



LA DECOMPRESSIONE DA ALTOFONDALE

Prof. Luigi Magno

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

È noto che l'assorbimento dei gas da parte dei liquidi è proporzionale alla pressione alla quale essi sono sottoposti ed è parimenti noto che quando si tratta di un miscuglio di gas i suoi componenti sono assorbiti in quantità proporzionale alla pressione parziale di ciascuno di essi.

Nel caso dell'aria la pressione parziale dell'azoto e dell'ossigeno è rispettivamente di 600,4 e 159,6 mmHg. e quindi assai maggiore è l'assorbimento dell'azoto; questo gas pur essendo, a differenza dell'ossigeno estraneo alle esigenze del metabolismo, non è tuttavia un gas inerte, nè privo di effetti tossici.

L'ossigeno assorbito in eccesso si scioglie nel plasma, mentre non aumenta in misura notevole la quantità che si combina con l'emoglobina.

Nel sangue arterioso ed in quello venoso dell'uomo, alla pressione atmosferica esistente a livello del mare, si trovano in media 1,2 cc.% di azoto.

Considerando un eguale coefficiente per tutti gli altri tessuti risulta, ad esempio, che in queste condizioni nella massa corporea di un soggetto del peso di 70 kg. sono disciolti 840 cc. di azoto.

In tal caso alla pressione relativa di tre atmosfere, corrispondenti ad una profondità di 30 m., l'azoto disciolto nel sangue, a saturazione completata, sarà quattro volte tanto (4,8 cc.%) e quindi nella intera massa corporea 3360 cc.

Durante la decompressione dovrà essere eliminato l'azoto disciolto in sovrappiù e cioè 2520 cc., che rappresentano appunto la quantità corrispondente alla differenza fra quella disciolta nell'organismo alla sovrappressione di tre atmosfere e quella in esso già esistente alla pressione atmosferica normale (nel nostro caso 840 cc.).

Considerando una gittata sistolica di 60 cc. con una frequenza di 70 pulsazioni al minuto si ottiene un volume minuto di 4.200 cc.

La quantità di azoto da eliminare essendo del 3,6%, valore corrispondente alla differenza fra la quantità di gas esistenti nel sangue a tre atmosfere di sovrappressione e quella esistente a pressione atmosferica normale (rispettivamente 4,8 e 1,2%), essere eliminati a livello alveolare con questo volume minuto circa 150 cc. di azoto al minuto.

Occorrerebbero quindi per l'eliminazione totale circa 17 minuti.

In realtà il problema risulta notevolmente più complesso perché la quantità di azoto da eliminare è maggiore di quella così calcolata, essendo fra l'altro, il coefficiente di assorbimento dei grassi sensibilmente maggiore di quello del sangue (anche cinque volte più, secondo Vernon e Quincke).

Si deve inoltre considerare che la saturazione di azoto dei vari tessuti avviene in tempi diversi a seconda della loro natura e della loro irrorazione (ogni tessuto ha un proprio tempo di saturazione).

La solubilità dei gas varia anche a seconda della natura del solvente.

Dalle classiche ricerche di Vernon sappiamo che tanto l'ossigeno che l'azoto e così pure l'anidride carbonica, presentano una ben diversa solubilità a seconda che si tratti di acqua o di grasso.

In modo particolare ci interessa il dato che a temperatura corporea il grasso dei mammiferi (analogamente si comporta l'olio di oliva) discioglie circa 5 volte più azoto dell'acqua, del sangue o del plasma sanguigno.

Anche gli altri gas inerti ed i gas respiratori si comportano in modo simile. Nella tabella seguente è riportata la solubilità dei vari gas rispettivamente in acqua ed in olio di oliva per la temperatura standard di 38° e per la pressione atmosferica.

Tab. I - Solubilità dei vari gas in acqua ed in olio d'oliva

Liquido	Elio	Azoto	Ossigeno	Argon	Anidride Carbonica
Acqua	0,0087	0,0127	0,023	0,0262	0,592
Olio di oliva	0,0148	0,0667	0,112	0,1359	—

La solubilità è espressa in cc. di gas disciolto in 1 cc. di solvente a 38° C ed a pressione atmosferica normale (da CLAMANN).

La quantità di gas che può sciogliersi in un determinato solvente può essere calcolata la capacità dell'organismo umano e quindi il suo contenuto in azoto alla pressione atmosferica.

Ponendo ad esempio, per un uomo di 70 kg. un contenuto in tessuti acquosi di 50 kg. e in tessuti grassi di 9 kg. avremo che:

$$\text{Kg. } 50 \times 0,0127 \times 80/100 = \text{cc. } 510$$

$$\text{Kg. } 9 \times 0,0667 \times 80/100 = \text{cc. } 482$$

Totale cc. 992

A pressione atmosferica, a livello del mare, l'organismo umano contiene quindi circa un litro di azoto disciolto nei vari tessuti.

Per ogni atmosfera di pressione in più pertanto l'organismo potrà disciogliere una eguale quantità di azoto.

Se abbassiamo la pressione esterna (come nel volo) o la aumentiamo (come nell'immersione) il corpo umano si troverà ad avere rispettivamente un eccesso o un difetto di gas rispetto all'ambiente e tenderà quindi a cederlo o ad assumerlo.

La diffusione avverrà quindi dal corpo all'aria o viceversa.

Ma questo scambio di gas non potrà avvenire istantaneamente ed indifferentemente perché dipende da diversi fattori fisici o biologici dei quali occorre tener conto.

Questi fattori sono rappresentati da:

- **differenza della concentrazione molecolare tra l'aria ed i tessuti;**
- **viscosità dei tessuti;**
- **distanza tra i capillari e le cellule (distanza intercapillare);**
- **irrorazione capillare (area di diffusione);**
- **flusso ematico (velocità di circolazione);**
- **coefficiente di solubilità del gas nella sostanza organica.**

Per diffusione intendiamo il passaggio di molecole da un sistema fluido ad un altro, nel quale la concentrazione delle molecole stesse è differente.

La legge generale della diffusione stabilisce che, quando la concentrazione delle molecole del gas è più grande in un dato punto del sistema rispetto ad un altro, il numero delle molecole in movimento verso la parte ove vi è una minore concentrazione è più grande che in senso opposto.

Quindi la velocità di diffusione è tanto più elevata quanto maggiore è la differenza di concentrazione molecolare tra un sistema e l'altro, ossia nel nostro caso tra l'aria respirata e i tessuti dell'organismo.

La velocità di diffusione è inoltre proporzionale alla superficie attraverso la quale avvengono gli scambi. Abbiamo già visto, ad esempio, che il contatto dell'aria atmosferica con il sangue attraverso gli alveoli polmonari avviene in una frazione di secondo su di una superficie di 40-80 mq.

La diffusione quindi dell'azoto dall'aria al sangue è praticamente istantanea ed in pochi minuti tutto il sangue può essere saturato (per una determinata variazione della pressione). Nel sangue allora si sarà verificato un aumento della pressione parziale dell'azoto (come degli altri gas del resto) e si sarà creata una corrispondente differenza di pressione tra il sangue ed i tessuti da questo irrorati.

Il gas comincerà quindi a diffondere dai capillari verso l'interno delle cellule e dei tessuti. Ma noi sappiamo che non tutti i tessuti sono egualmente vascolarizzati, e che questa vascolarizzazione capillare varia da momento a momento a seconda del regime di funzione di ogni singolo organo.

Nei muscoli ad esempio la superficie capillare può aumentare dallo stato di riposo a quello di lavoro fino a dieci volte tanto.

La velocità di diffusione dipenderà quindi in modo evidente dalla superficie totale di contatto tra il sangue ed i tessuti.

L'aumento del flusso ematico ossia della velocità di circolazione consente un più rapido scambio tra l'aria ed il sangue fino a certi limiti, oltre i quali il sangue passa attraverso i capillari polmonari senza fare in tempo a saturarsi con il gas atmosferico.

Alla stessa guisa una aumentata velocità di circolazione del sangue attraverso i tessuti consentirà un trasporto maggiore di gas nell'unità di tempo, ma potrà per contro ridurre la diffusione tra i due sistemi.

Più importante è lo spessore di tessuto (cellule o strati di cellule) che separa un capillare dall'altro ossia la distanza che il gas deve superare per diffondere dal sangue al punto più lontano dal capillare.

Infatti, anche per i tessuti viventi, il tempo di diffusione T di un gas è proporzionale al quadrato della distanza L (Eggleton):

$$T = L^2$$

come avviene molto approssimativamente per un gas che debba diffondere dalla superficie verso gli strati inferiori di un liquido.

La diffusione in profondità è molto diversa da tessuto a tessuto e da organo ad organo e ciò spiega le difficoltà alle quali si va incontro quando si voglia calcolare con precisione sufficiente la velocità di diffusione dell'azoto o dell'elio nei tessuti e soprattutto la velocità di eliminazione ai fini del calcolo delle tabelle di decompressione.

Naturalmente nei tessuti grassi il tempo necessario per la saturazione risulta aumentato, non soltanto per la maggiore distanza tra i capillari, ma anche per la maggiore quantità di azoto che essi possono assorbire.

Un altro fattore che regola la velocità di diffusione è dovuto alla viscosità del solvente.

Le soluzioni colloidali (come tali possono essere considerati i tessuti e le cellule) ed i grassi dovrebbero presentare una enorme viscosità e quindi rallentare praticamente all'infinito la diffusione.

Senonchè in pratica va tenuto presente che nei tessuti e nelle cellule esistono spazi attraverso i quali circolano liquidi interstiziali ed i gas in essi disciolti.

Ciò spiega come, ad esempio, la velocità di diffusione dell'azoto sia enormemente più elevata attraverso uno strato di lardo o di gelatina che attraverso uno strato di olio avente un eguale spessore.

Naturalmente questa possibilità di passaggio rapido del gas attraverso un sistema colloidale è possibile soltanto per spessori molto ridotti, come del resto avviene nei tessuti umani.

Infine si deve ricordare che la solubilità dei gas in un liquido, come ad esempio l'acqua, varia notevolmente in funzione della temperatura.

Per i problemi che ci riguardano dobbiamo tuttavia riferirci soltanto alla temperatura corporea di 37°C e questo fattore della solubilità si può quindi considerare costante.

Tuttavia spesso la cute può essere relativamente più fredda rispetto al nucleo corporeo e l'assorbimento del gas risultare ridotto.

Questa variazione è difficile da calcolare, anche perchè si associa ad una ridotta irrorazione periferica indotta dalla vasocostrizione e pertanto in pratica non viene considerata.

Il calcolo delle tabelle di decompressione si basa sui principi fisici di termodinamica applicati alla biologia, secondo criteri ricavati dall'esperienza, anche se siamo ancora lontani dall'aver compreso l'intimo meccanismo della formazione delle bolle o del trasporto dei gas nell'organismo animale e se le reazioni biologiche complicano all'infinito i fenomeni fisici.

La ricerca paziente di modelli matematici adattati alla pratica, iniziata all'inizio del secolo ha consentito all'uomo di arrivare a tollerare decompressioni dalle massime profondità compatibili con le funzioni vitali.

Tali modelli si basano sulle proprietà di solubilità (quantità) e di diffusione dei gas nei vari tessuti del corpo animale (velocità).

Naturalmente dipendendo il tempo di saturazione da tanto diversi e variabili fattori biologici legati all'irrorazione ed alla costituzione fisico-chimica dei diversi tessuti, risulta pressochè impossibile tener conto di un calcolo teorico dell'insieme delle diverse curve che dovrebbero essere calcolate per ogni singolo tessuto e soggette a variare da momento a momento.

Il comportamento di queste curve esponenziali da luogo ad una curva risultante con la quale si può seguire nel tempo la saturazione dell'organismo in toto.

Infatti il sangue, che fa da tessuto intermediario tra l'ambiente e le cellule, non sarà mai completamente saturato finchè non saranno saturati tutti i tessuti, pur avendo esso la possibilità di equilibrarsi con l'ambiente nel giro di pochi minuti.

Il vero comportamento delle curve esponenziali che riflettono la diffusione dell'azoto o dell'elio nell'organismo è stato rivelato dalle ricerche sperimentali sull'eliminazione dei gas dall'uomo e dagli animali sottoposti a respirazione in ossigeno puro.

Già Boycott, Damant e Haldane (1908) avevano calcolato, nei loro studi sulle tabelle di decompressione preventive, che il corpo umano si doveva desaturare secondo una curva esponenziale.

Behnke, Thomson e Shaw (1935), poterono stabilire poi la curva differenziale di eliminazione dell'azoto dal corpo umano, mediante ricerche condotte su uomini respiranti ossigeno puro a livello del mare.

Questi AA, accertarono inoltre che l'attività muscolare accelera la velocità delle prime tre reazioni (N2A, N2B, N2C), le quali, in caso di attività muscolare massimale, presentano costanti di tempo rispettivamente di 0,865; 0,243; 0,048.

Essi poterono pure confermare che le differenti velocità di scambio gassoso dei quattro tipi di tessuto, sopra considerati, sono condizionate oltre che dal contenuto in acqua e lipidi dei tessuti, anche dall'entità della loro irrorazione sanguigna.

Il primo gruppo di tessuti (indicato con A) infatti include certi organi parenchimatosi (fegato, reni, polmoni, ecc.) che possiedono una ricchissima irrorazione ematica e che presentano un tempo di emisaturazione di 1,5 min; il secondo gruppo, che presenta un tempo di emisaturazione di 8 min. è costituito principalmente dal tessuto muscolare; il terzo gruppo, con tempo di emisaturazione di 29,5 min., è costituito da tessuti meno irrorati, quali aponeurosi, tendini e tessuti connettivi in genere; il quarto gruppo con tempo di emisaturazione di 136 min., oltre che tessuti ricchi di lipidi e grassi (midollo osseo, adipe, mielina, grasso omentale, ecc.), comprende anche strutture con scarsa irrorazione ematica (cartilagini, labirinto, ecc.).

Le curve così stabilite illustrano con sufficiente precisione l'andamento nel tempo della desaturazione di un organismo umano, quando la pressione esterna dagli iniziali 570 mm.Hg. dell'azoto cade a 0, come avviene durante la respirazione in ossigeno puro.

Quando la pressione aumenta e l'azoto si trova a pressione maggiore nell'aria che nell'organismo, si verifica il fenomeno della saturazione che segue una curva teoricamente speculare alla precedente.

Questa, d'altra parte, ottenuta respirando ossigeno a pressione normale, è uguale, per andamento e formula, alla curva dell'eliminazione dell'azoto dai tessuti quando l'organismo, che si sia completamente saturato ad un determinato livello di iperpressione ossia ad una determinata profondità, ritorna alla pressione normale.

Per quanto riguarda le miscele respiratorie artificiali, già nel 1947 erano state calcolate tabelle per l'uso dell'elio, con lo stesso criterio di quelle per l'aria, modificando i limiti tollerabili di sovrasaturazione critica dei tessuti in considerazione della maggiore diffusibilità dell'elio e del minore coefficiente di ripartizione elio-acqua di questo gas rispetto all'azoto.

Più recentemente l'immersione a grandi profondità con miscele elio-ossigeno, nella quale può essere vantaggioso per motivi tecnici o economici o fisiologici l'uso alternato o abbinato di azoto (aria) ed elio, ha suggerito un calcolo più sofisticato basato su tessuti a diverso contenuto gassoso o a diverso coefficiente di perfusione ematica (Schreiner e Kelley).

L'equazione fondamentale per il calcolo della situazione della saturazione dei tessuti rimane praticamente la stessa; ma l'intento è quello di valutare la pressione totale dei gas che si sono alternati nello stesso tessuto nei diversi momenti dell'immersione o della decompressione.

Prof. LUIGI MAGNO

Convegno Internazionale

“Adeguamento delle Tecniche di Decompressione nell'Attività Subacquea Industriale”

RAVENNA - Domenica 20 Ottobre 2002