

# FISIOLOGIA DEL SISTEMA RESPIRATORIO 1

Lezione 7  
10/05/18

Argomenti:

- Statica del sistema toraco-polmonare
- Dinamica del sistema toraco-polmonare

## MECCANICA RESPIRATORIA

Il sistema respiratorio consente di operare gli scambi gassosi, arricchendo il sangue di **O<sub>2</sub>** ed eliminando la **CO<sub>2</sub>**, gas di scarto dei processi metabolici. Nel loro percorso di entrata e di uscita, questi due gas, rispettivamente, si muovono in direzione opposta, usando le medesime strutture che sono i condotti respiratori. Durante inspirazione ed espirazione per poter diffondere dagli alveoli al sangue e viceversa e poi dal sangue ai tessuti e viceversa, O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> devono superare una serie di ostacoli, rappresentati dalle resistenze che il sistema respiratorio oppone al flusso d'aria.

Per aver un flusso d'aria verso l'interno o verso l'esterno dei polmoni è necessario che vi sia un **gradiente pressorio** tra i due compartimenti: polmoni ed ambiente esterno. Tale flusso va dal compartimento ad alta pressione verso quello a bassa pressione. Quindi, durante l'inspirazione la pressione all'interno dei polmoni diventa minore di quella atmosferica, favorendo l'ingresso dell'aria; durante l'espirazione, invece, la pressione polmonare diventa superiore alla pressione ambientale, con conseguente fuoriuscita di aria. Il gradiente pressorio dipende dalla **legge di Boyle**, secondo cui il prodotto tra la pressione e il volume di una certa quantità di fluido rimane costante:  $P \times V = k$ .

Dunque, riducendo il volume di un contenitore contenente una miscela di gas, la pressione al suo interno aumenta; al contrario, aumentandone il volume, la pressione si riduce. Il contenitore è la **gabbia toracica**, che modifica la pressione al suo interno grazie a variazioni di volume ottenute grazie ai muscoli inspiratori ed espiratori.

È importante considerare che torace e polmone sono strutture adese tra loro, perché i polmoni sono rivestiti dalla pleura, costituita da un foglietto viscerale (adeso al polmone) e da uno parietale (adeso alla gabbia toracica). Essi scivolano tra loro ma non si scollano grazie alla presenza, tra essi, del liquido pleurico (pochi ml), contenuto in uno spazio virtuale, lo spazio pleurico.

### 1. Statica del sistema toraco-polmonare

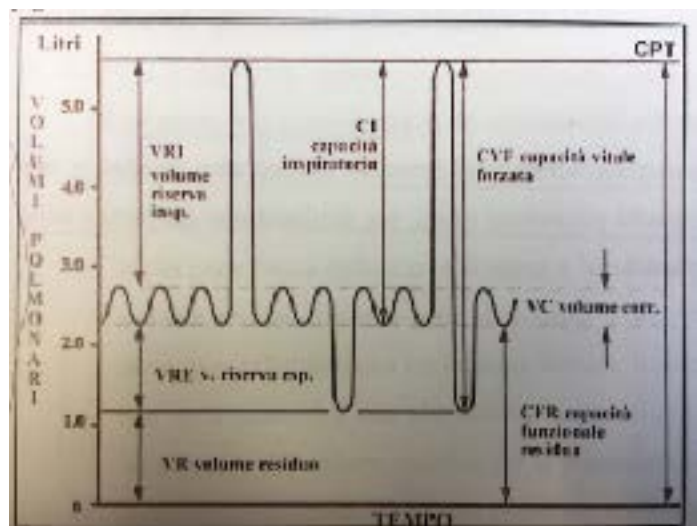
La *statica* del sistema respiratorio si occupa della relazione tra pressione e volume, *in assenza di flusso*.

#### 1.1 Volumi statici e capacità polmonari

I volumi polmonari sono quei volumi in cui si può suddividere l'aria in entrata e in uscita nel polmone e si misurano con la **spirometria**.

Suddivisione dei volumi:

- **Volume corrente** (500 mL): quantità d'aria inspirata ed espirata durante una respirazione tranquilla;
- **Volume residuo** (1-1,5 L): quantità d'aria presente all'interno dei polmoni al termine di un'espirazione forzata;
- **Volume di riserva inspiratoria (VRI)**: quantità d'aria inspirata con un'inspirazione forzata dopo un'inspirazione tranquilla (2,5-3 L);
- **Volume di riserva espiratoria (VRE)**: quantità d'aria espirata con un'espirazione forzata dopo un'espirazione tranquilla (1 L).



I volumi statici respiratori accorpatisi tra loro definiscono le capacità polmonari:

- **Capacità polmonare totale**: quantità d'aria totale contenuta nei polmoni ( $CPT = VR + VRE + VC + VRI$ );
- **Capacità vitale**: volume d'aria mobilizzata dal sistema respiratorio ( $CV = VRE + VC + VRI$ );
- **Capacità inspiratoria**: volume d'aria totale che può essere inspirato ( $CI = VC + VRI$ );
- **Capacità funzionale residua**: quantità d'aria contenuta nel polmone all'inizio di una respirazione tranquilla ( $CFR = VR + VRE$ ).

### 1.2 Pressioni polmonari

Quando si parla di gradiente pressorio tra interno ed esterno del sistema toraco-polmonare, bisogna confrontarsi con la pressione esterna. Sono tre le pressioni fondamentali coinvolte nella meccanica respiratoria:

- I. Pressione **intrapolmonare** o **alveolare** ( $P_a$ )
- II. Pressione **intratoracica** o **intrapleurica** ( $P_{ip}$ )
- III. Pressione **atmosferica** ( $P_b = 760 \text{ mmHg}$ )

La pressione atmosferica viene posta convenzionalmente uguale a 0, perché viene presa come riferimento per tutti gli scambi.

Poiché il punto di equilibrio del sistema toracopolmonare viene raggiunto per un volume in cui la forza di espansione esercitata dal torace è uguale e contraria a quella di retroazione del polmone, in queste condizioni agiscono sullo spazio pleurico due forze, che tendono ad espanderlo.

Per la solidarietà tra gabbia toracica e polmone, lo spazio pleurico non varia di volume. L'azione delle due forze fa sì che la pressione esercitata all'interno dello spazio pleurico sia inferiore alla pressione intrapolmonare e alla pressione atmosferica. La *pressione intrapleurica* vale in media 756 mmHg, cioè 4 mmHg inferiore a quella intrapolmonare (- 4 mmHg).

A riposo (dopo un'espirazione e prima della successiva inspirazione), d'altra parte, il *polmone* non si trova all'equilibrio, che è rappresentato, invece, dal collasso, poiché esso è formato da strutture elastiche che tendono a farlo collassare verso l'interno. Per tale motivo, il polmone esercita una **forza di retroazione**, diretta verso l'interno, che è una forza negativa nei confronti della parete toracica.

Contemporaneamente, a riposo, anche la *gabbia toracica* non è all'equilibrio, si trova, infatti, meno espansa rispetto al suo punto di equilibrio ed esercita, quindi una **forza di espansione**, diretta verso l'esterno, opposta rispetto quella generata dai polmoni.

Sono misurabili tre differenze di pressione nel sistema toracopolmonare, che vengono convenzionalmente definite come differenze di pressione tra il punto più interno e quello più esterno:

- I. Pressione **transpolmonare**:  $P_{tp} = P_a - P_{ip} = + 4 \text{ mmHg}$
- II. Pressione **transtoracica**:  $P_{tt} = P_{ip} - P_b = - 4 \text{ mmHg}$
- III. Pressione **transmurale**:  $P_{tm} = P_a - P_b = 0 \text{ mmHg}$

Per generare un gradiente pressorio, dato che evidentemente non si può modificare la pressione atmosferica, bisogna agire sulla pressione interna; d'altra parte, quando si dà inizio ad un'inspirazione, è necessario modificare attivamente la pressione alveolare, grazie all'azione dei muscoli respiratori.

### 1.3 Curve pressione-volume statiche

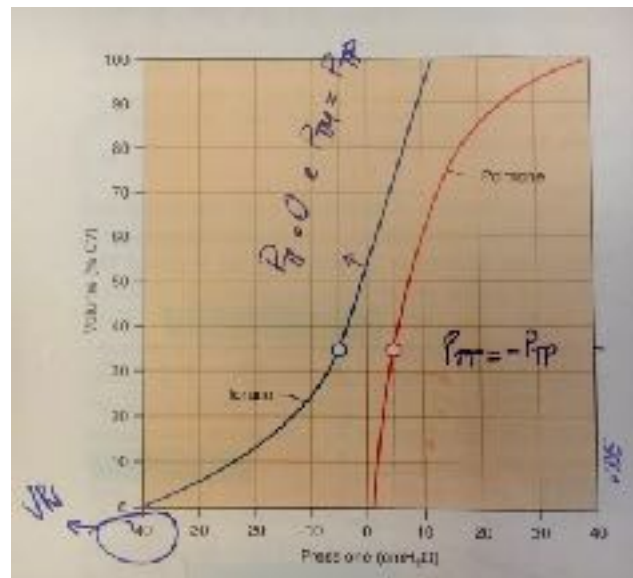
Il comportamento delle forze relative al solo polmone e/o alla sola gabbia toracica, in assenza di flusso viene mostrato dalle curve pressione-volume, che riportano sull'asse delle ascisse la pressione transpolmonare (per il polmone) o transtoracica (per il torace), e sull'asse delle ordinate il volume.

La curva relativa al polmone (*in rosso*) viene definita "curva di rilascio"; i muscoli non vengono coinvolti. Il polmone, svincolato dal torace, tende a collassare e, infatti, come si evince dal grafico, il punto di equilibrio del polmone si ha con un volume polmonare pari quasi a zero, in corrispondenza del quale il polmone stesso non deve sviluppare alcuna pressione *transpolmonare* per mantenere tale volume.

**La compliance** (pendenza della curva) **polmonare è massima ai minimi e minima ai massimi volumi polmonari**. Aumentando il volume polmonare, le pareti degli alveoli vengono distese e gli elementi elastici in esse contenute vengono stirate, con conseguente riduzione della compliance. La forma di tale diagramma dipende dal modulo elastico del parenchima polmonare.

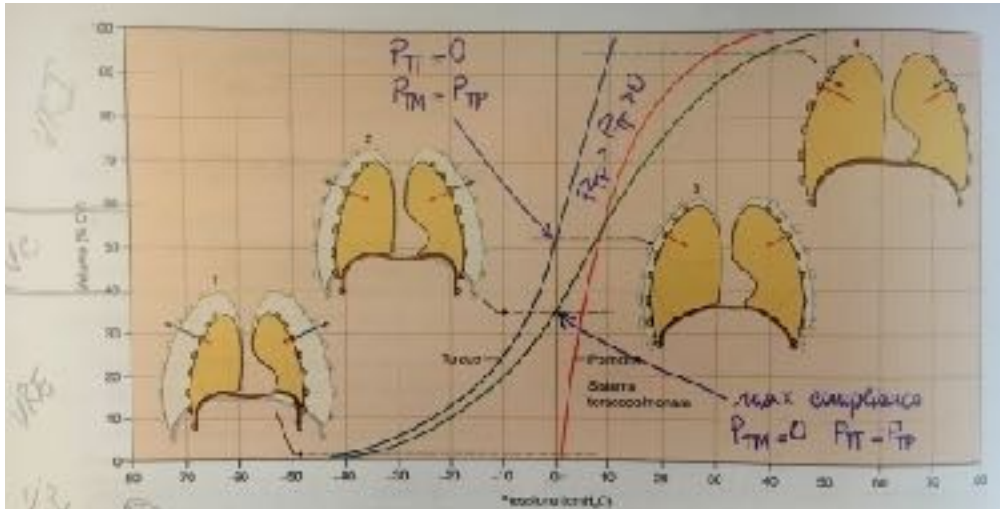
La curva relativa al torace (*in blu*), invece, mostra la tendenza della gabbia toracica all'espansione, se svincolata dal polmone. Il suo punto di equilibrio, d'altra parte, si ha in corrispondenza sempre di una pressione pari a zero, quando il volume è di circa il 60% e non è necessaria alcuna pressione *transtoracica* per mantenere quel determinato volume.

**La compliance toracica è, quindi, minima ai bassi e massima agli alti volumi polmonari.**



### 1.4 Diagramma pressione-volume del sistema toraco-polmonare

Fisiologicamente, polmone e torace sono strutture adese, quindi per studiare il comportamento globale del sistema toraco-polmonare è necessario integrare le caratteristiche di entrambi in un'unica curva pressione-volume (*in verde*). In questo caso, la pressione considerata è la pressione *transmurale*.



(1) Nel diagramma pressione-volume del sistema toraco-polmonare, si può evidenziare che, inizialmente, le proprietà meccaniche del sistema sono essenzialmente simili a quelle del torace. Dal momento che il volume residuo indica la quantità d'aria che rimane all'interno dei polmoni al termine di un'espirazione forzata, esso dipende dalla forza di contrazione dei **muscoli espiratori**, che si oppone alla tendenza del torace ad espandersi. Diminuendo il volume, la forza elastica della parete toracica aumenta, mentre cala la forza esercitata dalla contrazione muscolare: quando queste due forze si equilibrano si ha il **volume residuo**.

(2) La massima compliance del sistema toraco-polmonare si raggiunge quando la pressione trasmurale è uguale a 0 ( $P_{TT} = -P_{TP}$ ), poiché in queste condizioni sia il polmone che il torace hanno compliance elevata. Si tratta del punto di equilibrio del sistema toraco-polmonare, che corrisponde ad un volume del 30-40% circa: la forza di espansione del torace e la forza di retroazione del polmoni sono uguali ma di segno opposto, poiché né il torace né il polmone si trovano al punto di equilibrio e sviluppano, quindi, una forza che tende a riportarli verso questo.

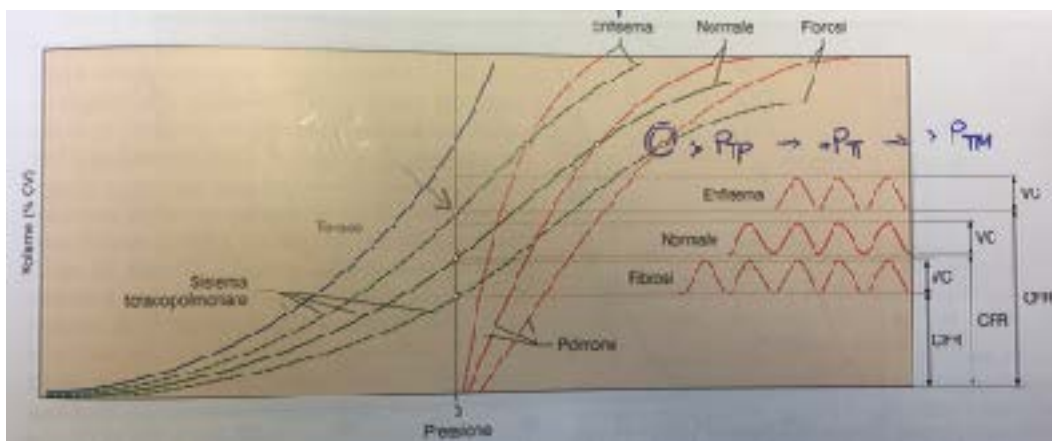
(3) Quando il volume polmonare corrisponde al 60% circa della CV, la curva del sistema toraco-polmonare incrocia quella del polmone libero. Il torace non contribuisce alle caratteristiche meccaniche del sistema toraco-polmonare, che dipendono solo dalle caratteristiche meccaniche del polmone, *proprio perché la gabbia toracica*.

(4) Più ci si avvicina alla **CPT**, più il contributo del polmone è maggiore ( $P_{TP} > P_{TT}$ ). Diminuisce la forza esercitata dai **muscoli inspiratori** che si accorciano, mentre cresce la forza di retroazione del polmone: l'espansione si arresta al raggiungimento di un volume a cui queste due si equivalgono.

### 1.5 Compliance respiratoria

L'**elastanza** del polmone (reciproco della compliance) dipende principalmente dalla distensione e dalla quantità di fibre elastiche del parenchima polmonare. Queste diminuiscono in caso di enfisema polmonare, a causa della distruzione dei setti alveolari, e aumentano in caso di fibrosi polmonare, per la deposizione di tessuto fibroso nei setti alveolari. Si tratta di due condizioni patologiche opposte e, essendo la compliance il reciproco dell'elastanza, si ha:

- **elevata compliance** nell'**enfisema**;
- **bassa compliance** nella **fibrosi**, dove il polmone risulta irrigidito.





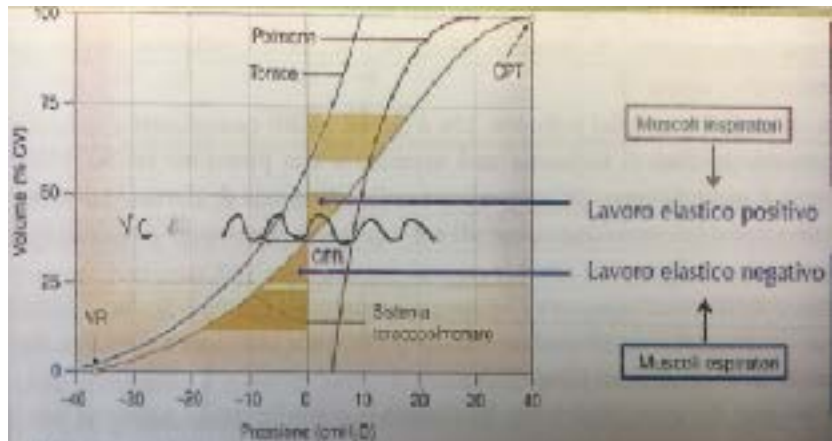
Dato un volume polmonare, per mantenerlo in caso di enfisema è necessaria una pressione molto minore, quindi si evidenzia, nel grafico, una curva pressione-volume del polmone (*in rosso*) spostata *verso sinistra*; mentre nella condizione di fibrosi la pressione richiesta sarà elevata e la curva spostata *verso destra*: per espandere il polmone è necessario esercitare una forza maggiore, poiché questo è più rigido. Tale shift della curva relativa al polmone si riflette allo stesso modo sulla curva toraco-polmonare (*in verde*); si evidenzierà, inoltre, un punto di equilibrio differente rispetto alla curva toraco-polmonare di un soggetto sano: ad un volume *maggiore* in caso enfisema ed a un volume *minore* nella fibrosi polmonare. Invece, la curva relativa al torace (*in blu*) è unica, poiché la condizione che ha alterato la compliance del polmone non ha alcuna influenza sulla gabbia toracica.

### 1.6 Lavoro contro le forze elastiche

Il lavoro contro le forze elastiche è il lavoro necessario per modificare l'elasticità del sistema, al fine di espandere il sistema polmonare o di ridurne le dimensioni.

Quando si introduce nei polmoni un volume d'aria al di sopra del punto di equilibrio (CFR), bisogna espandere gli alveoli, vincendo la forza di retrazione del polmone. Bisogna introdurre energia nel sistema, effettuando un **lavoro elastico positivo**, svolto dai **muscoli inspiratori**.

Analogamente, quando si vuole avere nei polmoni un volume inferiore alla CFR, occorre generare una forza che svuoti gli alveoli: in questo caso il lavoro elastico è **negativo** e viene svolto dai **muscoli espiratori**.

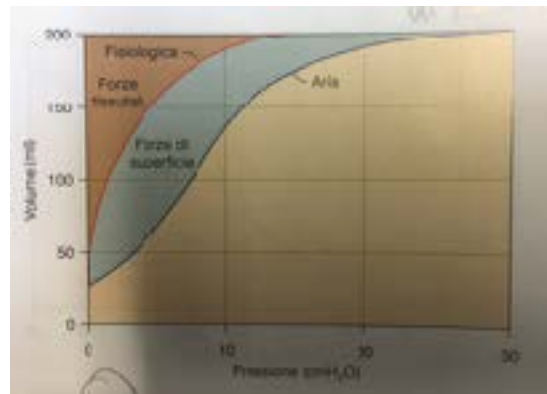


Dal grafico si evince che se si vuole aumentare (o diminuire) il volume, partendo da volumi già elevati (o già bassi), lontani dal volume di equilibrio, il lavoro richiesto, in valore assoluto, è maggiore.

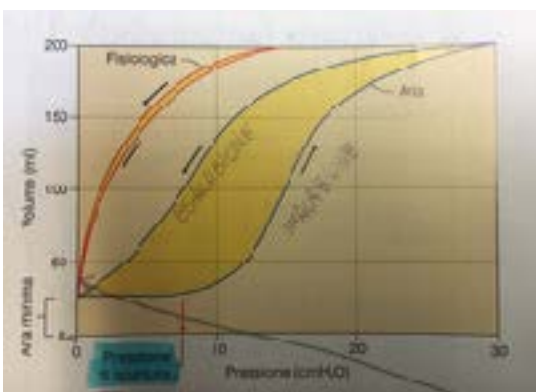
### 1.7 Effetto della tensione superficiale e isteresi polmonare

All'interno degli alveoli si sviluppano forze di tensione superficiale, poiché la superficie del parenchima alveolare rivolta verso l'interno degli alveoli è caratterizzata da un sottile strato liquido che è in diretto contatto con l'aria. La **tensione superficiale** all'interfaccia aria-liquido agisce verso l'interno dell'alveolo, aumentando la forza di retroazione del polmone e riducendone la compliance.

Dal grafico (*a destra*) si evincono due situazioni diverse: la curva indicata come "fisiologica" si ottiene riempiendo il polmone con acqua o soluzione fisiologica; quella indicata come "aria" deriva dal riempimento del polmone con aria. Se vi è soluzione fisiologica, non si crea l'interfaccia aria-liquido e non bisogna contrastare la tensione superficiale, ma solo l'elasticità polmonare. Invece, normalmente, essendo



presente tale interfaccia è necessario compiere un **lavoro maggiore tale da vincere sia la componente elastica parenchimale che quella alveolare** (tensione superficiale).



Nella figura a lato (*a sinistra*) sono rappresentate le *curve di insufflazione e svuotamento* nelle due situazioni precedenti: un polmone riempito con aria e uno con fisiologica.

Nel caso del polmone, con interfaccia aria-liquido, le due curve non coincidono, ma delimitano la cosiddetta area di **isteresi** (*area gialla*) infatti la pressione è maggiore nella curva di insufflazione dal momento che deve contrastare la tensione superficiale. Invece, nell'esalazione, la forza di pressione è diretta verso l'interno dell'alveolo, così come la tensione superficiale.

Inoltre, è importante evidenziare che, all'inizio della fase di inalazione, si ha un aumento di pressione senza che si osservino corrispondenti variazioni di volume; tale incremento è definito **pressione di apertura alveolare** e rappresenta la

pressione sviluppata al fine di vincere le forze di tensione superficiali e reclutare gli alveoli.

## 2. Dinamica del sistema toraco-polmonare

La dinamica del sistema respiratorio studia le forze determinanti i flussi d'aria nelle vie aeree. Questi devono vincere le resistenze viscosi e richiedono, quindi, energia, garantita dallo sviluppo di un gradiente pressorio, grazie alla contrazione dei muscoli respiratori.

Il flusso d'aria è uguale al rapporto tra il gradiente pressorio e la resistenza lungo le vie aeree ( $\Delta P / R$ ).

### 2.1 Resistenza delle vie aeree al flusso d'aria

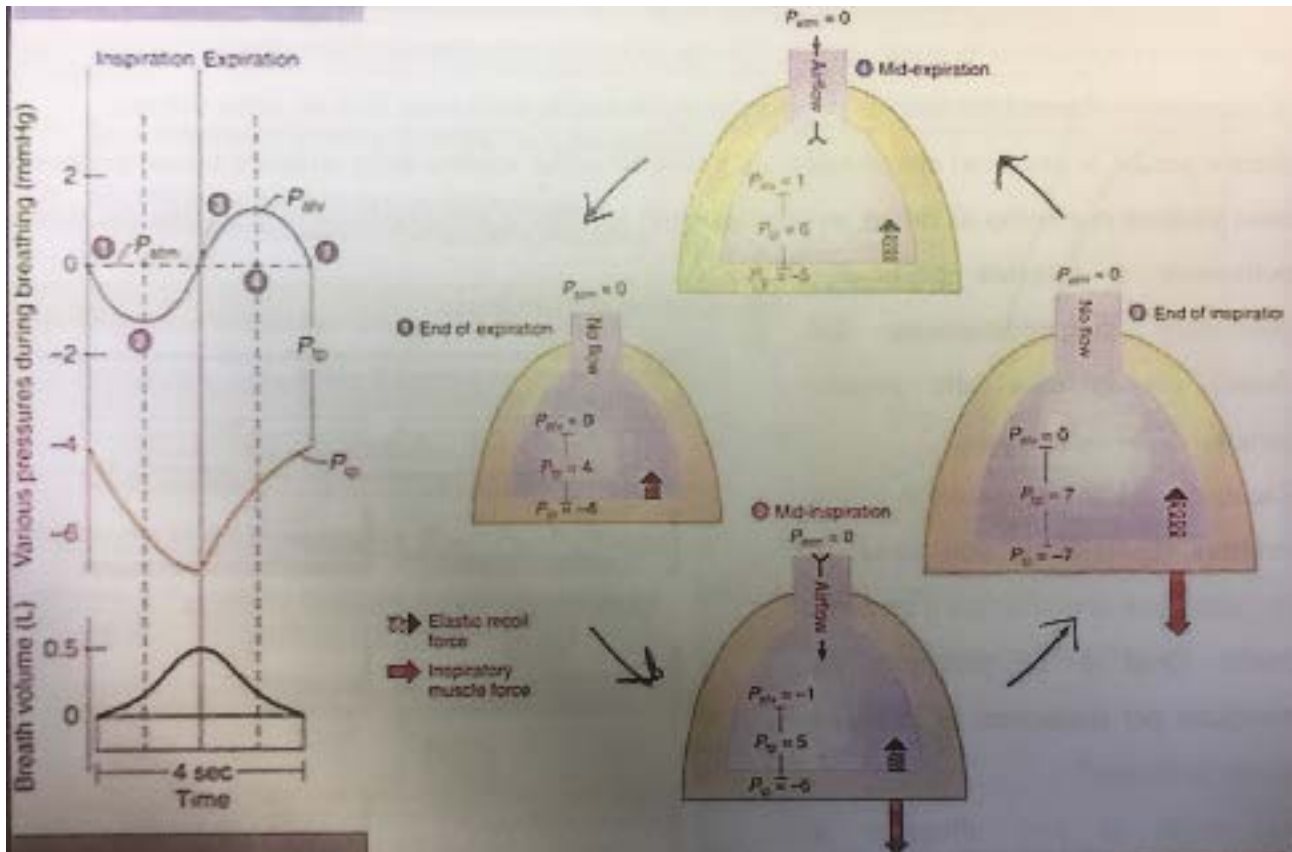
Nelle vie aeree vige la legge di Poiseuille, secondo cui la resistenza al flusso in un tubo è direttamente proporzionale alla lunghezza del tubo e alla viscosità del fluido ed inversamente proporzionale alla quarta potenza del raggio.

La superficie della sezione totale dell'albero respiratorio, ad ogni generazione, aumenta in modo considerevole, di conseguenza la resistenza al flusso diminuisce drasticamente in direzione distale e si riduce anche la velocità. Ne deriva una diminuzione dell'energia cinetica, che viene recuperata in energia potenziale, ad eccezione della frazione trasformata in calore, per azione delle forze viscosi e degli attriti.

Man mano che si procede nella direzione del flusso, la pressione nel sistema cala (aumento del gradiente pressorio), cioè viene ceduta energia potenziale, a sua volta convertita in energia cinetica, nel punto in cui una restrizione del diametro delle vie aeree impone un aumento della velocità del fluido, per mantenere invariato il flusso. Il **calo pressorio è maggiore nelle vie aeree prossimali**, dove il diametro è ridotto, la resistenza elevata e la velocità dell'aria massima.

Questo fenomeno è fondamentale in *espirazione*, poiché la velocità dell'aria deve aumentare drasticamente mentre il flusso procede verso la trachea, a causa della diminuzione dell'area della sezione totale delle vie aeree, per evitare il collasso delle vie aeree.

### 2.2 Ciclo respiratorio



#### 2.2.1 Fase inspiratoria

A riposo, non avendo un flusso d'aria, la pressione alveolare è uguale a 0, pari a quella atmosferica, mentre la pressione tranpolmonare è uguale a 4 ( $P_{tp} = P_a - P_{ip} = +4$  mmHg).

Per generare un flusso d'aria all'interno delle vie aeree, bisogna modificare la pressione alveolare.

All'inizio dell'inspirazione, la gabbia toracica si espande grazie alla contrazione dei muscoli inspiratori: ciò fa sì che la pressione intrapleurica diventi più negativa rispetto a quella presente a riposo (da -4 a **-6 mmHg**), poiché, con l'espansione della gabbia toracica, le forze di espansione toracica e di retroazione polmonare sono amplificate. Anche la pressione transtoracica si riduce, mentre *aumenta la pressione tranpolmonare* (da 4 a **5 mmHg**): il polmone si espande come il torace, a causa della stretta adesione tra le due strutture.

Tale aumento volumetrico porta, per la legge di Boyle, ad una depressione all'interno degli alveoli (pressione inferiore a quella atmosferica), con conseguente gradiente pressorio tra interno ed esterno (*riduzione della pressione trasmurale*), che determina un flusso d'aria in entrata.

L'aria, quindi, viene introdotta negli alveoli, il cui volume aumenta e la cui parete accumula energia elastica, che causa un progressivo aumento della  $P_a$ , agendo come forza di retroazione, mentre si riduce progressivamente la tendenza del torace ad espandersi. Di conseguenza il flusso continua fino a quando i due compartimenti (interno dei polmoni ed ambiente esterno) non raggiungeranno un nuovo equilibrio, cioè quando la pressione trasmurale sarà uguale a zero.

### 2.2.2 Fase espiratoria

A questo punto il flusso d'aria si arresta e i muscoli respiratori si rilasciano, di conseguenza gli alveoli non sono più soggetti alla forza generata da tali muscoli, ma sono sottoposti alla sola forza di retroazione del polmone. A causa dell'aumento delle forze elastiche (tendenza al collasso del polmone), si nota un incremento di  $P_a$  e  $P_{tt}$ , la  $P_{tm}$  diviene positiva. Si genera così un *flusso d'aria in uscita*, che raggiunge il suo massimo valore a metà espirazione e si interrompe quando il volume è ritornato alla CFR, cioè al punto di equilibrio statico del sistema toraco-polmonare. D'altra parte, man mano che l'aria fuoriesce dagli alveoli, la  $P_a$  ritorna al valore di 0 e si bilancia con la pressione atmosferica.