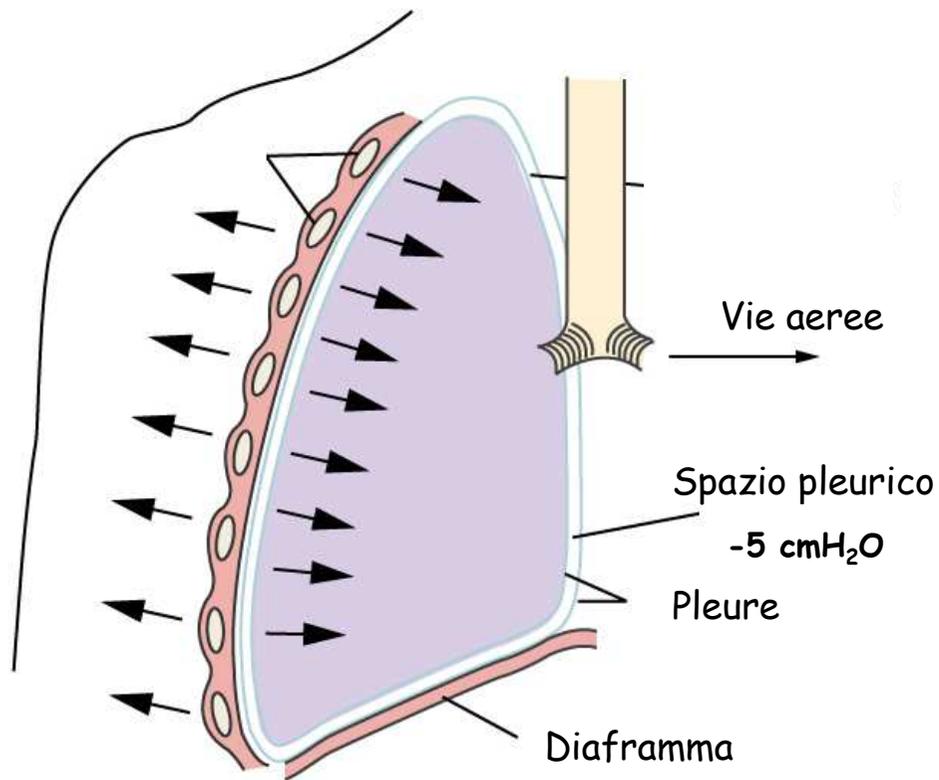
In **condizioni di riposo** (fine espirazione tranquilla) la forza di retrazione elastica del polmone è perfettamente controbilanciata da quella della gabbia toracica. Il sistema **toraco-polmonare** è perfettamente in equilibrio e la P_{ep} endopleurica (P_{ep}) è circa $-5 \text{ cmH}_2\text{O}$.

Pneumotorace



© 2005 edi.ermes milano

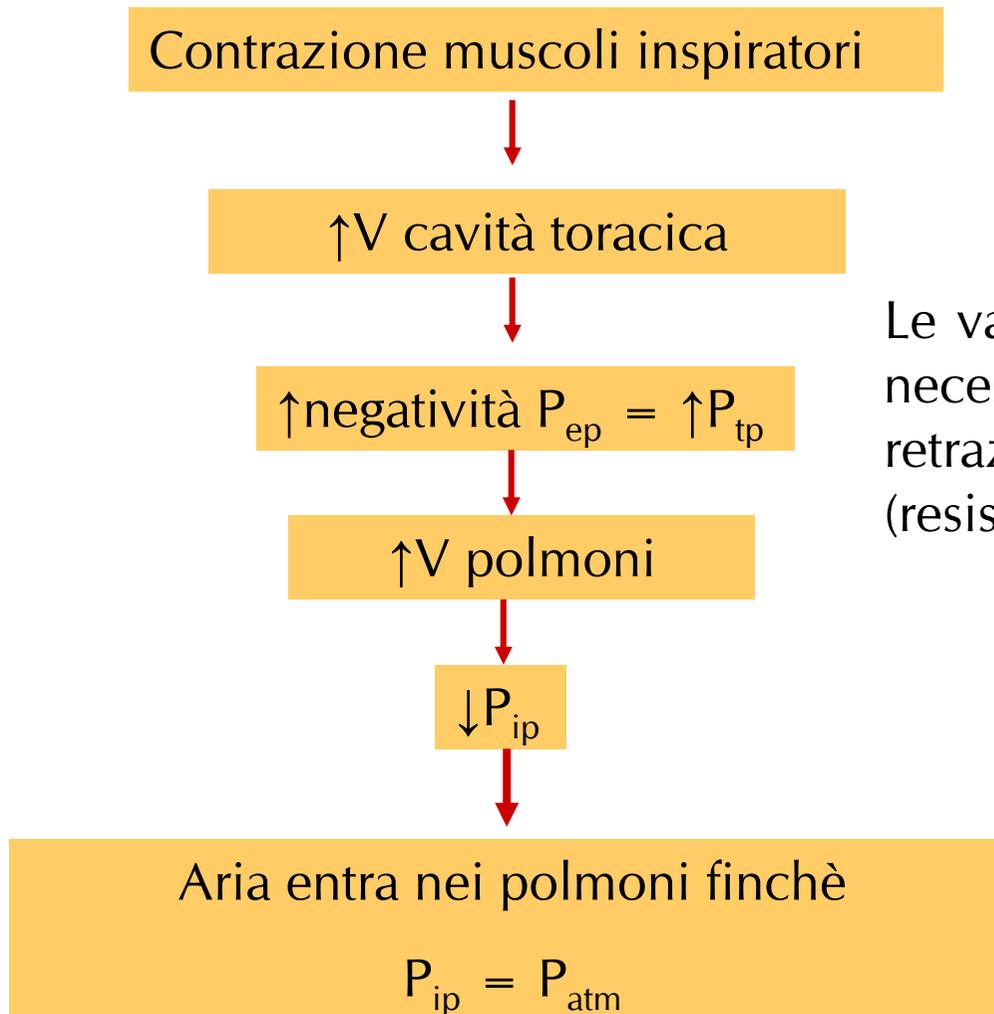
L'esistenza di forze elastiche uguali e contrarie è dimostrata dal fatto che quando entra aria nello spazio pleurico (**pneumotorace**), il polmone collassa e la gabbia toracica si espande.



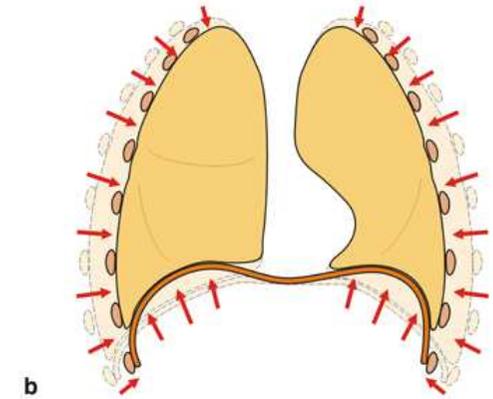
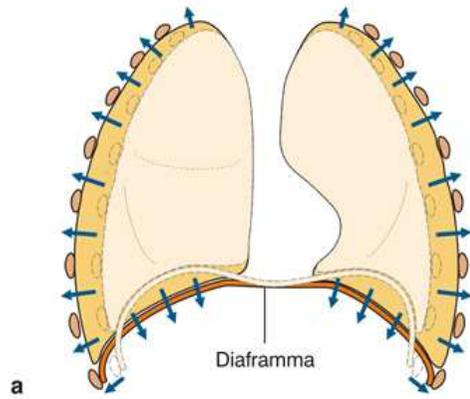
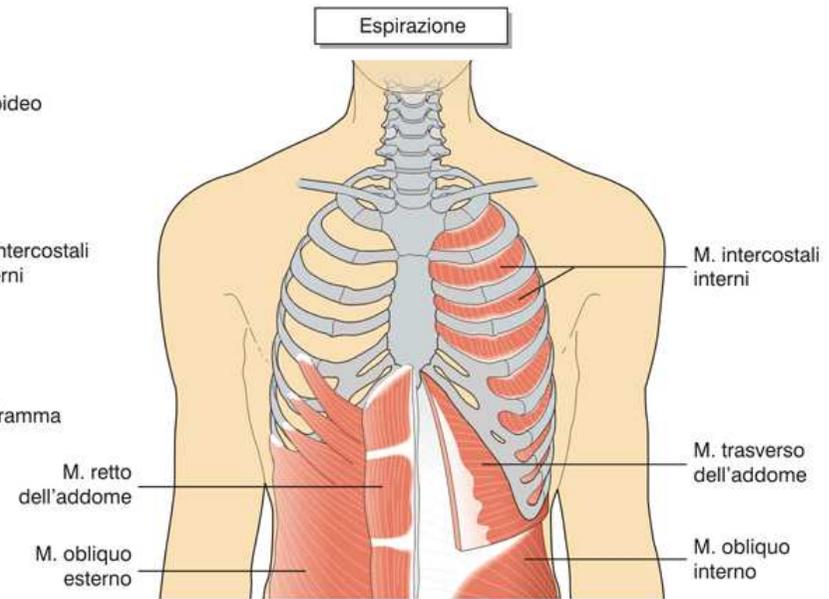
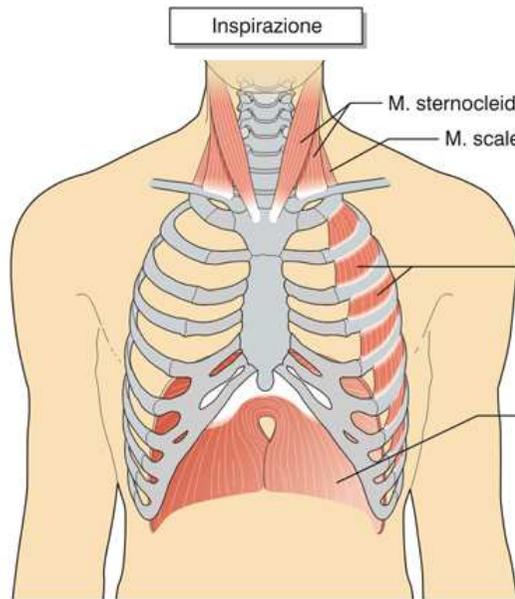
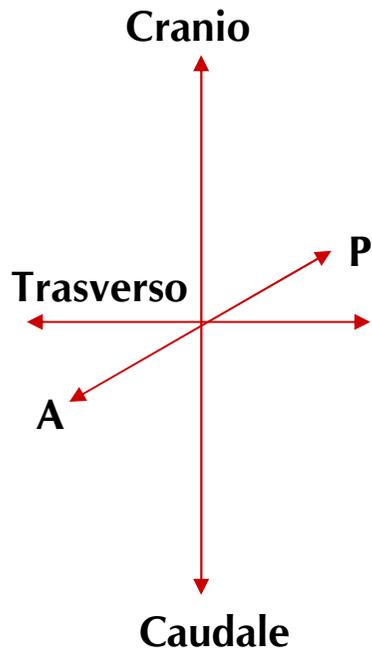
Condizione di riposo (CFR)

- Alla fine di un'espirazione tranquilla il polmone contiene un volume di aria: **capacità funzionale residua (CFR)** $\cong 2.3$ litri.
- Alla **CFR** il sistema toraco-polmonare è in equilibrio.
- Ogni variazione di volume rispetto alla **CFR** prevede lo sviluppo di forza muscolare.
- Per aumentare il volume al di sopra della CFR, è necessario vincere la maggiore forza di retrazione elastica del polmone, (**muscolatura inspiratoria**).
- Per ridurre il volume al di sotto della CFR è necessario vincere la maggiore forza di retrazione elastica della gabbia toracica (**muscolatura espiratoria**).

L'espansione del polmone durante l'inspirazione avviene come conseguenza dell'aumento di V della gabbia toracica, ottenuto con la contrazione dei muscoli inspiratori, che compiono un lavoro per vincere le forze di retrazione elastica del polmone.



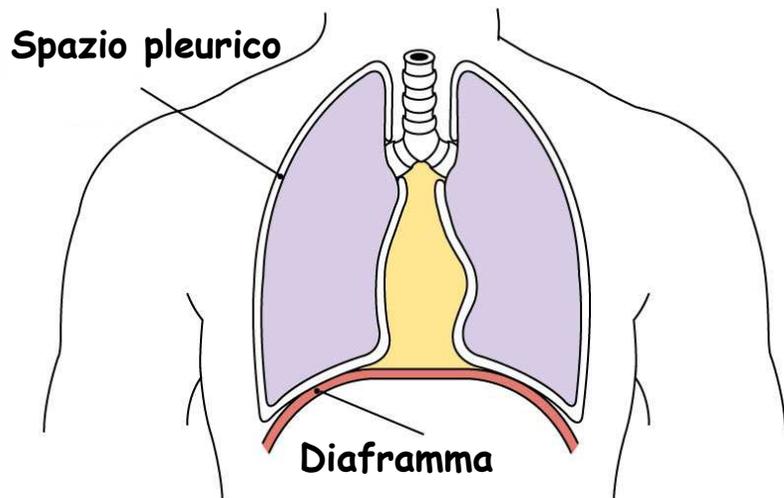
Le variazioni di P_{ep} riflettono la necessità di vincere le forze di retrazione elastica del polmone (resistenza elastica).



© 2005 edi.ermes milano

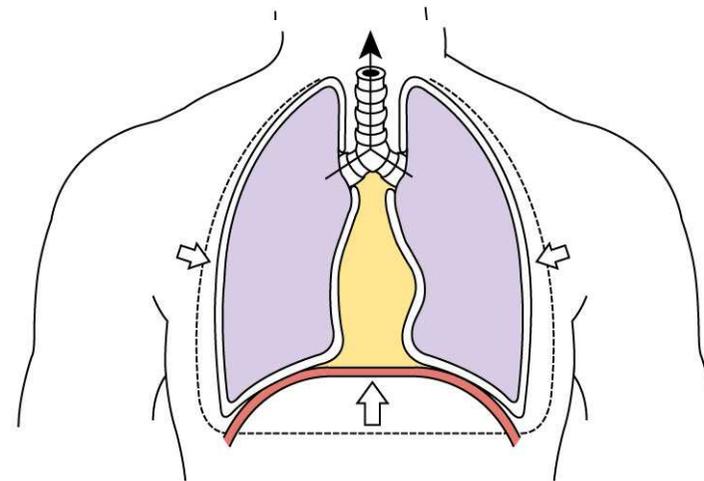
- Ms. Inspiratori** → ↑V gabbia toracica
- Diaframma** → ↑∅ C-C + T
- Intercostali esterni** → ↑∅ A-P + T
- Sternocleidomastoidei** → ↑∅ A-P + T
- Scaleni** → ↑∅ C-C

- Ms. Espiratori** → ↓V gabbia toracica (espirazione forzata: esercizio fisico, fonazione, canto, fase espiratoria starnuto e tosse)
- Intercostali interni, Addominali, Accessori** (Grande dorsale, Dentato posteriore-inferiore, Quadrato dei lombi)



DIAFRAMMA

Innervato dai nervi frenici (C3-C5).
 Inserzioni su sterno, costole più basse,
 colonna vertebrale, e legamento
 centrale aderente al pericardio.

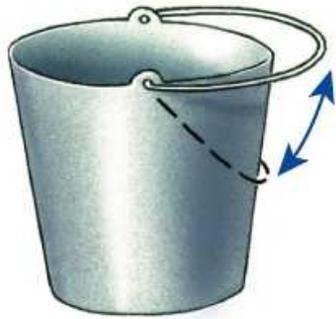


Rilasciamento diaframma \rightarrow $\downarrow V$ gabbia toracica \rightarrow CFR.

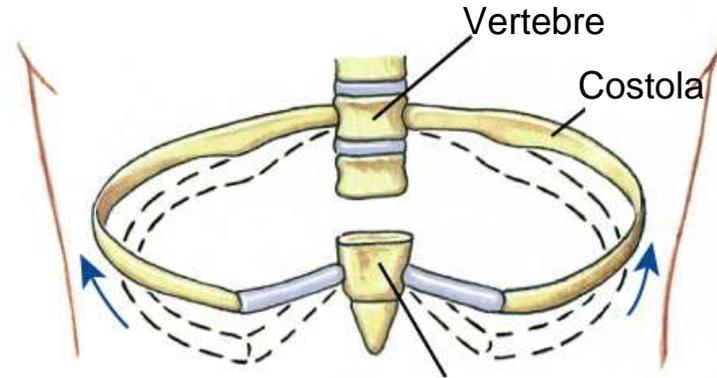
L'espiazione tranquilla è un fenomeno passivo assicurato dalle forze di retrazione del polmone.

Inspirazione profonda: 10 cm ($\uparrow V = 2-4$ l).

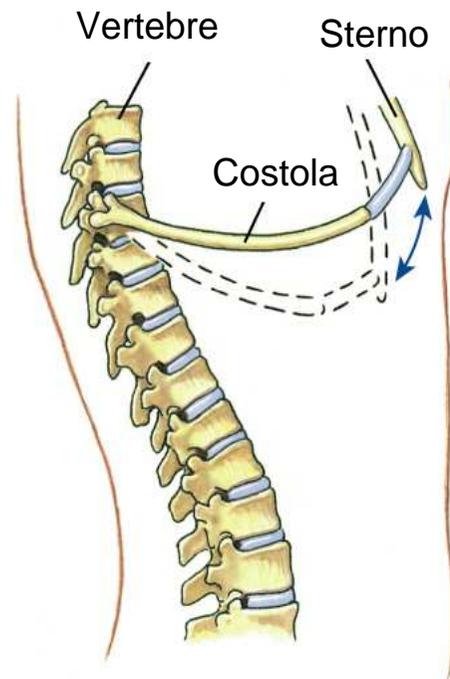
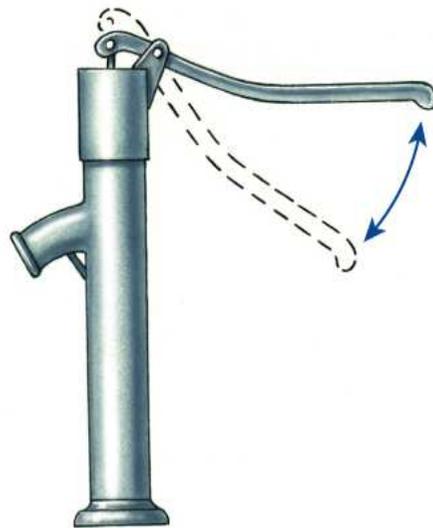
Minore efficienza: donna in gravidanza, obesi, compressione parete addominale.



Assi rotazione costole tangenti al collo.
 Diminuzione cranio-caudale angolo:
 I costa = 125° , VI costa = 88°



Ms intercostali esterni (nervi intercostali, T1-T11). Disposizione obliqua alto \rightarrow basso e avanti, innalzano le costole. $\uparrow \emptyset$ A-P + T.



Movimento leva di 3° tipo: potenza (muscoli), resistenza distribuita sulla parete anteriore della costola, fulcro (articolazione costo-vertebrale).

Costole più craniali si muovono in avanti $\rightarrow \uparrow \emptyset$ A-P, con movimento dello sterno in alto ed in avanti.

Costole più caudali si muovono verso l'esterno, contribuendo soprattutto $\uparrow \emptyset$ T.

Muscoli inspiratori accessori

Particolarmente attivi nell'inspirazione forzata (esercizio fisico, tosse, patologie ostruttive come l'asma)

Sternocleidomastoidei: sollevano lo sterno, aumentando il diametro antero-posteriore e trasverso della gabbia toracica

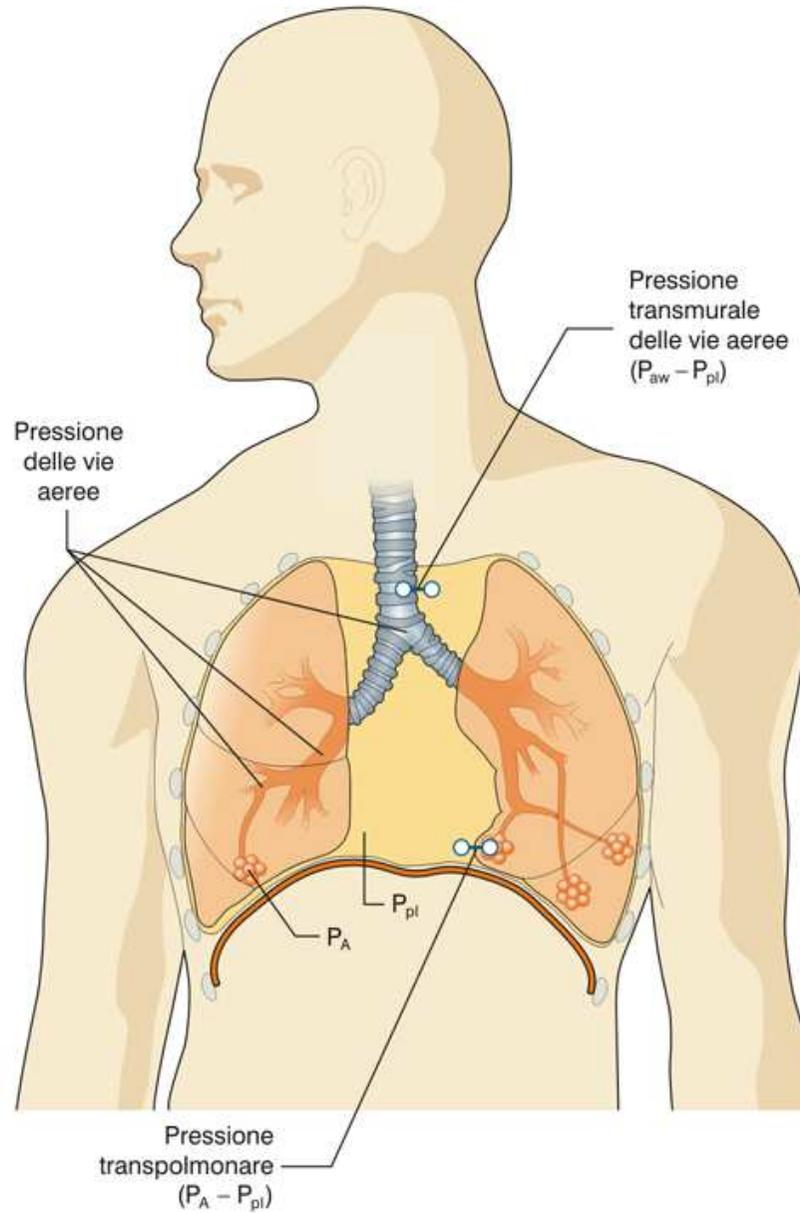
Scaleni: sollevano le prime due costole

➤ **L'inspirazione** è conseguenza dell'espansione del polmone, che segue l'aumento di V della gabbia toracica, ottenuto per contrazione dei **muscoli inspiratori**, che compiono un lavoro per vincere le forze di retrazione elastica del polmone.

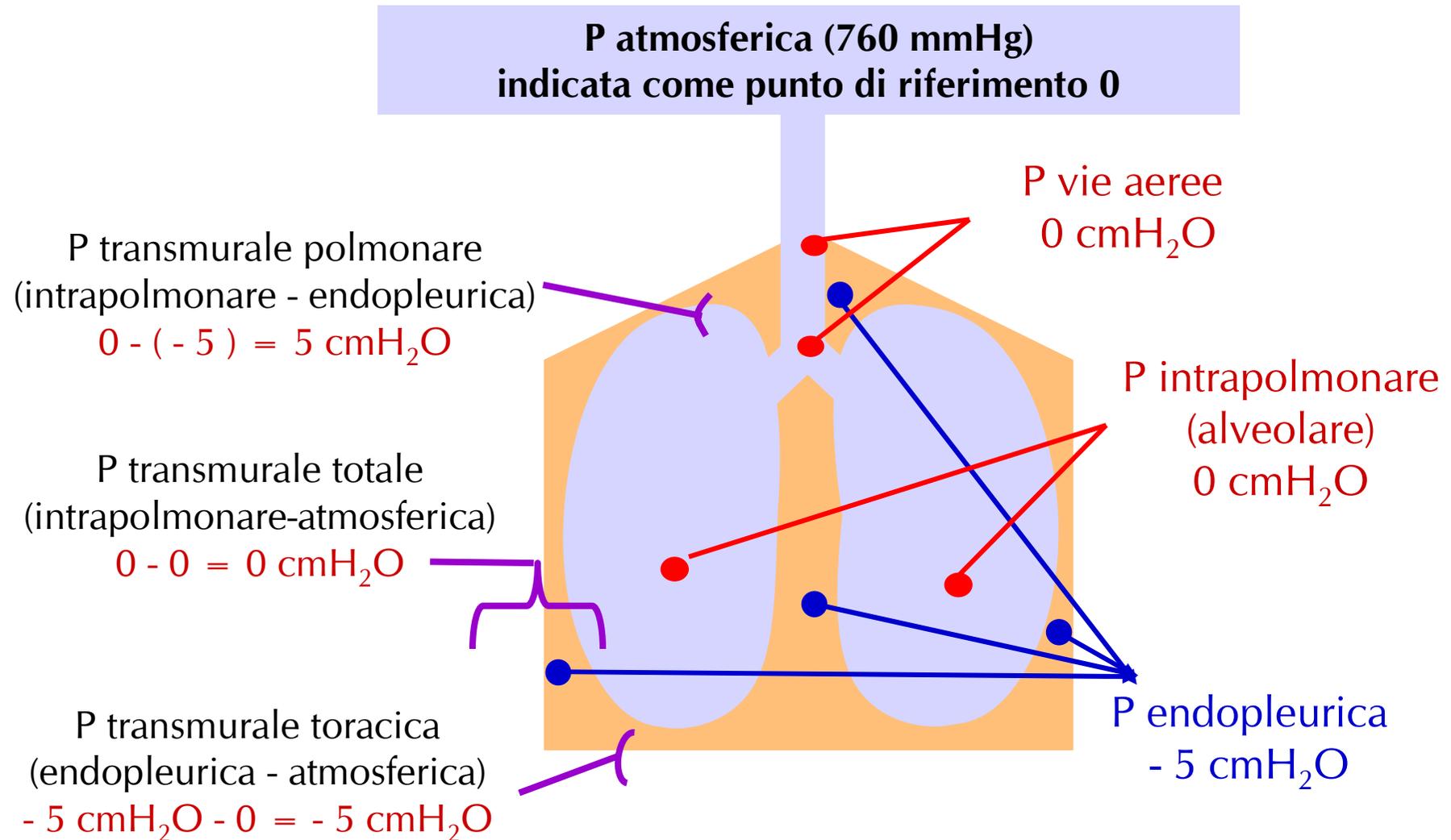
➤ **L'espirazione** tranquilla è un fenomeno passivo, associato al rilasciamento della muscolatura inspiratoria. Quando la muscolatura si rilascia il sistema toraco-polmonare torna al V di partenza (punto di equilibrio) grazie al prevalere delle forze di retrazione elastica del polmone.

➤ **L'espirazione forzata** (V inferiori alla CFR) necessita della contrazione dei muscoli espiratori, che devono vincere le forze di retrazione elastica della gabbia toracica.

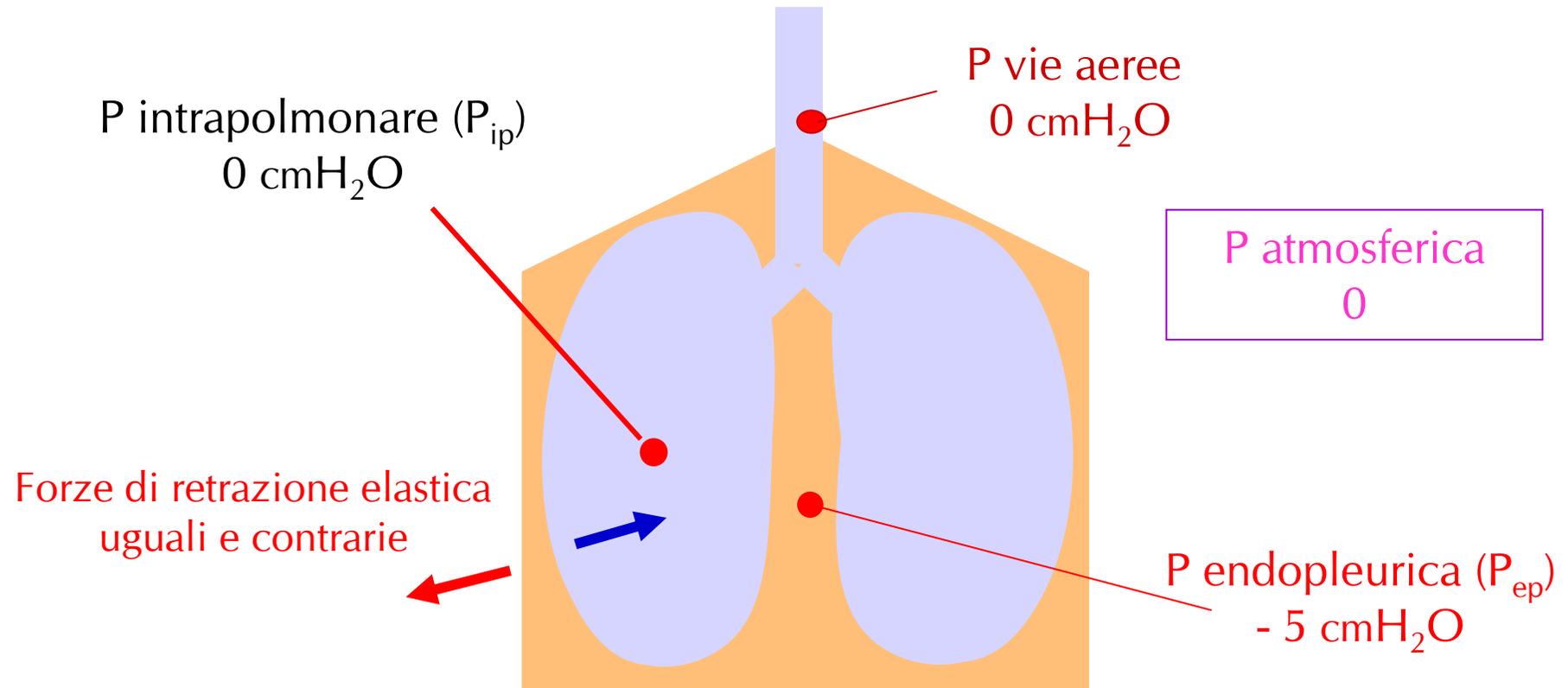
Pressioni da considerare nell'apparato respiratorio



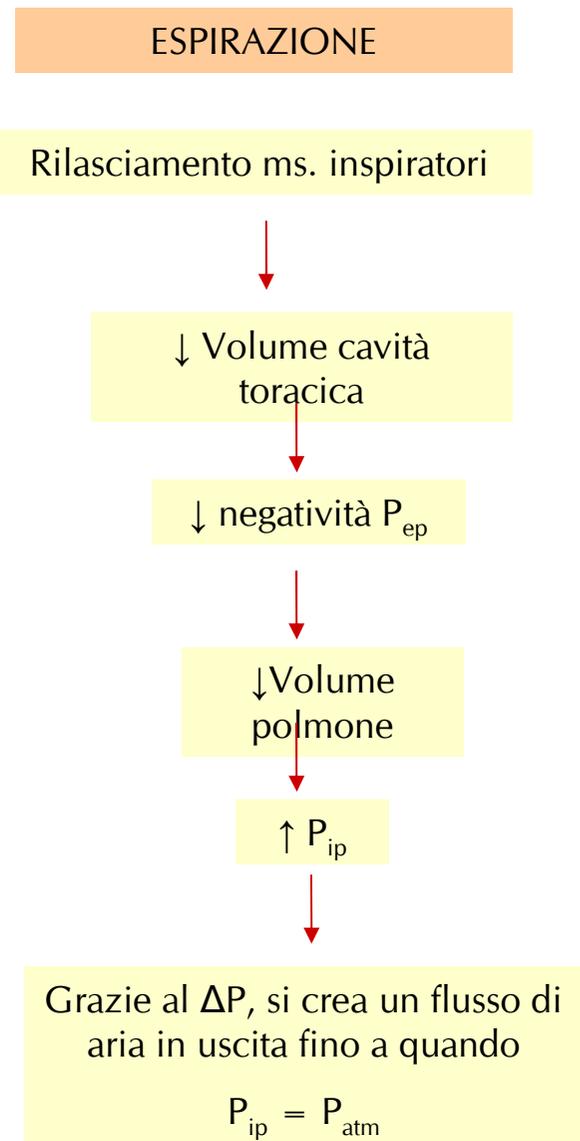
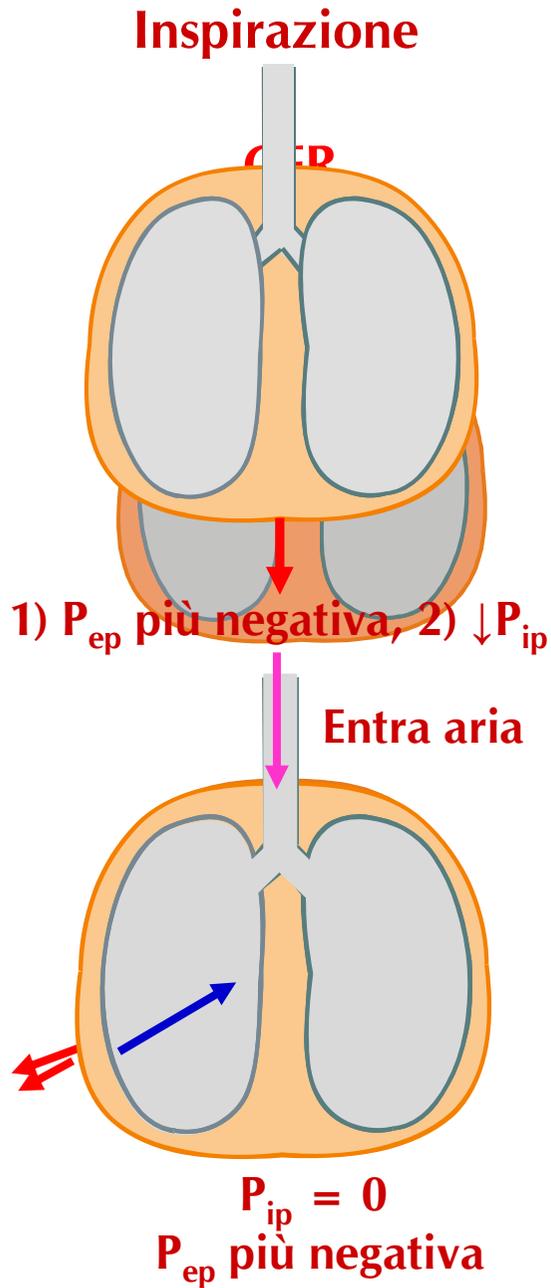
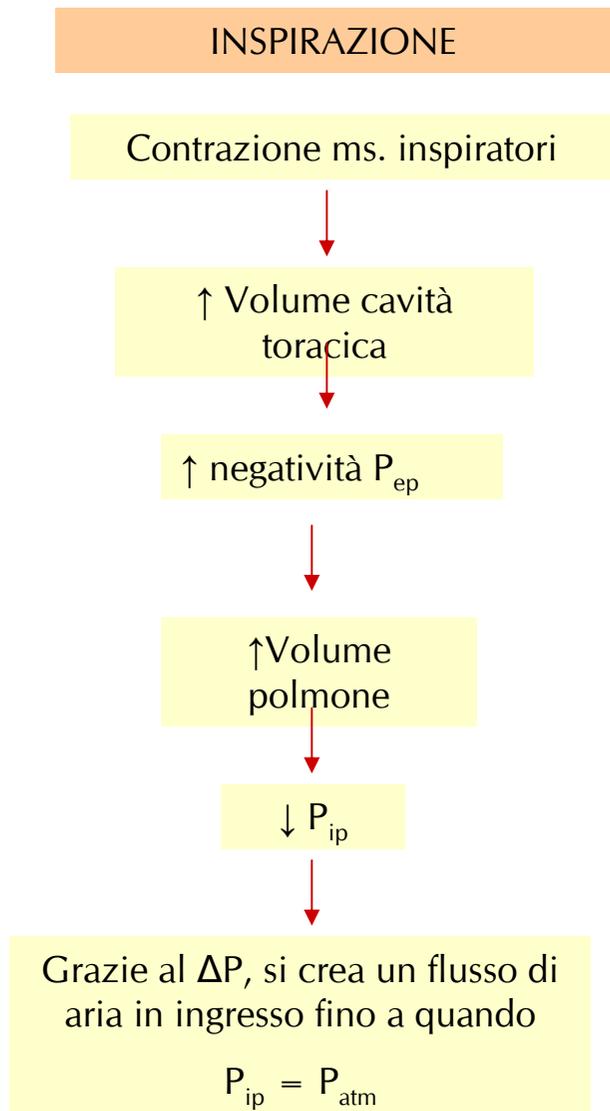
P nell'apparato respiratorio a riposo (in $\text{cmH}_2\text{O} = 1.36 \text{ mmHg}$)



Pi alla CFR



All'equilibrio (CFR), la P_{ep} è negativa a causa delle forze di retrazione elastica del polmone e del torace di uguale entità e direzione opposta. La P_{ip} è zero perché il polmone è in connessione con l'esterno.



ESPIRAZIONE FORZATA

Contrazione ms. espiratori

↓ Volume cavità toracica

↓ negatività P_{ep} fino a diventare positiva

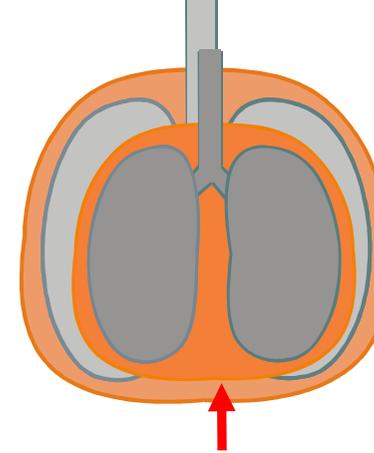
↓ Volume polmone

↑ P_{ip}

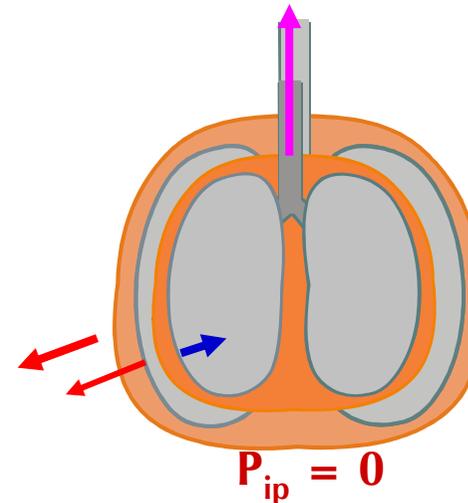
Grazie all'elevato ΔP , si crea un elevato flusso di aria in uscita fino a quando

$$P_{ip} = P_{atm}$$

**Esposizione
forzata**



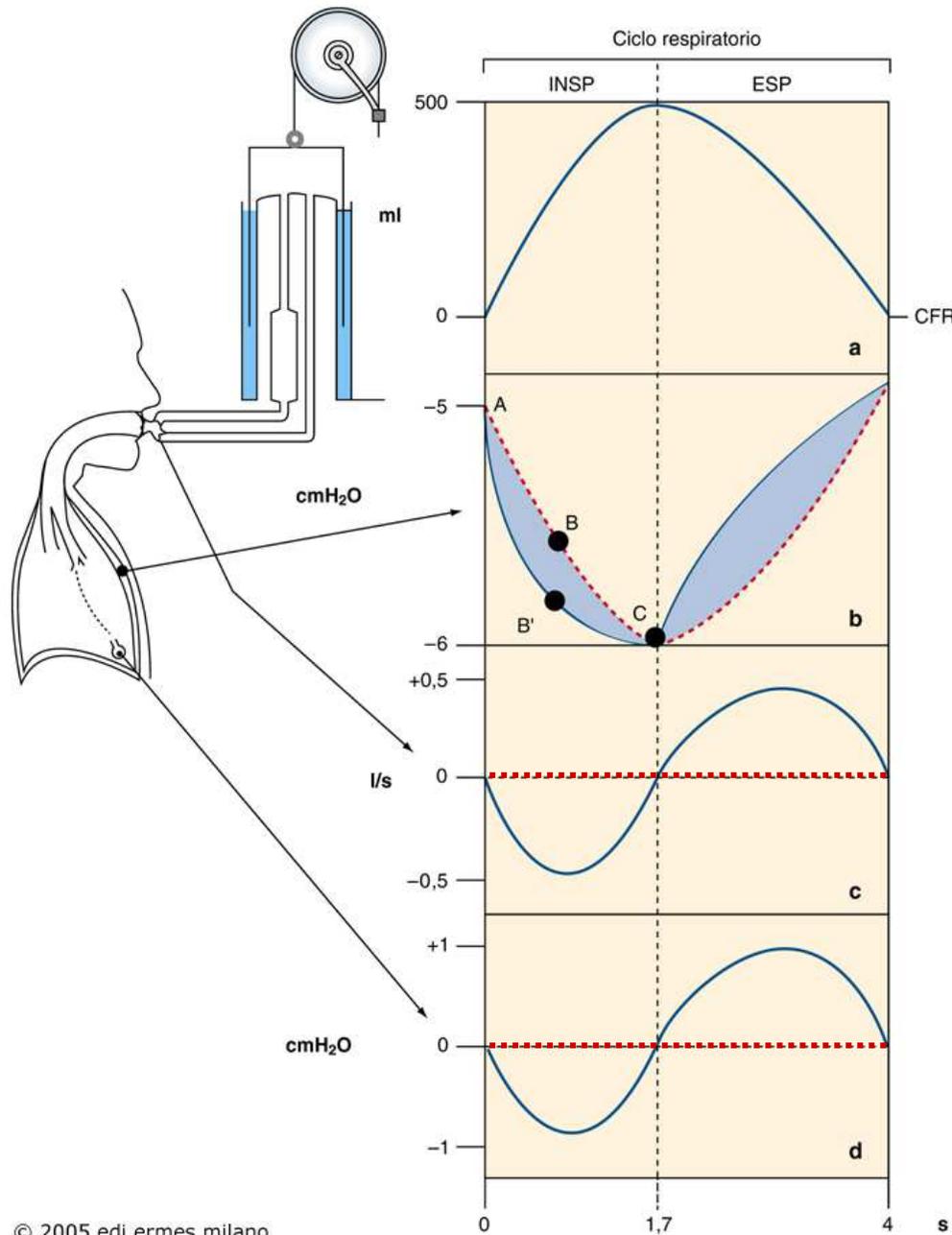
Esce aria



$$P_{ip} = 0$$

P_{ep} meno negativa o positiva

Variazioni di V polmonare, P endopleurica, Flusso e P intrapolmonare durante un ciclo respiratorio

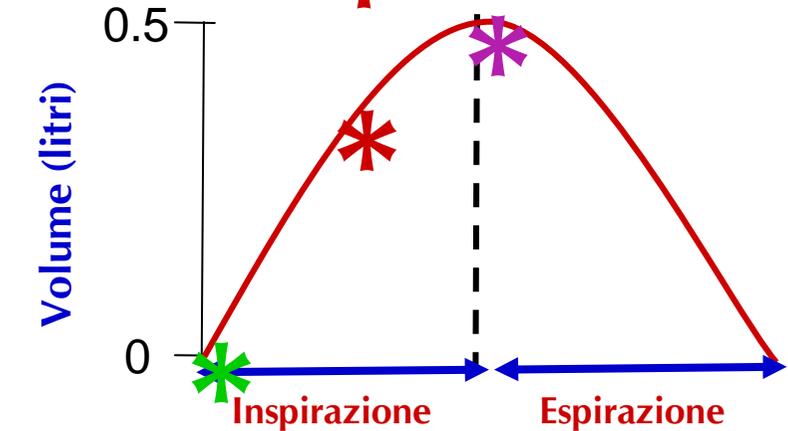
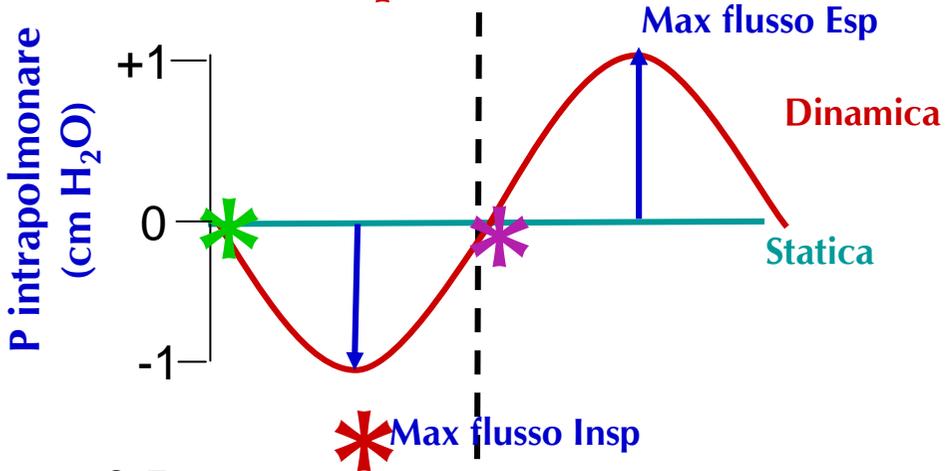
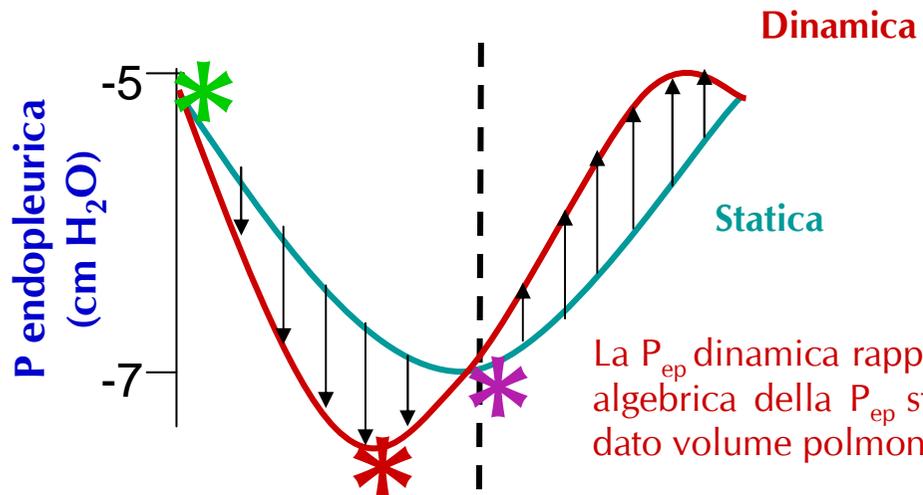


Condizioni statiche

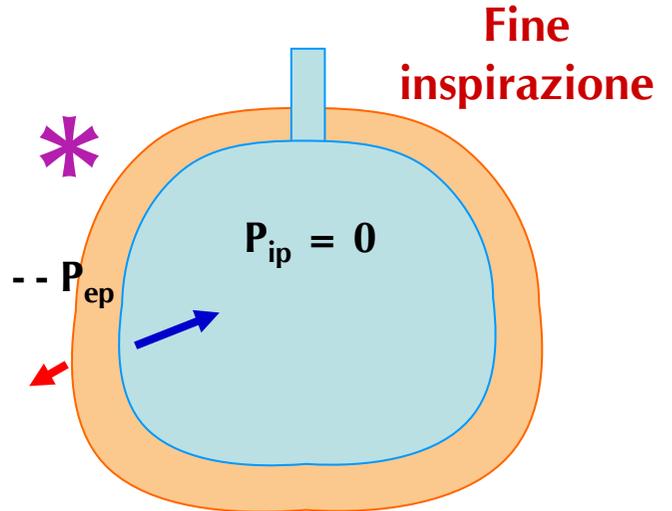
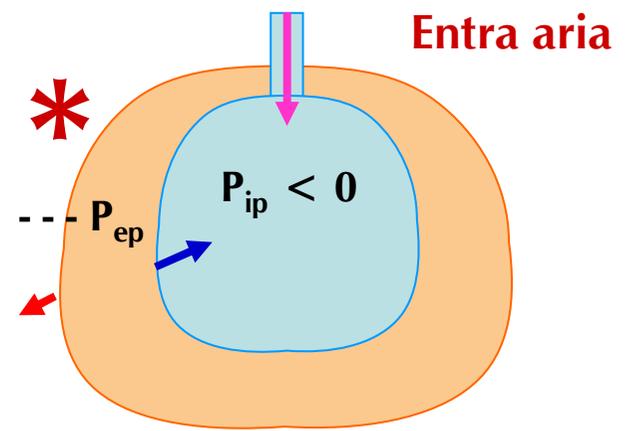
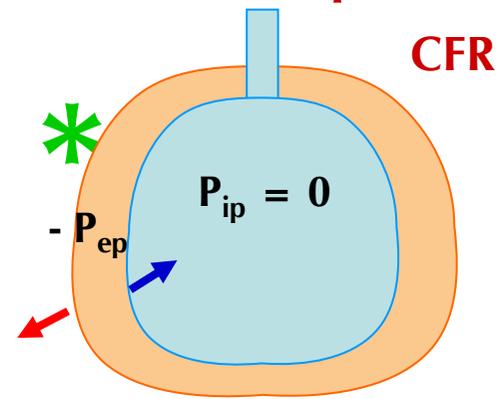
In condizioni statiche (assenza di flusso), la variazione di P_{ep} (ABC) rispecchia la necessità di vincere solo le resistenze elastiche del sistema toraco-polmonare.

Condizioni dinamiche

In presenza di flusso (respirazione normale), è necessaria una pressione aggiuntiva (AB'C) perché devono essere vinte anche le resistenze delle vie aeree. La quota aggiuntiva serve a creare negli alveoli una P negativa che richiama aria.



Pressioni in Inspirazione



Spirometria

Permette la misura diretta dei volumi respiratori.

Le variazioni di V polmonare, durante gli atti respiratori, provocano corrispondenti variazioni di V nello spirometro che possono essere registrati su carta (spirogramma)

La misurazione dei V polmonari specifici effettuata con spirometro deve tenere conto della P, Temperatura e saturazione di vapor acqueo ai quali i V fanno riferimento. Nella pratica si utilizzano tre differenti condizioni:

-**BTPS** (body temperature pressure saturated) corrispondente alla condizione nei polmoni ($t = 37^{\circ}\text{C}$, P atmosferica e saturazione 100%)

-**ATPS** (ambient temperature pressure saturated) corrispondente alla situazione nello spirometro

-**STPD** (standard temperature pressure dry) parametri predeterminati ($t = 0^{\circ}\text{C}$, $P = 101 \text{ KPa}$, saturazione 0%).

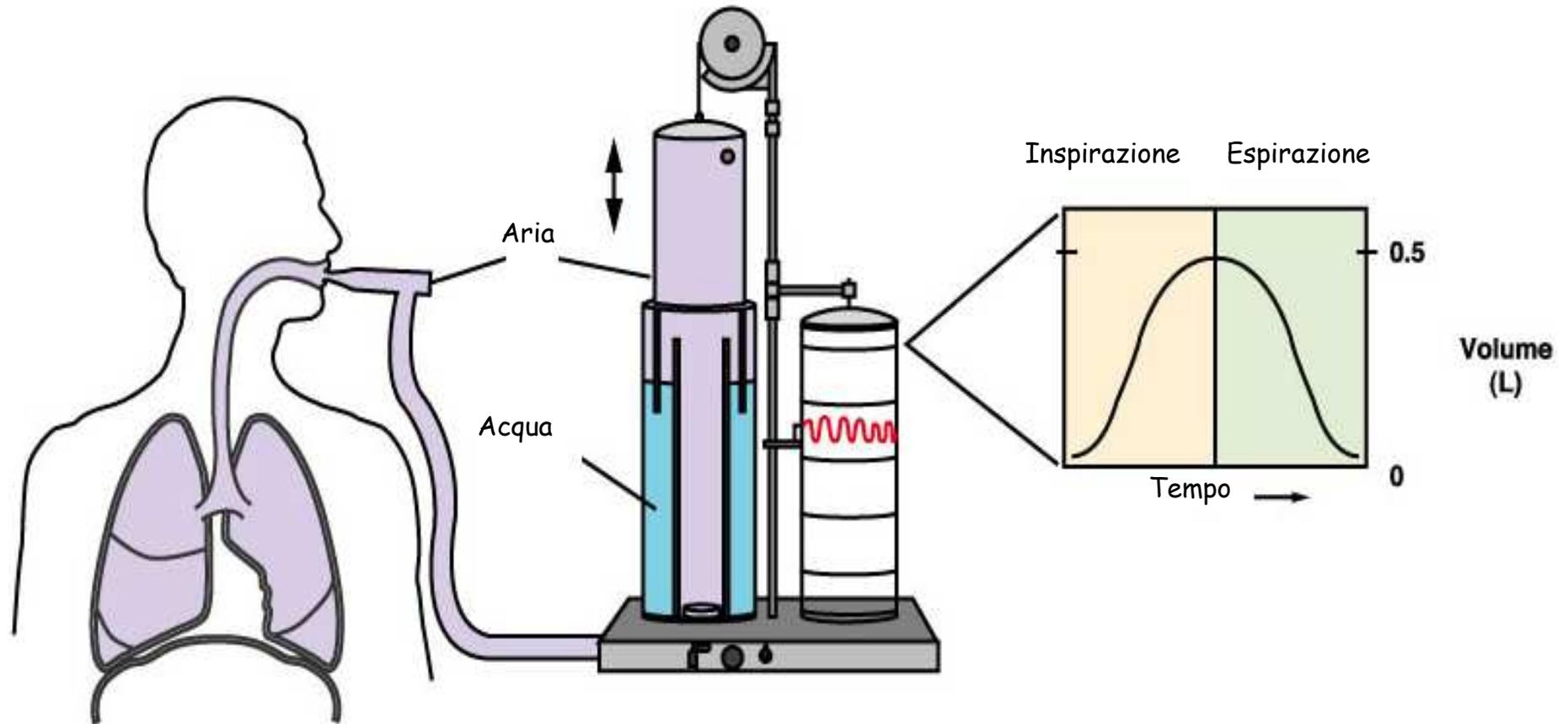
Le misurazioni avvengono necessariamente in condizioni **ATPS**. Fattore di conversione per passare alla BTPS = 1,1 (a 20°C), alla STPD = 0,89

$$\mathbf{BTPS = 1,1 \cdot ATPS}$$

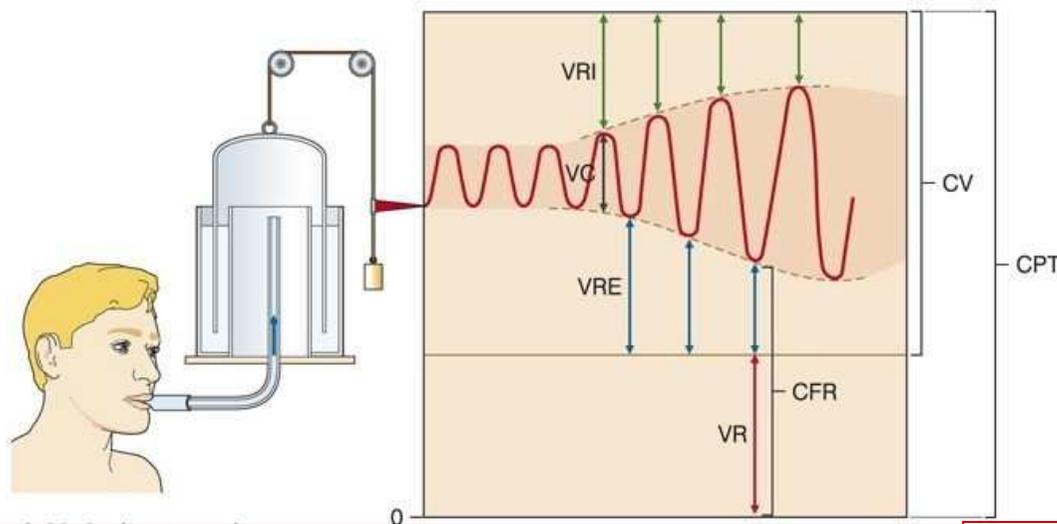
$$\mathbf{STPD = 0,89 \cdot ATPS}$$

$$\mathbf{BTPS = 1,17 \cdot STPD}$$

Spirometria: Le variazioni di V polmonare durante gli atti respiratori provocano corrispondenti variazioni di V nello spirometro, con movimenti della campana, che possono essere registrati su carta (spirogramma)



Tecnica attuale: il cavo viene fatto scorrere su un potenziometro lineare che genera un segnale elettrico di intensità proporzionale alla sua rotazione in senso orario e quindi allo spostamento del cavo e al V con cui è riempito lo spirometro.



© 2010 edi.ermes milano

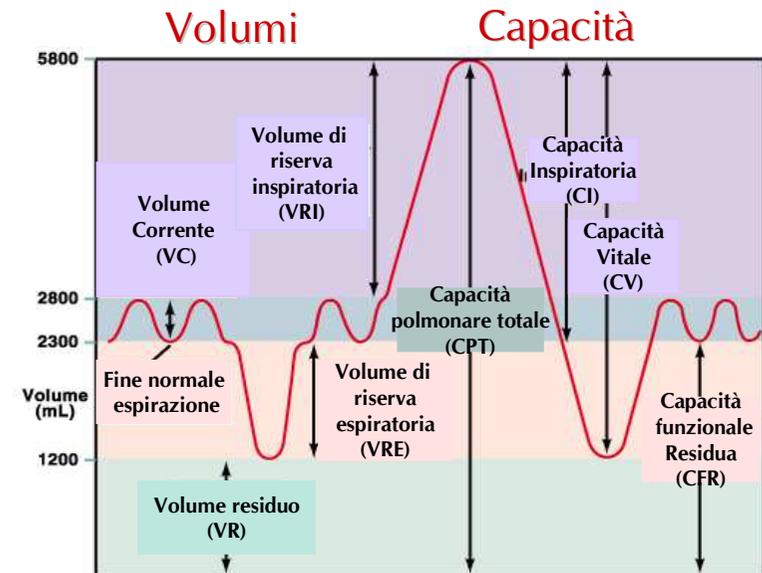
Volumi

Volume corrente (VC): Volume inspirato-espirstato in un atto respiratorio normale (**500 ml**)

Volume di riserva inspiratoria (VRI): massimo volume inspirabile oltre un'inspirazione normale (**3000 ml**)

Volume di riserva espiratoria (VRE): massimo V espirabile oltre un'espirstazione normale (**1100 ml**)

Volume residuo (VR): V presente nei polmoni alla fine di un'espirstazione massima (**1200 ml**)



Capacità

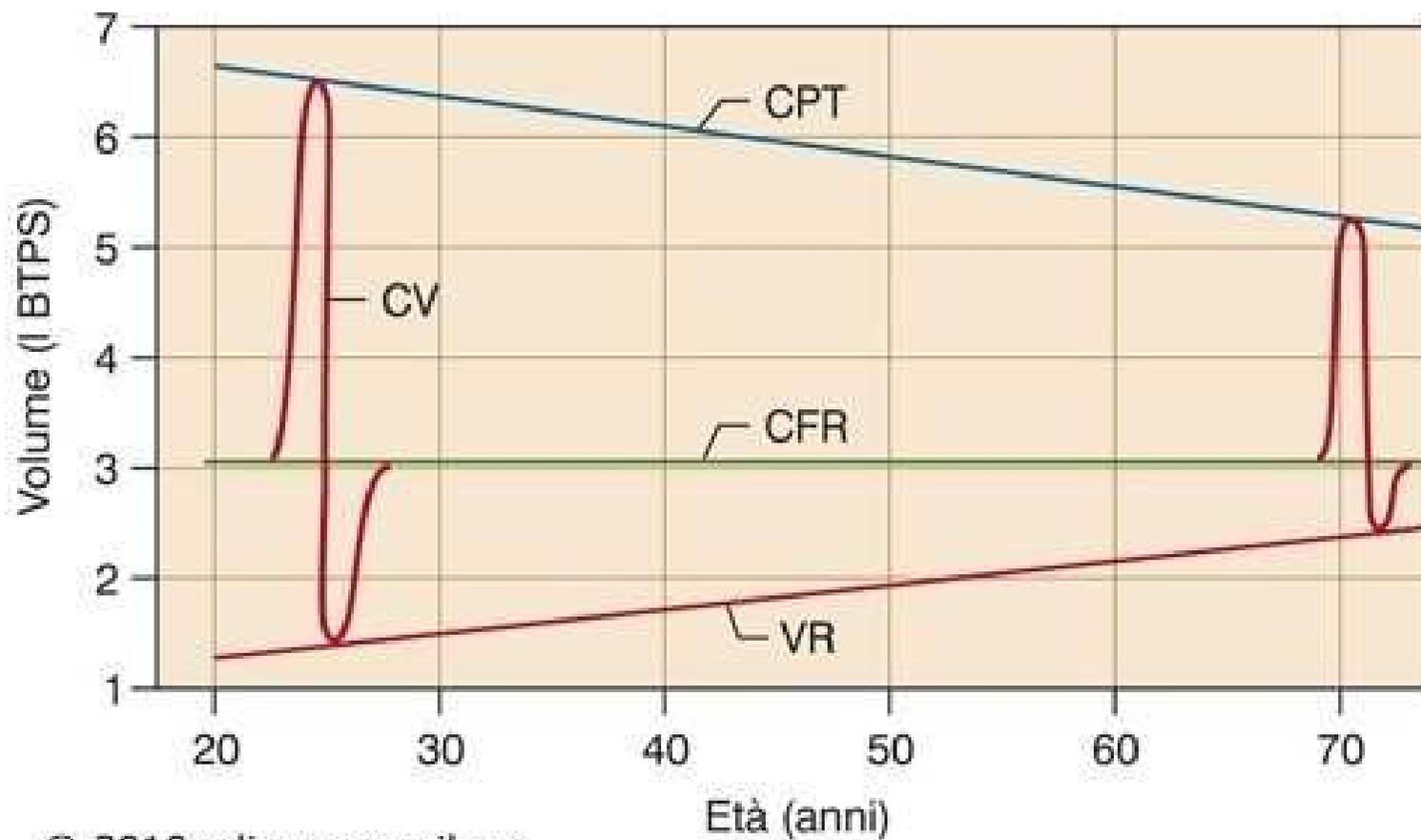
Capacità funzionale residua (CFR): V presente nel polmone alla fine di un'espirstazione normale = **VRE + VR**

Capacità inspiratoria (CI): massimo V inspirabile a partire dal V di fine espirstazione = **VC + VRI**

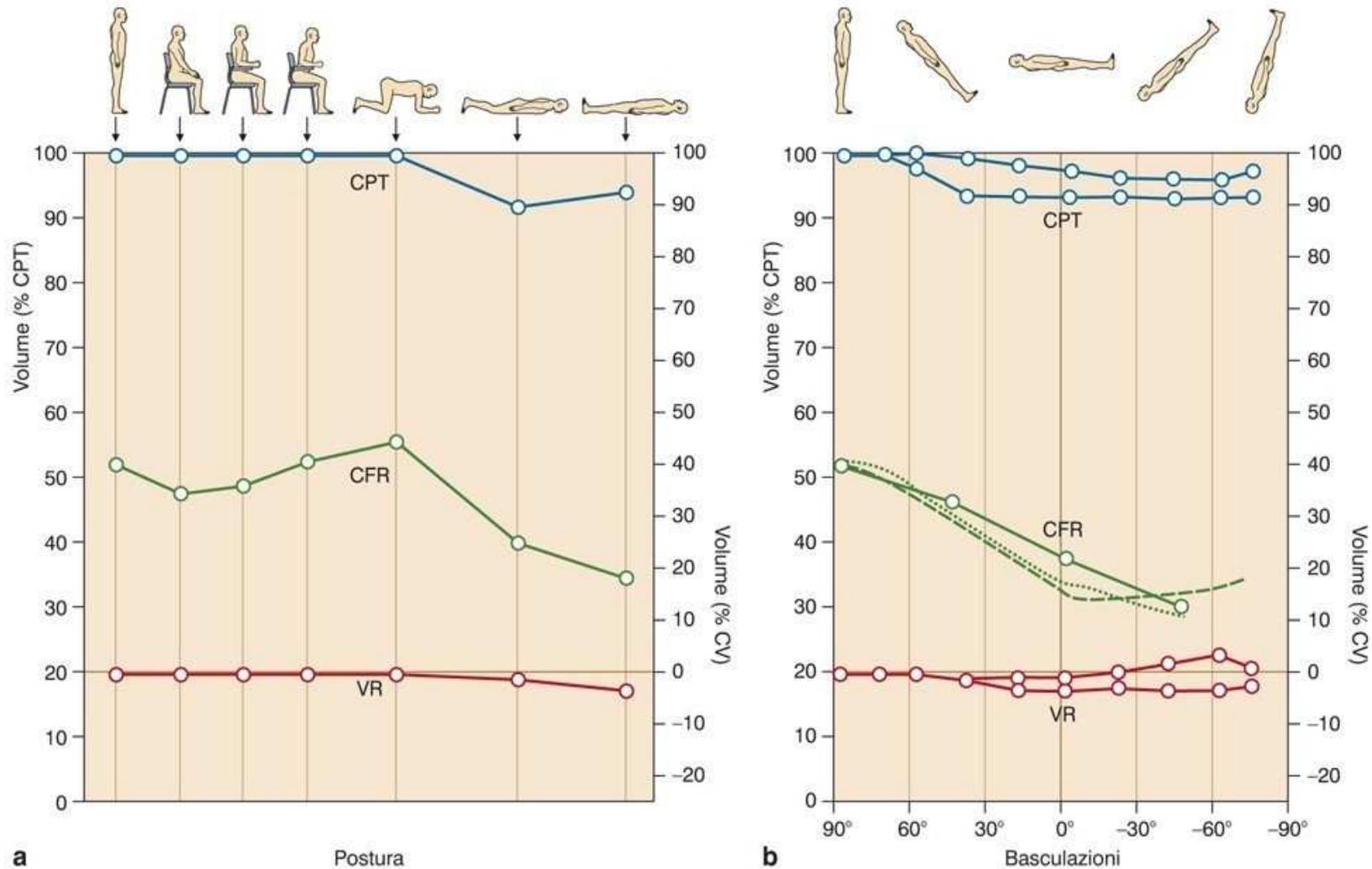
Capacità polmonare totale (CPT): V contenuto nel polmone alla fine di un'inspirazione massima = **VC + CV**

Capacità vitale (CV): massimo V che può essere inspirato ed espirstato = **VC + VRI + VRE**

Variazioni con l'età



Variazioni con la postura



© 2010 edi.ermes milano

I V polmonari si modificano con la postura a causa delle variazioni di P esercitata dal diaframma sulla gabbia toracica, dovute allo spostamento dei visceri addominali per azione della gravità.

La spirometria non permette la misurazione diretta della **CFR**, perchè non è possibile valutare il **VR** (volume di aria che non può essere espulso dal polmone).

Si usano metodi indiretti come:

- Metodo lavaggio azoto
 - Metodo diluizione dell'elio
 - Pletismografia
- } $V = Q/C$
- } $P.V = K$

Conoscendo **CFR** si può calcolare **VR = CFR-VRE**

Metodo lavaggio azoto

- 1) Partendo dalla CFR, il soggetto inspira O_2 puro per lavare l'azoto dai polmoni ed espira in uno spirometro.
- 2) La concentrazione (%) di azoto nell'aria espirata viene misurata all'inizio e durante il test e la misurazione viene interrotta quando la concentrazione di azoto diventa inferiore all'1%.
- 3) Poiché $Q = C.V$, moltiplicando il volume di tutto il gas espirato x la concentrazione (%) media di azoto nel totale di aria espirata, si ottiene la quantità di azoto contenuto nel polmone del soggetto all'inizio del test.
- 4) Dividendo la quantità di azoto per la concentrazione (%) iniziale di azoto, si ottiene il volume in cui era contenuto tutto l'azoto all'inizio del test (CFR).

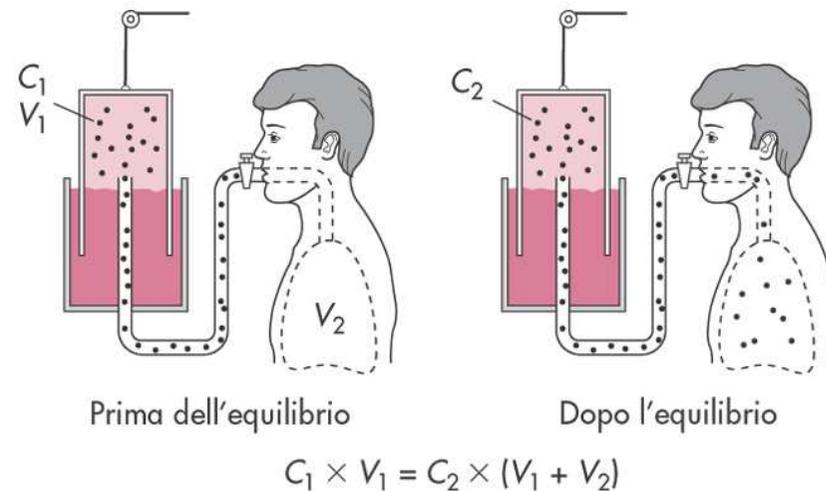
Si riempie uno spirometro con un volume noto di una miscela di aria ed elio a concentrazione nota.

$$Q_{E1} = C_1 \times V_1 \quad V_1 = \text{volume spirometro}$$

- Dopo un'espirazione normale, il soggetto viene collegato allo spirometro e comincia a respirare la miscela che si mescola con l'aria rimasta nel polmone (V_2 , CFR)

- L'elio si diluisce nella CFR, che può essere valutata dal grado di diluizione dell'elio. Infatti:

Metodo diluizione elio



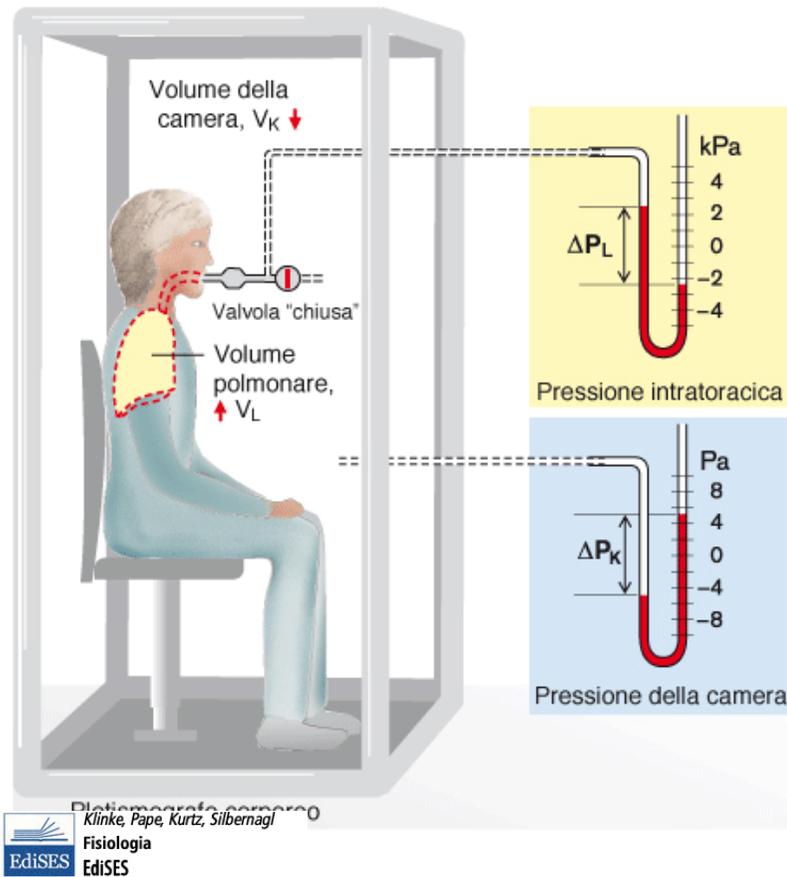
$$Q_{E2} = C_2 \times (V_1 + V_2) \text{ dove } V_2 \text{ è CFR}$$

$$\text{Essendo all'equilibrio } Q_{E1} = Q_{E2}$$

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times (V_1 + \text{CFR})$$

$$\text{CFR} = (C_1/C_2 - 1) \times V_1$$

Pletismografia corporea



Sfrutta la **legge di Boyle**: **$P \cdot V = K$**

Il soggetto siede in una cabina chiusa a tenuta d'aria (**pletismografo**) e respira mediante un tubo e un boccaglio collegato ad un sensore di P, che misura le variazioni di P alla bocca.

Al termine di una normale espirazione il tubo viene occluso e il soggetto, che tenta di inspirare, espande il torace con forza. Il V polmonare (**$V_L = CFR$**) aumenta di un valore ΔV uguale al ΔV di riduzione del V di aria nella camera (V_K), mentre la P intrapolmonare (alla bocca) diminuisce (da **P_1** a **P_2**) e quella della camera aumenta (da **P_3** a **P_4**).

Si applica la Legge di Boyle alla camera:

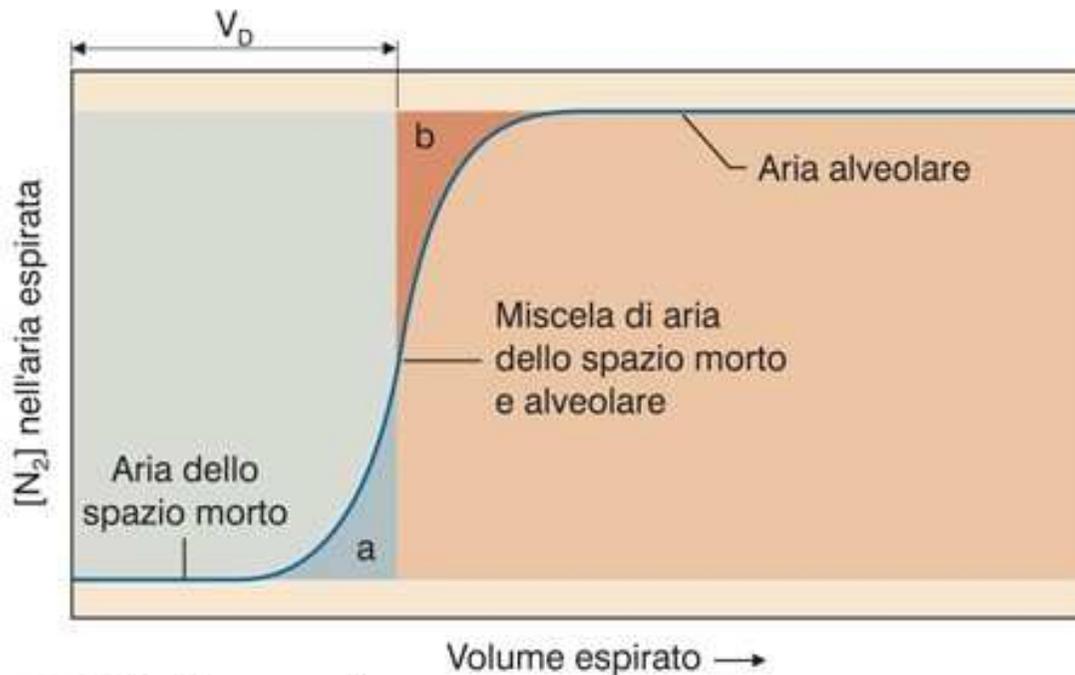
$P_3 \cdot V_K = P_4 (V_K - \Delta V)$ per calcolare ΔV e poi al polmone: **$P_1 \cdot V_L = P_2 \cdot (V_L + \Delta V)$** per calcolare **$V_L = CFR$** .

Il volume di aria inspirata, che non raggiunge gli alveoli, ma rimane nelle vie aeree di conduzione, è definito **SPAZIO MORTO ANATOMICO** e nell'adulto è circa 150 ml.

Si definisce **SPAZIO MORTO FISIOLÓGICO** l'insieme dello spazio morto anatomico e degli spazi alveolari che, per problemi di perfusione, non partecipano agli scambi.

Nel polmone normale il numero degli alveoli in cui gli scambi non avvengono è molto ridotto, quindi lo **spazio morto fisiologico**, in un soggetto sano, corrisponde allo **spazio morto anatomico**.

Misura dello spazio morto: Metodo di Fowler



© 2010 edi.ermes milano

Volume spazio morto è il volume per il quale le due aree a e b sono uguali
 $([N_2]=0) + 1/2 \text{ volume } (\uparrow[N_2])$

- Singola inspirazione di O_2 puro.
- Durante l'espirazione si misura continuamente la $[N_2]$ nell'aria espirata.
- Il primo volume di aria espirata contiene solo O_2 ($[N_2] = 0$), perché proviene dallo spazio morto.
- Quando l'aria espirata inizia a contenere aria alveolare $[N_2]$ aumenta e diventa costante quando tutta l'aria espirata proviene dagli alveoli.

Esempio di misurazione dello spazio morto

Un paziente collegato allo spirometro respira un volume corrente di 500 ml ad una frequenza di 12 respiri/min.

Alla fine di una espirazione completa si fa inspirare O₂ (100%) e durante la successiva espirazione si misura continuamente la [N₂].

La concentrazione di N₂ è 0 nei primi **130 ml** e poi aumenta e diventa costante quando il gas emesso è **170 ml**.

$$\begin{aligned} \text{Volume spazio morto} &= \\ \text{Volume } ([N_2]=0) &+ \frac{1}{2} \text{ volume } (\uparrow[N_2]) \\ 130 + \frac{1}{2} (170-130) &= 150 \text{ ml} \end{aligned}$$

Il Metodo di Fowler misura il volume delle vie aeree di conduzione, fino al livello in cui il gas inspirato viene rapidamente diluito con il gas già presente nei polmoni, e consente la misura dello **SPAZIO MORTO ANATOMICO**.

Lo **SPAZIO MORTO FISIOLOGICO** si misura con il metodo di Bohr, che valuta il volume polmonare, che non elimina l'anidride carbonica.

MISURA DELLO SPAZIO MORTO FISIOLOGICO (Equazione di Bohr)

Misura il volume di polmone che non elimina CO₂.

Il volume espirato (V_E) è formato da volume dello spazio morto (V_D) + volume alveolare (V_A). $V_E = V_D + V_A$

La quantità di CO₂ espirata = quantità CO₂ proveniente dallo spazio morto, (concentrazione CO₂ uguale a quella dell'aria inspirata, $C_{ICO_2} = 0$) + quantità CO₂ proveniente dagli alveoli (concentrazione CO₂ alveolare, C_{ACO_2}).

Essendo la quantità di un gas = $V \times C$:

$$V_E C_{ECO_2} = V_D C_{ICO_2} + V_A C_{ACO_2} \rightarrow V_E C_{ECO_2} = V_A C_{ACO_2} \rightarrow V_E C_{ECO_2} = (V_E - V_D) C_{ACO_2}$$

$$\frac{V_D}{V_E} = \frac{C_{ACO_2} - C_{ECO_2}}{C_{ACO_2}}$$

pressione parziale di un gas
proporzionale alla sua
concentrazione:

Equazione di Bohr

$$\frac{V_D}{V_E} = \frac{P_{ACO_2} - P_{ECO_2}}{P_{ACO_2}} \quad \text{Poiché } P_{ACO_2} = P_{aCO_2} \quad \frac{V_D}{V_E} = 1 - \frac{P_{CO_2E}}{P_{CO_2a}}$$

Rapporto V_D/V_E normalmente varia tra 0.20-0.30. Diminuisce durante l'esercizio ed aumenta con l'età.

Si definisce **volume minuto** o **ventilazione polmonare** il volume di aria in- ed espirato nell'unità di tempo.

$$V = V_C \cdot Fr$$

$V_C = 0.5 \text{ l}$, $Fr = 12 \text{ respiri/min}$

$$V = 6 \text{ l/min}$$

Quella parte del volume minuto che ventila gli alveoli è detta **ventilazione alveolare**, il resto, **ventilazione dello spazio morto**.

$$V_A = (V_C - V_D) \cdot Fr$$

In condizioni normali $V_D = 150 \text{ ml}$

$$V_A = (500 - 150) \cdot 12 = 4.2 \text{ l/min}$$