

VENTILAZIONE POLMONARE E ALVEOLARE

Il termine ventilazione comprende volume e modalità di distribuzione dell'aria negli alveoli.

La **ventilazione polmonare** è data dal volume di aria che **complessivamente entra ed esce dal polmone** nell'unità di tempo (così come la gittata cardiaca è il volume di sangue inviato in circolo nell'unità di tempo).

VENTILAZIONE POLMONARE = VOLUME CORRENTE x FREQUENZA RESPIRATORIA

La **ventilazione alveolare** è data dal volume di aria che **effettivamente raggiunge l'area di scambio delle vie aeree** nell'unità di tempo.

VENTILAZIONE ALVEOLARE = (VOLUME CORRENTE – SPAZIO MORTO)
x FREQUENZA RESPIRATORIA

Il volume di aria che arriva negli alveoli deve essere proporzionale al volume degli alveoli stessi.

SPAZIO MORTO

Dei 500 cm³ (circa) di aria che entrano ad ogni atto inspiratorio circa **150 cm³** restano nelle vie aeree superiori che sono vie di conduzione e non contengono tessuto di scambio.

Solo 350 cm³ del volume corrente raggiungono gli alveoli.

Prima dell'entrata del volume corrente, gli alveoli contengono una quantità di aria pari alla Capacità Funzionale Residua (CFR), ossia il volume residuo sommato al volume di riserva espiratoria.

Le riserve polmonari di aria hanno notevole importanza, perchè

1) Evitano sbalzi di temperatura che potrebbero danneggiare le vie respiratorie.

2) Evitano sbalzi di umidità.

3) Uniformano le pressioni parziali dei gas.

Sono in definitiva una **riserva di equilibrio**.

I 150 cm³ di volume racchiusi nelle vie aeree in cui non avvengono scambi sono definiti volume di spazio morto.

Esiste uno **spazio morto anatomico**, costituito appunto dalla estensione delle vie aeree superiori, in cui non avvengono scambi gassosi, ed uno **spazio morto fisiologico**, dato dal volume dello spazio morto anatomico sommato al volume occupato da alveoli nei quali, per vari motivi, non avvengono scambi.

A parità di volume di ventilazione polmonare, si possono avere volumi di ventilazione alveolare molto diversi, determinati dalle variazioni di volume corrente e/o frequenza respiratoria.

VOLUME CORRENTE	FREQUENZA RESPIRATORIA	VENTILAZIONE POLMONARE	VENTILAZIONE ALVEOLARE
150	40	6000	0
500	12	6000	4200
1000	6	6000	5100

L'aria alveolare ha una composizione molto diversa dall'aria atmosferica, anche se è sempre in equilibrio con essa. Consideriamo che:

- 1) Nel polmone c'è costantemente aria residua, che non si rinnova completamente.
- 2) A livello degli alveoli viene continuamente sottratto O₂ ed immessa CO₂.

Alla fine di una espirazione eupnoica i polmoni contengono ancora circa 3500 cm³. Arrivano ogni volta 350 cm³ di aria "rinnovata", perciò l'incremento è del 10%.

COEFFICIENTE DI VENTILAZIONE = è il rapporto tra il volume di aria inspirata che giunge a livello alveolare e volume di aria presente da prima negli alveoli.

Il volume di aria che mediamente non raggiunge gli alveoli è circa 1/3 di quella inspirata nell'unità di tempo. L'efficienza della ventilazione polmonare è normalmente meno del 35%.

Il volume di aria che mediamente giunge in 1 minuto a livello alveolare è di circa 5000 cm³.

La gittata sistolica invia dal ventricolo destro un volume / minuto (V) di sangue di circa 5000 cm³. Il rapporto tra aria alveolare e sangue circolante nei polmoni è quindi 1. (Tale rapporto però è passibile di differenze regionali, in quanto è diverso se consideriamo gli apici o le basi del polmone. L'argomento sarà trattato in maniera specifica a proposito del rapporto ventilazione / perfusione).

L'aria espirata non ha la stessa composizione dell'aria alveolare, perché ad essa si aggiunge l'aria degli spazi morti.

L'aria alveolare ha temperatura corporea ed è satura di vapore acqueo.

Composizione Percentuale media	% N ₂	% O ₂	% CO ₂
ARIA INSPIRATA	79.02	20.94	0.04
ARIA ESPIRATA	79.2	16.3	4.5
ARIA ALVEOLARE	80.4	14.0	5.6

I valori oscillano a seconda dei movimenti respiratori. La percentuale di O₂ dell'aria espirata è maggiore di quella dell'aria alveolare a causa della presenza dello spazio morto, che durante l'espirazione mescola la propria aria a quella proveniente dagli alveoli. L'aria espirata ha dunque composizione intermedia tra aria inspirata e aria alveolare.

RESISTENZA DELLE VIE AEREE

La resistenza delle vie aeree è così definita:

$$R = \frac{P_{\text{bocca}} - P_{\text{alveolare}}}{\dot{V}}$$

Se tra le due estremità di un tubo fluisce dell'aria, tra queste esiste una differenza di pressione, un ΔP , e le linee di corrente dipendono dal valore e dalle modalità di flusso.

1) Basso valore di flusso = le linee di corrente si muovono parallelamente alle pareti del tubo.

Tale genere di flusso è detto **flusso laminare**, definito dalla **legge di HAGEN-POISEUILLE**

$$\dot{V} = \frac{DP}{8 h l} r^4$$

DP = gradiente di pressione

\dot{V} = flusso (volume / unità di tempo)

h = viscosità del fluido

l = lunghezza del vaso

r = raggio del vaso

Il valore del raggio del tubo e della viscosità del fluido hanno grande importanza.

La pressione è proporzionale al valore del flusso:

$$DP = K V$$

2) Alto valore di flusso = le linee di corrente si disorganizzano, e il flusso viene definito **flusso turbolento**.

La pressione non è proporzionale all'entità del flusso, ma, **approssimativamente**, al suo quadrato.

$$DP = K V^2 \gg$$

Il flusso turbolento non è veloce quanto il laminare. Nel flusso turbolento ha molta importanza il valore della densità del fluido, non quello della viscosità.

La formula del Numero di Reynolds indica se il flusso è laminare o turbolento:

$$Re = 2 r v d / h$$

d = densità del fluido

v = velocità media del fluido

r = raggio del tubo

h = viscosità del fluido

Si sviluppa facilmente turbolenza quando la velocità media è alta, la densità è alta e il raggio del tubo è di grandi dimensioni, perciò un numero di Reynolds alto ci indica che il flusso è turbolento.

Un gas a bassa densità come l'elio (He) difficilmente produce turbolenza.

In un tubo dritto e levigato si sviluppa un flusso turbolento quando Re è maggiore di 2000.

Le vie respiratorie sono rapportabili ad un sistema di tubi piuttosto complesso, con ramificazioni di calibro diverso e superfici interne irregolari.

In un sistema così ramificato è plausibile che un flusso laminare si sviluppi solo nelle vie aeree più piccole, dove i numeri di Reynolds sono molto bassi (circa 1 nei bronchioli terminali).

Nelle vie superiori (naso, bocca, glottide e bronchi) il flusso di aria è di tipo turbolento anche nella respirazione quieta. Per questo motivo con uno stetoscopio si possono udire i rumori respiratori alla superficie della parete toracica.

Mediamente nelle vie aeree si ha un **flusso di transizione** = nel flusso di transizione la pressione è proporzionale al valore del flusso, ma anche al valore del suo quadrato.

$$DP = K_1 V + K_2 V^2$$

Misurazioni dirette della caduta di pressione lungo l'albero bronchiale hanno dimostrato che la sede di resistenza al flusso più importante è costituita dai bronchi di medio calibro, con minimi contributi da parte dei bronchioli più piccoli.

La maggiore caduta di pressione si verifica fino alla settima ramificazione delle vie aeree, mentre le vie aeree con diametro inferiore a 2 mm sono responsabili di una caduta di pressione del 20 % .

Il fatto che le vie aeree di piccolo diametro contribuiscano in misura lieve alla resistenza può essere ragionevolmente spiegato dal loro enorme numero e dalla disposizione in parallelo, che limita la resistenza totale.

FATTORI CHE DETERMINANO LA RESISTENZA DELLE VIE AEREE:

1) Pressione transmurale \bar{P}_t è il valore di pressione equivalente alla differenza tra la pressione interna e quella esterna alle vie aeree.

Quando tale valore è positivo il condotto si espande e la resistenza si riduce, ma se ha valori negativi il condotto inizia a restringersi.

Se il valore della pressione transmurale diventa ancora di più negativo il condotto si comprime progressivamente: durante l'espirazione i condotti cartilaginei si restringono, e la resistenza al flusso aereo è maggiore di quella che si instaura durante l'inspirazione. Le fasi del respiro non influenzano significativamente il diametro dei bronchioli, perché il loro calibro dipende dal volume polmonare che non varia di molto in eupnea (meno del 20 %).

2) **Tono del muscolo liscio bronchiale** 1 nei bronchi la stimolazione del sistema ortosimpatico provoca dilatazione, mentre quella del sistema parasimpatico provoca costrizione.

3) **Densità e viscosità del gas respirato** 1 nel caso di immersioni a grandi profondità la densità dei gas aumenta enormemente, e per fare muovere l'aria all'interno delle vie aeree occorre un valore elevato di pressione. Per ovviare a questo inconveniente, nelle immersioni a grandi profondità, si utilizza come gas respirato una miscela di ossigeno ed elio.

CIRCOLO POLMONARE

La ventilazione apporta O₂ alla barriera sangue – aria degli alveoli, dove avviene lo scambio dei gas. Il circolo polmonare preleva O₂ dagli alveoli e lo porta verso il cuore sinistro, da dove viene ridistribuito al resto del corpo.

I polmoni sono perfusi per il **99 %** dal circolo polmonare e circa per l'**1 %** dal circolo sistemico. Il circolo polmonare origina dall'**ARTERIA POLMONARE**, che riceve il sangue venoso dal ventricolo destro.

L'arteria polmonare si ramifica come le vie aeree, fino a frammentarsi nei capillari polmonari, in una rete a maglie così fitte che viene definita da alcuni fisiologi come un unico sottile strato di sangue in movimento, interrotto solo a tratti. Questa disposizione consente la massima possibilità di contatto tra sangue e gas alveolari.

Il sangue ossigenato viene drenato dal letto capillare attraverso le piccole vene polmonari che decorrono tra i vari lobuli e si raccolgono nelle **4 GRANDI VENE POLMONARI**, che confluiscono nell'atrio sinistro.

Il polmone riceve anche una piccolissima parte di sangue dal circolo sistemico (1 %), il **CIRCOLO BRONCHIALE**, attraverso le arterie bronchiali, che originano dall'aorta. Scopo principale del circolo bronchiale è quello di irrorare le pareti dei grossi bronchi.

Le vene bronchiali confluiscono in parte nel sistema venoso polmonare e in parte nelle vene azigos, che fanno parte del circolo venoso sistemico.

La piccola quantità di sangue venoso che drena direttamente nel cuore sinistro rende conto del fatto che, anche in condizioni di reale omeostasi, la gittata del ventricolo sinistro è lievemente superiore alla gittata del ventricolo destro.

Inoltre questa piccola quantità, unitamente ad altre, rende conto del fatto che il sangue immesso nell'aorta è lievemente desaturato di O₂ (normalmente di circa 5 mmHg).

Dal polmone proviene anche una certa quantità di linfa. I vasi linfatici decorrono principalmente attorno ai bronchi più grossi e ai vasi sanguigni.

VALORI PRESSORI DEL CIRCOLO POLMONARE

Il circolo polmonare viene detto anche **PICCOLO CIRCOLO**, e il circolo sistemico viene detto **GRANDE CIRCOLO**, ma tra i due sistemi vascolari esistono enormi differenze perchè la funzione è totalmente diversa.

I valori pressori del circolo polmonare sono bassi rispetto a quelli del circolo sistemico:

Pressione sistolica = 25–30 mmHg

Pressione diastolica = 8 –10 mmHg.

Pressione media = 15 mmHg

L'arteria polmonare è più corta dell'aorta, ma soprattutto meno spessa delle arterie sistemiche, dotata di una **minore quantità di cellule muscolari lisce e di elastina**. Vene e venule del circolo polmonare sono molto sottili e anch'esse dotate di minore quantità di muscolatura liscia, la qual cosa non significa che il circolo polmonare sia dotato di uno scarso controllo vasomotorio attivo.

La resistenza vascolare polmonare è circa 1/10 di quella del letto vascolare sistemico, e la pressione arteriosa, seppure molto bassa, è sufficiente a fare giungere il sangue fino all'apice dei polmoni. Il cuore destro può così lavorare a basso regime, a differenza del sinistro che deve apportare sangue a distretti anche molto superiori al livello del cuore (es. un braccio esteso al di sopra della testa)

Nei capillari polmonari la pressione media non è ancora stata accertata. Secondo alcuni dati avrebbe valori medi tra la pressione arteriosa e quella venosa.

Altri dati indicano che a livello dei capillari ci sia la massima caduta di pressione, la qual cosa nel circolo sistemico si verifica nelle arteriole, a monte dei capillari.

Nel circolo polmonare la caduta di pressione si verifica in modo più graduale.

Per motivi idrostatici la pressione dei capillari polmonari varia considerevolmente nelle diverse regioni polmonari.

Caratteristica dei capillari polmonari è il fatto di essere a contatto con un **ambiente gassoso**.

L'epitelio è sottilissimo, perciò i capillari collabiscono (si chiudono) oppure si aprono a seconda di un equilibrio di pressioni. Nel caso dei capillari alveolari la pressione esterna è la pressione alveolare, che in eupnea ha valori vicinissimi alla pressione atmosferica.

I vasi del circolo polmonare vengono indicati come vasi alveolari ed extra - alveolari.

1) VASI ALVEOLARI = capillari e vasi poco più grandi, adiacenti agli alveoli.

Il calibro di questi vasi è condizionato dal rapporto tra pressione interna e pressione alveolare.

2) VASI EXTRA - ALVEOLARI = arterie e vene di medio calibro che decorrono nel parenchima polmonare.

Il calibro è condizionato dal volume polmonare, dal momento che il polmone espandendosi fa trazione sulle loro pareti.

3) VASI DI GROSSO CALIBRO = vasi della regione dell'ilo, che sono situati al di fuori del parenchima polmonare.

Il calibro è condizionato dalla pressione endopleurica.

RESISTENZA VASCOLARE POLMONARE

La caduta di pressione nel circolo polmonare è circa 10 volte inferiore a quella del circolo sistemico (10 contro 100).

Nel circolo sistemico l'elevata resistenza è data dalle arteriole, mentre nel circolo polmonare la pressione cala più gradualmente fino ai capillari e la resistenza è molto bassa ma compatibile con la distribuzione del sangue in un sottile film di liquido sulla vastissima superficie delle pareti alveolari.

La resistenza dei capillari si può ulteriormente abbassare in seguito ad aumenti di pressione nel circolo sistemico, attraverso due sistemi:

a) RECLUTAMENTO = in seguito ad innalzamenti pressori bassi. In alcuni capillari, che in condizioni normali restano chiusi, il sangue comincia a defluire e si abbassa la resistenza globale.

Non è noto il motivo per cui normalmente siano collassati.

b) DISTENSIONE = in seguito ad innalzamenti pressori alti. I singoli segmenti capillari subiscono un notevole aumento di calibro, sorprendente data la sottigliezza della membrana che li separa dallo spazio alveolare.

Anche il volume polmonare è un elemento determinante per la resistenza vascolare polmonare, soprattutto perchè influenza il calibro dei vasi extra - alveolari.

DISTRIBUZIONE DEL FLUSSO SANGUIGNO

Il volume ematico totale del circolo polmonare (dal ventricolo destro al ventricolo sinistro) è di circa 500 ml, quindi il 10% del volume totale di sangue circolante, ed è il 40-50 % del peso dei polmoni. A riposo, il letto capillare polmonare contiene circa 75 ml di sangue; durante l'esercizio fisico tale volume aumenta, fino a raggiungere il massimo volume anatomico, circa 200 ml.

Nel polmone umano, in accordo con la posizione assunta dal corpo, esiste una considerevole differenza di flusso sanguigno nelle diverse regioni.

Nella stazione eretta il flusso sanguigno diminuisce quasi linearmente dalle basi agli apici, dove si riscontrano valori molto bassi.

In posizione supina il flusso non diminuisce alle basi, aumenta agli apici e nelle regioni posteriori del polmone, mentre cala in quelle anteriori (il polmone è orizzontale).

In posizione capovolta il flusso agli apici è maggiore rispetto alle basi.

Durante l'esercizio moderato il flusso sanguigno aumenta nelle zone apicali e le differenze regionali diminuiscono.

Tutto ciò dipende dalle differenze di pressione idrostatica all'interno dei vasi sanguigni.

APICI

P alveolare > P arteriosa > P venosa

ZONA INTERMEDIA

P arteriosa > P alveolare > P venosa

BASI

P arteriosa > P venosa > P alveolare

ZONA 1 = Agli apici dei polmoni la pressione arteriosa è bassa e quando la pressione
(**APICI**) alveolare ha un valore vicino a quello, della pressione atmosferica esiste ancora possibilità di flusso ematico.

Se il valore della pressione dell'aria nell'alveolo aumenta e supera quello della pressione arteriosa i capillari vengono " schiacciati " e il sangue non passa, perciò non si verificano scambi di gas tra aria e sangue. In queste condizioni si definisce tale zona **spazio morto alveolare**.

Ciò può accadere durante una espirazione forzata che determina una pressione alveolare superiore a quella atmosferica., o quando ci si trova in condizioni di pressione arteriosa molto bassa o di ipovolemia (ad es in seguito a forti emorragie).

ZONA 2 = In questa zona la pressione arteriosa è maggiore di quella della zona 1, ma la
(**INTERMEDIA**) pressione venosa è ancora molto bassa. Se aumenta la pressione alveolare, ad es durante una espirazione forzata, si può schiacciare l'estremità venosa impedendo la circolazione. Se si occlude il circolo la pressione arteriosa aumenta a monte fino a diventare maggiore di quella alveolare, perciò il vaso si riapre e il sangue fluisce di nuovo. I vasi si aprono e chiudono a seconda del valore della pressione alveolare.

ZONA 3 = Alla basi dei polmoni le pressioni arteriosa e venosa sono maggiori della
(**BASI**) pressione alveolare, anche quando essa è elevata, ed il flusso quindi è continuo, e, come di norma, determinato dalla differenza artero – venosa.
Tale zona è sempre perfusa, in eupnea, anche in condizioni di ipotensione, o durante una espirazione forzata.

BILANCIO IDRICO DEL POLMONE

Lo spessore dell'epitelio che separa il sangue dall'aria capillare è inferiore a 0.5 µm, perciò è importante un efficace drenaggio del liquido che si può accumulare all'interno degli alveoli, impedendo gli scambi. Secondo il principio di Starling entità e direzione del flusso di liquido attraverso i capillari sono determinate da un equilibrio tra pressione idrostatica e pressione osmotica del lume capillare e dello spazio interstiziale.

$$\dot{Q}_f = K [(P_c + p_i) - (P_i + p_c)]$$

\dot{Q}_f = movimento di fluido / unità di tempo

K = costante di filtrazione del capillare

P_c = pressione idrostatica del capillare

P_i = pressione idrostatica del liquido interstiziale

π_c = pressione osmotica del capillare

π_i = pressione osmotica del liquido interstiziale

Alcuni valori pressori dei capillari polmonari non sono certi. E' probabile che nel polmone umano il valore risultante da questa equazione indichi una uscita netta di liquido verso l'esterno del capillare, determinando un afflusso di liquido al sistema linfatico di circa 20 ml / ora.

Se il liquido non viene efficacemente drenato si può verificare un edema interstiziale che può degenerare in edema polmonare e compromettere così gli scambi gassosi.

REGOLAZIONE DEL CIRCOLO POLMONARE

I vasi del circolo polmonare sono innervati dal Sistema Nervoso Autonomo (SNA), e, anche se non possiedono una quantità di tessuto muscolare liscio elevata, essendo la pressione in essi piuttosto bassa, anche una piccola variazione di tono muscolare influenza la resistenza.

Le arteriole del circolo polmonare sono innervate da:

NERVI PARASIMPATICI (nervi **VAGHI**), la cui stimolazione provoca dilatazione dei vasi, attraverso la liberazione di acetilcolina.

NERVI SIMPATICI la cui stimolazione provoca dilatazione dei vasi se il mediatore chimico, la noradrenalina, interagisce con recettori denominati beta, mentre provoca costrizione dei vasi se la noradrenalina interagisce con i recettori di tipo alfa. I recettori alfa sono presenti in numero maggiore, perciò la stimolazione delle fibre simpatiche provoca prevalentemente vasocostrizione.

La stimolazione dei barocettori provoca dilatazione dei vasi polmonari di resistenza.

RAPPORTO VENTILAZIONE - PERFUSIONE

$$\dot{V}_a / \dot{Q}$$

\dot{V}_a = Flusso di aria alveolare (**Ventilazione**) / Unità di tempo

\dot{Q} = Flusso ematico nel capillare alveolare (**Perfusione**) / Unità di tempo.

Il ruolo essenziale del polmone è quello di **scambiatore** di gas tra sangue e aria, la qual cosa accade dietro il vincolo del metabolismo corporeo e delle sue richieste, che sottrae O₂ dal circolo e vi immette CO₂.

Si può considerare modello di unità polmonare un contenitore ripieno di H₂O a flusso continuo, nel quale viene immesso ininterrottamente dall'alto del colorante in polvere.

L'acqua simula il flusso di sangue (\dot{Q}).

Il colorante simula l'apporto di O₂ (\dot{V}_a).

Occorre tenere in conto altresì che la ventilazione fisiologica avviene in maniera intermittente. La velocità di flusso dell'acqua simula la perfusione, ossia la velocità del flusso ematico nel capillare alveolare.

La velocità di aggiunta del colorante simula la ventilazione alveolare, e cioè l'apporto di O₂.

La concentrazione del colorante nel contenitore e nell'acqua (che scorre similmente al sangue), è determinata dal rapporto tra queste due velocità, così come la pO₂ e la pCO₂ in una unità alveolare è determinata dal rapporto VENTILAZIONE / PERFUSIONE.

Il valore di pO₂ nell'aria alveolare, circa 100 mmHg, è quindi dato da un equilibrio tra aggiunta di O₂ attraverso la ventilazione alveolare e la sua rimozione mediante il flusso sanguigno; il valore di pCO₂ nell'aria alveolare, circa 40 mmHg, è determinato dalle stesse condizioni.

ALTERAZIONI DI \dot{V}_a / \dot{Q}

1) Supponiamo una situazione di ventilazione ostacolata (ad es. alveoli non ventilati) :

- durante il passaggio di sangue nel capillare: pO₂ e pCO₂ dell'aria alveolare restano invariate, perciò viene reimpresso in circolo sangue venoso.
Questa situazione rappresenta uno “ spreco di perfusione ”.

2) Supponiamo una situazione di flusso ematico assai ridotto (ad es. capillari alveolari chiusi per motivi pressori o per alterazioni patologiche) :

- non c'è passaggio di sangue, per cui l'aria alveolare ha una composizione simile all'aria inspirata, perchè non avvengono cessioni di CO₂ o prelievi di O₂.
Questa situazione rappresenta uno “ spreco di ventilazione ”.

Se si altera il rapporto \dot{V}_a / \dot{Q} la composizione gassosa dell'aria alveolare può diventare:

simile a quella del sangue venoso misto

simile a quella dell'aria inspirata.

La normale funzione polmonare dipende da un appropriato rapporto V_a / Q , perchè eventuali anomalie in esso sono causa di una inadeguata ossigenazione.

Nei pazienti affetti da malattie polmonari (bronchiti croniche, enfisema, fibrosi ecc...) il rapporto V_a / Q risulta alterato.

DIFFERENZE REGIONALI DI \dot{V}_a / \dot{Q}

In un polmone in stazione eretta la distribuzione di V_a / Q segue una modalità topografica, cioè varia da regione a regione, dall'alto al basso, per influenza della gravità e del peso del polmone.

PERFUSIONE (\dot{Q})

In stazione eretta il flusso ematico è irregolarmente distribuito, è cioè aumenta marcatamente scendendo dagli apici alle basi.

Il flusso ematico, per effetto della gravità, è notevolmente più intenso nelle regioni basali.

Il motivo di queste differenze di flusso è dato dalle differenze di pressione idrostatica.

I capillari degli apici polmonari hanno differenze di pressione artero - venosa molto basse, così basse talvolta da non essere sufficienti per il flusso.

VENTILAZIONE (\dot{V}_a)

In stazione eretta anche la ventilazione alveolare è irregolarmente distribuita, a causa della modificazione che si verifica nel polmone dovuta alla gravità e al peso dell'organo stesso

La ventilazione alveolare, per effetto della gravità, è notevolmente maggiore nelle regioni basali.

In posizione supina V_a è maggiore nella zona posteriore del polmone (quella che in tale posizione risulta essere la parte più bassa), rispetto alla parte anteriore (quella che in questa posizione sta più in alto) .

In posizione laterale (sdraiati su di un fianco) V_a è maggiore nella parte più bassa (cioè nel polmone del lato su cui il soggetto è sdraiato) .

Il polmone si espande più facilmente quando è a bassi volumi; a volumi più ampi, cioè quando si trova in posizione di maggiore trazione, risulta meno estensibile.

Le BASI POLMONARI presentano un piccolo volume di riposo, perchè su di esse viene esercitata una forza traente molto bassa.

Durante l'inspirazione vanno incontro quindi ad una espansione ottimale.

Gli APICI POLMONARI presentano invece, anche a riposo, un elevato volume, perchè sono soggetti ad una forza traente maggiore di quella delle basi. Durante l'inspirazione perciò essi vanno incontro ad una espansione minore di quella delle basi, in quanto a riposo sono già piuttosto tesi.

Gli effetti della gravità e del peso del polmone incidono però maggiormente sulla perfusione. Da ciò consegue che il rapporto ventilazione / perfusione è maggiore agli apici rispetto alle basi.

• •
 V_a / Q aumenta dalle basi agli apici, perchè **gli apici risultano sempre più ventilati che perfusi.**

Negli apici è presente comunque flusso ematico, anche se assai ridotto, perchè se il flusso fosse 0, V_a / Q assumerebbe valore infinito. mentre un valore V_a / Q esiste comunque, ed è un valore finito.

• •
Il valore medio di V_a / Q (ottenuto senza tenere in considerazione le differenze regionali nel polmone o facendo una media dei vari valori) è circa 0.8, se si considerano 4000 cm³ circa di V_a e 5000 cm³ circa di Q .

SCAMBI GASSOSI

In sincronia con l'alternanza di riempimento e svuotamento polmonare, si ha lo scorrimento di sangue nei capillari alveolari.

Esistono meccanismi specifici che assicurano lo scambio gassoso a livello alveolare, e precisamente la **ASSUNZIONE di O₂ e il RILASCIO di CO₂.**

La superficie alveolare è ricoperta da un velo di H₂O, perciò occorre esaminare:

- a) I meccanismi di passaggio dei gas dall'aria alveolare al velo di H₂O dell'alveolo.
- b) I meccanismi di scambio tra H₂O, barriera della parete dell'alveolo, e sangue del capillare alveolare.

DISSOLUZIONE DEI GAS NEL VELO ACQUEO ALVEOLARE

E' necessario conoscere le leggi fisiche che regolano il passaggio delle molecole dalla miscela gassosa dell'aria alveolare al liquido che bagna gli alveoli, e viceversa.

Secondo la **legge di Dalton**, in una miscela di gas, ognuno di essi esercita una pressione in rapporto alla propria concentrazione, come se vi si trovasse da solo, indipendente dalla presenza degli altri gas.

La pressione che ogni singolo gas esercita in una miscela è detta **PRESSIONE PARZIALE (p)**.

La pressione totale di una miscela di gas è la somma delle pressioni parziali di tutti i gas presenti in essa.

Per conoscere la pressione parziale di un gas è necessario moltiplicare la pressione totale della miscela per la percentuale del gas, che è detta **FRAZIONE DI CONCENTRAZIONE**.

$$p_x = P \cdot F_x$$

p_x = pressione parziale del gas X

P = pressione totale dei gas

F_x = frazione di concentrazione, che per convenzione si riferisce al gas secco

Se, come nel caso della miscela di gas costituita dall'aria alveolare, è presente vapore acqueo, che come tutti i gas, esercita una pressione parziale, di circa 47 mmHg, tale valore va sottratto alla pressione totale.

$$760 \text{ mmHg (pressione atmosferica)} - 47 = 713 \text{ mmHg.}$$

Nell'aria alveolare quindi solo 713 mmHg di pressione sono esercitati da N₂, O₂, CO₂.

Calcoliamo la pressione parziale di O₂ nell'aria alveolare:
supponiamo una percentuale di O₂ di 15 %. La pressione totale è 713 mmHg.

$$p_{O_2} = 713 \times 15/100 = 106 \text{ mmHg}$$

Qualsiasi gas si può sciogliere in un liquido

La **legge di Henry** descrive come, a parità di pressione, temperatura e volume, la quantità di gas che si discioglie in un liquido è proporzionale alla pressione parziale del gas nel liquido.

$$c = S \cdot p$$

c = concentrazione del gas nel liquido (espressa in cm³)

p = pressione parziale del gas

S = costante di solubilità

Per esprimere la concentrazione di un gas in un liquido, si può utilizzare il termine **TENSIONE**, analogo alla pressione parziale di un gas in una miscela gassosa.

DIFFUSIONE DEI GAS

O₂ passa dall'aria al sangue, CO₂ passa dal sangue all'aria.

Il fenomeno di diffusione di O₂ e CO₂ da aria a sangue e viceversa, avviene in modo **completamente passivo**, senza alcun dispendio energetico, perchè avviene in seguito ad un **GRADIENTE PRESSORIO**.

Esiste quindi un flusso di O₂ e CO₂ da un ambiente a concentrazione maggiore ad uno a concentrazione minore.

Se p di un determinato gas è nella miscela gassosa è maggiore di p del gas nell'ambiente liquido, il gas può diffondere nel liquido, in quantità rapportate alla propria **solubilità**.

La barriera aria - sangue è costituita da:

- 1) Parete alveolare**
- 2) Lamine basali dell'epitelio alveolare e capillare**
- 3) Endotelio capillare**

Nella parete alveolare si distinguono cellule di due tipi:

1) PNEUMOCITI DI TIPO I : sono cellule sottili e appiattite in tutto il corpo, ingrossate solo nella parte che contiene il nucleo, povere di organuli, e perciò passive. Non oppongono notevoli resistenze alla diffusione dei gas.

2) PNEUMOCITI DI TIPO II : sono cellule più spesse e ricche di organuli rispetto ai pneumociti di tipo I, contengono i corpi osmiofili lamellati secernenti le lipoproteine che costituiscono il fattore tensioattivo surfattante. Questo fattore (in aggiunta alle funzioni precedentemente descritte), regola la presenza di H₂O a livello della superficie alveolare, limitandone l'eccesso.

L'endotelio dei capillari è costituito da cellule molto appiattite; il diametro è talmente ridotto che gli eritrociti fluiscono in fila semplice, uno ad uno, perchè il ogni eritrocita occupa quasi interamente il diametro capillare. Si verificano in tal modo condizioni favorevoli alla diffusione dei gas disciolti nel velo di H₂O della superficie alveolare.

Le cellule della barriera aria–sangue non intervengono quindi attivamente nella diffusione dei gas; il passaggio delle molecole è legato a fattori chimico–fisici.

Così, poiché la pressione parziale, o meglio la tensione di O₂ disciolto nel velo di H₂O alveolare è maggiore di quella del sangue venoso, per il fenomeno di diffusione semplice, O₂ diffonde nel sangue. Il fenomeno contrario avviene per CO₂.

	SANGUE	ARIA
O₂	40 mmHg	100 mmHg
CO₂	46 mmHg	40 mmHg

E' importante notare la differenza di gradiente di pressione tra O₂ (60 mmHg) e CO₂ (6 mmHg).

Tale differenza è dovuta alla diversa diffusività dei due gas: O₂ , essendo molto meno solubile, necessita di un gradiente 10 volte più elevato per poter diffondere.

Molteplici fattori influenzano la velocità di diffusione di O₂ e CO₂ :

1) GRADIENTE DI PRESSIONE (DP)

2) SUPERFICIE DI SCAMBIO (ossia l'area che deve essere attraversata dal gas)

3) SPESSORE DELLA PARETE ALVEOLARE

4) TEMPO DISPONIBILE PER LO SCAMBIO (ossia la velocità del sangue nel capillare).

5) DIMENSIONI MOLECOLARI DEL GAS

6) SOLUBILITA' DEL GAS NEL PLASMA

2 - 3 - 4 coincidono per O₂ e CO₂

5 è diverso per O₂ e CO₂, ma non in maniera rilevante

6 è un fattore particolarmente importante, perchè CO₂ è molto più solubile di O₂ nel liquido alveolare e nel sangue, e ciò spiega perchè le quantità di CO₂ scambiate sono uguali a quelle di O₂, anche in presenza di un gradiente pressorio molto minore.

SUPERFICIE DI SCAMBIO

L'area di scambio, costituita dalla somma delle superfici di tutti gli alveoli, va da 50 a 100 m², ma è molto variabile, con una media di 60-70 m².

Aumenta durante l'attività fisica, e diminuisce in condizioni di riposo. Varia ancora di più in condizioni patologiche, perchè alcune affezioni polmonari possono ridurre notevolmente la superficie alveolare.

TEMPO DI SCAMBIO

In condizioni di riposo, l'equilibrio tra la pO₂ dell'aria alveolare e quella del sangue capillare si raggiunge quando l'eritrocita è giunto a circa 1/3 dell'intero tragitto capillare, quindi in circa 0.25 secondi contro 0.75 secondi che costituiscono il tempo impiegato dall'eritrocita per compiere l'intero tragitto capillare.

Il tempo in esubero rappresenta un FATTORE DI SICUREZZA, perchè in alcune condizioni patologiche può accadere che occorra un tempo maggiore per raggiungere l'equilibrio delle pressioni parziali di O₂ dell'area alveolare e del sangue.

Secondo la legge di Fick, il volume di gas che nell'unità di tempo diffonde attraverso la lamina di un determinato tessuto, è direttamente proporzionale al gradiente pressorio e alla superficie di suddetta lamina, e inversamente proporzionale allo spessore della lamina.

$$\dot{V}_{\text{gas}} = A/S \times (p_1 - p_2) \times D$$

\dot{V}_{gas} = volume / minuto (velocità espressa come tale)

A = area della lamina

S = spessore della lamina

D = coefficiente di diffusione o DIFFUSIVITA'.

Tale coefficiente Indica la capacità di diffusione di un determinato gas attraverso i polmoni con quel determinato rapporto A/S. Per un dato tessuto la diffusività di un gas è direttamente proporzionale alla solubilità del gas e inversamente proporzionale al suo peso molecolare

$$D = \text{Solubilità del gas} / \sqrt{\text{Peso Molecolare}}$$

In un individuo normale, in condizioni fisiologiche, A / S si considera costante, perciò il flusso del gas dipende unicamente dalla differenza delle pressioni parziali e dalla diffusività del gas.

$$\dot{V}_{\text{gas}} = (p_1 - p_2) \cdot D$$
$$D = \dot{V} / p_1 - p_2$$

La capacità di diffusione polmonare di un gas è data dalla quantità di gas che nell'unità di tempo attraversa tutta la superficie alveolare quando la differenza tra la pressione parziale alveolare e la tensione del gas disciolto nel sangue è 1 mmHg

O₂ ha capacità di diffusione di 25 cm³/ minuto.

CO₂ ha capacità di diffusione di 500 cm³/ minuto.

Il motivo di questa notevole differenza è il fatto che, CO₂ è molto più solubile di O₂, circa 24 volte più solubile. Il risultato netto è che la velocità di diffusione di CO₂ attraverso una lamina di tessuto polmonare è 20 volte più grande di quella di O₂.