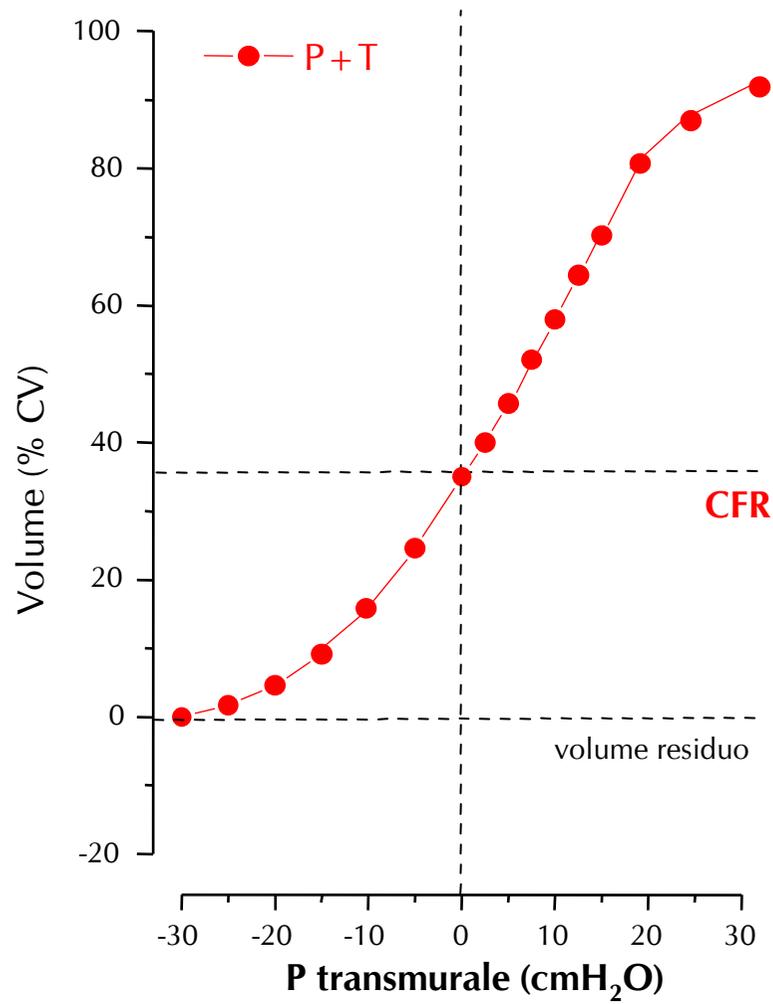
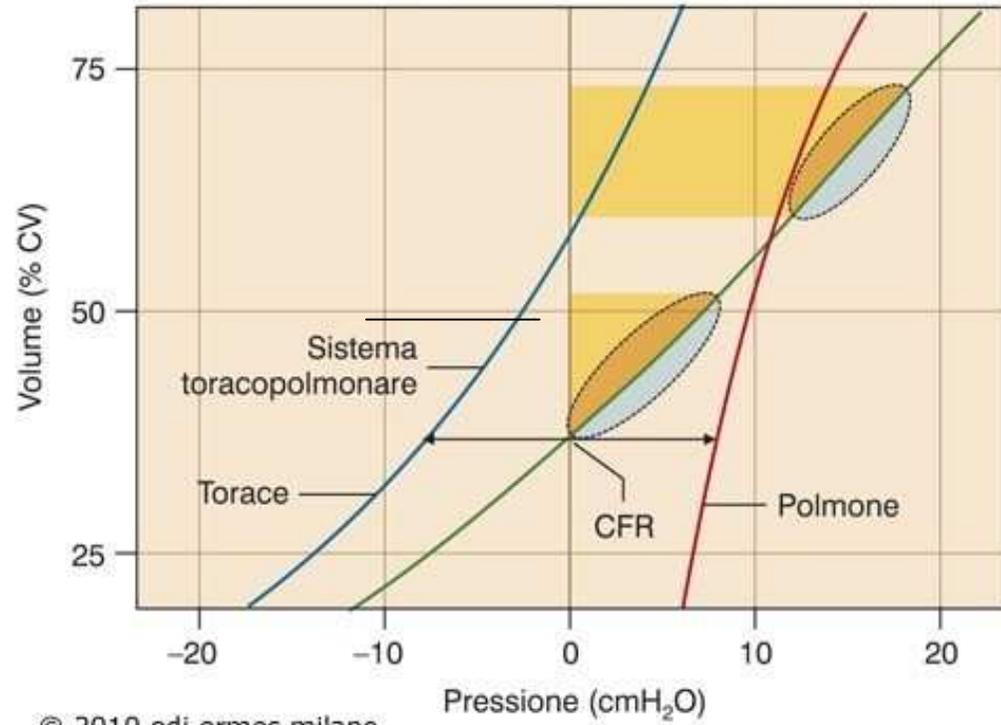


## Curva statica



## Curva dinamica



## Curve dinamiche

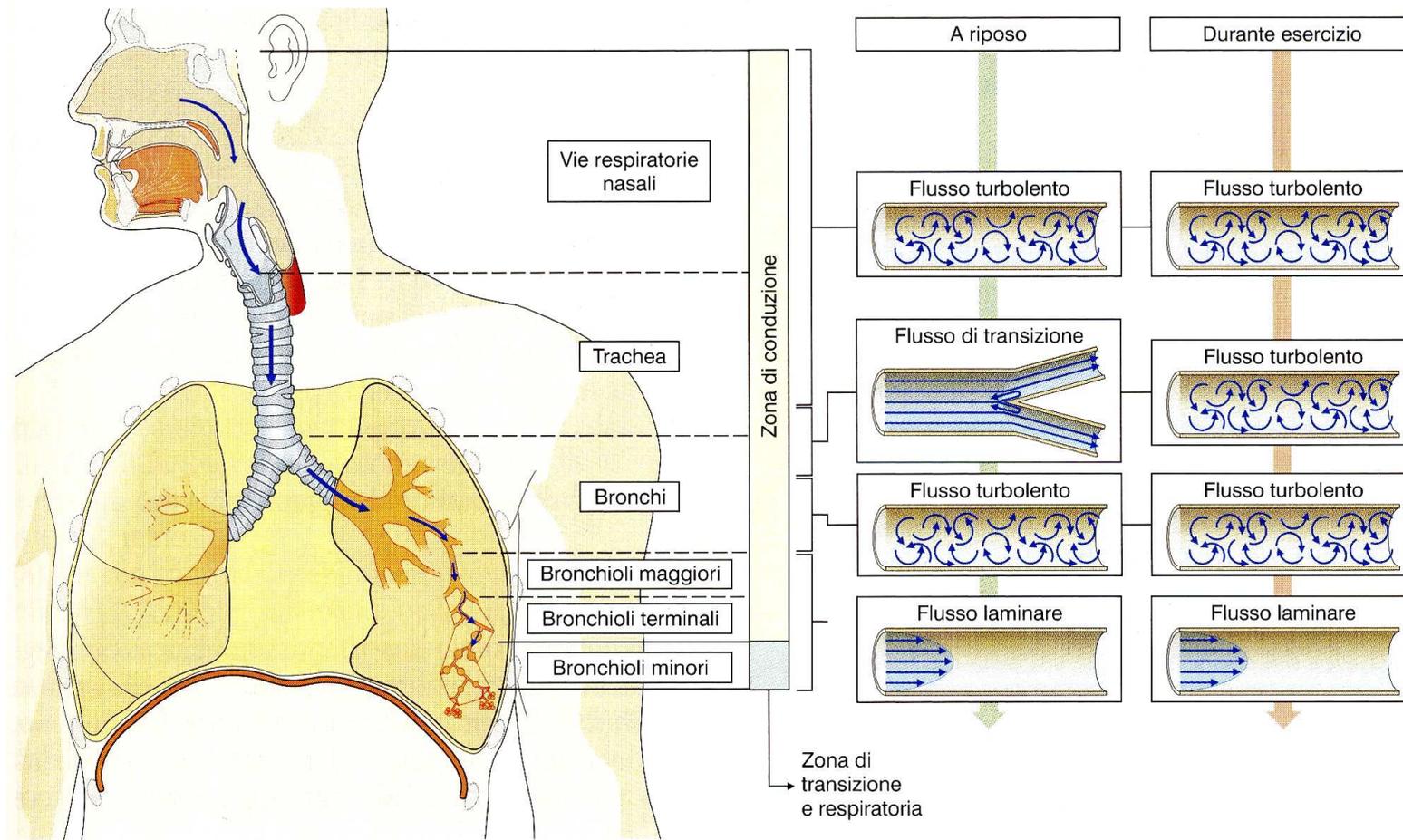
- Isteresi per la tensione superficiale
- Isteresi per la viscosità dei tessuti
- Isteresi per le resistenze delle vie aeree

# Resistenze delle vie aeree

Valutabili in condizioni **dinamiche**, quando si crea flusso:  $F = \Delta P/R$

Anche per il flusso nelle vie aeree è applicabile l'equazione di Poiseuille  $F = \Delta P \pi r^4 / 8 \mu l$

- 70% di R nei bronchi maggiori fino ai bronchi di medio calibro
- 30% di R nei bronchi con diametro  $< 2$  cm (numero elevato e disposizione in parallelo)
- In individui normali  $R \cong 1.5$  cmH<sub>2</sub>O/(l/s) (range 0.6-2.3). Aumenta nelle patologie restrittive fino a 10 cmH<sub>2</sub>O/l/s



### Condizioni di Flusso:

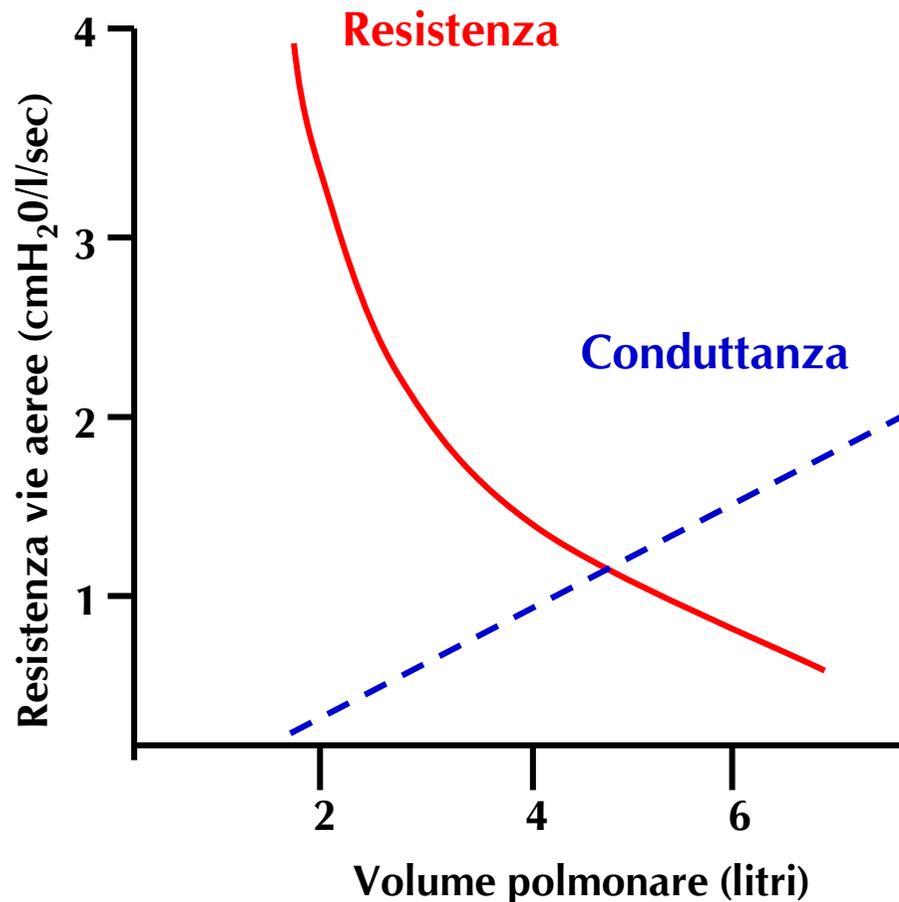
- **Laminare:** bronchioli minori.  $\Delta P = F \cdot R$
- **Turbolento:** vie aeree più grandi (numero di Reynolds  $> 2000$  anche a velocità moderate).  $\Delta P = F^2 \cdot R$
- **Transizionale:** a livello delle biforcazioni e quando aumenta la velocità.  $\Delta P = F \cdot R_1 + F^2 \cdot R_2$  (Equazione di Rohrer)

## Resistenze e sistema nervoso autonomo

**Parasimpatico:** costrizione ed ipersecrezione bronchiale

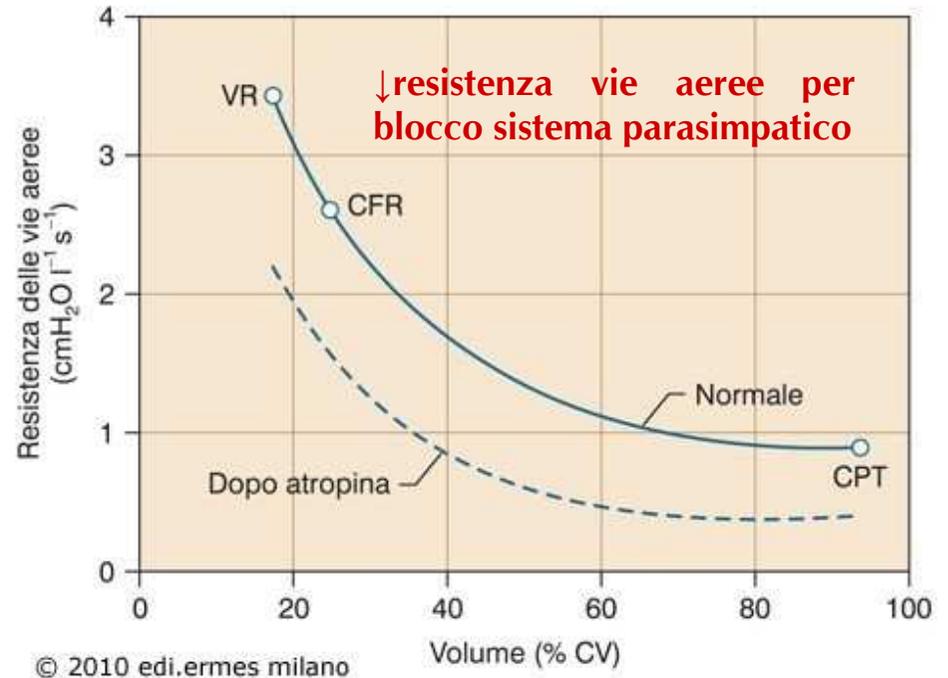
**Simpatico-Adrenergico:** dilatazione ed iposecrezione bronchiale

# Le Resistenze delle vie aeree diminuiscono in inspirazione



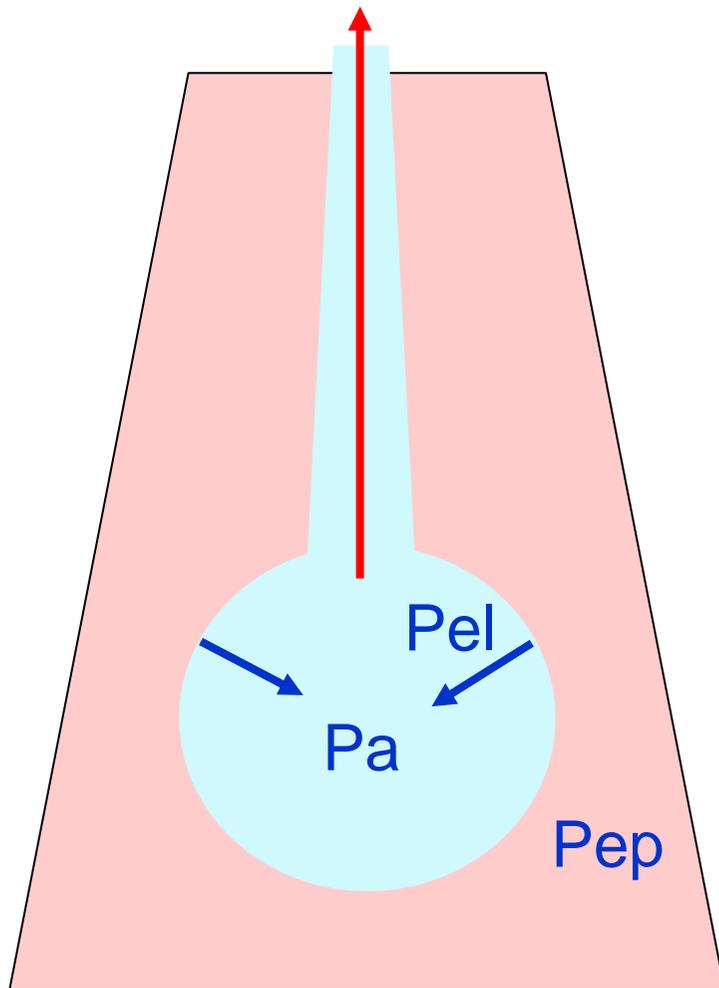
↑V polmonare → ↓R vie aeree, per aumento del calibro:

- Condotti distesi per ↑P<sub>tm</sub> (P<sub>ep</sub> più negativa)
- ↑retrazione elastica degli alveoli → ↑trazione meccanica sulle pareti delle vie aeree



## **Le Resistenze delle vie aeree aumentano durante l'espiazione forzata**

- Le vie aeree più piccole collassano sotto l'azione della  $P_{ep}$  che diventa positiva
- A bassi volumi diminuisce la forza di retrazione alveolare e quindi la trazione meccanica sulle vie aeree



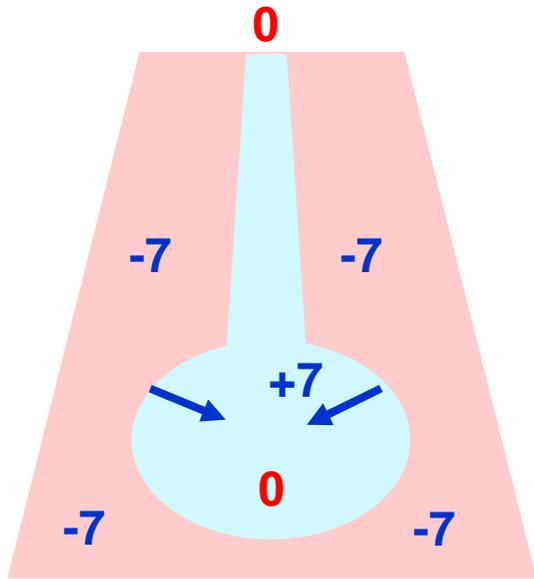
$$P_{tp} = P_a - P_{ep}$$

La Pressione transmurale del polmone ( $P_{tp}$ ), è la P che distende il polmone ed è uguale alla P di retrazione elastica ( $P_{el}$ ) che tende a farlo collassare.

Nell'alveolo la forza di spinta per l'espirazione ( $P_a$ ) è data dalla somma della retrazione elastica ( $P_{el}$ ) e della P endopleurica ( $P_{ep}$ ).

La  $P_a$  che determina il flusso di aria in uscita dall'alveolo è:

$$P_a = P_{el} + P_{ep}$$



### Fine inspirazione

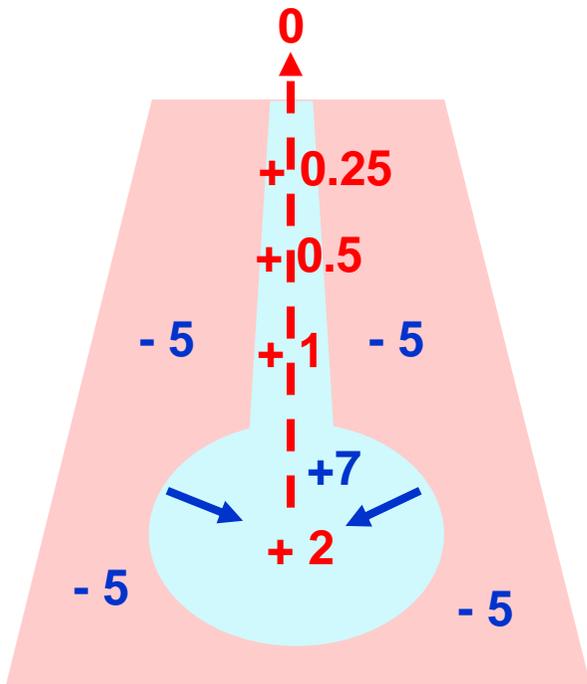
$$P_a = 0, P_{ep} = -7, P_{el} = +7.$$

### Espirazione passiva

Durante l'espiazione passiva (rilasciamento muscolatura inspiratoria),  $P_{ep}$  torna al valore pre-inspirazione (-5) e  $P_a = P_{el} + P_{ep}$ , sale a + 2 [+7 + (-5)], determinando il flusso espiratorio quando la glottide si apre.

Lungo le vie aeree la P diminuisce per:

- perdita di energia nel vincere le resistenze al flusso
- aumento della velocità con il diminuire dell'area di sezione trasversa delle vie aeree, che determina per il **Principio di Bernoulli** ulteriore caduta di P.





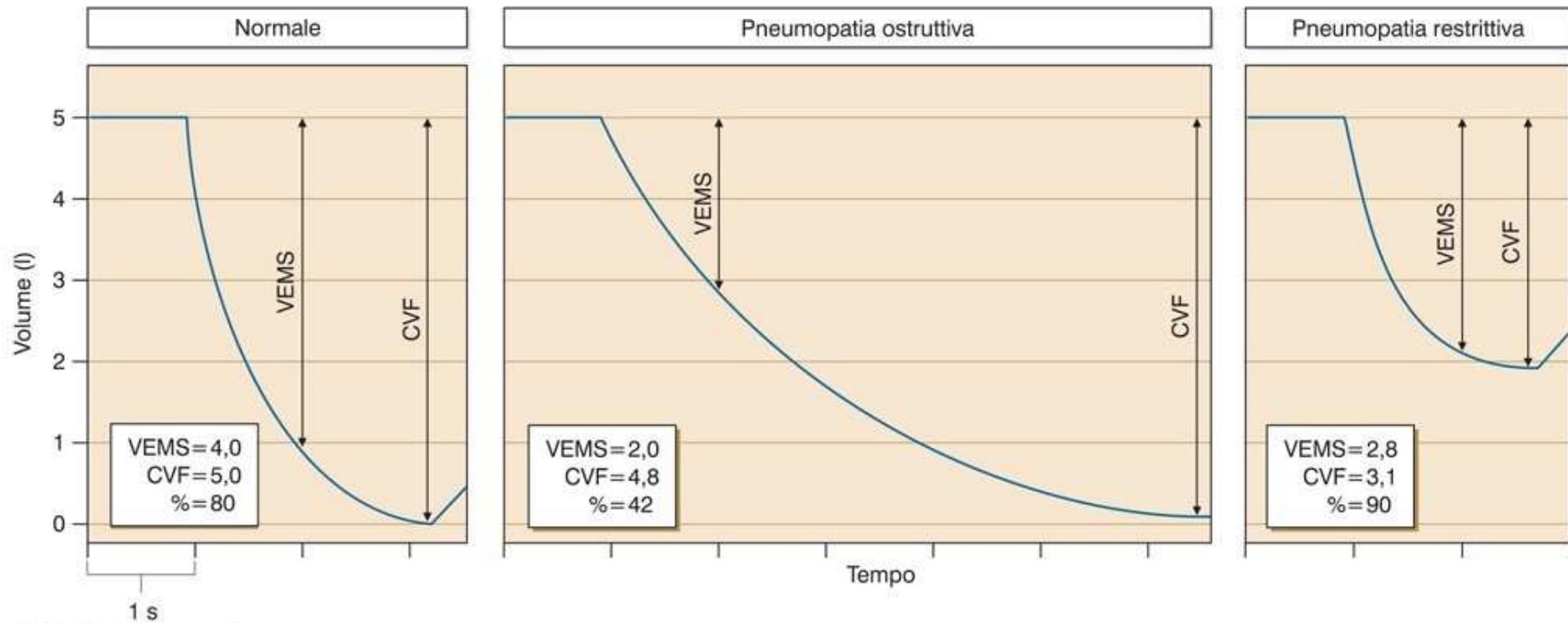
# Espirazione forzata e spirometria dinamica



Un test di valutazione della funzionalità polmonare è quello che consiste nel registrare, mediante uno spirometro, **la capacità vitale forzata (FVC)** che è il volume espirato forzatamente, partendo dalla CPT.

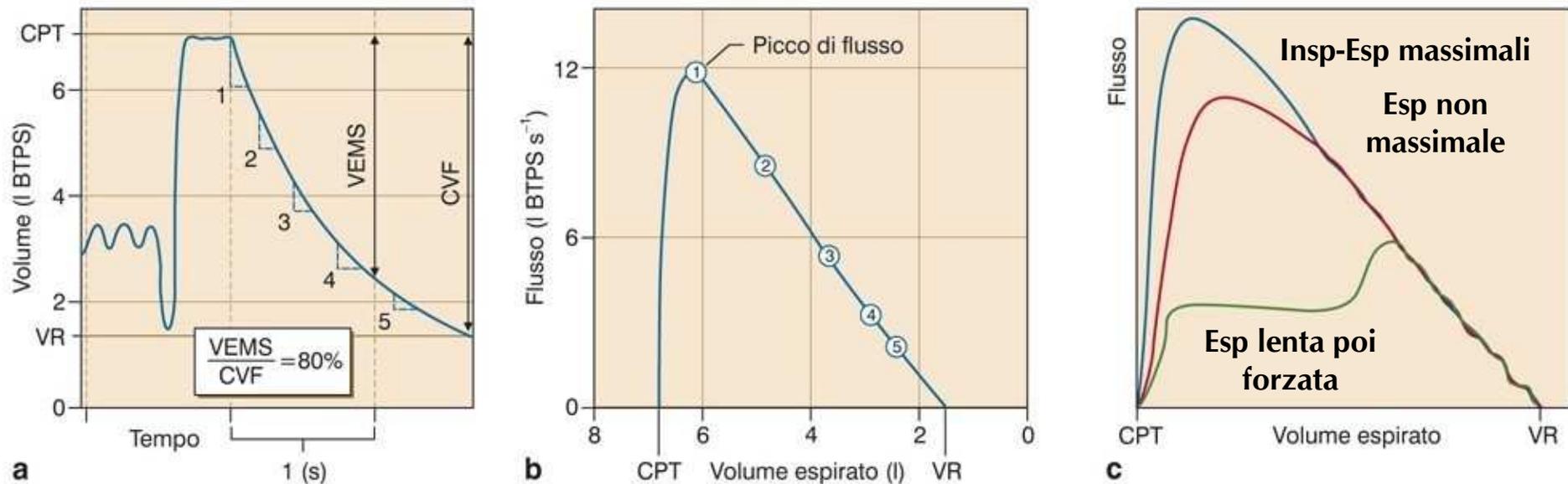
Si valuta il **FEV<sub>1</sub>** (volume di aria espirato nel primo secondo) e si esprime come **FEV<sub>1</sub>/FCV%** (indice di Tiffeneau):

Nel soggetto normale è **70-80%** (70-80% del volume espirato viene espulso nel primo secondo), mentre nelle patologie ostruttive risulta minore.



© 2010 edi.ermes milano

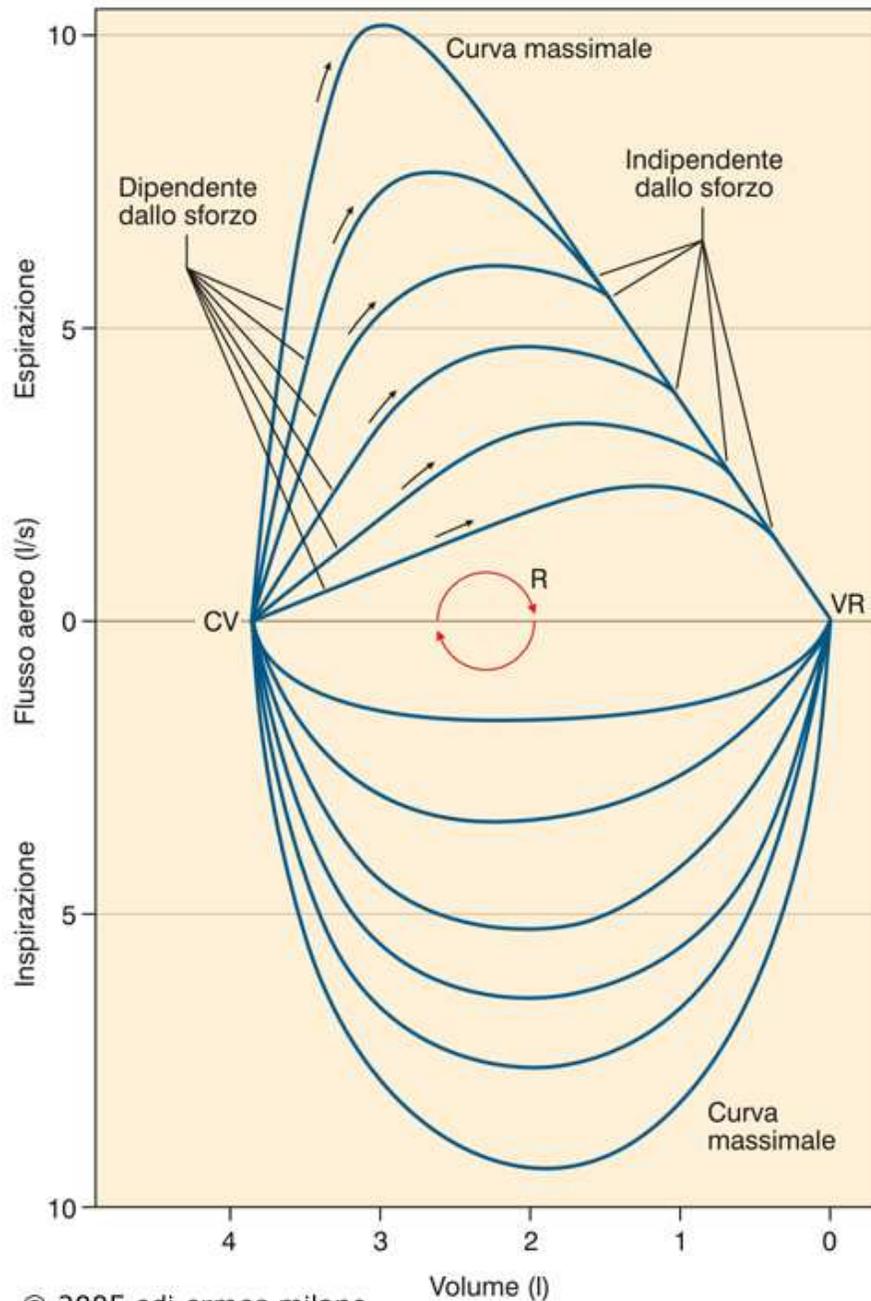
Il **volume massimo espirato in un secondo (VEMS)** si riduce sia nelle patologie ostruttive che in quelle restrittive, ma poiché la capacità vitale forzata (CVF) può essere normale nelle patologie ostruttive e si riduce nelle patologie restrittive, l'indice di Tiffeneau è rispettivamente ridotto ed aumentato.



© 2010 edi.ermes milano

Nella curva di spirometria dinamica (a) la pendenza del tracciato nella fase di espirazione forzata (derivata prima) corrisponde al flusso istantaneo. La **curva flusso-volume** (b) studia il flusso istantaneo in funzione del volume a cui è stato calcolato durante l'espirazione forzata.

Il flusso espiratorio aumenta rapidamente fino ad un massimo (**flusso espiratorio massimo**) che dipende dallo sforzo espiratorio e poi diminuisce con il procedere dell'espirazione e diventa indipendente dallo sforzo espiratorio, a causa della compressione delle vie aeree.



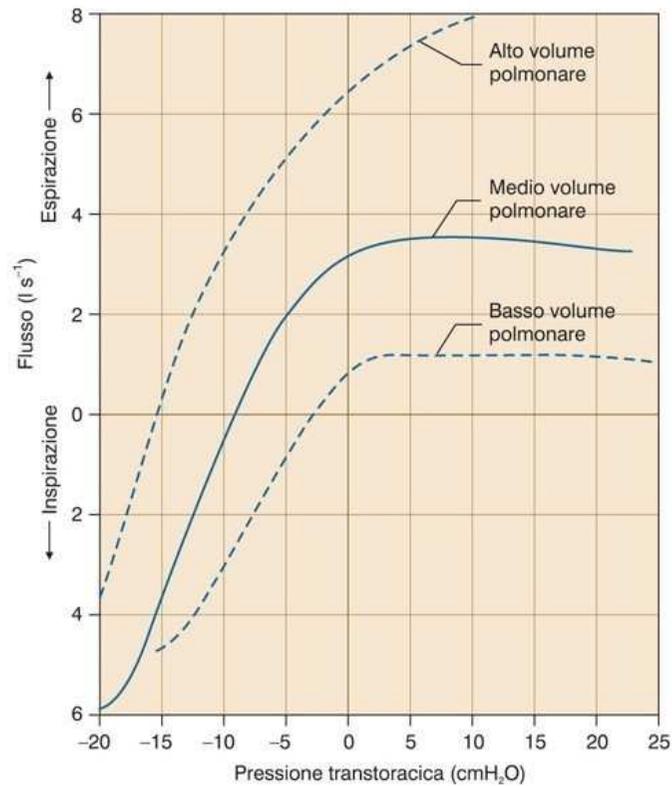
Diagrammi **flusso-volume** durante la respirazione normale (R) e in condizioni di espirazioni forzate a partire dalla CV con sforzi espiratori diversi.

All'inizio dell'espirazione forzata l'aumento di flusso fino al massimo dipende dallo sforzo compiuto mentre la diminuzione nella fase successiva dell'espirazione diventa indipendente dallo sforzo.

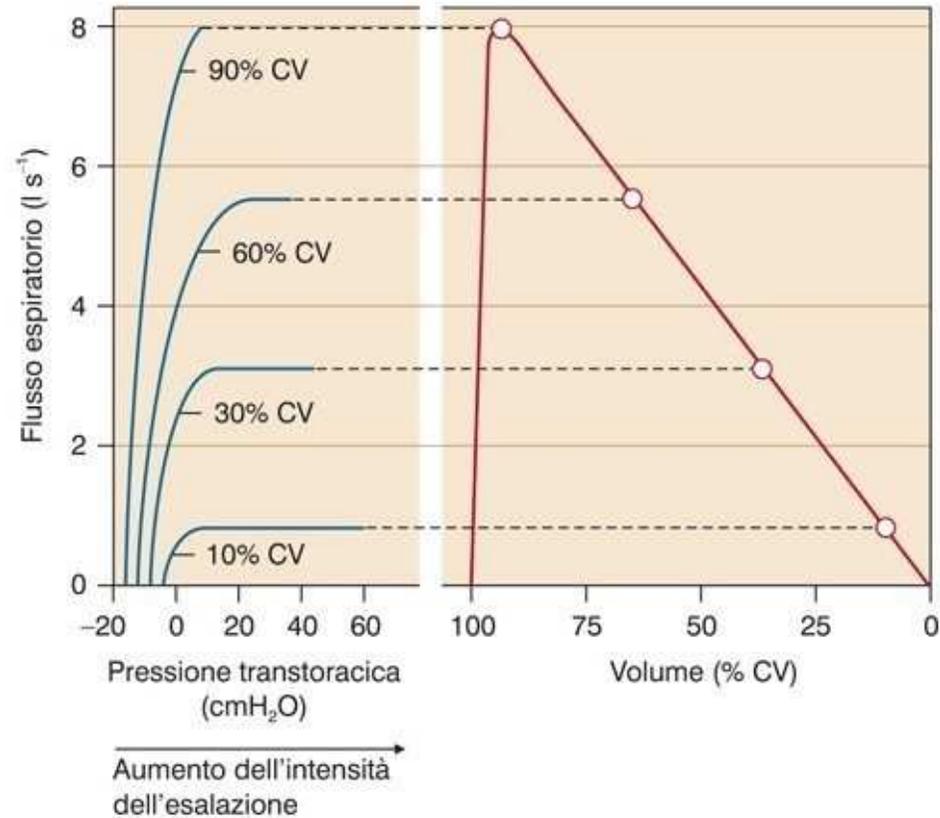
**L'indipendenza dallo sforzo dipende dalla compressione dinamica delle vie aeree, che comporta aumento della R al flusso.**

Nel soggetto sano la limitazione di flusso si osserva solo durante l'espirazione forzata.

# Curve Flusso-Pressione

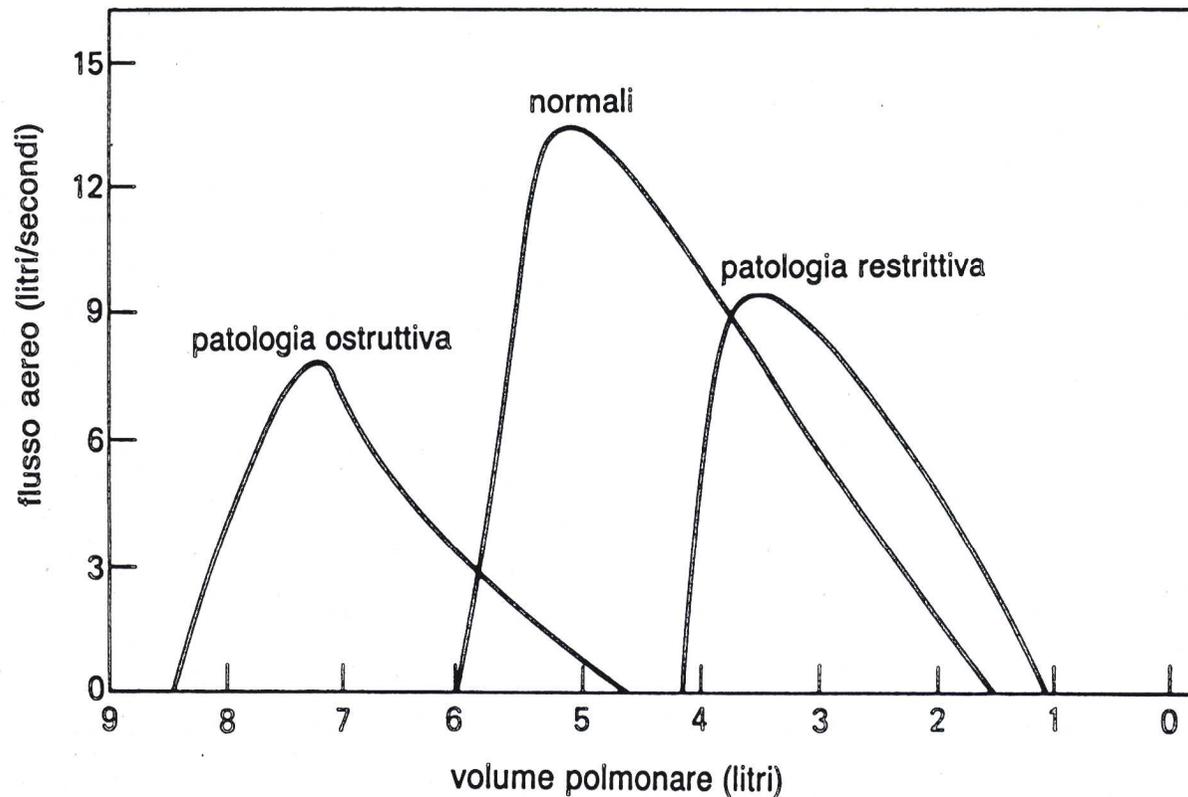


© 2010 edi.ermes milano



© 2010 edi.ermes milano

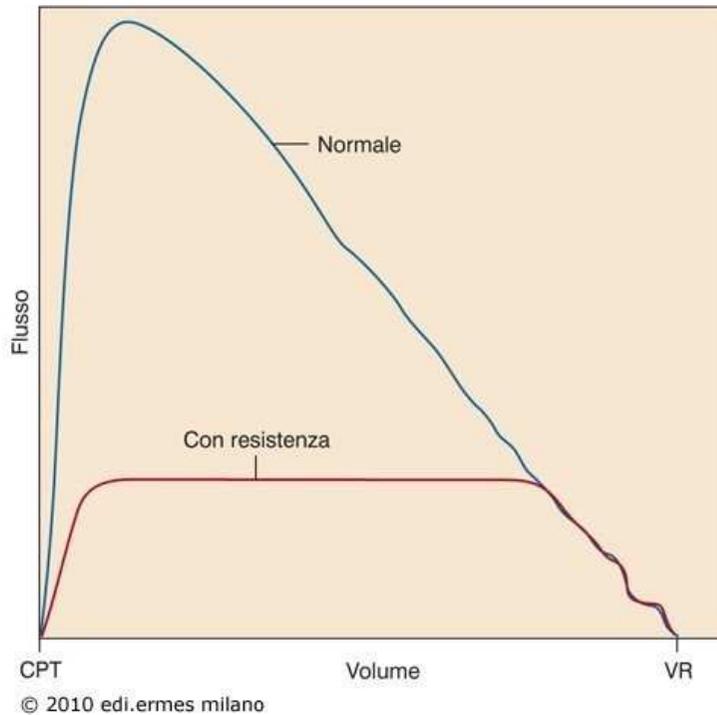
Il **flusso** aumenta con l'aumento della forza muscolare sviluppata fino al raggiungimento di uno stato stazionario (**flusso indipendente dallo sforzo**), spiegabile con un aumento della resistenza.



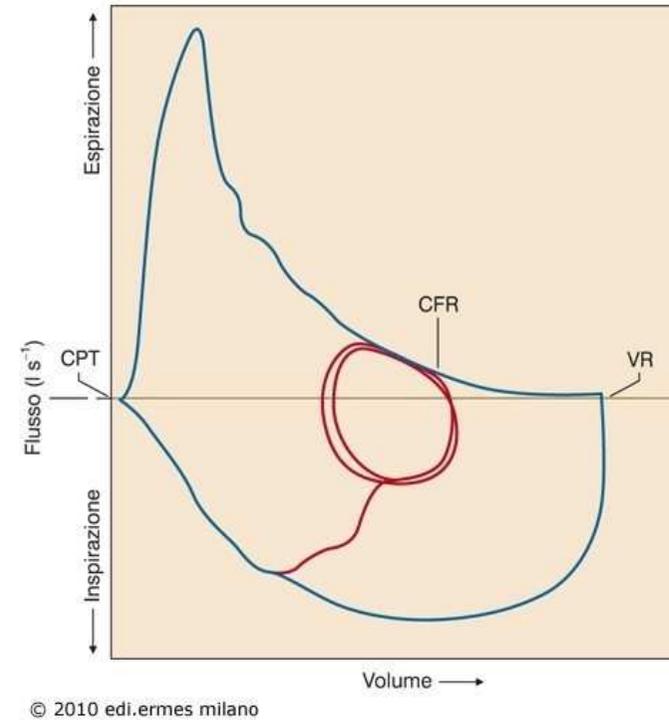
**Patologie ostruttive** (maggiore Resistenza vie aeree: asma, enfisema, ecc.): Il soggetto ha difficoltà ad espirare ( $\uparrow$ CPT e  $\uparrow$ VR). Il **flusso espiratorio massimo** diminuisce e la parte sforzo dipendente della curva è alterata, perché le vie aeree collassano più facilmente.

**Patologie restrittive** (maggiore Resistenza elastica: fibrosi ecc.). Il soggetto ha difficoltà ad espandere il polmone ( $\downarrow$ CPT e  $\downarrow$ VR). Il **flusso espiratorio massimo** diminuisce perché i volumi raggiunti in inspirazione sono minori, ma la parte sforzo dipendente della curva è praticamente normale.

## Ostruzione prossimale



## Ostruzione distale



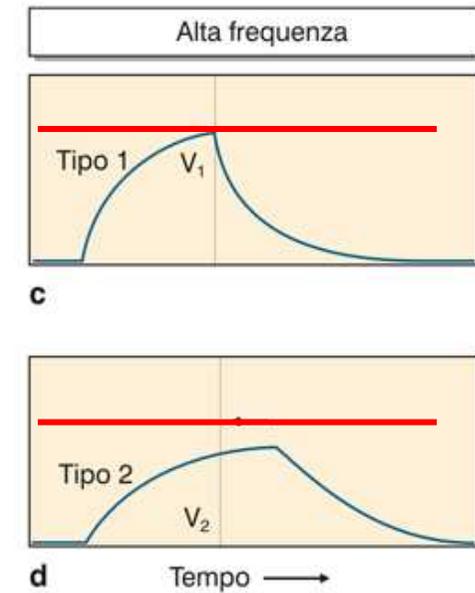
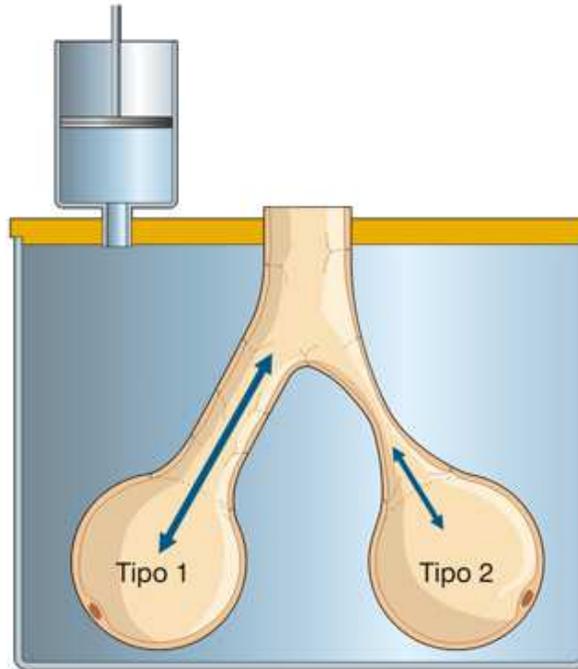
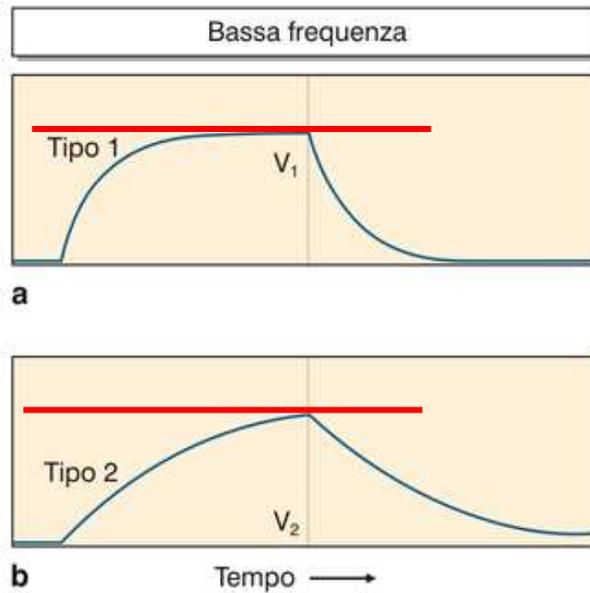
**Ostruzione prossimale** (edema della glottide o presenza di resistenze artificiali alla bocca): Aumenta la  $R$  delle vie aeree alte rigide. Il picco di flusso è minore ma può essere mantenuto per un ampio ambito di volumi polmonari (tanto più lungo quanto maggiore è l'ostruzione), finché non appaiono fenomeni di compressione dinamica.

**Ostruzione distale** (enfisema polmonare e asma bronchiale): Aumenta la  $R$  delle vie aeree distensibili. La fase iniziale dell'espirazione forzata è quasi normale, ma essendo il **punto di eguale pressione** distale, la porzione **sforzo indipendente** della curva è spostata a sinistra e la compressione delle vie aeree è tanto più precoce ed accentuata, quanto maggiore è l'ostruzione.

Le variazioni di volume alveolare seguono le variazioni di forza muscolare con un ritardo descritto dalla costante di tempo:

$$\tau = R \cdot C$$

R = resistenza, C = compliance

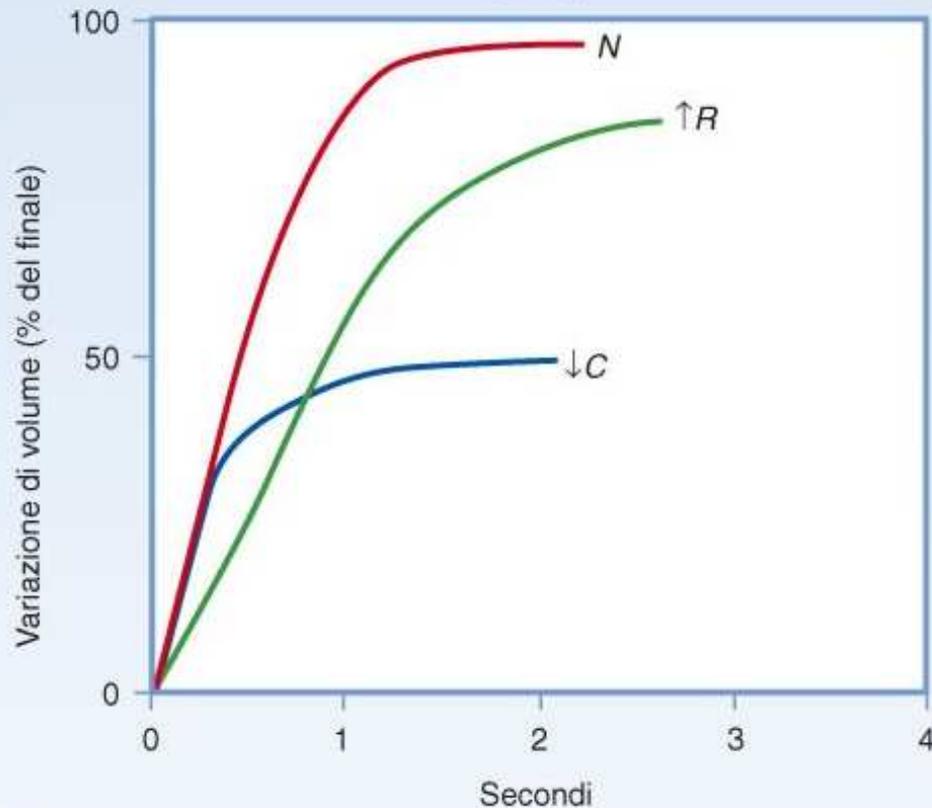
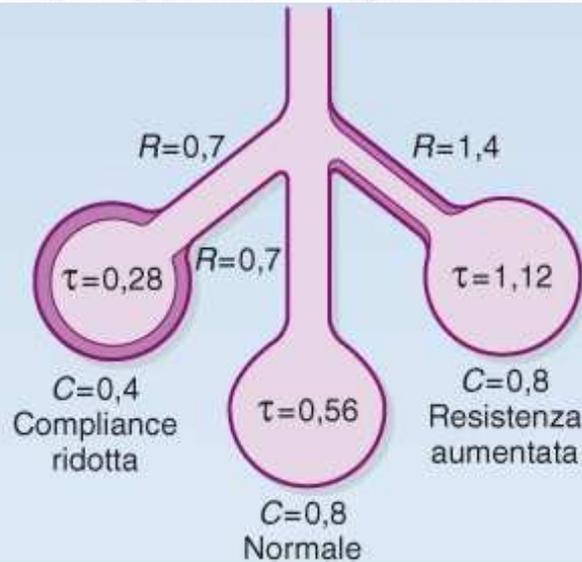


© 2005 edi.ermes milano

Con frequenza 12/min un ciclo respiratorio dura 5 sec (inspirazione 2.5 s).

**Condizioni normali (1):** V finale raggiunto in 0.6 sec. Il V può essere raggiunto anche ad elevate frequenze respiratorie.

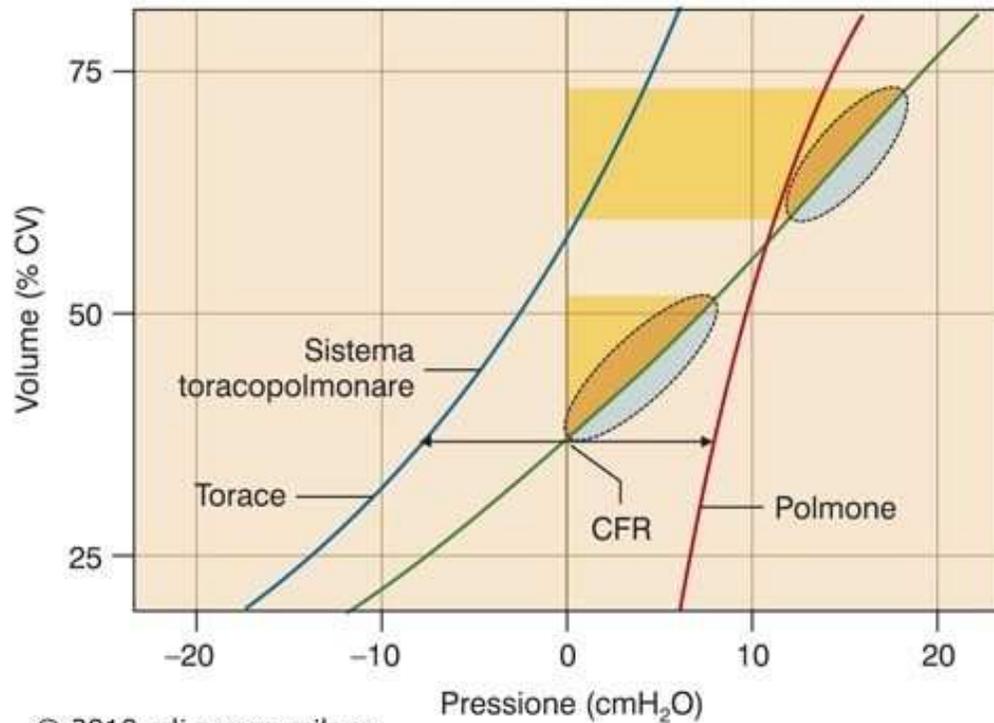
**Condizioni patologiche (ostruttive, 2):** V finale viene raggiunto solo a frequenze basse. Si può verificare che in espirazione l'alveolo normale si svuoti nell'alveolo più lento (pendolo d'aria).



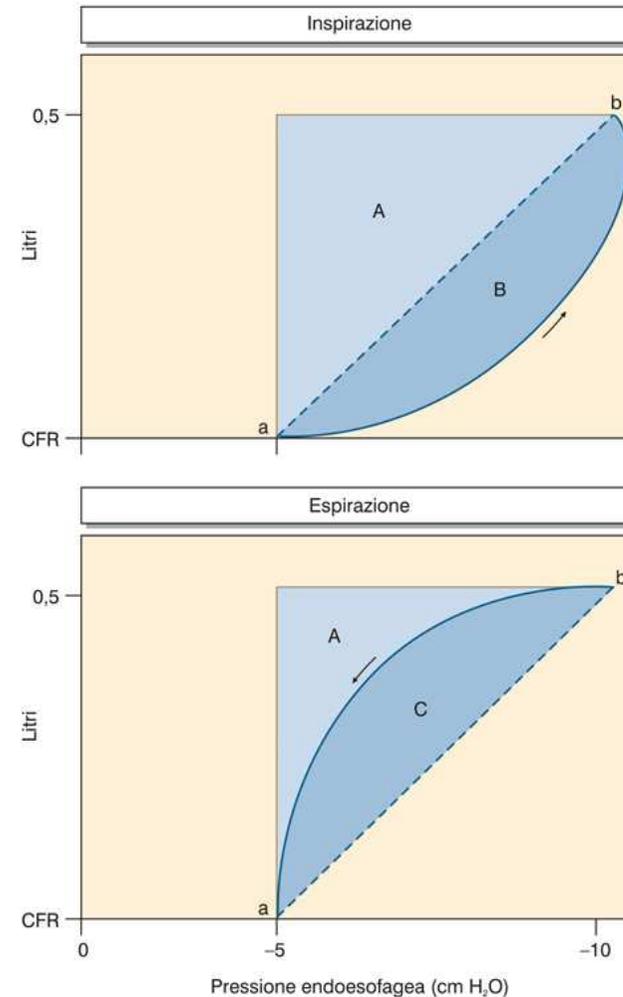
Nelle **patologie restrittive** (**compliance ridotta**), il volume inspirato è minore del normale, ma è raggiunto più velocemente, perché minore compliance = minore  $\tau$ .

Nelle **patologie ostruttive** (**maggiore resistenza delle vie aeree**), il volume inspirato è minore del normale, perché l'elevata resistenza ne ritarda il raggiungimento ( $\tau$  maggiore). L'inspirazione finisce prima che tale volume venga raggiunto.

# Lavoro elastico e resistivo



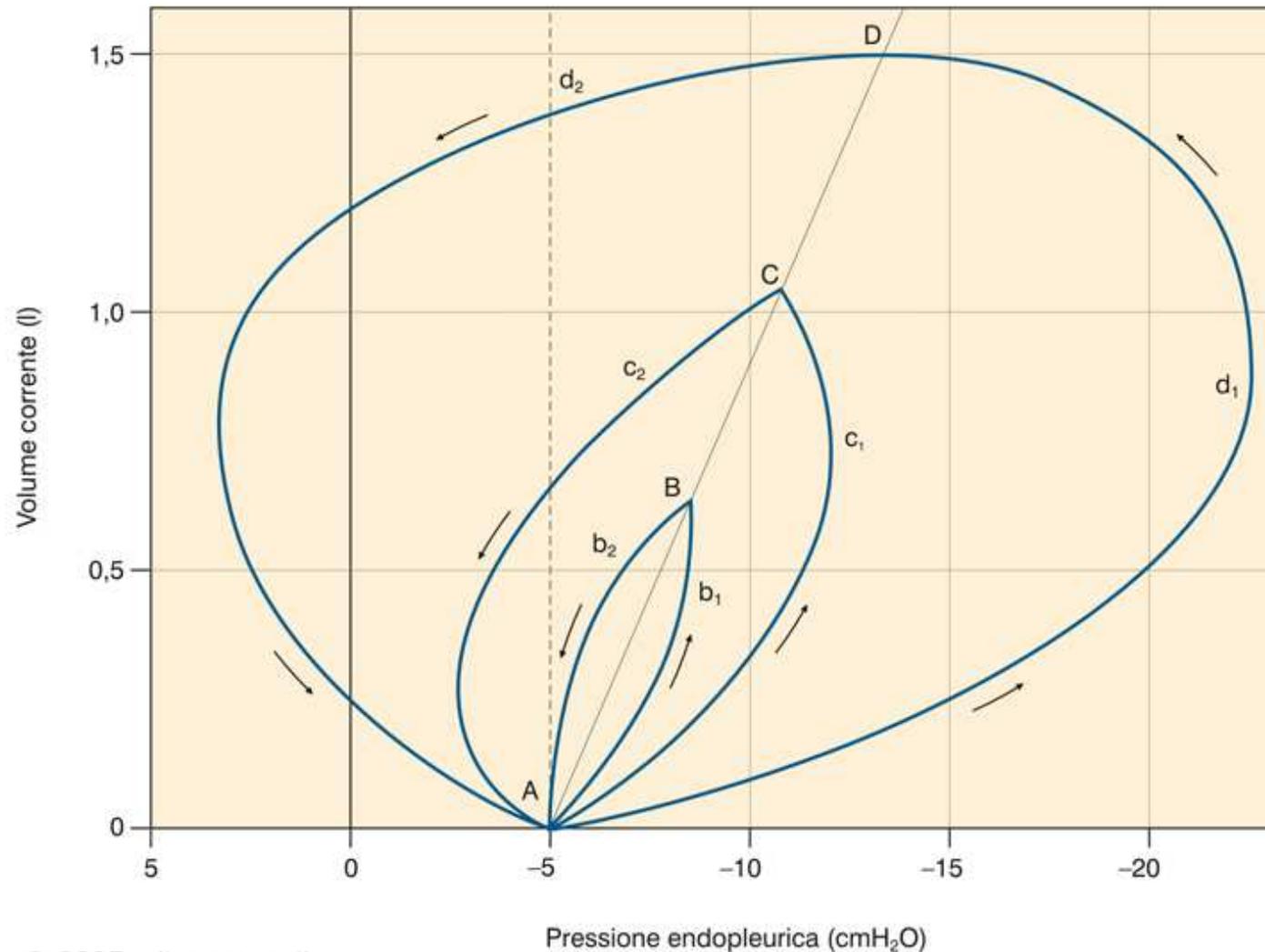
© 2010 edi.ermes milano



© 2005 edi.ermes milano

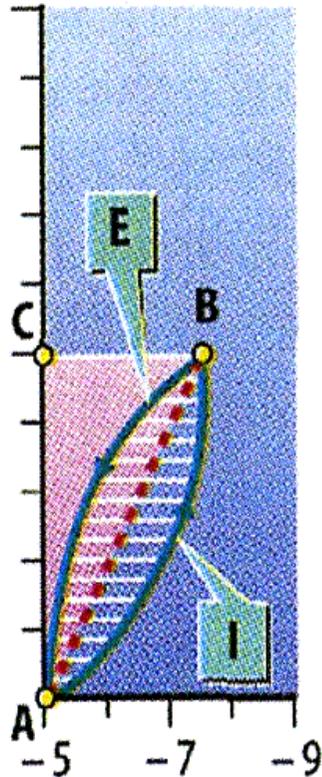
**Inspirazione: area A** ( $P \cdot V/2$ ) lavoro compiuto per vincere le resistenze elastiche, **area B** lavoro compiuto per vincere le resistenze delle vie aeree (non elastiche).

**Espirazione. area C:** lavoro necessario per vincere le resistenze delle vie aeree. In condizioni normali il lavoro espiratorio è minore dell'energia elastica accumulata durante l'inspirazione (area C all'interno dell'area A), pertanto l'espiazione è passiva.

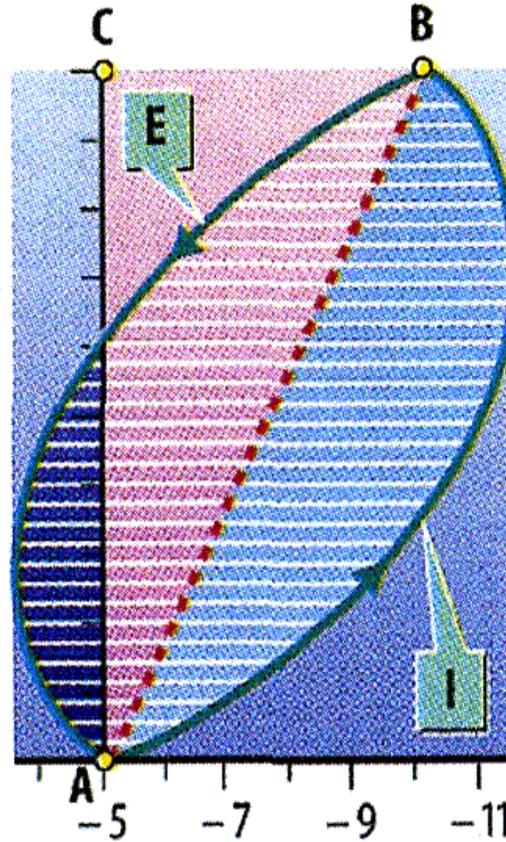


**Relazione P-V dinamica** di un ciclo respiratorio a riposo (ansa A-B, B-A) e durante iperventilazione moderata (A-C, C-A) ed intensa (A-D, D-A). L'ansa respiratoria si allarga a causa dell'aumento del volume corrente e della maggiore resistenza delle vie aeree, che si verifica a frequenze respiratorie maggiori.

Frequenza normale



Frequenza maggiore



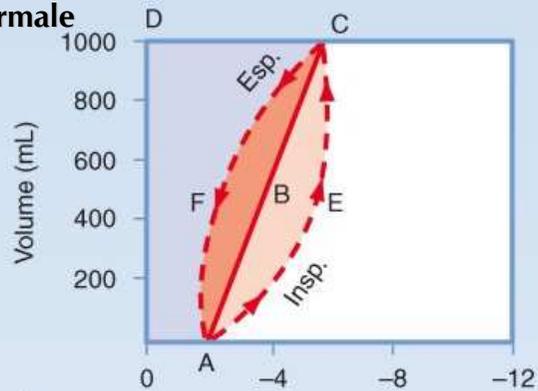
Pressione intrapleurica P<sub>pleu</sub> [cm H<sub>2</sub>O]

**Area rosa: triangolo ABCA** = Lavoro inspiratorio contro le resistenze elastiche ( $P \cdot V/2$ )

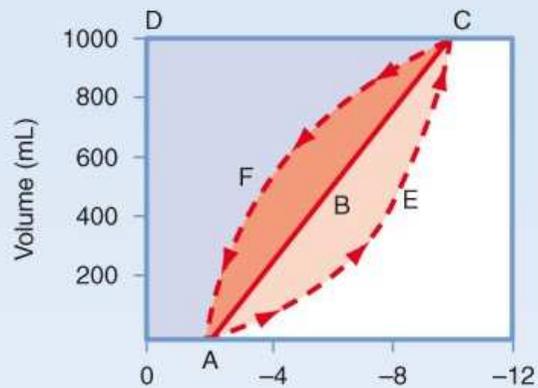
**Area tratteggiata ABA** = Lavoro in- ed espiratorio contro le resistenze delle vie aeree. In condizioni normali il lavoro espiratorio è minore dell'energia elastica accumulata durante l'inspirazione, pertanto l'espirazione è passiva.

**Area blu tratteggiata** = Lavoro compiuto dai muscoli espiratori durante una respirazione a frequenza maggiore.

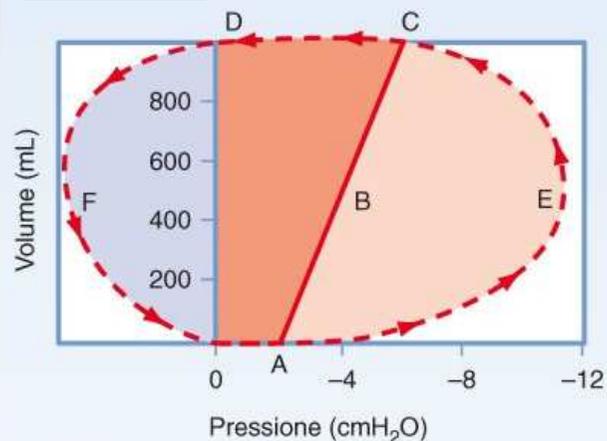
### Normale



### Restrittiva



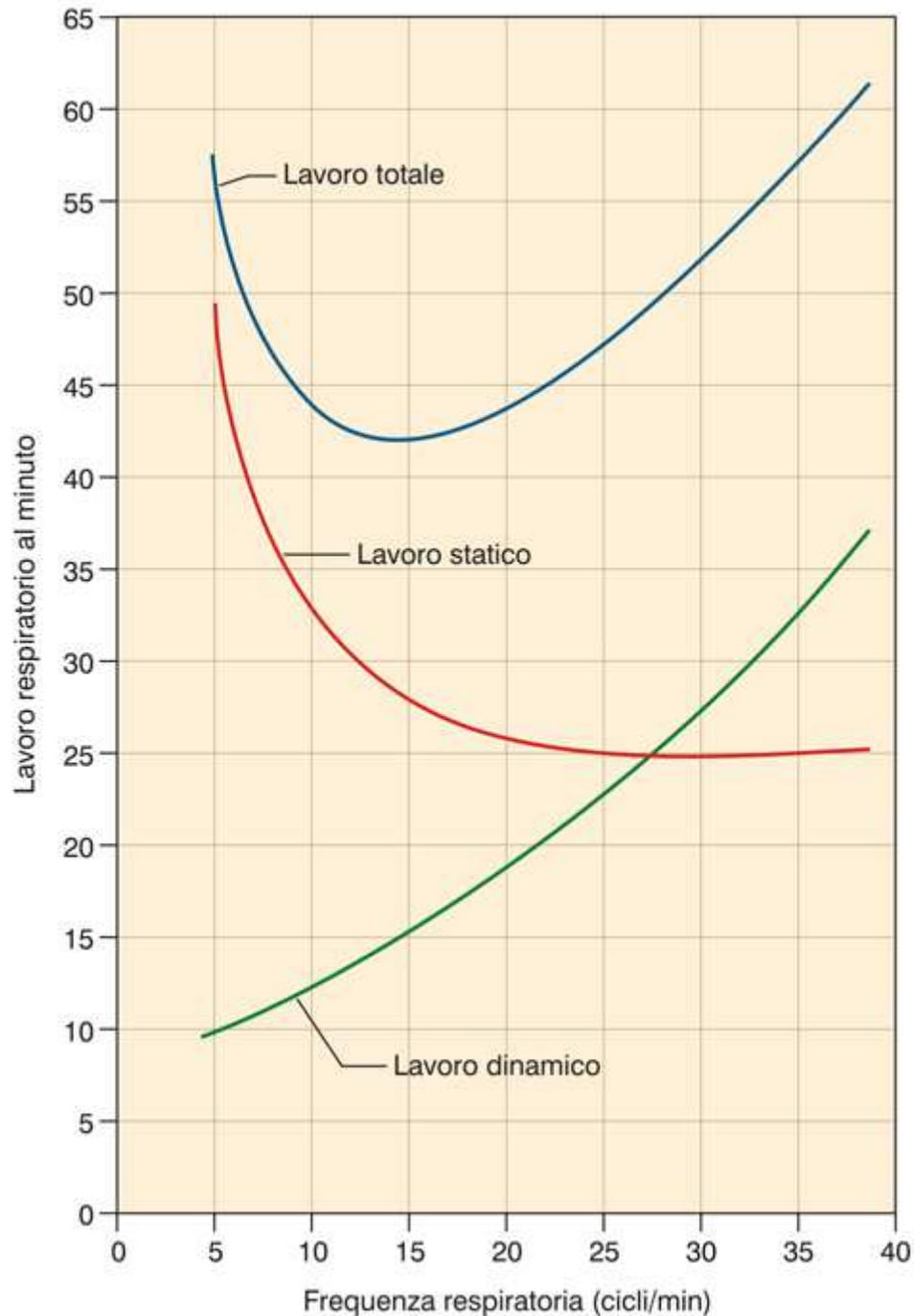
### Ostruttiva



## Condizioni normali

Nelle **patologie restrittive**, aumenta il lavoro elastico, il soggetto compensa riducendo il volume corrente ed aumentando la frequenza respiratoria

Nelle **patologie ostruttive**, il lavoro elastico è normale, aumenta quello per vincere la resistenza delle vie aeree, l'espiazione è attiva, con intervento della muscolatura espiratoria. Il soggetto compensa aumentando il volume corrente e riducendo la frequenza respiratoria



La ventilazione alveolare:

$[(V_C - V_D) \times Fr]$  in condizioni normali è circa 5 l/min

Lo stesso valore può essere ottenuto variando il **volume corrente** o la **frequenza respiratoria**.

Con l'aumentare della **frequenza**, il **lavoro elastico** (statico) diminuisce perché si riduce il  $V_C$ , ma aumenta il **lavoro non elastico** (dinamico) perché aumenta il flusso nelle vie aeree

Il lavoro totale ( $L_s + L_d$ ) è minimo per frequenze respiratorie normali (12-14 atti/min).