

La Finestra dell' Ossigeno

Questo argomento lo possiamo sicuramente classificare come ostico per la maggior parte dei subacquei, un po' come la legge di Boyle nel corso open o la legge di Dalton nel corso nitrox.

La difficoltà dipende dal fatto che esso racchiude in se concetti di fisica, chimica e fisiologia e di conseguenza la loro assimilazione non risulta sempre immediata.

Volendo evitare di fare riferimento „alle formule“ e quindi spiegandolo in una maniera puramente descrittiva si rischia di lasciare dei punti interrogativi nei nostri ascoltatori, d'altra parte usando una spiegazione più scientifica, che inevitabilmente richiama delle equazioni, si può ottenere lo stesso risultato ma per motivi opposti.

La soluzione ideale sarà trovare un giusto compromesso che faccia assimilare questo importante concetto, ricordando che non siamo dei medici iberbarici ma delle persone che vogliono solo ampliare le loro conoscenze, in modo tale che ogni qual volta vi si faccia riferimento il subacqueo lo possa padroneggiare con sufficiente dimestichezza.

Nella rete si possono leggere svariati articoli sull'argomento alcuni spiegati con un approccio più scientifico e altri più descrittivi, i primi sono di grande utilità una volta che il lettore ha fatto proprio il concetto della oxygen window per poterlo approfondire più nel dettaglio mentre i secondi ne danno un'idea più generale essendo spesso dei richiami all'interno di un contesto più vasto.

Anche se l'argomento è noto da molti anni, inizialmente era trattato negli ambienti delle immersioni tecniche, solo di recente con l'introduzione nelle agenzie ricreative dei corsi tec-rec ha iniziato ad essere conosciuto, almeno come nome, in maniera sempre maggiore.

Questo come altri fondamenti della teoria decompressiva dovrebbero essere quantomeno nominati durante i corsi nitrox e decompression e non lasciati alla discrezione dell'istruttore, la finestra dell'ossigeno (per nostra fortuna) e la MDD (per nostra sfortuna) non guardano il tipo di brevetto posseduto dal subacqueo.

Lo scopo di queste pagine, senza nessuna velleità scientifica, sarà quello di rispondere in modo semplice ad alcune domande che sempre più spesso si sentono parlando con i subacquei siano essi allievi o semplici compagni d'immersione, successivamente ognuno potrà approfondire a suo piacimento l'argomento leggendo testi e articoli di carattere più tecnico.

In particolare vedremo di dare una risposta ai seguenti quesiti:

- *cosa si intende per finestra d'ossigeno ?*
- *qual'è il suo meccanismo di formazione ?*
- *perché la somministrazione d'ossigeno è più efficace in camera iberbarica ?*
- *perché la MDD si cura con l'ossigeno ?*

Se queste domande vi fanno venire voglia di non continuare la lettura perché pensate di non avere le basi per capire quanto seguirà, vi rispondo come sono solito introdurre l'argomento con gli allievi:

„...nella chiacchierata che iniziamo tra poco, la differenza tra voi e me non dipende da conoscenze che io ho e voi ancora no, ma piuttosto dal fatto che io so quali concetti acquisiti prendere e come collegarli tra di loro, mentre voi ancora no“.

Cosa si intende per finestra d'ossigeno ?

Iniziamo dando una definizione, tra le varie possibili, della O.W. che ci servirà poi come punto di partenza per le nostre considerazioni.

„La finestra dell'ossigeno é data dalla differenza delle pressioni parziali dei gas presenti nel sistema arterioso e in quello venoso.“

Questa definizione, facile da memorizzare, non puo' spiegare da sola né il meccanismo di formazione della finestra né far capire la sua importanza fondamentale in ambito decompressivo, quindi per il momento ci dice poco o nulla.

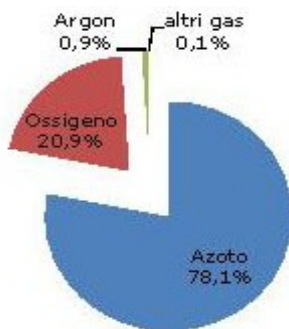
Rileggendola possiamo pero' iniziare a capire con „chi o cosa“ avremmo a che fare, in altre parole quali saranno i *concetti già acquisiti* che ci saranno di riferimento, in particolare:

1. abbiamo a che fare con un differenza di pressione.
2. i responsabili sono dei gas, ovvero le loro *pressioni parziali* e questo dovrebbe richiamarci alla mente la legge di *Dalton*.
3. questi gas „passano“ nel sistema circolatorio e nei nostri tessuti e questo dovrebbe richiamarci alla mente la legge di *Henry*.
4. infine, anche una ripassata al nostro *apparato respiratorio* ci sarà di aiuto, così come non sarebbe male ricordarci la differenza tra *pressione* e *tensione* di un gas.

Questi *concetti acquisiti*, in quanto tali, non dovrebbe essere necessario ribadirli, comunque di volta in volta durante la nostra chiaccherata faremo dei richiami con lo scopo di ripassarli e magari approfondirli.

Qual' é il suo meccanismo di formazione ?

la prima cosa da fare é determinare in modo univoco quali e quanti sono i gas che prendono parte alla finestra dell'ossigeno e per fare cio' iniziamo rivedendo la composizione della miscela aria come sotto rappresentato (*vedasi anche per completezza l'appendice - A*).



Le percentuali di ossigeno e azoto possiamo considerarle rispettivamente pari al 21% e al 79%, accorpando quindi i gas minori essenzialmente nella frazione di azoto.

Supponendo inoltre che l'aria respirata sia secca e priva di altre sostanze (ovvero non inquinata) abbiamo così determinato i primi due gas che ci interessano l'ossigeno (O_2) e l'azoto (N_2).

D'altronde era scontato che non potesse essere diversamente vista l'importanza che essi

ricoprono per la vita sulla terra e non mi riferisco solo all'ossigeno come *gas metabolico* ma anche all'azoto, vedasi a tal proposito l'*omonimo ciclo*.

Il terzo gas é dipendente dall'ossigeno in quanto ne rappresenta il suo prodotto „di scarto“ durante la *respirazione cellulare*, ovvero il meccanismo attraverso il quale la cellula in presenza di O_2 produce energia da utilizzare nei processi vitali e tale gas é l'anidride carbonica o piu' correttamente detto *biossido di carbonio* (CO_2).

Il quarto e ultimo gas é il *vapore acqueo* che é presente sia all'interno del nostro corpo che nell'atmosfera e come vedremo tra le varie funzioni ha quella di umidificare l'aria respirata.

Arrivati a questo punto possiamo costruirci la *tabella - 1* in cui riportiamo i dati in nostro possesso.

Gas				
Ossigeno				
Azoto				
Vapore acqueo				
Anidride carbonica				

Tabella - 1

Il passo successivo sarà quello di completare la tabella scrivendo „qualcosa“ nella prima riga e una serie di valori all'interno dello spazio verde mentre la riga gialla riporterà i totali.

Andando a rileggere la definizione di finestra d'ossigeno intuimmo che i valori riguarderanno le pressioni parziali dei gas appena trovati che si riferiscono al sistema arterioso e venoso, per cui la *tabella - 1* si completerà parzialmente diventando la *tabella - 1.1*

Gas	Aria inspirata	Aria alveolare	Sangue arterioso	Sangue venoso
Ossigeno				
Azoto				
Vapore acqueo				
Anidride carbonica				
Pressioni totali				

Tabella - 1.1

Nella seconda e terza colonna abbiamo aggiunto le pressioni parziali dell'aria che respiriamo al livello del mare e dell'aria alveolare, ovvero quando giunge agli alveoli polmonari ed è pronta per passare nel flusso ematico.

La riga gialla riporterà infine la somma delle varie pressioni e tensioni parziali di ogni colonna.

Primo richiamo: legge di Dalton

La pressione parziale che un gas esercita all'interno di una miscela gassosa è direttamente proporzionale alla sua percentuale nella miscela stessa.

ovvero

$$P_{p \text{ gas}} = \% \text{ gas} \times P \text{ miscela}$$

applicando la formula per determinare i valori delle pressioni parziali (**Pp**) a livello del mare dei gas nell'aria inspirata (prima colonna *Tabella - 1.1*) otterremo i seguenti risultati:

$$P_{pO_2} = 0,21 \times 760 = 159 \text{ mmHg}$$

$$P_{pN_2} = 0,79 \times 760 = 601 \text{ mmHg}$$

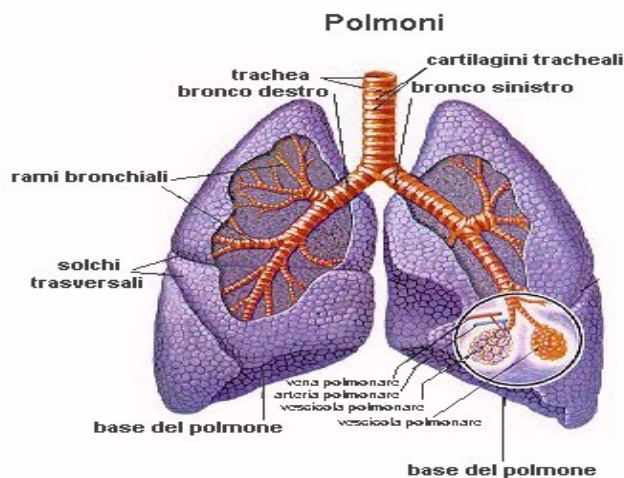
I valori ottenuti sono stati arrotondati e l'unità di misura sono i mmHg (millimetri di mercurio, per approfondimenti vedasi l'esperimento di *E. Torricelli*).

Ricordo inoltre che: $1 \text{ atm} = 1 \text{ bar} = 760 \text{ mmHg} = 760 \text{ Torr} = 1013,25 \text{ mbar}$

Applicando la legge di Dalton ai gas che ci riguardano e conoscendone le loro percentuali a livello alveolare, arterioso e venoso possiamo riempire le caselle verdi a completamento della *tabella - 1.1* come tra poco vedremo.

Secondo richiamo: l'apparato respiratorio

Vediamo ora in maniera molto semplice e schematica il nostro apparato respiratorio, ovvero cosa accade quando respiriamo.

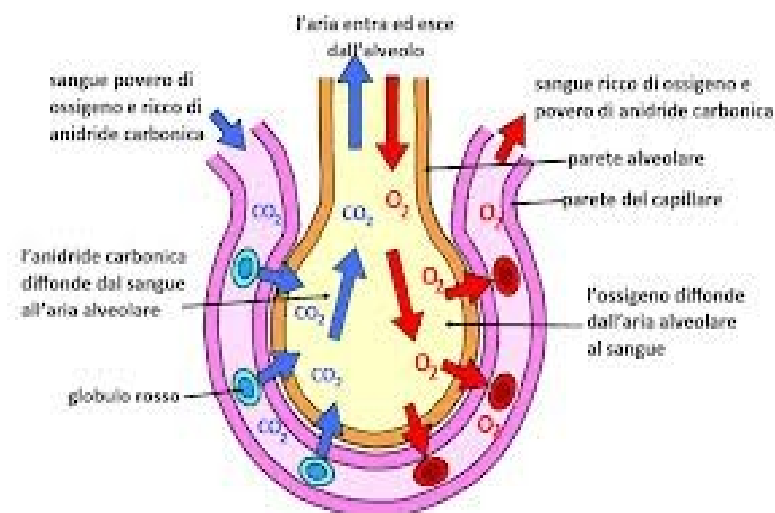


L'aria entra nel nostro corpo dalla cavità nasale oppure dalla bocca (immersione) e tramite la trachea arriva ai bronchi (sinistro e destro) che a loro volta entrano in uno dei due polmoni.

All'interno dei polmoni i bronchi si dividono in bronchi secondari e continuando a dividersi in rami sempre più piccoli arrivano a formare i bronchioli e alla fine di essi troviamo gli alveoli polmonari.

Questa divisione e ramificazione ha essenzialmente lo scopo di aumentare la superficie per gli

scambi gassosi (parete alveolare), si conta che nei polmoni ci siano circa 600 milioni di alveoli con una superficie totale di quasi 100 metri quadri.



Gli alveoli, la cui parete ha uno spessore dell'ordine del micron (millesimi di millimetro), sono circondati dai capillari dell'arteria polmonare ed è proprio in questa zona di contatto (*legge di Henry*) che avvengono gli scambi gassosi. I gas attraversano lo spessore costituito dalla parete alveolare e da quella capillare ed entrano nel sistema circolatorio (sangue arterioso ricco di O₂) e in modo analogo ma inverso viene ceduto agli alveoli il contenuto trasportato dal sangue venoso (povero di O₂ e ricco di CO₂) dopo che si sono completati i processi

metabolici (ossido riduzione). L'ossigeno e l'anidride carbonica si legano all'emoglobina dei globuli rossi, il primo come ossi-emoglobina e la seconda come carbossi-emoglobina.

Possiamo pensare gli alveoli come dei piccolissimi palloncini al cui interno si trovano i gas costituenti l'aria compreso il vapore acqueo sopra menzionato, la cui funzione oltre a inumidire la miscela aria (come già detto) è anche quella di inumidire gli alveoli stessi e permettere ad una sostanza chiamata surfactante di disciogliersi in esso impedendo agli alveoli di collassare con le conseguenze che possiamo immaginare.

Essendo quindi solo gli alveoli preposti agli scambi gassosi si comprende anche l'esistenza di una parte del sistema respiratorio che prende il nome di spazio morto (trachea e bronchioli), dove non avvengono scambi.

Questo spazio però è importante perché ha la funzione di miscelare e stabilizzare l'aria che respiriamo impedendole ad esempio di giungere agli alveoli troppo calda, fredda o secca.

Possiamo pensare allo spazio morto come ad una specie di anticamera di stabilizzazione, l'aria che si trova al suo interno (circa 2300 ml) si mescola con quella inspirata (circa 350 ml) impedendo di fatto brusche variazioni nelle concentrazioni dei gas che passano nel flusso sanguigno.

Riassumiamo quanto visto finora

1. abbiamo dato una definizione della finestra d'ossigeno di cui però dobbiamo dimostrarne l'esattezza.
2. abbiamo trovato quanti e quali sono i gas che prendono parte alla O.W.
3. abbiamo ripassato la legge di Dalton e calcolato come dimostrazione le pressioni parziali dell'O₂ e dell'N₂ nell'aria atmosferica al livello del mare considerandola secca, ovvero priva di vapor acqueo.
4. abbiamo ripassato sommariamente l'apparato respiratorio osservando che le concentrazioni dei gas variano a causa dello spazio morto polmonare e quindi negli alveoli dovremmo aspettarci dei valori diversi da quelli iniziali.
5. abbiamo visto che negli scambi tra alveoli e circolo sanguigno interviene la legge di Henry (che per il momento abbiamo solo accennato).

Possiamo quindi finalmente scrivere i valori mancanti all'interno della nostra tabella completandola, ma prima ripassiamo assieme ancora due concetti importanti:

il primo e **probabilmente nuovo** riguarda l'ossigeno che a seguito dei processi metabolici si trasforma in anidride carbonica e la quantità di questa trasformazione la possiamo considerare paritaria, ovvero:

per ogni molecola di O₂ che viene utilizzata se ne produce un'uguale quantità di CO₂

quanto appena detto potrà sembrare di poca importanza ma vi esorto a tenerlo a mente, tra breve ritorneremo su questo concetto.

il secondo (*terzo richiamo*) riguarda la differenza esistente tra la pressione parziale e la tensione di un gas:

per pressione parziale si intende quella esercitata dal gas in fase gassosa (stato libero)

per tensione si intende quella esercitata dal gas in fase disciolta (esempio nel sangue)

quindi per rigore di forma dovremmo fare queste distinzioni anche nella nostra tabella, ma per semplicità continueremo a usare (impropriamente) il termine di pressione parziale anche riferendoci ai gas disciolti.

Vediamo allora la *tabella - 1.2* come appare una volta completata con tutti i suoi valori.

Gas	Aria inspirata	Aria alveolare	Sangue arterioso	Sangue venoso
Ossigeno	159	103	95	44
Azoto	601	570	570	570
Vapore acqueo	0	47	47	47
Anidride carbonica	0	40	40	91
Pressioni totali	760	760	752	752

Tabella - 1.2

Nella colonna *dell'aria inspirata* notiamo (semplificando) che i gas sono solo due e che per la legge di Dalton la somma delle loro pressioni parziali al livello del mare é uguale a 760 mmHg.

Nella colonna *dell'aria alveolare* i gas diventano quattro con l'aggiunta del vapor acqueo e della CO₂ mentre le pressioni parziali di O₂ e N₂ diminuiscono (la somma delle pressioni parziali rimane sempre uguale a 760 mmHg), tutto questo inoltre concorda con quanto si é detto sullo spazio morto polmonare.

Nella colonna *del sangue arterioso* le pressioni parziali dei gas non variano tranne quella del O₂ che diminuisce di 8 mmHg, questa piccola differenza dipende dal fatto che non tutto l'ossigeno alveolare passa nel circolo arterioso, alla fine quindi la somma delle pressioni nel sangue arterioso sará di 752 mmHg.

Nella colonna *del sangue venoso*, a seguito dei processi metabolici, si ha una diminuzione della pressione parziale dell'ossigeno e un conseguente aumento di quella dell'anidride carbonica (**casella rossa**) mentre i valori dell'azoto e del vapor acqueo rimangono invariati e questo dimostra (come detto sin dal corso open) che l'azoto é un gas inerte ovvero non partecipa ai processi metabolici (PpN₂ = 570 mmHg negli alveoli e nel sangue).

Anche la somma delle pressioni parziali dei gas nel sangue arterioso e in quello venoso rimangono uguali (752 mmHg).

L'apparenza inganna

Come avrete notato l'ultima frase é stata scritta in grassetto, cosí com' é stata messa in evidenza nella *tabella - 1.2* la casella con il valore della PpCO₂ nel sangue venoso, ovviamente la cosa é stata da me intenzionalmente voluta, ma secondo voi perché ?

Quanto scritto in precedenza aveva lo scopo di spiegare la definizione di finestra dell'ossigeno data inizialmente, provate quindi a rileggerla attentamente confrontandola con la *tabella - 1.2*, notate (per caso) qualche cosa di strano ?

Fermatevi a riflettere magari rileggendo l'articolo, avete tutte le conoscenze e indicazioni per trovare questa incongruenza, in questo modo focalizzerete maggiormente la vostra attenzione sull'argomento che stiamo trattando.

L'errore voluto

Ho creato questo errore che dovrebbe servire a voi come verifica di quanto letto sinora e a me per introdurre un concetto chiave, sperando che non vi sia stato difficile trovarlo e che la lettura della prima parte che segue vi serva come verifica e gratificazione personale per i vostri sforzi, vediamo assieme di cosa si trattava.

Secondo la definizione, la O.W. é dovuta alla differenza tra la somma delle pressioni parziali dei gas presenti nel sistema arterioso rispetto a quello venoso, il problema é che le due pressioni parziali in questione (riga gialla della tabella) hanno lo stesso valore di 752 mmHg per cui la loro differenza é zero e quindi la finestra d'ossigeno non dovrebbe esistere !!!

Siccome invece per nostra fortuna la finestra esiste (Haldane stesso aveva capito che una bolla si assorbe perché la sua PpN₂ é maggiore della PpN₂ del sangue), vuol dire che dobbiamo ancora vedere il meccanismo che genera il salto di pressione parziale o come chiamato da Hills „insaturazione intrinseca“.

Quarto richiamo: legge di Henry

A temperatura costante la solubilità di un gas poco solubile in un dato volume di solvente é direttamente proporzionale alla pressione parziale del gas in equilibrio con la soluzione.

ovvero:

$$c = k * p$$

dove **c** é la concentrazione del gas nel liquido (misurata in frazione molare, molarita, ecc...), **k** é la costante di Henry e dipende dal gas, dal solvente e dalla temperatura e infine **p** é la pressione parziale esercitata dal gas sopra la soluzione (misurata in mmHg, Torr, ecc...). Riguardo quanto detto sulla costante di Henry (vedasi l'appendice - B).

... il meccanismo di formazione della O.W.

Dalla legge di Henry si deduce che la pressione parziale di un gas (**p**) é direttamente proporzionale alla concentrazione (**c**) e inversamente proporzionale alla costante (**k**) che per semplificare le cose possiamo identificarla con la solubilità del gas (vedasi l'appendice C).

ovvero:

$$p = c/k_{(solubilit\grave{a})}$$

questo vuol dire che due gas aventi la stessa concentrazione (**c**) eserciteranno delle pressioni parziali (**p**) diverse a seconda della loro solubilità nel liquido, quindi anche se l'O₂ ha un rapporto paritario (vedi sopra) con la CO₂ (uguale **c**) la loro solubilità é molto diversa e quindi diverse saranno anche le loro pressioni parziali nel sangue arterioso e venoso ed é questa differenza (salto di pressioni parziali) che genera la finestra d'ossigeno come riportato nella tabella - 1.2 (corretta)

Gas	Aria inspirata	Aria alveolare	Sangue arterioso	Sangue venoso
Ossigeno	159	103	95	44
Azoto	601	570	570	570
Vapore acqueo	0	47	47	47
Anidride carbonica	0	40	40	45
Pressioni totali	760	760	752	706

Tabella - 1.2 (corretta)

L'ossigeno passa da 95 a 44 mmHg con una caduta di 51 mmHg, ma questa caduta non è supportata dall'anidride carbonica che varia da 40 a 45 mmHg, quindi con un aumento di soli 5 mmHg.

La CO₂ ha una solubilità nel plasma di 483,56 ml/l mentre l'O₂ ha una solubilità di 23,25 ml/l, questo vuol dire che l'anidride carbonica è circa 21 volte più solubile dell'ossigeno nel plasma ($483,56 / 23,25 = 20,80$) e questo provoca una differenza di pressioni parziali totali tra il sangue arterioso e quello venoso di **46 mmHg** ($752 - 706 = 46$ mmHg) ovvero la O.W. dimostrando quindi l'esattezza della definizione data inizialmente.

Prima di continuare voglio fare una puntualizzazione riguardo i fattori che influenzano gli scambi gassosi e che comunemente si fanno dipendere solo dalla legge di Henry, nella realtà i fattori che influenzano la quantità di gas che passa in soluzione (pensiamo al caso che ci riguarda alveoli / sangue) sono vari e più precisamente:

- l'ampiezza della superficie di contatto tra gas e liquido (alveoli / capillari)
- al peso molecolare della sostanza
- la distanza che separa il gas dal liquido (spessore membrane cellulari)
- la solubilità del gas nel liquido
- il gradiente di concentrazione

il tutto può essere sintetizzato nella legge di Fick (*vedasi l'appendice - D*).

Perché la somministrazione di O₂ è più efficace in camera iperbarica ?

Durante il trattamento in camera iperbarica viene somministrato O₂ a una pressione maggiore di quella ambiente (2,8 ata) e siccome il valore della O.W. dipende dalla PpO₂ è ovvio che aumentando questa di conseguenza aumenta la finestra.

Se la differenza tra O₂ arterioso e venoso aumenta perché la sua PpO₂ viene incrementata, anche la differenza dei valori totali delle pressioni parziali nei due sistemi aumenterà determinando un'apertura della finestra che tuttavia non è illimitata e sarà massima per PpO₂ comprese tra 1,3 e 3 atm.

Quindi aumentare la finestra vuol dire in definitiva accelerare il processo di eliminazione dei gas all'interno del corpo (tessuti).

Ricordo inoltre che il trattamento in camera iperbarica non si effettua solo per curare la MDD ma anche ad esempio per le intossicazioni dovute al monossido di carbonio (classico esempio il mal funzionamento delle stufe a gas) o anche per determinati gradi di ustione.

Perché l'embolia si cura con l'ossigeno ?

Dal corso open abbiamo imparato che uno dei problemi che può capitare a chi pratica immersioni con le bombole, se non rispetta una serie di regole, è la malattia da decompressione (MDD) ovvero la formazione e l'acrescimento di bolle di gas (emboli) che possono creare seri problemi al nostro organismo e sappiamo che il responsabile di queste bolle è l'azoto.

Abbiamo anche appreso che la cura consiste in un trattamento (o più) in camera iperbarica dove viene somministrato ossigeno ad una elevata pressione parziale (ossigeno iperbarico).

La domanda però sorge spontanea (o almeno dovrebbe), perché curiamo le bolle di azoto respirando ossigeno?

Sarebbe come (scusate l'esempio discutibile) curarsi il mal di testa pulendosi le orecchie, in altre parole anche se abbiamo appreso l'importanza e il meccanismo di base della O.W. non possiamo dire di avere le idee completamente chiare sul perché la bolla si riduce di diametro.

Vediamo allora con l'aiuto di qualche esempio di capire meglio cosa accade nel nostro corpo durante la fase di risalita se ad un certo momento iniziassimo a respirare ossigeno puro.

Premetto che quanto vedremo non deve essere associato ad immersioni fuori curva, stiamo parlando di normali profili d'immersione (senza obblighi decompressivi) in cui arrivati alla sosta di sicurezza (-5mt per 3 minuti) anziché continuare a respirare aria, respiriamo ossigeno puro da un bombolino che avevamo portato con noi, lo stesso sarebbe se fossimo in superficie e respirassimo per alcuni minuti ossigeno.

Analoga cosa sarebbe se si usasse del nitrox con elevati tenori di O₂ (esempio nitrox 80), io ho usato ossigeno puro perché otteniamo il massimo effetto non essendoci presente nessuna percentuale di azoto.

Esorto prima di continuare con gli esempi di aver ben chiaro il meccanismo che lega la pressione parziale con la solubilità e come questa possa modificare la prima a parità di concentrazione di soluto (gas).

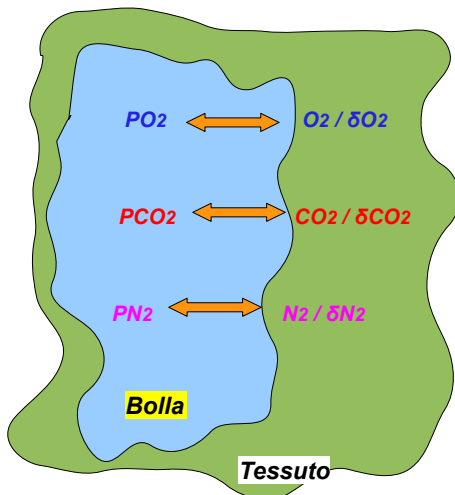


Figura - 1

Nella figura - 1 è rappresentato lo stato di equilibrio tra bolla e tessuto.

Durante la risalita la pressione esterna diminuisce e fino a quando non si effettua una sosta la pressione dei gas all'interno della bolla e la tensione dei gas all'interno del tessuto cercheranno di equilibrarsi tra loro e con la pressione esterna.

L'equilibrio lo si avrà non appena ci fermiamo e rimarrà tale fintanto che sosteneremo a quella profondità.

Le tensioni dei gas sono espresse dal rapporto tra la concentrazione del gas e la sua costante di solubilità.

La figura - 1 è rappresentativa dello stato di un sub che inizia la sosta di sicurezza continuando a respirare la stessa miscela della risalita, nel nostro esempio aria.

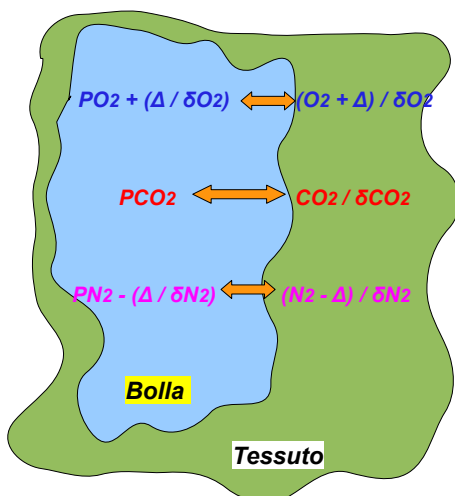


Figura - 2

Quando il sub passa a respirare ossigeno puro come nel nostro esempio e supponendo che non venga in parte metabolizzato, la situazione cambia come in figura - 2.

L'incremento (Δ) della concentrazione di O₂ provocherà l'aumento della tensione nel tessuto e della pressione nella bolla, essendo però il sistema in equilibrio (siamo sempre alla stessa profondità) bisognerà che una uguale quantità di N₂ ($-\Delta$) esca dalla bolla e dal tessuto.

La variazione di pressione dentro la bolla sarà pari alla seguente somma algebrica: $(\Delta / \delta O_2) - (\Delta / \delta N_2)$, siccome però la solubilità dell'O₂ è circa il doppio di quella del N₂ ne consegue che la PpO_2 sarà sempre minore della PpN_2 e quindi la somma algebrica avrà un valore negativo e di conseguenza la bolla anche se di poco si sgonfierà.

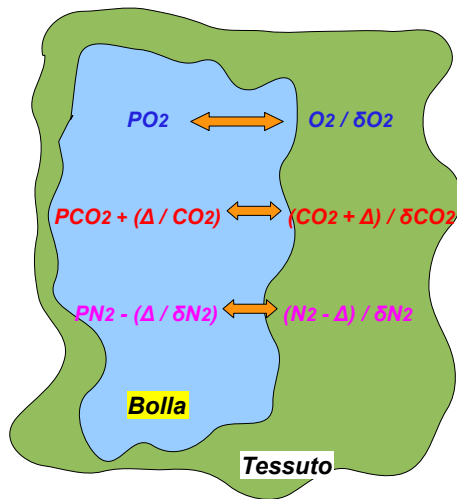


Figura - 3

Se invece (come avviene) l'ossigeno in più ($\Delta / \delta O_2$) è in parte metabolizzato (nel nostro esempio sarà tutto) la situazione finale sarà come quella della figura - 3. Ovvero si avrà un aumento di CO₂ ($CO_2 + \Delta$) sia nel tessuto che nella bolla a sostituzione dell'ossigeno. Ricordando (come detto sopra) la grande differenza tra la solubilità della CO₂ rispetto a quella dell'O₂, questa farà praticamente sparire il termine (Δ / CO_2) dentro la bolla lasciando totalmente a carico dell'azoto $-(\Delta / \delta N_2)$ la compensazione della pressione ed è questa differenza a provocare la diminuzione del volume della bolla.

Lo stesso meccanismo che abbiamo appena esaminato avviene anche se il sub continua a respirare la stessa miscela di fondo (aria nel nostro esempio) solo che in questo modo si continuerà ad introdurre azoto e non si avrà un aumento della pressione parziale dell'ossigeno e quindi in definitiva il processo durerà più a lungo poiché la finestra è piccola.

All'interno della bolla l'ossigeno verrà metabolizzato trasformandosi in anidride carbonica ed entrambi determineranno un calo pressorio che verrà rimpiazzato dall'azoto dal momento che la legge di Dalton deve essere rispettata (pressione interna della bolla, tensione e pressione esterna devono equilibrarsi).

La finestra dell'ossigeno in definitiva è la conseguenza diretta della trasformazione metabolica del O₂ in CO₂.

L'azoto nei nostri tessuti può seguire due strade, passare nel sangue e venire rimosso con la respirazione o compensare la quantità d'ossigeno e anidride carbonica che sono usciti dalla bolla.

Si potrebbe pensare che quando l'azoto ha riequilibrato la situazione la bolla diventi stabile (la pressione esterna non varia, siamo sempre in sosta di sicurezza oppure in superficie), in realtà il sistema bolla deve sottostare anche alla *legge di Laplace* secondo la quale:

la differenza tra la pressione interna della bolla e quella esterna è inversamente proporzionale al raggio della bolla e direttamente proporzionale alla tensione.

Questo vuol dire che quando la bolla si riduce (raggio più piccolo) la differenza tra le pressioni aumenta e quindi una certa quantità di azoto dovrà tornare nei tessuti (legge di Dalton), successivamente altro ossigeno entrato nella bolla si trasformerà in anidride carbonica e il tutto riprenderà come sopra fintanto che la bolla non collasserà o che il suo raggio diminuirà sotto un valore critico (chiamato raggio critico) divenendo asintomatica e silente.

In realtà è stato appurato che non tutte le bolle si dissolvono (anche se in teoria dovrebbero) e questo dipende da alcune sostanze (surfactanti) che ne irrigidiscono la struttura, l'azione stabilizzatrice da parte di queste sostanze è massima entro determinati valori di diametro della bolla oltre i quali diventa instabile e può collassare.

Lo scopo quindi di una corretta risalita è quello di evitare che il diametro delle bolle presenti superi la così detta tensione critica (valori M).

Infine é utile ricordare che la forma sferica delle bolle in realtà puo' essere diversa poiché si possono adattare ad eventuali spazi presenti tra i tessuti ostruendone dei passaggi con le conseguenze che tutti conosciamo (pensiamo per esempio all' ostruzione di una vena).

Conclusioni

Come detto all'inizio la finestra d'ossigeno deve la sua difficoltà al fatto che racchiude argomenti di fisica, chimica e fisiologia e ognuno di questi a sua volta ne richiama altri ancora.

Raramente é sufficiente leggere un solo testo, per quanto esaustivo possa essere, per apprendere questo importante concetto e questo dipende dal fatto che ognuno di noi impara le cose in maniera e tempi diversi a seconda delle conoscenze possedute.

Leggendo articoli scritti da autori diversi si apprende in una maniera piu' graduale e meno faticosa e successivamente si approfondisce con testi esposti in modo piu' tecnico.

Lo scopo di queste pagine (spero almeno in parte riuscito) era dare una spiegazione con parole diverse e il piu' possibile semplici di questo fondamentale fenomeno fisiologico.

Si capisce quindi l'importanza di usare miscele arricchite durante un' immersione sia come gas principale (nitrox) sia per catalizzare il processo decompressivo.

Troppo spesso l'uso dell'ossigeno viene visto solo come cura in caso di MDD oppure come gas decompressivo in profili fuori curva, sarebbe auspicabile invece che si diffondesse una cultura basata sulla prevenzione che ponesse nella giusta ottica l'uso di questo gas (previo addestramento) anche in ambito ricreativo da associare alle immersioni ad aria.

Inutile ricordare che prima di adoperare miscele arricchite é necessario frequentare uno specifico corso che ogni didattica ricreativa annovera così come sarebbe utile, sempre in ambito ricreativo, seguire un corso decompression.

C. Chieco

Approfondimenti:

- Bonuccelli C. – L'immersione in miscela – Editrice la Mandragora -2000
- Jonny E – Brian jr – La finestra ossigeno – www.diritalia.it
- Scambio di gas inerte – www.csrweb.it

Nota:

- foto apparato respiratorio fonte dalla rete

Appendice – A

Composizione dell'aria al livello del suolo

Gas	Simbolo	Volume (%)
Azoto	N ₂	78,08
Ossigeno	O ₂	20,95
Argon	Ar	0,93
Vapor acqueo	H ₂ O	0,33
Biossido di carbonio	CO ₂	0,03
Neon	Ne	0,0018
Elio	He	0,0005
Metano	CH ₄	0,0002
Idrogeno	H ₂	0,0001
Cripto	Kr	0,000011
Xeno	Xe	0,000009
Ozono	O ₃	0,000004
Monossido di carbonio	CO	tracce
Ammoniaca	NH ₃	tracce
Totale (con H₂O)		100,32

Nota :

considerando l'aria secca il valore del vapor acqueo non viene conteggiato e ai fini didattici solitamente vengono considerati solo ossigeno e azoto.

Appendice - B

Si riporta come esempio la *tabella - 2* che prende in esame il coefficiente di assorbimento di tre gas in acqua a diverse temperature (come confronto della solubilità dei gas nei liquidi).

Gas	Temperatura		
	0°	20°	30°
N ₂	0,0235	0,015	0,0134
O ₂	0,0489	0,028	0,0261
CO ₂	1,713	0,88	0,655

Tabella - 2

Consideriamo a titolo esemplificativo il valore dell'azoto alla temperatura di 30 gradi che è pari a 0,0134, questo significa che in una bacinella d'acqua alla temperatura di 30 gradi e sovrastata dal gas azoto alla pressione ambiente (1 atm), si scioglierà in un millimetro di acqua un volume di azoto pari a 0,0134 mL.

La solubilità

Con il termine solubilità si intende la capacità di una sostanza (soluto) di sciogliersi in un'altra (solvente).

Chimicamente viene definita come la massima quantità di soluto che ad una data temperatura e pressione si scioglie in una determinata quantità di solvente.

ovvero:

$$\alpha = c / c_s$$

dove **c** è la concentrazione attuale e **c_s** quella alla saturazione.

Continuando ad aggiungere soluto lo si vedrà precipitare sul fondo del recipiente che contiene il solvente (classico esempio del sale da cucina in un bicchiere d'acqua) e questo vuol dire che la soluzione è satura, ovvero non si potrà più sciogliere altro soluto (ferme restando le condizioni di pressione, temperatura e quantità di solvente).

La concentrazione invece è data dal rapporto tra soluto e solvente per unità di soluzione.

Il grafico sotto riportato mostra l'andamento della curva di saturazione rispetto alla temperatura, ovvero come varia la solubilità con la temperatura.

Tranne alcune eccezioni si nota che i solidi (esempio il sale da cucina) seguono una solubilità diretta (aumenta con l'aumentare della temperatura del solvente) mentre i gas seguono una solubilità inversa (aumenta con il diminuire della temperatura del solvente).

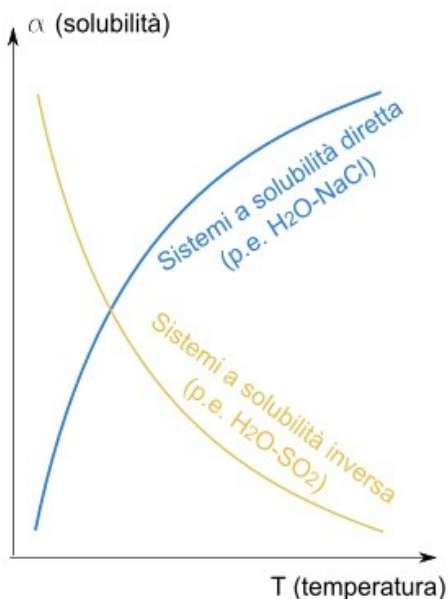


Foto Wikipedia

Per noi subacquei quanto appena detto ha un riscontro pratico nella differenza di pesata che possiamo riscontrare se ci immergiamo in mari freddi (esempio il mar Baltico) che hanno una quantità di sale disciolta (e quindi di densità) minore rispetto a mari caldi (esempio mar Rosso).

Mentre con riferimento alla solubilità dei gas appare chiaro che a parità di muta (ovvero isolamento termico) e del profilo d'immersione, i nostri tessuti tenderanno ad assorbire meno inerte (azoto) se ci immergiamo alle Maldive che non in un fiordo norvegese.

I gas si sciolgono maggiormente in solventi a basse temperature poiché la loro energia cinetica (del solvente) è debole. Pensiamo ad una pentola d'acqua sul fuoco che bolle, la sua energia cinetica (velocità di movimento delle molecole) è in aumento a causa della temperatura quindi un gas che di per se già possiede una elevata energia preferirà cederla (quindi sciogliersi) ad un solvente con bassa temperatura (debole energia cinetica).

Appendice – D

Legge di Fick

La velocità di diffusione di una sostanza attraverso una membrana é direttamente proporzionale all'area della membrana, alla solubilità della sostanza nella membrana, al gradiente di concentrazione e inversamente proporzionale allo spessore della membrana e alla radice quadrata del peso molecolare della sostanza.

ovvero:

$$v_{diff} = A \times S \times \Delta c / t \times \sqrt{pm}$$

dove **A** é l'area della membrana, **S** la solubilità della sostanza nella membrana, **Δc** il gradiente di concentrazione, **t** lo spessore della membrana e **pm** il peso molecolare della sostanza.

Applicandola ad un gas si avranno le seguenti uguaglianze: **Δc = Δp** (differenza delle pressioni) e **S = D** = costante di diffusione.

esempio:

determinare la velocità di diffusione della CO₂ rispetto a quella dell'O₂ :

$$\frac{V_{(CO_2)}}{V_{(O_2)}} = \frac{A \times D_{(CO_2)} \times \Delta p / t \times \sqrt{pm_{(CO_2)}}}{A \times D_{(O_2)} \times \Delta p / t \times \sqrt{pm_{(O_2)}}}$$

considerando che i termini A, Δp e t sono uguali, si ottiene la seguente:

$$\frac{V_{(CO_2)}}{V_{(O_2)}} = \frac{D_{(CO_2)}}{\sqrt{pm_{(CO_2)}}} \times \frac{\sqrt{pm_{(O_2)}}}{D_{(O_2)}}$$

ovvero : la velocità di diffusione é direttamente proporzionale alla solubilità e inversamente proporzionale alla radice quadrata del peso molecolare.

Essendo il coefficiente di solubilità della CO₂ = 0,0032 e dell'O₂ = 0,0013 e i valori dei pm rispettivamente di 44 e 32 si otterrà:

$$\frac{V_{(CO_2)}}{V_{(O_2)}} = \frac{0,032}{\sqrt{44}} \times \frac{\sqrt{32}}{0,0013} = \frac{0,1792}{0,00858} = \mathbf{20,88}$$

La velocità di diffusione della CO₂ é circa 21 volte maggiore di quella dell'O₂.

Conseguenza della legge di Fick é che lo stesso gas sará presente nei vari tessuti in quantitá diverse che dipendono dai parametri appena visti e questo spiega il perché della suddivisione del corpo umano in tessuti (compartimenti) denominati: rapidissimi, rapidi, medi, lenti e lentissimi.

Questa divisione chiamata compartimentazione tessutale o modello compartimentale é alla base dei modelli decompressivi detti appunto compartimentali (esempio Buhlmann) da cui é stato sviluppato l' algoritmo decompressivo ZH-L adoperato in molti computer subacquei.