CAPITOLO

8

L'apparato respiratorio

Respiriamo circa ventimila volte al giorno senza pensarci, e ogni respiro è una piccola lezione di fisica dei gas e di chimica degli equilibri.

OBIETTIVI

1. Descrivere l'anatomia delle vie aeree e dei polmoni e collegare la struttura degli alveoli alla loro funzione.
2. Spiegare la meccanica della ventilazione con la legge di Boyle e leggere uno spirogramma.
3. Calcolare pressioni parziali con la legge di Dalton e spiegare gli scambi gassosi come diffusione.
4. Interpretare la curva di dissociazione dell'emoglobina e l'effetto Bohr e descrivere il trasporto del CO_2 e il suo legame con il pH del sangue.
5. Descrivere il controllo nervoso e chimico del respiro, l'adattamento all'alta quota e i principali rischi per la salute dei polmoni.

INDICE DEL CAPITOLO

8.1 Respirare: un lavoro in quattro tappe 2
8.2 Le vie aeree e i polmoni 3
8.3 La ventilazione polmonare 8
8.4 Gli scambi gassosi 13
8.5 Il trasporto dei gas nel sangue 16
8.6 Il controllo del respiro e la salute dei polmoni 21

Scienze naturali 4 · Parte III · Il corpo umano: nutrizione, scambi e difesa · versione 1.0
Capitolo 8: L'apparato respiratorio · pagine 225–252 del volume completo · estratto per lo studio

Prova a trattenere il respiro, seduto e all'asciutto. Dopo qualche decina di secondi lo stimolo a respirare diventa sempre più forte, finché non riesci più a resistere. Viene spontaneo pensare che sia la mancanza di ossigeno a costringerti; in realtà, in quel momento, il sangue che arriva al cervello contiene ancora molto ossigeno. A spingerti è soprattutto l'anidride carbonica, il diossido di carbonio che le cellule continuano a produrre e che si accumula nel sangue, abbassandone il pH.

In questo capitolo seguirai il viaggio dei gas respiratori dall'aria fino ai mitocondri e ritorno. Vedrai come il torace funziona da pompa grazie alla legge di Boyle, come la legge di Dalton spiega gli scambi negli alveoli, perché l'emoglobina ha una curva a forma di S e come il sangue trasporta CO_2 sotto forma di ioni idrogenocarbonato, collegandosi al tampone del sangue che hai studiato nel capitolo 4. Infine scoprirai chi decide il ritmo del respiro e quali sono i nemici principali dei nostri polmoni.

8.1 Respirare: un lavoro in quattro tappe

Nel linguaggio comune «respirare» vuol dire far entrare e uscire l'aria dai polmoni. Per un fisiologo la parola indica invece una catena di processi che porta l'ossigeno dall'atmosfera alle cellule e il diossido di carbonio nel verso opposto. Le tappe sono quattro:

- la **ventilazione polmonare**, cioè il movimento dell'aria fra l'ambiente e gli alveoli, prodotto dai muscoli respiratori;
- la **respirazione esterna**, lo scambio di O_2 e CO_2 fra l'aria degli alveoli e il sangue dei capillari polmonari;
- il trasporto dei gas nel sangue, dai polmoni ai tessuti e ritorno, affidato all'apparato cardiovascolare (cap. 9);
- la **respirazione interna**, lo scambio di gas fra il sangue dei capillari e le cellule dei tessuti.

Dentro le cellule l'ossigeno viene consumato dalla respirazione cellulare, che avviene nei mitocondri e produce il CO_2 da eliminare. Le prime quattro tappe esistono per servire questa quinta, e ciascuna dipende dalle altre: se la ventilazione si riduce, il CO_2 si accumula; se manca l'emoglobina, l'aria può essere ottima ma l'ossigeno non arriva ai tessuti.

DA RICORDARE

Richiamo · La respirazione cellulare. In *Scienze naturali 2*, cap. 5, hai visto che le cellule ossidano il glucosio e altre molecole organiche per ricavare l'energia che immagazzinano nell'ATP. In forma complessiva, $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$. L'ossigeno è l'accettore finale degli elettroni nei mitocondri: è una grande ossidoriduzione (cap. 5), e senza ossigeno la produzione di ATP crolla. Ogni molecola di ossigeno consumata dalle cellule è entrata da un respiro, e quasi ogni molecola di CO_2 prodotta ne uscirà con un altro.

8.2 Le vie aeree e i polmoni

L'apparato respiratorio comprende le vie aeree, che conducono l'aria, e i polmoni, dove avvengono gli scambi (Figura 8.1). Si distinguono le vie aeree superiori, dal naso alla laringe, e le vie aeree inferiori, dalla trachea ai bronchioli.

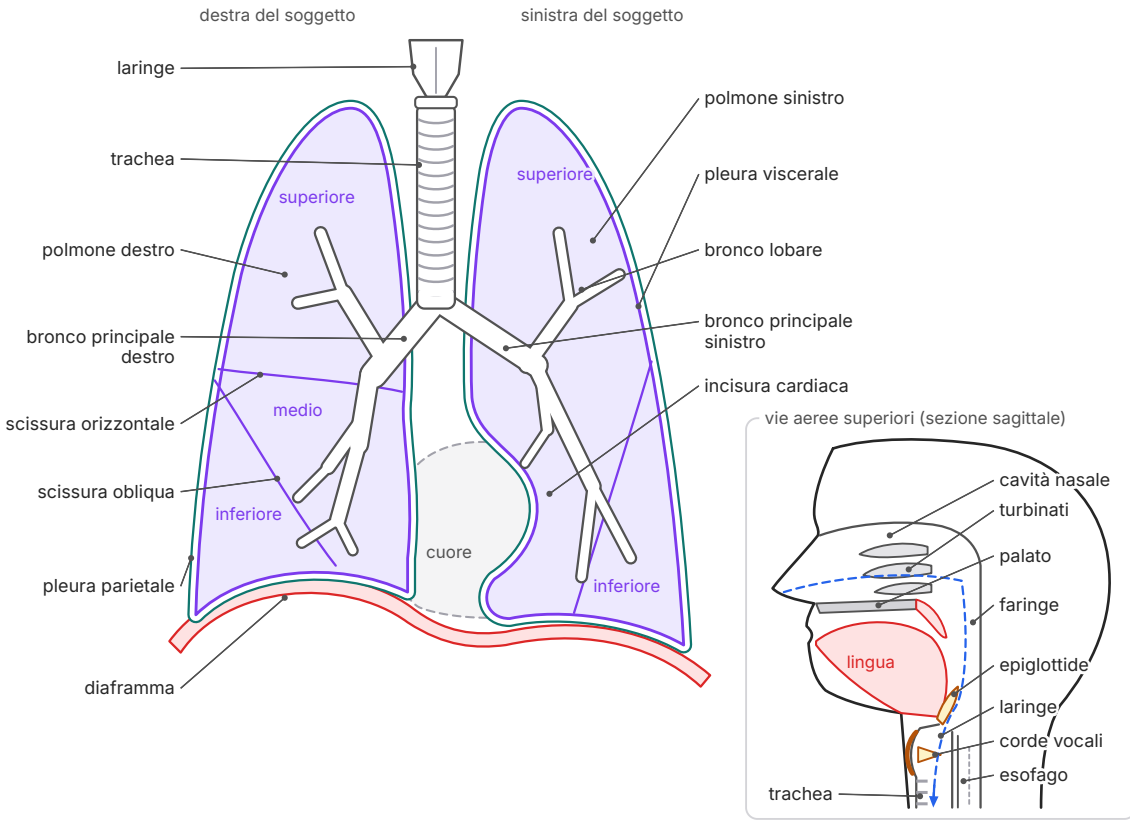


Figura 8.1 L'apparato respiratorio in visione anteriore (schema non in scala): la destra del soggetto è alla sinistra di chi guarda. Il polmone destro ha tre lobi, separati dalla scissura orizzontale e da quella obliqua; il sinistro ne ha due e presenta l'incisura cardiaca, dove si accoglie il cuore. Ogni polmone è avvolto dalla pleura viscerale; la pleura parietale riveste la parete del torace e il diaframma. Il bronco principale destro è più corto, più largo e più verticale del sinistro. Nel riquadro, le vie aeree superiori in sezione sagittale; la linea tratteggiata azzurra segue il percorso dell'aria.

8.2.1 Naso, faringe e laringe

L'aria entra di preferenza dalle narici e percorre le **cavità nasali**, divise dal setto nasale. Dalla parete laterale di ciascuna sporgono tre lamine ossee ricurve, i turbinati (o conche nasali), che aumentano la superficie della mucosa e rendono l'aria turbolenta. La mucosa è riccamente vascolarizzata e coperta di muco: l'aria si riscalda verso i 37 °C, si satura di vapore acqueo e lascia sul muco gran parte delle particelle di polvere. Respirando a lungo con la bocca, d'inverno, la gola si secca proprio perché questo condizionamento dell'aria non avviene.

Dalle cavità nasali l'aria passa nella **faringe**, un condotto muscolare che è un incrocio fra le vie dell'aria e quelle del cibo. Vi si distinguono la rinofaringe, dove si aprono le tube di Eusta-

chio che la collegano all'orecchio medio (cap. 13), l'orofaringe, dietro la bocca, e la laringofaringe, che continua in avanti nella laringe e indietro nell'esofago.

La **laringe** è un breve condotto sostenuto da cartilagini: la più grande, la cartilagine tiroidea, forma la sporgenza del collo detta «pomo d'Adamo». Durante la deglutizione la laringe si solleva e l'**epiglottide**, una lamina di cartilagine elastica, ne chiude l'ingresso, così che il cibo scivola nell'esofago (cap. 7). Se un frammento di cibo entra lo stesso nella laringe, un violento colpo di tosse cerca di espellerlo.

Nella laringe si trovano le **corde vocali** (o pieghe vocali), due pieghe della mucosa tese fra le cartilagini. A riposo sono divaricate e lasciano passare l'aria; quando parliamo, i muscoli laringei le avvicinano e l'aria espirata le fa vibrare. È la fonazione: la frequenza del suono cresce con la tensione delle corde e diminuisce con la loro lunghezza e massa, come per le corde di una chitarra. Alla pubertà, nei maschi, il testosterone fa crescere la laringe e le corde vocali si allungano: la voce «cambia» e si abbassa (cap. 14). Il suono prodotto nella laringe diventa parola grazie alla bocca, alla lingua, alle labbra e alle cavità di risonanza.

8.2.2 Trachea, bronchi e bronchioli

La **trachea** è un tubo lungo circa 12 cm e largo circa 2,5 cm, che scende davanti all'esofago. È tenuta aperta da 16–20 anelli di cartilagine ialina a forma di C, aperti all'indietro: la parte posteriore, senza cartilagine e con muscolo liscio, permette all'esofago di dilatarsi quando passa un boccone. La mucosa è un epitelio pseudostratificato ciliato con cellule caliciformi che producono muco (*Scienze naturali 3*, cap. 16): le particelle inalate restano intrappolate nel muco, e il battito coordinato delle ciglia lo spinge verso la faringe, dove viene deglutito. Questo «tappeto mobile» è la prima difesa dei polmoni.

All'altezza della quinta vertebra toracica circa, la trachea si divide nei due **bronchi** principali. Il destro è più corto, più largo e più verticale: per questo un piccolo oggetto inalato per errore, come una nocciolina, finisce più spesso nel polmone destro. Entrati nei polmoni, i bronchi si ramificano in bronchi lobari (tre a destra, due a sinistra), poi segmentali, sempre più sottili: dalla trachea agli alveoli si contano circa 23 generazioni di ramificazioni, un vero «albero bronchiale». Le diramazioni più sottili, con diametro inferiore a circa 1 mm, sono i **bronchioli**: non hanno cartilagine, ma una parete con molto muscolo liscio, che può restringerli o dilatarli, come vedrai a proposito dell'asma.

Fino ai bronchioli terminali le vie aeree servono solo a condurre l'aria: formano la zona di conduzione, nella quale non avvengono scambi. L'aria che riempie questi condotti, circa 150 mL in un adulto, è detta **spazio morto** anatomico: a ogni inspirazione è la prima ad arrivare agli alveoli, ma è aria già espirata. Dopo i bronchioli terminali comincia la zona respiratoria: bronchioli respiratori, dotti alveolari e sacchi alveolari, le cui pareti sono fatte di alveoli.

8.2.3 I polmoni e le pleure

I due polmoni occupano quasi tutta la cavità toracica. Fra di loro si trova il mediastino, che contiene il cuore, i grandi vasi, la trachea e l'esofago. Ogni polmone ha forma di cono: l'apice sale fino a poco sopra la clavicola, la base poggia sul diaframma. Il polmone destro ha tre lobi (superiore, medio e inferiore), il sinistro due, e il suo margine anteriore presenta l'incisura cardiaca, perché il cuore sporge verso sinistra. Sulla faccia mediale di ciascun polmone si trova l'ilo, dove entrano ed escono il bronco principale, le arterie e le vene polmonari, i vasi linfatici e i nervi.

Ogni polmone è avvolto da una membrana sierosa a due foglietti, la **pleura**. La pleura viscerale aderisce al polmone; la pleura parietale riveste la parete interna del torace e la faccia superiore del diaframma. Fra le due resta la cavità pleurica, uno spazio sottilissimo che contiene pochi millilitri di liquido pleurico. Il liquido riduce l'attrito e, soprattutto, tiene i due foglietti uniti come due vetrini bagnati, che scivolano l'uno sull'altro ma non si staccano: per questo i polmoni seguono i movimenti della parete del torace. Se l'aria entra nella cavità pleurica, per una ferita o la rottura di alveoli, l'adesione si perde e il polmone si affloscia: è lo pneumotorace.

8.2.4 Gli alveoli e la membrana respiratoria

Gli **alveoli** sono piccole cavità a forma di sacchetto, con un diametro di un paio di decimi di millimetro, raccolte a grappolo intorno ai dotti alveolari (Figura 8.2). Sono moltissimi: un conteggio accurato su polmoni di adulti ne ha stimati in media circa 480 milioni (Ochs e collaboratori, 2004), con grandi differenze fra persona e persona. Insieme offrono al sangue una superficie di scambio di circa 70 m^2, il valore riportato più spesso nei manuali: decine di volte la superficie della pelle.

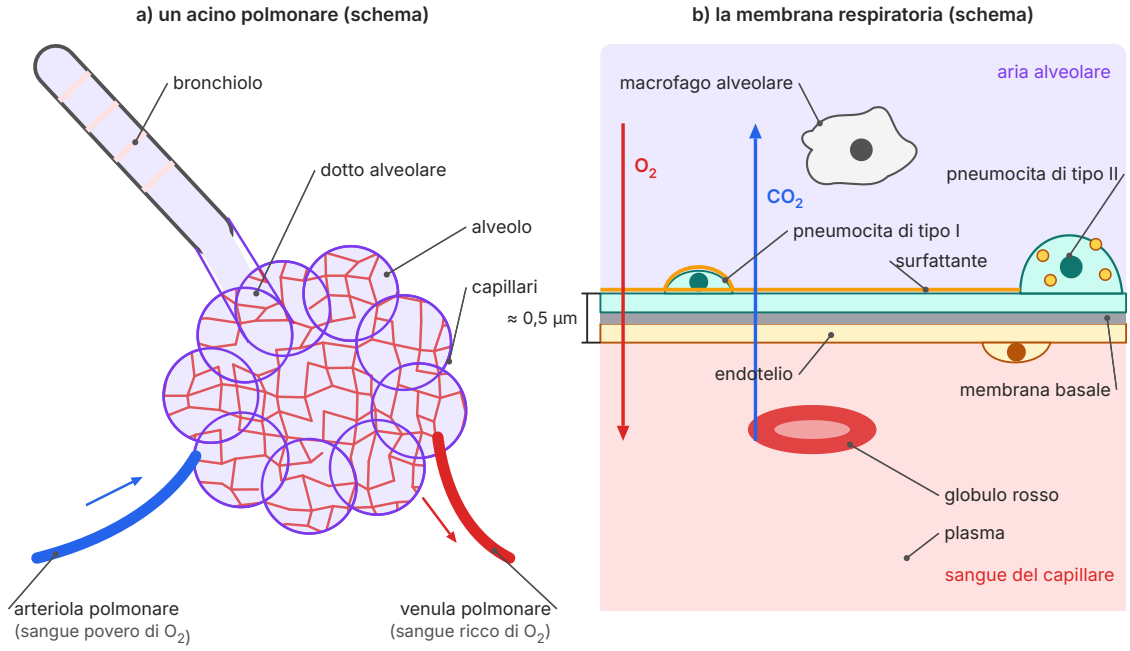


Figura 8.2 a) Un acino polmonare (schema non in scala): dal bronchiolo si passa al dotto alveolare e ai sacchi alveolari, avvolti da una fitta rete di capillari. L'arteriola polmonare porta sangue povero di ossigeno, la venula riporta sangue ossigenato. b) La parete fra l'aria e il sangue, molto ingrandita e non in scala. Il gas attraversa l'epitelio alveolare (pneumociti di tipo I), le membrane basali fuse e l'endotelio del capillare: in tutto circa 0,5 µm. I pneumociti di tipo II secernono il surfattante; i macrofagi alveolari ripuliscono la superficie degli alveoli.

La parete di un alveolo è formata soprattutto da cellule sottilissime e appiattite, i **pneumociti** di tipo I, attraverso i quali avvengono gli scambi. Fra di essi si trovano i pneumociti di tipo II, più tondeggianti, che producono il **surfattante**, una miscela di fosfolipidi e proteine che forma un velo sulla superficie interna degli alveoli. Il velo d'acqua che bagna gli alveoli ha una tensione superficiale che tenderebbe a farli chiudere, come una bolla che si sgonfia; il surfattante la riduce e impedisce che gli alveoli più piccoli collassino in espirazione. Nei neonati molto prematuri il surfattante può essere insufficiente, e la respirazione diventa faticosa: è la sindrome da distress respiratorio neonatale, che oggi si cura anche somministrando surfattante. Sulla superficie degli alveoli si muovono infine i macrofagi alveolari, cellule del sistema immunitario che inglobano le particelle e i batteri sfuggiti alle difese delle vie aeree (cap. 10).

Ogni alveolo è avvolto da una rete di capillari polmonari. Fra l'aria e il sangue restano solo tre strati: l'epitelio alveolare, le membrane basali fuse dell'epitelio e del capillare, e l'endotelio del capillare. Insieme formano la **membrana respiratoria**, spessa in media circa 0,5 µm, molto meno del diametro di un globulo rosso (circa 7,5 µm). Una superficie enorme e una barriera sottilissima: sono proprio le due condizioni che rendono veloce la diffusione, come vedrai nel paragrafo sugli scambi gassosi.

8.3 La ventilazione polmonare

8.3.1 Muscoli e pressioni

I polmoni non hanno muscoli: si espandono e si svuotano perché cambia il volume della cavità toracica che li contiene. Il principio è quello della legge di Boyle, che hai incontrato in *Scienze naturali 3*, cap. 2, come caso particolare dell'equazione dei gas ideali $PV = nRT$: per una quantità fissa di gas a temperatura costante, la pressione è inversamente proporzionale al volume,

$$P_1V_1 = P_2V_2 \ (n \text{ e } T \text{ costanti})$$

Inoltre un gas si sposta sempre dalla regione a pressione maggiore a quella a pressione minore. Basta quindi aumentare il volume degli alveoli perché la loro pressione scenda sotto quella atmosferica e l'aria entri; basta ridurlo perché l'aria esca (Figura 8.3). In fisiologia le pressioni si misurano in millimetri di mercurio: 1 mmHg = 133,3 Pa, e la pressione atmosferica normale è 760 mmHg.

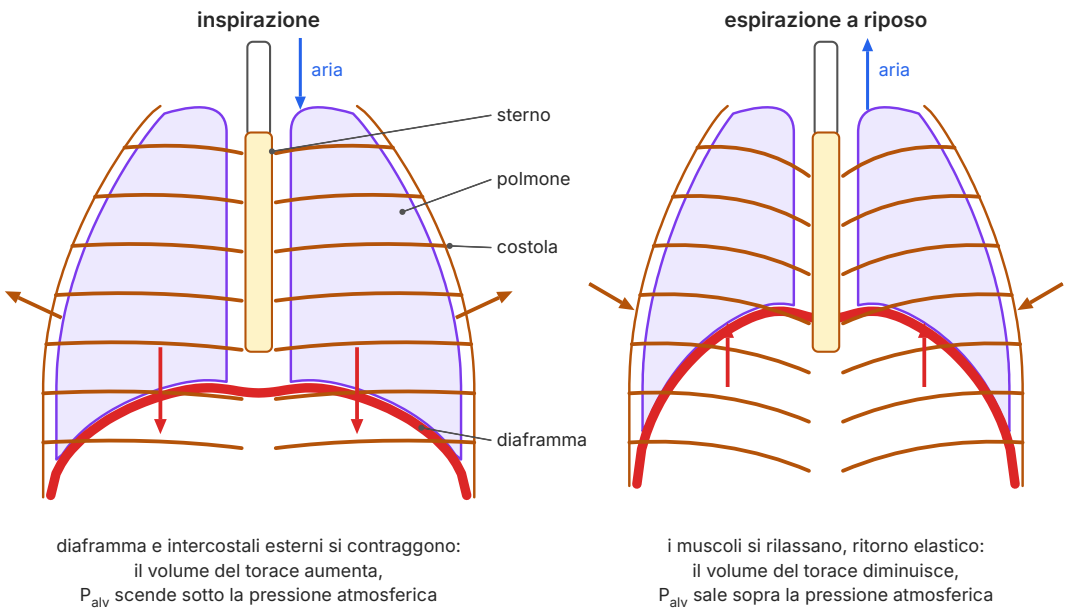


Figura 8.3 La meccanica respiratoria (schema frontale non in scala). In inspirazione il diaframma si contrae e si abbassa, appiattendo le sue due cupole, e i muscoli intercostali esterni sollevano le costole e lo sterno: il torace si allarga in tutte le direzioni. Nell'espirazione a riposo i muscoli si rilassano e il ritorno elastico dei polmoni riporta il torace al volume iniziale. P_{alv} è la pressione dell'aria negli alveoli.

L'inspirazione è sempre un processo attivo. Il muscolo principale è il **diaframma**, una lamina di muscolo scheletrico a forma di doppia cupola che separa il torace dall'addome. Quando si contrae, stimolato dai nervi frenici, le cupole si abbassano e si appiattiscono e il torace si allunga verso il basso: nella respirazione tranquilla il diaframma produce circa tre quarti dell'aumento di volume. Il resto è opera dei muscoli intercostali esterni, che sollevano le costole e spingono in avanti lo sterno. I polmoni, uniti alla parete dal liquido pleurico, seguono il torace: la pressione negli alveoli scende di circa 1–2 mmHg sotto quella atmosferica e l'aria entra, finché le due pressioni non tornano uguali.

L'espirazione a riposo è invece passiva. I muscoli si rilassano e i polmoni, ricchi di fibre elastiche e tesi dalla tensione superficiale degli alveoli, tornano indietro come un elastico: il volume si riduce, la pressione alveolare sale di circa 1 mmHg sopra quella atmosferica e l'aria esce. Durante uno sforzo, quando bisogna espirare in fretta e a fondo, intervengono i muscoli intercostali interni, che abbassano le costole, e i muscoli addominali, che spingono i visceri contro il diaframma. Anche l'inspirazione forzata recluta muscoli accessori del collo, come gli scaleni e gli sternocleidomastoidei.

Nella cavità pleurica la pressione resta sempre un po' più bassa di quella degli alveoli: a riposo circa 4 mmHg sotto la pressione atmosferica. È questa piccola differenza a mantenere i polmoni distesi contro la parete del torace, anche alla fine di un'espirazione.

ERRORE FREQUENTE

«Inspirando spingiamo l'aria nei polmoni». I muscoli respiratori non spingono l'aria: allargano il torace. La pressione negli alveoli diventa così più bassa di quella atmosferica, ed è l'atmosfera a spingere l'aria dentro, lungo le vie aeree, come in una siringa di cui si tira lo stantuffo. Allo stesso modo, i polmoni non «si gonfiano» da soli: seguono la parete del torace, perché le pleure restano unite dal liquido pleurico. Se la parete si apre, come nello pneumotorace, il polmone non segue più il torace e si affloscia.

ESEMPIO SVOLTO

Quanto basta per far entrare l'aria

Problema. Alla fine di un'espirazione tranquilla polmoni e vie aeree contengono 2,40 L di aria alla pressione atmosferica, 760 mmHg. Supponi che il diaframma aumenti il volume di 12 mL prima che entri aria. Quale pressione raggiunge l'aria nei polmoni, se la temperatura resta costante?

Soluzione. La quantità di gas e la temperatura non cambiano, quindi vale la legge di Boyle con $V_1 = 2{,}40\ \text{L}$, $V_2 = 2{,}40\ \text{L} + 0{,}012\ \text{L} = 2{,}412\ \text{L}$:

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{760\ \text{mmHg} \times 2{,}40\ \text{L}}{2{,}412\ \text{L}} = 756{,}2\ \text{mmHg}$$

Risultato. La pressione scende di circa 3,8 mmHg sotto quella atmosferica, a fronte di un aumento di volume di appena lo 0,5 %. Una differenza di pochi millimetri di mercurio basta a far entrare l'aria: nella respirazione vera il volume cresce e l'aria entra contemporaneamente, e la pressione alveolare si discosta da quella atmosferica solo di 1–2 mmHg.

8.3.2 Volumi e capacità polmonari

I volumi d'aria mobilizzati con il respiro si misurano con uno **spirometro**, uno strumento che registra il volume di aria inspirata ed espirata in funzione del tempo; il grafico che ne risulta è lo spirogramma (Figura 8.4). In un respiro tranquillo un adulto muove circa mezzo litro d'aria: è il **volume corrente**. Con un'inspirazione forzata si possono aggiungere circa 3 L (volume di riserva inspiratoria), con un'espirazione forzata si possono espellere ancora circa 1,2 L (volume di riserva espiratoria). Neppure l'espirazione più forte svuota i polmoni: vi resta il **volume residuo**, circa 1,2 L, che lo spirometro non può misurare perché quest'aria non esce mai.

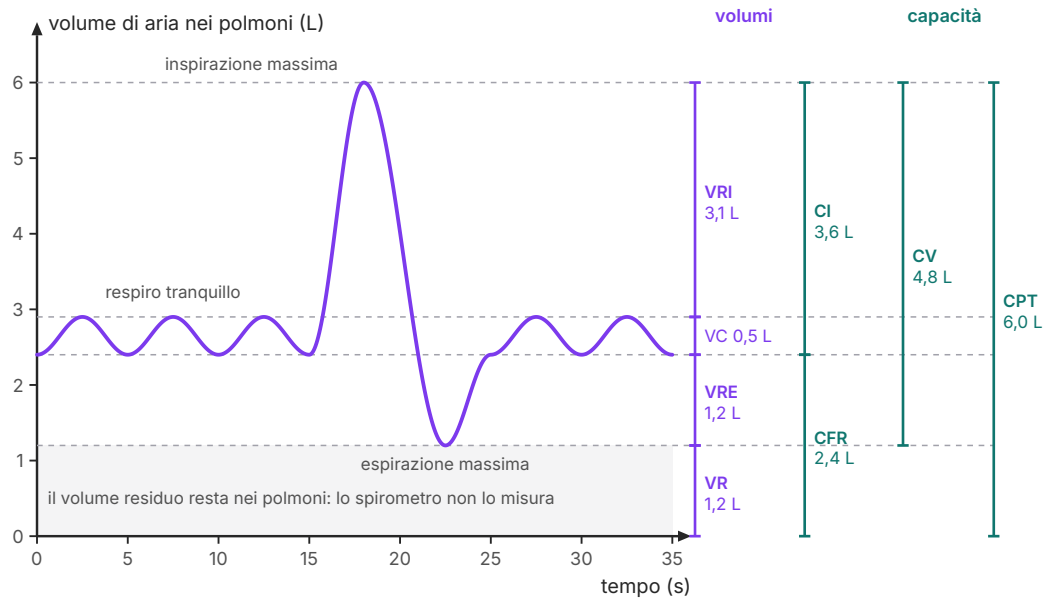


Figura 8.4 Spirogramma calcolato con i valori tipici di un giovane adulto maschio (Tabella 8.1): tre respiri tranquilli, un'inspirazione massima seguita da un'espirazione massima, poi di nuovo respiri tranquilli, a 12 atti al minuto. A destra i volumi (VC volume corrente, VRI e VRE volumi di riserva inspiratoria ed espiratoria, VR volume residuo) e le capacità, che sono somme di volumi (CI inspiratoria, CFR funzionale residua, CV vitale, CPT polmonare totale). La zona grigia corrisponde al volume residuo.

Sommando i volumi si ottengono le capacità. La più usata è la **capacità vitale**, il volume massimo che si può espirare dopo un'inspirazione massima: volume corrente più i due volumi di riserva, circa 4,8 L nel nostro esempio. La capacità polmonare totale aggiunge il volume residuo. I valori della Tabella 8.1 sono tipici di un giovane uomo: dipendono dalla statura, dall'età e dal sesso, e nelle donne sono in media più bassi. Per questo, in una visita medica, i risultati di una spirometria si confrontano con valori di riferimento calcolati per persone della stessa statura, età e sesso.

Tabella 8.1 Volumi e capacità polmonari: valori tipici, arrotondati, di un giovane adulto maschio a riposo [TOR].

Grandezza	Definizione	Valore tipico (L)
volume corrente (VC)	aria inspirata o espirata in un respiro tranquillo	0,5
volume di riserva inspiratoria (VRI)	aria che si può ancora inspirare dopo un'inspirazione normale	3,1
volume di riserva espiratoria (VRE)	aria che si può ancora espirare dopo un'espirazione normale	1,2
volume residuo (VR)	aria che resta nei polmoni dopo un'espirazione massima	1,2
capacità inspiratoria (CI)	VC + VRI	3,6
capacità funzionale residua (CFR)	VRE + VR: aria nei polmoni alla fine di un'espirazione normale	2,4
capacità vitale (CV)	VC + VRI + VRE	4,8
capacità polmonare totale (CPT)	CV + VR	6,0

A riposo un adulto compie circa 12–20 atti respiratori al minuto. Il prodotto del volume corrente per la frequenza respiratoria f è la ventilazione polmonare al minuto, $V_E = V_C \cdot f$: con 0,5 L e 12 atti/min fanno 6 L/min. Non tutta quest'aria però raggiunge gli alveoli, perché a ogni respiro circa 0,15 L restano nello spazio morto. L'aria nuova che arriva davvero agli alveoli è la ventilazione alveolare, $V_A = (V_C - V_D) \cdot f$, che conta per gli scambi.

ESEMPIO SVOLTO

Respiro rapido e superficiale o lento e profondo?

Problema. Due persone ventilano entrambe 6,0 L/min: la prima con 20 respiri al minuto da 0,30 L, la seconda con 10 respiri al minuto da 0,60 L. Lo spazio morto è 0,15 L per entrambe. Quale delle due rinnova di più l'aria degli alveoli?

Soluzione. La ventilazione al minuto è uguale: 0,30 L × 20 /min = 0,60 L × 10 /min = 6,0 L/min. La ventilazione alveolare invece è

- prima persona: $V_A = (0{,}30\ \text{L} - 0{,}15\ \text{L}) \times 20\ /\text{min} = 3{,}0\ \text{L/min}$;
- seconda persona: $V_A = (0{,}60\ \text{L} - 0{,}15\ \text{L}) \times 10\ /\text{min} = 4{,}5\ \text{L/min}$.

Risultato. Con il respiro lento e profondo arriva agli alveoli il 50 % di aria nuova in più. Nel respiro superficiale una parte grande di ogni atto si limita a spostare l'aria dello spazio morto avanti e indietro. Per questo, durante uno sforzo, l'organismo aumenta prima di tutto la profondità del respiro, e solo dopo la frequenza.

ESPERIENZA DI LABORATORIO

Misura la tua capacità vitale

Obiettivo. Misurare il volume corrente e la capacità vitale con uno spirometro a bottiglia rovesciata e confrontare i risultati della classe.

Materiale. Una bottiglia di plastica da 5 L, un cilindro graduato da 250 mL, un pennarello indelebile, una bacinella grande, un tubo di gomma o di silicone lungo circa 60 cm, boccagli monouso (uno per studente), un panno per asciugare.

Procedimento. 1) Gradua la bottiglia: versa l'acqua 250 mL alla volta e segna ogni livello. 2) Riempi la bottiglia d'acqua fino all'orlo, chiudila con la mano, capovolgila nella bacinella mezza piena e togli la mano sott'acqua; fai entrare nella bottiglia un'estremità del tubo e inserisci il boccaglio nell'altra. 3) Dopo un'inspirazione normale, espira normalmente nel tubo: l'aria che sposta l'acqua è il volume corrente. Rimetti la bottiglia piena e ripeti. 4) Inspira il più profondamente possibile ed espira tutta l'aria che puoi nel tubo, senza fretta: il volume letto è la capacità vitale. Ripeti tre volte e tieni il valore più alto. 5) Raccogli in una tabella i risultati della classe insieme alla statura di ciascuno.

Sicurezza. Ognuno usa il proprio boccaglio, che alla fine si getta; nel tubo si soffia soltanto, senza mai inspirare (si aspirerebbe acqua). Chi ha l'asma o un raffreddore non partecipa alla prova forzata. Se durante le prove senti un capogiro, fermati e siediti. L'acqua versata sul pavimento va asciugata subito, perché rende scivoloso il laboratorio.

Risultato atteso. Il volume corrente è dell'ordine di mezzo litro; la capacità vitale di uno studente è di qualche litro, di solito più grande nei ragazzi più alti. Il valore misurato è un po' sottostimato, perché l'aria espirata si raffredda nella bottiglia e si contrae.

Domande. 1) Quale volume polmonare questo strumento non potrà mai misurare, e perché? 2) Che relazione trovi, nella classe, fra statura e capacità vitale? 3) Perché si ripete la prova tre volte e si tiene il valore massimo, invece della media?

8.4 Gli scambi gassosi

8.4.1 Le pressioni parziali

Per descrivere gli scambi di gas fra aria, sangue e tessuti non si usano le concentrazioni ma le pressioni parziali. In *Scienze naturali 3*, cap. 2, hai visto la legge di Dalton: in una miscela di gas la pressione totale è la somma delle pressioni parziali, e la pressione parziale di ciascun gas è proporzionale alla sua frazione molare χ_i:

$$P_i = \chi_i \cdot P_{tot}$$

L'aria secca contiene il 78,08 % di azoto, il 20,95 % di ossigeno, lo 0,93 % di argo e circa lo 0,04 % di diossido di carbonio (in moli, cioè in volume). Al livello del mare la pressione parziale

dell'ossigeno nell'aria inspirata è quindi $PO_2 = 0{,}2095 \times 760$ mmHg ≈ 159 mmHg, quella del diossido di carbonio $PCO_2 = 0{,}0004 \times 760$ mmHg $\approx 0{,}3$ mmHg. Nelle vie aeree l'aria si satura di vapore acqueo, che a 37 °C ha una pressione di 47 mmHg: restano $760 - 47 = 713$ mmHg per gli altri gas, e la PO_2 scende a $0{,}2095 \times 713 \approx 149$ mmHg.

Negli alveoli la PO_2 è ancora più bassa, circa 100 mmHg, e la PCO_2 è molto più alta, circa 40 mmHg. Le ragioni sono due. A ogni respiro entrano negli alveoli soltanto circa 0,35 L di aria nuova, che si mescolano con i circa 2,4 L rimasti nei polmoni (la capacità funzionale residua): l'aria alveolare si rinnova poco alla volta. Intanto il sangue sottrae continuamente ossigeno agli alveoli e vi cede CO_2. La composizione dell'aria alveolare è così un equilibrio dinamico fra la ventilazione, che porta ossigeno e porta via CO_2, e il sangue, che fa il contrario. Questa stabilità è preziosa: la PO_2 e la PCO_2 alveolari cambiano di poco fra un respiro e l'altro.

ESEMPIO SVOLTO

L'ossigeno in alta quota

Problema. La Capanna Regina Margherita, il rifugio sul Monte Rosa che ospita anche un laboratorio di fisiologia d'alta quota, si trova a 4554 m. Secondo l'atmosfera standard internazionale, un modello medio dell'atmosfera, a quella quota la pressione è circa 430 mmHg. Calcola la PO_2 dell'aria secca e quella dell'aria nella trachea, satura di vapore a 37 °C, e confrontale con i valori al livello del mare.

Soluzione. La frazione di ossigeno nell'aria non cambia con la quota: è sempre 20,95 %. Cambia la pressione totale.

- aria secca: $PO_2 = 0{,}2095 \times 430$ mmHg ≈ 90 mmHg (al livello del mare 159 mmHg);
- aria nella trachea: $PO_2 = 0{,}2095 \times (430 - 47)$ mmHg ≈ 80 mmHg (al livello del mare 149 mmHg).

Risultato. In quota l'ossigeno nella trachea ha una pressione parziale di poco più della metà di quella al livello del mare ($80/149 \approx 0{,}54$). La pressione del vapore acqueo resta 47 mmHg a qualsiasi quota, perché dipende soltanto dalla temperatura del corpo: per questo il suo peso relativo cresce man mano che si sale. La pressione reale cambia anche con il tempo meteorologico e la latitudine, per cui questi valori sono indicativi.

8.4.2 La diffusione attraverso la membrana respiratoria

Gli scambi gassosi avvengono per semplice diffusione, senza alcun trasporto attivo (*Scienze naturali 2*, cap. 4): ogni gas si sposta dalla zona in cui la sua pressione parziale è maggiore a quella in cui è minore, indipendentemente dagli altri gas. La velocità della diffusione è tanto maggiore quanto più grandi sono la superficie e la differenza di pressione parziale, e quanto più sottile è la barriera da attraversare: le tre caratteristiche che hai trovato negli alveoli.

La Figura 8.5 riassume le pressioni parziali lungo il percorso. Il sangue che arriva ai capillari polmonari dall'arteria polmonare, povero di ossigeno, ha una PO_2 di circa 40 mmHg e una PCO_2

di circa 46 mmHg. Negli alveoli l'ossigeno trova una differenza di circa 60 mmHg e passa nel sangue; il CO_2 trova una differenza di soli 6 mmHg e passa negli alveoli. Questa differenza piccola basta, perché il CO_2 è molto più solubile in acqua dell'ossigeno e attraversa la membrana con grande facilità. A riposo un globulo rosso resta in un capillare polmonare per meno di un secondo, ma il sangue si mette in equilibrio con l'aria alveolare già nel primo terzo di questo tempo: rimane un ampio margine di sicurezza, utile durante uno sforzo, quando il sangue scorre più in fretta.

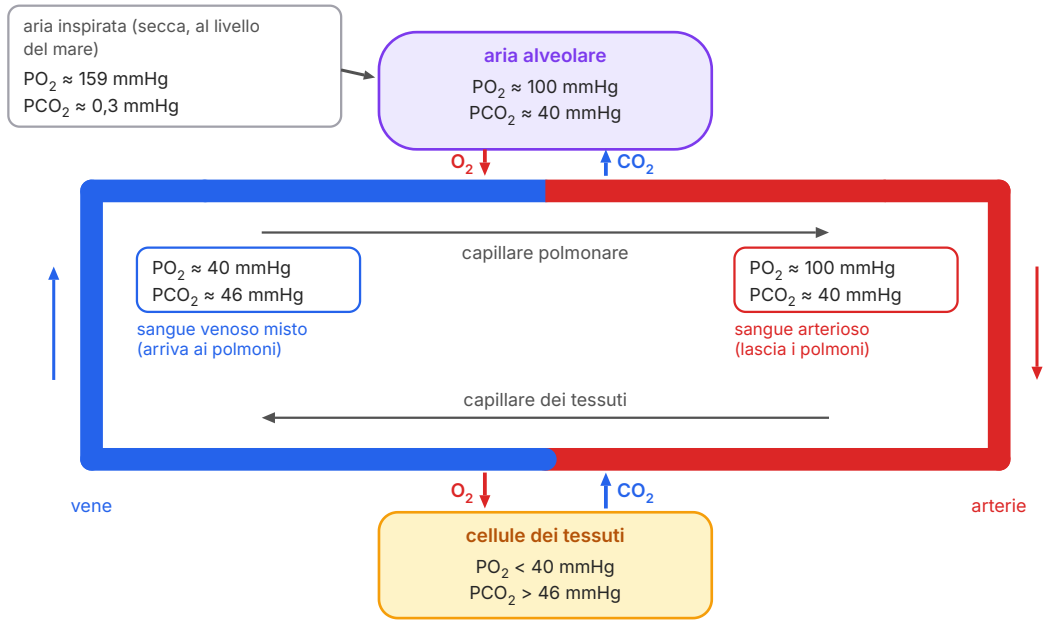


Figura 8.5 Le pressioni parziali di O_2 e di CO_2 lungo il percorso dei gas, a riposo e al livello del mare (valori tipici arrotondati, in mmHg; schema: il cuore non è rappresentato). In ogni punto ciascun gas diffonde verso la pressione parziale minore: l'ossigeno dagli alveoli al sangue e dal sangue alle cellule, il CO_2 in senso opposto. In rosso il sangue ricco di ossigeno, in blu quello povero di ossigeno.

Nei tessuti avviene lo scambio opposto. Le cellule consumano ossigeno e producono CO_2, per cui nel liquido che le circonda la PO_2 è di 40 mmHg o meno e la PCO_2 di 46 mmHg o più; in un muscolo che lavora la differenza è ancora maggiore. L'ossigeno passa dal sangue arterioso alle cellule, il CO_2 dalle cellule al sangue, che torna verso il cuore con i valori del sangue venoso. Nota che il nome dei vasi non dipende dal loro contenuto di ossigeno: le arterie polmonari portano sangue povero di ossigeno dal cuore ai polmoni, le vene polmonari riportano al cuore sangue ossigenato (cap. 9).

8.5 Il trasporto dei gas nel sangue

8.5.1 L'emoglobina

L'ossigeno è poco solubile in acqua: alla PO_2 degli alveoli 100 mL di sangue ne sciolgono appena 0,3 mL circa. Se dovessimo contare solo sull'ossigeno disciolto, il cuore dovrebbe pompare decine di volte più sangue. Il problema è risolto dall'**emoglobina** (Hb), la proteina che riempie i globuli rossi. È un tetramero formato da quattro catene polipeptidiche, due α e due β: un esempio di struttura quaternaria (*Scienze naturali 3*, cap. 14). Ogni catena porta un gruppo eme, un anello organico con al centro uno ione ferro Fe^{2+}, che lega in modo reversibile una molecola di O_2. Una molecola di emoglobina può quindi trasportare fino a quattro molecole di ossigeno.

Il sangue contiene circa 12–17 g di emoglobina per decilitro, in media di più negli uomini, e ogni grammo può legare circa 1,34 mL di ossigeno. Con 15 g/dL il sangue può trasportare fino a circa 20 mL di O_2 per decilitro legati all'emoglobina, contro 0,3 mL disciolti: circa il 98 % dell'ossigeno viaggia legato all'emoglobina. La frazione dei siti di legame occupati dall'ossigeno è la **saturazione** dell'emoglobina, espressa in percentuale; è il valore che il saturimetro, la piccola pinza da dito usata in ospedale e in farmacia, stima dal colore del sangue che attraversa il dito.

8.5.2 La curva di dissociazione

Come varia la saturazione con la PO_2? Il grafico che lo mostra è la **curva di dissociazione dell'emoglobina** (Figura 8.6), e non è una retta: ha una forma a S, sigmoide. La forma nasce dalla **cooperatività** fra le quattro subunità. Quando una molecola di ossigeno si lega a una subunità, la forma dell'intera proteina cambia leggermente e le altre subunità legano l'ossigeno con più facilità; viceversa, quando una molecola se ne va, anche le altre si staccano più facilmente. Nel 1910 il fisiologo inglese Archibald V. Hill propose di descrivere la curva con un'equazione empirica,

$$S = \frac{PO_2{}^{n}}{P_{50}{}^{n} + PO_2{}^{n}}$$

dove S è la saturazione (fra 0 e 1), P_{50} è la PO_2 alla quale l'emoglobina è saturata per metà, circa 27 mmHg nel sangue umano, e $n \approx 2{,}7$ misura la cooperatività: con $n = 1$, senza cooperatività, la curva sarebbe un ramo di iperbole. Il modello di Hill è un'approssimazione, ma riproduce bene la curva reale nell'intervallo che interessa il corpo.

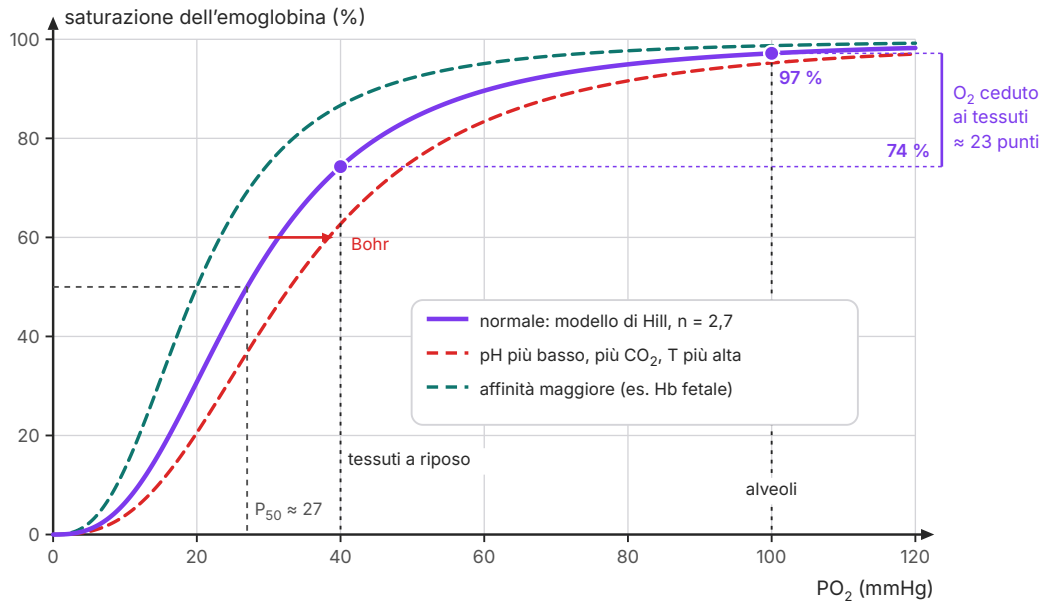


Figura 8.6 Curva di dissociazione dell'emoglobina calcolata con il modello di Hill (n = 2,7, P_{50} = 27 mmHg). Negli alveoli (PO_2 ≈ 100 mmHg) l'emoglobina è saturata al 97 %; nei tessuti a riposo (PO_2 ≈ 40 mmHg) al 74 %. La curva tratteggiata rossa (P_{50} = 33 mmHg) mostra lo spostamento a destra dovuto all'effetto Bohr; quella verde acqua (P_{50} = 20 mmHg) una curva spostata a sinistra, come quella dell'emoglobina fetale. Curve illustrative.

La forma a S è perfetta per il suo lavoro. Nella parte alta la curva è quasi piatta: fra 100 e 60 mmHg la saturazione passa soltanto dal 97 % al 90 % circa. Anche se la PO_2 alveolare scende, per esempio in collina o per una malattia polmonare lieve, il sangue lascia i polmoni quasi saturo. Nella parte centrale, fra 10 e 40 mmHg, la curva è invece ripida: piccole diminuzioni della PO_2 nei tessuti liberano molto ossigeno. A riposo il sangue venoso è ancora saturato al 74 % circa, perché i tessuti usano solo circa un quarto dell'ossigeno disponibile; il resto è una riserva, che un muscolo al lavoro, dove la PO_2 può scendere a 20 mmHg, sfrutta in pieno.

ESEMPIO SVOLTO

Quanto ossigeno consegna il sangue

Problema. Un adulto ha 15 g/dL di emoglobina; il suo sangue arterioso è saturato al 97 % e quello venoso al 74 %. Ogni grammo di emoglobina saturata lega 1,34 mL di O_2. Quanto ossigeno cedono ai tessuti 100 mL di sangue? Quanto ne ricevono i tessuti in un minuto, se il cuore pompa 5,0 L di sangue al minuto?

Soluzione. L'ossigeno legato all'emoglobina in un decilitro di sangue è 15 g × 1,34 mL/g × S:

- sangue arterioso: $15 \times 1{,}34 \times 0{,}97 \approx 19{,}5$ mL di O_2 per decilitro;
- sangue venoso: $15 \times 1{,}34 \times 0{,}74 \approx 14{,}9$ mL di O_2 per decilitro;
- ossigeno ceduto: $19{,}5 - 14{,}9 \approx 4{,}6$ mL per decilitro di sangue.

In un minuto passano 5,0 L = 50 dL di sangue, quindi i tessuti ricevono $50 \times 4{,}6$ mL $\approx 2{,}3 \times 10^2$ mL di ossigeno. L'ossigeno disciolto (0,3 mL/dL nel sangue arterioso, circa 0,1 mL/dL in quello venoso) cambierebbe il risultato di meno del 5 %.

Risultato. A riposo i tessuti ricevono circa 230 mL di ossigeno al minuto, un valore vicino al consumo di ossigeno di un adulto a riposo. Il sangue venoso torna al cuore con circa tre quarti del suo ossigeno.

8.5.3 L'effetto Bohr e le altre emoglobine

La curva di dissociazione non è fissa. Nel 1904 il fisiologo danese Christian Bohr, con Karl Hasselbalch e August Krogh, osservò che il CO_2 riduce l'affinità dell'emoglobina per l'ossigeno. Oggi sappiamo che la curva si sposta a destra quando il pH diminuisce, quando la PCO_2 aumenta e quando la temperatura sale: è l'**effetto Bohr**. Gli ioni H^+ si legano all'emoglobina e favoriscono la forma che trattiene meno ossigeno; in forma semplificata,

$$HbO_2 + H^+ \rightleftarrows HHb^+ + O_2$$

e, per il principio di Le Châtelier (cap. 3), un aumento di H^+ sposta l'equilibrio verso destra e libera ossigeno. Proprio nei tessuti più attivi, che producono più CO_2 e più acido e sono più caldi, l'emoglobina cede più ossigeno: a una PO_2 di 40 mmHg, con la curva rossa della Figura 8.6, la saturazione scende al 63 % invece che al 74 %. Nei polmoni, dove il CO_2 se ne va e il pH sale, la curva torna a sinistra e l'emoglobina lega di nuovo l'ossigeno.

Altre proteine simili all'emoglobina hanno curve diverse. La **mioglobina** dei muscoli è formata da una sola catena con un solo gruppo eme: non è cooperativa, ha una curva iperbolica e un'affinità per l'ossigeno molto più alta dell'emoglobina, per cui riceve ossigeno dal sangue e lo tiene in riserva nella fibra muscolare. L'emoglobina fetale, formata da due catene α e due catene γ, ha una curva spostata a sinistra: nella placenta può così sottrarre ossigeno al sangue della madre (cap. 14).

COLLEGAMENTI

Chimica · Il monossido di carbonio, un equilibrio conteso. Il monossido di carbonio, CO, si forma nelle combustioni incomplete (cap. 6): stufe e caldaie mal regolate, bracieri in ambienti chiusi, gas di scarico, fumo di sigaretta. È un gas senza colore né odore, e si lega al ferro dell'eme nello stesso sito dell'ossigeno, con un'affinità circa 200 volte maggiore. L'equilibrio $HbO_2 + CO \rightleftarrows HbCO + O_2$ è quindi molto spostato verso destra: anche una piccola frazione di CO nell'aria occupa molti siti dell'emoglobina, e in più fa trattenere più saldamente l'ossigeno ai siti rimasti liberi. Il sangue resta rosso vivo, ma i tessuti ricevono meno ossigeno: mal di testa, nausea, sonnolenza, fino alla perdita di coscienza.

Il principio di Le Châtelier (cap. 3) indica anche la cura: aumentare la PO_2, prima con ossigeno puro e nei casi gravi in camera iperbarica, sposta l'equilibrio verso sinistra e libera più in fretta l'emoglobina dal CO. La prevenzione è semplice: controllo periodico degli impianti, aerazione dei locali, rivelatori di monossido di carbonio vicino agli apparecchi a combustione.

8.5.4 Il trasporto del diossido di carbonio

Il CO_2 prodotto dalle cellule viaggia nel sangue in tre forme (Figura 8.7; quote tipiche dei manuali, arrotondate):

- circa il **7 %** è disciolto nel plasma, perché il CO_2 è circa venti volte più solubile in acqua dell'ossigeno;
- circa il **23 %** si lega ai gruppi amminici delle catene dell'emoglobina, non all'eme, formando la **carbaminoemoglobina** ($HbCO_2$);
- circa il **70 %** viaggia sotto forma di ioni idrogenocarbonato, HCO_3^-, disciolti nel plasma.

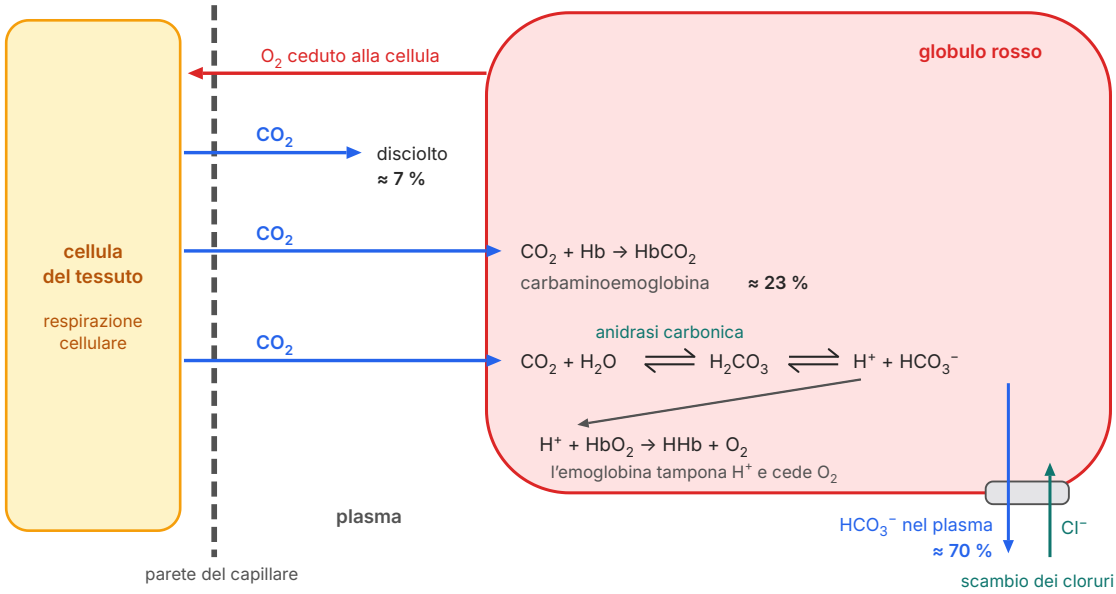


Figura 8.7 Il trasporto del CO_2 nei capillari dei tessuti (schema non in scala). Il CO_2 prodotto dalle cellule diffonde nel plasma e nei globuli rossi. Nel globulo rosso l'anidrasi carbonica accelera la formazione di acido carbonico, che si ionizza; l'emoglobina lega gli ioni H^+ e cede l'ossigeno; gli ioni HCO_3^- escono nel plasma in cambio di ioni Cl^-. Nei capillari polmonari tutte queste reazioni procedono in senso inverso e il CO_2 torna negli alveoli.

La terza via è la più importante e passa per una reazione che conosci dal capitolo 4:

$$CO_2 + H_2O \rightleftarrows H_2CO_3 \rightleftarrows H^+ + HCO_3^-$$

Nel plasma la prima reazione è lenta; nei globuli rossi invece c'è l'**anidrasi carbonica**, un enzima che la accelera enormemente. Il CO_2 che entra nei globuli rossi si trasforma rapidamente in acido carbonico, che si ionizza subito. Gli ioni H^+ vengono legati dall'emoglobina, che li tampona e, per l'effetto Bohr, cede ossigeno; gli ioni HCO_3^- escono nel plasma attraverso una proteina della membrana che li scambia con ioni cloruro Cl^-, che entrano: è lo scambio dei cloruri, che mantiene la neutralità elettrica. Nei capillari polmonari, dove la PCO_2 è più bassa, le reazioni procedono al contrario: HCO_3^- rientra nel globulo rosso, si riforma CO_2 e il gas diffonde negli alveoli. Anche il legame con l'ossigeno aiuta: l'emoglobina ossigenata lega meno H^+ e meno CO_2 e li rilascia (effetto Haldane).

Così il trasporto del CO_2 è legato all'equilibrio acido-base. Il tampone CO_2/HCO_3^-, il più importante del sangue (cap. 4), funziona bene proprio perché i polmoni possono cambiare la quantità di CO_2 in pochi minuti. Se la ventilazione è insufficiente il CO_2 si accumula e il pH scende (acidosi respiratoria); se si respira troppo e troppo a fondo, il CO_2 viene eliminato in ec-

cesso e il pH sale (alcalosi respiratoria). I reni, più lentamente, completano la regolazione (cap. 11).

ERRORE FREQUENTE

«Il CO_2 è trasportato dall'emoglobina», «il CO_2 viaggia come acido carbonico». Entrambe le frasi sono sbagliate. L'emoglobina trasporta come carbaminoemoglobina solo circa un quarto del CO_2; la parte principale, circa il 70 %, viaggia nel plasma come ione idrogenocarbonato HCO_3^-. L'acido carbonico H_2CO_3 è soltanto un passaggio intermedio: appena formato si ionizza, e in ogni istante nel sangue ce n'è pochissimo. L'emoglobina è comunque indispensabile anche per il CO_2, perché tampona gli ioni H^+ che si liberano quando si forma HCO_3^-.

IN SINTESI

- Legge di Boyle (n, T costanti): $P_1V_1 = P_2V_2$; l'aria va dalla pressione maggiore alla minore.
- Legge di Dalton: $P_i = \chi_i \cdot P_{tot}$; nell'aria secca $\chi_i(O_2) = 0{,}2095$.
- Ventilazione al minuto $V_E = V_C \cdot f$; ventilazione alveolare $V_A = (V_C - V_D) \cdot f$, con $V_D \approx 0{,}15$ L.
- Modello di Hill: $S = PO_2^{\,n} / (P_{50}^{\,n} + PO_2^{\,n})$, con $n \approx 2{,}7$ e $P_{50} \approx 27$ mmHg.
- Ossigeno legato all'emoglobina: 1,34 mL/g × [Hb] × S.
- Trasporto del CO_2: ≈ 7 % disciolto, ≈ 23 % carbaminoemoglobina, ≈ 70 % HCO_3^-.

8.6 Il controllo del respiro e la salute dei polmoni

8.6.1 I centri respiratori

Respiriamo anche mentre dormiamo, senza pensarci: il ritmo del respiro nasce da gruppi di neuroni del tronco encefalico, i **centri respiratori**. Nel bulbo si trovano i gruppi respiratori che generano il ritmo di base e inviano impulsi, attraverso i nervi frenici e intercostali, al diaframma e ai muscoli intercostali; nel ponte altri gruppi di neuroni regolano il passaggio fra inspirazione ed espirazione e rendono il ritmo regolare. La corteccia cerebrale può modificare il respiro volontariamente, quando parliamo, cantiamo o tratteniamo il fiato, ma solo entro certi limiti: dopo un po' di apnea i centri del tronco encefalico riprendono il comando.

8.6.2 I chemocettori: è il CO_2 a dettare il ritmo

I centri respiratori adattano la ventilazione alle necessità grazie ai **chemocettori**, recettori sensibili alla composizione chimica del sangue. I chemocettori centrali si trovano nel bulbo e rispondono alla concentrazione di ioni H^+ nel liquido cerebrospinale. Il CO_2 attraversa facilmente la barriera fra il sangue e il cervello e lì forma H^+ con la reazione $CO_2 + H_2O \rightleftarrows H^+ + HCO_3^-$: così un aumento di PCO_2 nel sangue si traduce in un aumento di acidità percepito dai neuroni. I

chemocettori periferici si trovano nei glomi carotidei, alla biforcazione delle arterie carotidi, e nei glomi aortici, sull'arco dell'aorta; rispondono anche loro alla PCO_2 e al pH, e sono gli unici a rispondere a una diminuzione della PO_2.

Al livello del mare lo stimolo principale del respiro è la PCO_2 arteriosa: un aumento di pochi mmHg basta a far crescere nettamente la ventilazione, che riporta il CO_2 al valore normale. La PO_2, invece, interviene in modo importante solo quando scende molto, sotto circa 60 mmHg: è il margine che la parte piatta della curva dell'emoglobina rende possibile. Ecco perché, trattenendo il respiro, è l'accumulo di CO_2 a farti cedere. Ed ecco perché è pericoloso iperventilare prima di un'apnea in acqua: si abbassa la PCO_2, lo stimolo a risalire arriva in ritardo, e intanto l'ossigeno può scendere tanto da far perdere i sensi senza alcun preavviso.

8.6.3 In alta quota

In montagna, sopra i 2500–3000 m circa, la PO_2 alveolare si abbassa al punto che la saturazione dell'emoglobina comincia a scendere sensibilmente. I chemocettori periferici rispondono e la ventilazione aumenta, ma l'iperventilazione elimina anche CO_2, alza il pH del sangue e frena a sua volta il respiro. Nei giorni successivi l'organismo si acclimata: i reni eliminano più HCO_3^- e riportano il pH verso la norma (cap. 11), la ventilazione può crescere ancora, e il rene libera più eritropoietina (EPO), l'ormone che stimola il midollo osseo a produrre globuli rossi (cap. 9). Nel giro di qualche settimana il sangue contiene più emoglobina e trasporta più ossigeno per litro: più emoglobina sposta verso destra l'equilibrio $Hb + O_2 \rightleftarrows HbO_2$, come hai visto nel capitolo 3.

COLLEGAMENTI

Sport e salute · Montagna, allenamento in quota e doping. Una salita troppo rapida ad alta quota può provocare il mal di montagna acuto, con mal di testa, nausea, insonnia e affanno: la prevenzione principale è salire gradualmente, lasciando al corpo il tempo di acclimatarsi, e scendere se i sintomi peggiorano. Molti atleti di resistenza si allenano in quota proprio per aumentare la loro emoglobina in modo naturale. Ottenere lo stesso effetto iniettando EPO sintetica o trasfusioni è invece doping (*Scienze naturali 3*, cap. 16): oltre a essere vietato e scorretto verso gli altri atleti, è pericoloso, perché un sangue con troppi globuli rossi diventa più viscoso e aumenta il rischio di trombosi, infarto e ictus.

8.6.4 I nemici dei polmoni

I polmoni sono a contatto con l'aria esterna e con tutto quello che contiene. Il più grave dei rischi evitabili è il fumo di tabacco. Il fumo contiene catrame, ricco di sostanze cancerogene come gli idrocarburi policiclici aromatici, fra cui il benzo[a]pirene (cap. 6); nicotina, che dà una forte dipendenza; e monossido di carbonio. Il fumo paralizza e poi distrugge le ciglia dell'epitelio bronchiale: il muco non viene più spinto verso la gola e deve essere espulso con la tosse, la «tosse del fumatore». Con gli anni può svilupparsi la broncopneumopatia cronica ostruttiva (BPCO), che comprende la bronchite cronica e l'enfisema: le pareti degli alveoli si

rompono, gli alveoli si fondono in sacche più grandi, la superficie di scambio diminuisce e l'espirazione diventa faticosa. Il fumo è inoltre la causa principale del tumore del polmone, secondo l'Organizzazione mondiale della sanità.

L'asma è un'infiammazione cronica delle vie aeree, nella quale i bronchioli reagiscono in modo eccessivo a stimoli come allergeni (cap. 10), fumo, aria fredda o sforzo: il muscolo liscio si contrae, la mucosa si gonfia e produce muco, e il passaggio dell'aria si restringe, soprattutto in espirazione. È una malattia che si tiene sotto controllo con farmaci prescritti dal medico e permette, se curata, anche di fare sport. Infine l'aria delle città contiene il particolato atmosferico: PM_{10} e $PM_{2,5}$ sono le particelle con diametro inferiore a 10 µm e a 2,5 µm, prodotte dal traffico, dal riscaldamento e dalle industrie. Più le particelle sono piccole, più scendono in profondità nelle vie aeree: le più fini raggiungono gli alveoli.

COLLEGAMENTI

Educazione alla salute · Proteggere il respiro. Non fumare e non respirare il fumo degli altri è la scelta più efficace per la salute dei polmoni; anche le sigarette elettroniche e i prodotti a tabacco riscaldato non sono privi di rischi. Chi vuole smettere può rivolgersi al proprio medico o ai centri antifumo del Servizio sanitario nazionale. L'attività fisica regolare rende più efficiente la ventilazione, e i vaccini raccomandati proteggono da alcune infezioni respiratorie (cap. 10).

Agenda 2030 · Aria pulita. L'obiettivo 3 (salute e benessere) e l'obiettivo 11 (città sostenibili) chiedono di ridurre le malattie causate dall'inquinamento dell'aria. In Italia la Pianura Padana, chiusa fra Alpi e Appennini e con frequenti inversioni termiche in inverno, è una delle aree in cui il particolato ristagna più facilmente; trasporti meno inquinanti e un riscaldamento efficiente sono le leve principali.

Primo soccorso. Se una persona soffoca perché un corpo estraneo le ostruisce le vie aeree, si chiama subito il 112. Le manovre di disostruzione, come la manovra di Heimlich, si imparano nei corsi di primo soccorso, con istruttori e manichini.

SINTESI

- La respirazione comprende ventilazione polmonare, respirazione esterna negli alveoli, trasporto dei gas nel sangue e respirazione interna nei tessuti, al servizio della respirazione cellulare.
- Le vie aeree superiori (cavità nasali, faringe, laringe) riscaldano, umidificano e filtrano l'aria; nella laringe l'epiglottide protegge le vie aeree e le corde vocali producono la voce.
- Trachea e bronchi sono sostenuti da cartilagine e rivestiti da epitelio ciliato con muco; i bronchioli hanno muscolo liscio. Lo spazio morto anatomico è di circa 150 mL.
- Il polmone destro ha tre lobi, il sinistro due e l'incisura cardiaca; le pleure e il liquido pleurico tengono i polmoni aderenti alla parete del torace.
- Gli alveoli, centinaia di milioni con circa 70 m^2 di superficie, hanno pneumociti di tipo I per gli scambi, di tipo II per il surfattante e macrofagi; la membrana respiratoria è spessa circa 0,5 µm.
- L'inspirazione è attiva (diaframma e intercostali esterni), l'espirazione a riposo è passiva; per la legge di Boyle l'aumento di volume abbassa la pressione alveolare e l'aria entra.
- Lo spirometro misura volume corrente, volumi di riserva e capacità vitale, non il volume residuo; conta la ventilazione alveolare, $(V_C - V_D) \cdot f$.
- Gli scambi avvengono per diffusione secondo le pressioni parziali ($P_i = \chi_i \cdot P_{tot}$): PO_2 159 mmHg nell'aria secca, circa 100 negli alveoli, 40 nel sangue venoso.
- Circa il 98 % dell'ossigeno viaggia legato all'emoglobina; la curva di dissociazione è sigmoide per la cooperatività ($P_{50} \approx 27$ mmHg) e si sposta a destra con più CO_2, più acidità e più calore (effetto Bohr).
- Il monossido di carbonio occupa l'eme con un'affinità circa 200 volte maggiore di quella dell'ossigeno; si combatte aumentando la PO_2.
- Il CO_2 viaggia per il 7 % disciolto, per il 23 % come carbaminoemoglobina e per il 70 % come HCO_3^-, grazie all'anidrasi carbonica; il trasporto del CO_2 regola il pH del sangue.
- I centri respiratori del bulbo e del ponte generano il ritmo; al livello del mare lo stimolo principale è la PCO_2, rilevata soprattutto dai chemocettori centrali. Fumo, inquinamento e asma sono i principali nemici dei polmoni.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Quale struttura chiude l'ingresso della laringe durante la deglutizione?
   - **A.** le corde vocali
   - **B.** il palato molle
   - **C.** l'epiglottide
   - **D.** la cartilagine tiroidea

2. ● Quanti lobi ha il polmone destro?
   - **A.** tre
   - **B.** due
   - **C.** quattro
   - **D.** cinque

3. ● Il surfattante è prodotto:
   - **A.** dai macrofagi alveolari
   - **B.** dai pneumociti di tipo II
   - **C.** dalle cellule caliciformi della trachea
   - **D.** dai pneumociti di tipo I

4. ●● Durante un'inspirazione tranquilla:
   - **A.** il diaframma si rilassa e sale
   - **B.** si contraggono i muscoli addominali
   - **C.** la pressione negli alveoli supera quella atmosferica
   - **D.** il diaframma si contrae e si abbassa

5. ● Il volume di aria che resta nei polmoni dopo un'espirazione massima si chiama:
   - **A.** volume residuo
   - **B.** volume corrente
   - **C.** capacità vitale
   - **D.** volume di riserva espiratoria

6. ● Nell'aria alveolare di una persona a riposo, al livello del mare, la PCO_2 vale circa:
   - **A.** 0,3 mmHg
   - **B.** 40 mmHg
   - **C.** 46 mmHg
   - **D.** 100 mmHg

7. ●● La maggior parte del CO_2 trasportato dal sangue viaggia:
   A. disciolta nel plasma come gas
   B. legata al ferro dell'eme
   C. come ione idrogenocarbonato nel plasma
   D. come acido carbonico nei globuli rossi

8. ●● Quale cambiamento sposta a destra la curva di dissociazione dell'emoglobina?
   A. un aumento del pH del sangue
   B. una diminuzione della PCO_2
   C. una diminuzione della temperatura
   D. un aumento della temperatura

9. ●●● Al livello del mare, in una persona sana, lo stimolo principale che aumenta la ventilazione è:
   A. una diminuzione della PO_2 rilevata dai glomi carotidei
   B. un aumento della PCO_2 arteriosa, che aumenta l'acidità del liquido cerebrospinale
   C. un aumento della PO_2 alveolare
   D. una diminuzione della concentrazione di HCO_3^- nei globuli rossi

Vero o falso

10. ● L'espirazione a riposo è un processo attivo, prodotto dalla contrazione dei muscoli intercostali interni.

11. ● Il bronco principale destro è più corto, più largo e più verticale del sinistro.

12. ● Le arterie polmonari portano ai polmoni sangue ricco di ossigeno.

13. ●● Il monossido di carbonio si lega all'emoglobina nello stesso sito dell'ossigeno, con un'affinità circa 200 volte maggiore.

14. ●● In alta montagna la PO_2 dell'aria è più bassa perché la percentuale di ossigeno nell'aria diminuisce con la quota.

15. ●●● La PO_2 alveolare è più bassa di quella dell'aria inspirata perché l'aria nuova si mescola con quella rimasta nei polmoni e il sangue sottrae continuamente ossigeno agli alveoli.

Applicare

16. ●● L'aria secca contiene il 20,95 % di O_2 e lo 0,04 % di CO_2. Calcola la PO_2 e la PCO_2 dell'aria a) al livello del mare (760 mmHg); b) a 2000 m di quota, dove la pressione è circa 596 mmHg (atmosfera standard).

17. ●● Una ragazza a riposo respira 16 volte al minuto con un volume corrente di 0,45 L; il suo spazio morto è 0,15 L. a) Calcola la ventilazione al minuto e la ventilazione alveolare. b) Durante una corsa respira 30 volte al minuto con un volume corrente di 2,0 L: calcola di nuovo le due grandezze.

18. ●● Uno studente ha una capacità vitale di 4,6 L, un volume corrente di 0,5 L e un volume di riserva espiratoria di 1,1 L. a) Quanto vale il suo volume di riserva inspiratoria? b) E la capacità inspiratoria? c) Se il volume residuo è 1,2 L, quanto valgono la capacità funzionale residua e la capacità polmonare totale?

19. ●●● Un subacqueo con le bombole, a 10 m di profondità, dove la pressione è circa 2 atm, riempie i polmoni fino a 5,0 L con aria a quella pressione. Che volume occuperebbe quell'aria se risalisse in superficie (1 atm) trattenendo il fiato, a temperatura costante? Confronta il risultato con una capacità polmonare totale di 6,0 L e spiega perché nei corsi di immersione si insegna a non trattenere mai il respiro durante la risalita.

20. ●●● Usa il modello di Hill con $n = 2{,}7$ e $P_{50} = 27$ mmHg. a) Calcola la saturazione dell'emoglobina a $PO_2 = 60$ mmHg e a $PO_2 = 20$ mmHg. b) Quale delle due situazioni corrisponde a un muscolo al lavoro, e quale al sangue arterioso di una persona salita in alta quota?

21. ●● Una persona ha 14 g/dL di emoglobina, con una saturazione del 97 % nel sangue arterioso e del 75 % nel sangue venoso. Ogni grammo di emoglobina saturata lega 1,34 mL di O_2. a) Quanto ossigeno è legato all'emoglobina in 100 mL di sangue arterioso e di sangue venoso? b) Quanto ossigeno ricevono i tessuti in un minuto, se la gittata cardiaca è 5,0 L/min? (Trascura l'ossigeno disciolto.)

22. ● A riposo un adulto produce circa 200 mL di CO_2 al minuto (valore tipico). Usando le quote tipiche del trasporto del CO_2, calcola quanti millilitri al minuto ne viaggiano a) disciolti nel plasma; b) come carbaminoemoglobina; c) come HCO_3^-.

Leggere dati e figure

23. ●● Osserva la Figura 8.4. a) Quali valori leggi per il volume corrente, il volume di riserva inspiratoria e quello espiratorio? b) Verifica che la capacità vitale è la loro somma. c) Quanti atti respiratori compie la persona nei primi 15 s, e qual è quindi la sua frequenza respiratoria? d) Perché la zona grigia non può essere ricavata da uno spirogramma reale?

24. ●●● Osserva la Figura 8.6. a) Quanto vale la P_{50} della curva normale? b) Di quanti punti percentuali diminuisce la saturazione fra gli alveoli (100 mmHg) e i tessuti a riposo (40 mmHg)? c) La curva rossa ha $P_{50} = 33$ mmHg: leggi o calcola la saturazione a 100 mmHg e a 40 mmHg, e di quanto aumenta l'ossigeno ceduto. d) Perché questo spostamento è vantaggioso in un muscolo che lavora?

25. ●●● Un giovane pedala su una cyclette, e un'insegnante registra la sua frequenza respiratoria e il suo volume corrente in tre condizioni (dati di esempio, Tabella 8.2). a) Calcola la ventilazione al minuto e la ventilazione alveolare in ciascuna condizione, con uno spazio morto di 0,15 L. b) Di quante volte aumenta la ventilazione alveolare dal riposo allo sforzo intenso? c) Che cosa è aumentato di più, la frequenza o la profondità del respiro?

Tabella 8.2 Respiro di un giovane su una cyclette in tre condizioni (dati di esempio).

Condizione	Frequenza (atti/min)	Volume corrente (L)
riposo	12	0,50
sforzo moderato	20	1,5
sforzo intenso	35	2,5

26. ●● Osserva la Figura 8.5. a) In quale direzione diffondono l'ossigeno e il CO_2 negli alveoli e nei tessuti? b) Calcola la differenza di pressione parziale che spinge ciascun gas attraverso la membrana respiratoria. c) Perché il CO_2 riesce a passare negli alveoli anche se la sua differenza di pressione è dieci volte più piccola?

Indagare e argomentare

27. ●● Progetta un esperimento con l'indicatore blu di bromotimolo (viraggio da blu a giallo fra pH 7,6 e 6,0, appendice) per verificare che l'aria espirata dopo un esercizio fisico contiene più CO_2 di quella espirata a riposo. Indica la variabile indipendente, quella dipendente, le variabili da tenere costanti, il controllo e le norme di sicurezza.

28. ●●● Alcuni pescatori in apnea fanno una serie di respiri rapidi e profondi prima di immergersi, pensando di «fare il pieno di ossigeno». Spiega, con quello che sai sui chemocettori e sulla curva dell'emoglobina, perché questa abitudine è inutile per l'ossigeno e molto pericolosa.

29. ●● Spiega perché una persona che arriva in poche ore a 4500 m respira più in fretta e si stanca facilmente, e quali adattamenti compaiono nei giorni e nelle settimane successive. Perché un atleta può trarre vantaggio da un periodo di allenamento in quota, e perché l'EPO sintetica è invece doping e un rischio per la salute?

30. ●●● Il fumo di sigaretta danneggia l'apparato respiratorio a più livelli. Spiega come agisce sulle difese delle vie aeree (ciglia, muco, macrofagi), sugli alveoli e sul trasporto dell'ossigeno nel sangue, collegando ciascun effetto alla struttura che hai studiato.

PER APPROFONDIRE

- [TOR] G. J. Tortora, B. Derrickson, *Principles of Anatomy and Physiology*: il capitolo sull'apparato respiratorio, con l'anatomia delle vie aeree, la meccanica respiratoria e i volumi polmonari.
- [SIL] D. U. Silverthorn, *Human Physiology*: i capitoli sulla meccanica della respirazione e sugli scambi e il trasporto dei gas, con il controllo chimico del respiro.
- [CAM] L. A. Urry et al., *Campbell Biology*: il capitolo sugli scambi gassosi negli animali, per confrontare i polmoni con branchie e trachee.

Glossario del capitolo

Alveolo
Piccola cavità a fondo cieco della zona respiratoria del polmone, avvolta da capillari, dove avvengono gli scambi gassosi.

Anidrasi carbonica
Enzima dei globuli rossi che accelera la reazione $CO_2 + H_2O \rightleftarrows H_2CO_3$, da cui si forma HCO_3^-.

Capacità vitale
Volume massimo di aria che si può espirare dopo un'inspirazione massima: volume corrente più i volumi di riserva inspiratoria ed espiratoria.

Carbaminoemoglobina
Emoglobina che ha legato CO_2 ai gruppi amminici delle sue catene; trasporta circa il 23 % del CO_2.

Chemocettori
Recettori sensibili alla composizione chimica del sangue o del liquido cerebrospinale (PCO_2, H^+, PO_2), che regolano la ventilazione tramite i centri respiratori.

Corde vocali
Pieghe della mucosa della laringe che, avvicinate e fatte vibrare dall'aria espirata, producono la voce.

Curva di dissociazione dell'emoglobina
Grafico della saturazione dell'emoglobina in funzione della PO_2; è sigmoide per la cooperatività fra le subunità.

Effetto Bohr
Diminuzione dell'affinità dell'emoglobina per l'ossigeno, con spostamento a destra della curva di dissociazione, quando aumentano H^+, PCO_2 o temperatura.

Emoglobina
Proteina tetramerica dei globuli rossi con quattro gruppi eme contenenti Fe^{2+}; lega in modo reversibile fino a quattro molecole di O_2.

Epiglottide
Lamina di cartilagine elastica che chiude l'ingresso della laringe durante la deglutizione.

Membrana respiratoria
Barriera fra aria e sangue negli alveoli: epitelio alveolare, membrane basali fuse ed endotelio del capillare, spessa circa 0,5 µm.

Pleura
Membrana sierosa a due foglietti, viscerale e parietale, che avvolge il polmone e riveste la cavità toracica; il liquido fra i foglietti li tiene uniti.

Respirazione esterna
Scambio di O_2 e CO_2 fra l'aria degli alveoli e il sangue dei capillari polmonari.

Respirazione interna
Scambio di O_2 e CO_2 fra il sangue dei capillari e le cellule dei tessuti.

Spazio morto
Volume delle vie aeree in cui non avvengono scambi gassosi (circa 150 mL nell'adulto).

Surfattante
Miscela di fosfolipidi e proteine secreta dai pneumociti di tipo II, che riduce la tensione superficiale negli alveoli e ne impedisce il collasso.

Ventilazione polmonare
Movimento dell'aria fra l'ambiente e gli alveoli, prodotto dai muscoli respiratori; al minuto è il prodotto del volume corrente per la frequenza respiratoria.

Volume corrente
Volume di aria inspirato o espirato in un respiro tranquillo, circa 0,5 L nell'adulto.

Volume residuo
Volume di aria che resta nei polmoni dopo un'espirazione massima; non si misura con lo spirometro.

Soluzioni

1. C. L'epiglottide si abbassa sull'ingresso della laringe mentre la laringe si solleva; le corde vocali servono alla fonazione.

2. A. Il polmone destro ha tre lobi (superiore, medio, inferiore); il sinistro due, con l'incisura cardiaca.

3. B. Il surfattante è secreto dai pneumociti di tipo II; quelli di tipo I sono le cellule sottili degli scambi.

4. D. Il diaframma si contrae e si abbassa; il volume del torace aumenta e la pressione alveolare scende sotto quella atmosferica.

5. A. Il volume residuo, circa 1,2 L, resta nei polmoni anche dopo un'espirazione massima.

6. B. Circa 40 mmHg; 0,3 mmHg è il valore dell'aria secca inspirata, 46 mmHg quello del sangue venoso.

7. C. Circa il 70 % viaggia come HCO_3^- nel plasma; il 23 % come carbaminoemoglobina (legata ai gruppi amminici della globina, non al ferro) e il 7 % disciolto.

8. D. Più calore riduce l'affinità dell'emoglobina per l'ossigeno; spostano la curva a destra anche un pH più basso e una PCO_2 più alta, non il contrario.

9. B. La PCO_2 arteriosa, attraverso gli ioni H^+ che il CO_2 forma nel liquido cerebrospinale, agisce sui chemocettori centrali; la PO_2 diventa uno stimolo importante solo sotto circa 60 mmHg.

10. F. A riposo l'espirazione è passiva: i muscoli si rilassano e i polmoni tornano indietro per elasticità. Gli intercostali interni intervengono solo nell'espirazione forzata.

11. V. Per questo un corpo estraneo inalato finisce più spesso nel bronco e nel polmone destro.

12. F. Le arterie polmonari portano dal cuore ai polmoni sangue povero di ossigeno; il sangue ossigenato torna al cuore con le vene polmonari.

13. V. Il CO compete con l'ossigeno per l'eme; l'equilibrio $HbO_2 + CO \rightleftarrows HbCO + O_2$ è molto spostato a destra.

14. F. La frazione di ossigeno resta 20,95 % a ogni quota; diminuisce la pressione totale, e quindi la pressione parziale $P_i = \chi_i \cdot P_{tot}$.

15. V. A ogni respiro solo circa 0,35 L di aria nuova si mescolano con circa 2,4 L di aria rimasta nei polmoni, e il sangue toglie ossigeno di continuo: la PO_2 alveolare si stabilizza intorno a 100 mmHg.

16. a) $PO_2 = 0{,}2095 \times 760 \approx 159$ mmHg; $PCO_2 = 0{,}0004 \times 760 \approx 0{,}30$ mmHg. b) $PO_2 = 0{,}2095 \times 596 \approx 125$ mmHg; $PCO_2 = 0{,}0004 \times 596 \approx 0{,}24$ mmHg.

17. a) $V_E = 0{,}45$ L $\times$ 16 /min = 7,2 L/min; $V_A = (0{,}45 - 0{,}15)$ L $\times$ 16 /min = 4,8 L/min. b) $V_E = 2{,}0 \times 30 = 60$ L/min; $V_A = (2{,}0 - 0{,}15) \times 30 \approx 56$ L/min (55,5 L/min).

18. a) VRI = CV − VC − VRE = 4,6 − 0,5 − 1,1 = 3,0 L. b) CI = VC + VRI = 3,5 L. c) CFR = VRE + VR = 1,1 + 1,2 = 2,3 L; CPT = CV + VR = 4,6 + 1,2 = 5,8 L.

19. Per la legge di Boyle $V_2 = P_1V_1/P_2 = 2$ atm $\times$ 5,0 L / 1 atm = 10 L. È molto più della capacità polmonare totale (6,0 L): trattenendo il fiato, l'aria che si espande durante la risalita distenderebbe gli alveoli fino a romperli, con il rischio che entri aria nella cavità pleurica o nei vasi (embolia gassosa). Durante la risalita bisogna quindi espirare con continuità.

20. a) $S(60) = 60^{2,7}/(27^{2,7} + 60^{2,7}) \approx 0{,}90$, cioè circa 90 %; $S(20) \approx 0{,}31$, cioè circa 31 %. b) 20 mmHg è tipico di un muscolo al lavoro, che estrae gran parte dell'ossigeno; 60 mmHg può essere la PO_2 arteriosa in alta quota, dove la saturazione resta comunque intorno al 90 % grazie alla parte piatta della curva.

21. a) Arterioso: $14 \times 1{,}34 \times 0{,}97 \approx 18{,}2$ mL/dL; venoso: $14 \times 1{,}34 \times 0{,}75 \approx 14{,}1$ mL/dL. b) Differenza 4,1 mL/dL (4,13); in un minuto passano 50 dL di sangue: $50 \times 4{,}13 \approx 2{,}1 \times 10^2$ mL di O_2 al minuto.

22. a) 7 % di 200 mL = 14 mL/min disciolti; b) 23 % = 46 mL/min come carbaminoemoglobina; c) 70 % = 140 mL/min come HCO_3^-.

23. a) Volume corrente 0,5 L (da 2,4 a 2,9 L), volume di riserva inspiratoria 3,1 L (da 2,9 a 6,0 L), volume di riserva espiratoria 1,2 L (da 2,4 a 1,2 L). b) 0,5 + 3,1 + 1,2 = 4,8 L, come l'escursione fra 1,2 e 6,0 L. c) Tre respiri in 15 s, cioè 12 atti al minuto. d) La zona grigia è il volume residuo: quell'aria non esce mai dai polmoni e quindi non passa nello spirometro.

24. a) $P_{50} \approx 27$ mmHg. b) Da 97 % a 74 %: circa 23 punti percentuali. c) Con $P_{50} = 33$ mmHg la saturazione è circa 95 % a 100 mmHg e circa 63 % a 40 mmHg: la differenza diventa circa 32 punti, cioè l'emoglobina cede circa il 40 % in più di ossigeno (32/23 ≈ 1,4). d) Il muscolo che lavora produce più CO_2 e acido ed è più caldo: proprio lì l'emoglobina cede più ossigeno, senza perderne quasi nulla nei polmoni.

25. a) Riposo: $V_E = 12 \times 0{,}50 = 6{,}0$ L/min, $V_A = 12 \times 0{,}35 = 4{,}2$ L/min. Sforzo moderato: $V_E = 20 \times 1{,}5 = 30$ L/min, $V_A = 20 \times 1{,}35 = 27$ L/min. Sforzo intenso: $V_E = 35 \times 2{,}5 \approx 88$ L/min (87,5), $V_A = 35 \times 2{,}35 \approx 82$ L/min (82,25). b) 82,25/4,2 ≈ 20: la ventilazione alveolare aumenta di circa 20 volte. c) La profondità: il volume corrente cresce di 5 volte, la frequenza di circa 3 volte (35/12 ≈ 2,9). Respirare più a fondo riduce il peso dello spazio morto.

26. a) Negli alveoli l'ossigeno passa dall'aria (100 mmHg) al sangue (40 mmHg), il CO_2 dal sangue (46 mmHg) all'aria (40 mmHg); nei tessuti l'ossigeno passa dal sangue (100 mmHg) alle cellule (meno di 40 mmHg), il CO_2 dalle cellule (più di 46 mmHg) al sangue (40 mmHg). b) Nei polmoni: O_2 100 − 40 = 60 mmHg; CO_2 46 − 40 = 6 mmHg. c) Il CO_2 è molto più solubile in acqua dell'ossigeno (circa venti volte), per cui diffonde attraverso la membrana con facilità anche con una differenza di pressione piccola.

27. *Traccia di risposta.* Variabile indipendente: lo stato della persona (a riposo o subito dopo un esercizio standard, per esempio 2 minuti di saltelli). Variabile dipendente: il tempo che l'indicatore impiega a virare al giallo soffiando a ritmo costante, o il numero di espirazioni necessarie. Costanti: volume e concentrazione dell'indicatore, recipiente, ritmo del soffio, temperatura. Controllo: una provetta con lo stesso indicatore in cui non si soffia, che deve restare blu. Sicurezza: si soffia soltanto, senza mai aspirare; cannucce personali; occhiali; lavarsi le mani alla fine.

28. *Traccia di risposta.* Il sangue arterioso è già saturato al 97 % circa: respirare più a fondo aggiunge pochissimo ossigeno. L'iperventilazione invece abbassa molto la PCO_2, che è lo stimolo principale del respiro. In apnea lo stimolo a risalire arriva in ritardo, perché la PCO_2 parte bassa; la PO_2 può così scendere sotto il livello che mantiene la coscienza prima che si senta il bisogno di respirare, e si sviene sott'acqua senza preavviso (sincope da apnea), con il rischio di annegare.

29. *Traccia di risposta.* A 4500 m la pressione è circa 430 mmHg e la PO_2 dell'aria nella trachea è circa 80 mmHg: la PO_2 alveolare e la saturazione si abbassano, i chemocettori periferici stimolano la ventilazione, ma l'eliminazione di CO_2 alza il pH e limita la risposta; i tessuti ricevono meno ossigeno e la fatica arriva presto. Nei giorni successivi i reni eliminano HCO_3^- e correggono il pH, la ventilazione cresce; in settimane l'EPO prodotta dal rene aumenta globuli rossi ed emoglobina. Tornato in pianura, l'atleta trasporta più ossigeno. L'EPO sintetica ottiene artificialmente lo stesso effetto: è vietata come doping e rende il sangue più viscoso, con rischio di trombosi, infarto e ictus.

30. *Traccia di risposta.* Il fumo paralizza e distrugge le ciglia, mentre aumenta la produzione di muco: il muco ristagna e si espelle solo con la tosse, e le vie aeree si infettano e si infiammano più facilmente (bronchite cronica). Le particelle e le sostanze irritanti sovraccaricano i macrofagi alveolari e mantengono un'infiammazione cronica che rompe le pareti degli alveoli (enfisema): la superficie di scambio si riduce. Il catrame contiene cancerogeni come il benzo[a]pirene (tumore del polmone). Il monossido di carbonio, con un'affinità per l'emoglobina circa 200 volte maggiore, riduce l'ossigeno trasportato.