



OSSIGENO: IMPIEGO IN SICUREZZA

Capitano di Fregata Medico
Fabio FARALLI

COMSUBIN
MARINA MILITARE ITALIANA

La scoperta dell'ossigeno come gas è attribuita a Joseph Priestley nel 1775 che lo denominò "dephlogisticated air". Contemporaneamente ma in modo indipendente anche un farmacista svedese, Carl Wilhem Scheele, aveva scoperto l'ossigeno e lo aveva chiamato "fire air". Priestley, descrivendo le proprietà di questo gas, ne prospettava l'impiego terapeutico per affezioni polmonari nelle quali la semplice aria sembrava essere insufficiente ad eliminare "il putrido effluvio flogistico". Beddoes e Watt pubblicarono il primo testo di ossigeno terapia nel 1796, ma tale pratica terapeutica non ebbe il successo aspettato.

Lavoisier nel 1785 cambiò il nome di questo gas da "dephlogisticated air" a "principe acidifiant" o "principe oxygine", dal greco oxys (acido, aceto) e gene (generare, produrre) ritenendo che tutti gli acidi contenessero ossigeno. Un secolo, circa, dopo la scoperta dell'ossigeno, nel 1878, Paul Bert, studiando la "malattia dei cassoni", una inspiegabile, a quel tempo, sindrome patologica che colpiva gli operai che lavoravano alla costruzione dei moli nei porti del Mare del Nord, osservò e descrisse quelle caratteristiche dell'ossigeno che più interessano l'attività subacquea.

Paul Bert nel suo libro "La pression barometrique" descrisse le basi patogenetiche della "malattia dei cassoni" e cercò di indicarne la prevenzione ed i rimedi. In particolare, osservò come la respirazione di ossigeno attenuasse la sintomatologia degli operai affetti da malattia dei cassoni. Nelle sue osservazioni e sperimentazioni si imbatté anche negli effetti tossici dell'ossigeno respirato ad alte pressioni parziali. La crisi iperossica che coinvolge il sistema nervoso centrale porta ancora il suo nome: **"effetto Paul Bert"**.

Più tardi, nel 1899, fu Lorrain Smith ad evidenziare gli effetti tossici dell'ossigeno a livello polmonare : **"effetto Lorrain Smith"**.

Probabilmente il primo uso dell'ossigeno durante la decompressione può essere avvenuto nel 1928 da parte di Damant per la decompressione nel corso di immersioni profonde ad aria.

Dobbiamo probabilmente a Lambertsen nel 1941 la prima applicazione dell'ossigeno, in maniera sistematica, alle decompressioni delle immersioni in miscela. In seguito l'impiego dell'ossigeno in decompressione è divenuto pratica comune, ampiamente usata e, talvolta, abusata.

I rischi connessi con l'impiego dell'ossigeno nella attività subacquea sono legati al suo impiego come gas da immersione, puro od in miscele iperossigenate, o come gas da decompressione.

L'immersione con l'apparecchio ad ossigeno puro è ancora limitata quasi esclusivamente ai militari, anche se recentemente vi è stato un risveglio dell'interesse per questa tecnica di immersione da parte del mondo civile. I problemi connessi con l'impiego di questo tipo di autorespiratore subacqueo sono numerosi, a dispetto della sua relativa semplicità strutturale e funzionale.

Il ruolo dell'ossigeno nella decompressione è quello di rimpiazzare il gas inerte contenuto nella miscela respiratoria al fine di favorire la desaturazione dei tessuti e quindi ridurre la quantità di gas che può contribuire alla formazione delle bolle.

Per comprenderne appieno il meccanismo, occorre fare alcune premesse.

Innanzitutto l'ossigeno deve essere inquadrato dal punto di vista fisico e chimico.

Nella tabella 1 sono riportate le caratteristiche chimico-fisiche dei gas che sono stati usati come gas respiratori nelle attività subacquee umane.

27/06/2005

www.wreckdiveliguria.com

info@wreckdiveliguria.com

Logistics for Divers from Abroad

Tel/Fax +39-0141-213963 – Mobil. +39-349-13 36 764



Tabella 1

Gas	Peso Molecolare	Densità 37°C g/l/ATA	Viscosità 20°C 1 ATA (cP)	Solubilità ml/ml/ATA		Coefficiente di diffusione cm ² /sec × 10 ⁻⁶		Conducibilità termica cal/sec×cm×°C× 10 ⁻⁵ 38°C	Capacità termica cal/g/°C
				acqua 38°C	olio 38°C	Acqua 38°C	olio 38°C		
aria	-	1.139	182.7	-	-	-	-	6.42	1.40
N ₂	28.01	1.1017	175.0	0.013	0.061	30.1	7.04	6.41	1.40
O ₂	32.00	1.2584	201.8	0.095	0.11	28.2	6.59	6.59	1.40
He	4.00	0.1572	194.1	0.0086	0.015	63.2	18.6	36.86	1.66
Ne	20.18	0.7926	311.1	0.0097	0.019	34.8	8.34	11.82	1.64
Ar	39.94	1.571	221.7	0.026	0.14	25.2	5.29	4.42	1.67
H ₂	2.02	0.0792	87.6	0.017	0.048	112.6	26.3	45.87	1.41
CO ₂	44.01	1.7410	148.0	0.563	0.900	24.0	5.62	4.17	1.30

Dalla tabella emergono alcune osservazioni:

- l'ossigeno è un gas denso: il suo peso molecolare è 32, quindi è più pesante dell'azoto, molto più pesante dell'elio e dell'idrogeno;
- l'ossigeno è un gas molto solubile sia nell'acqua che nell'olio, più solubile dell'azoto, molto di più dell'elio e dell'idrogeno;
- l'ossigeno è leggermente meno diffusibile dell'azoto, molto meno rispetto all'elio e dell'idrogeno;

Queste caratteristiche devono essere tenute in debito conto nella elaborazione di una procedura decompressiva con l'impiego di ossigeno.

Nella tabella 2 sono riportate le pressioni parziali dei vari gas componenti l'aria a livello alveolare, arterioso e venoso.

Tabella 2



Gas	Pressione parziale alveolare (mmHg)	Pressione parziale nel sangue arterioso (mmHg)	Pressione parziale nel sangue venoso (mmHg)
Azoto	570	570	570
Ossigeno	104	95	40
Anidride carbonica	40	40	45
Vapore acqueo	46	46	46
Totale	760	751	701

Se noi osserviamo le pressioni parziali dei vari gas, vediamo come la loro somma a livello alveolare sia differente da quella a livello venoso. Rimanendo costante la pressione parziale dell'inerte e del vapore acqueo, si nota una differenza fra la tensione degli altri gas, ossigeno e anidride carbonica. Infatti possiamo notare una differenza di 59 mmHg (760 – 701).

Questo fenomeno è spiegabile nei seguenti termini: il metabolismo dell'organismo produce anidride carbonica consumando ossigeno. La quantità di anidride carbonica prodotta è più o meno simile alla quantità di ossigeno consumata. Controllando la tabella delle caratteristiche fisiche dei gas, possiamo notare come l'anidride carbonica sia estremamente più solubile dell'ossigeno. Questo fa sì che a parità di volume disciolto, la tensione prodotta dalla anidride carbonica sarà molto inferiore. Questa differenza venne chiamata "oxygen window" ("finestra dell'ossigeno") da Behnke, nel 1967.

Tale differenza di tensione aumenta in maniera lineare con l'aumentare della pressione parziale dell'ossigeno inspirato.

Ciò crea un "buco" di pressione nel sangue venoso, che può quindi contenere, per esempio, il gas inerte in eccesso nei tessuti e trasportarlo ai polmoni per la sua eliminazione.

Alte pressioni parziali di ossigeno hanno però anche altri effetti: estremamente importante è la vasocostrizione determinata sia nel distretto arterioso sia nel distretto venoso, ben nota ai medici iperbarici che la sfruttano ai fini antiedemigeni tale effetto risulta essere spiccata a più alte pressioni parziali di ossigeno. Dal punto di vista decompressivo, questo effetto deve, comunque, essere considerato come riduttivo della perfusione dei tessuti. L'ossigeno è ampiamente utilizzato nella via metabolica più importante, la glicolisi aerobica, e la sua utilizzazione porta alla produzione di CO₂.

Il consumo metabolico di ossigeno dipende in massima parte dalle richieste energetiche del nostro organismo ed è interessato in maniera marginale dalla sua pressione parziale.

Di questo deve essere tenuto conto, poiché quando si trova in eccesso, l'ossigeno può contribuire alla formazione di bolle durante la decompressione, come qualsiasi altro gas.

27/06/2005

www.wreckdiveliguria.com

info@wreckdiveliguria.com

Logistics for Divers from Abroad

Tel/Fax +39-0141-213963 – Mobil. +39-349-13 36 764



Infatti Donald nel 1955 parlò di **“oxygen bends”** in seguito ad una serie di esperimenti condotti su capre che respiravano miscele contenenti la stessa pressione parziale di gas inerte, ma differenti pressioni parziali di ossigeno. Anche i risultati di alcuni studi di Weathersby e di Logan eseguiti al fine di dimostrare la validità, nella scelta del profilo decompressivo impiegando miscele nitrox, della teoria della “profondità equivalente in aria”, hanno dimostrato una maggiore incidenza, anche se non statisticamente significativa, di problemi decompressivi nell'impiego di miscele con elevate pressioni parziali di ossigeno, comprese tra 1,3 e 1,6 ATA, rispetto all'aria.

Infine non possono essere dimenticati gli effetti tossici della respirazione di ossigeno iperbarico.

La tossicità neurologica ne limita la pressione parziale massima in decompressione a 1,6 ATA, se non a valori anche inferiori. La tossicità polmonare può invece avere un ruolo nell'alterare la presunta eliminazione di gas inerte, riducendo gli scambi gassosi a livello polmonare.

A questo punto abbiamo tutti gli elementi per valutare l'impiego dell'ossigeno nelle immersioni. I quesiti cui è necessario dare una risposta sono essenzialmente due: quale deve essere la pressione parziale massima dell'ossigeno in fase di immersione e quale deve essere quella massima in fase decompressiva.

Il primo quesito è estremamente importante ai fini della sicurezza dell'immersione stessa. Gran parte degli incidenti occorsi a subacquei che impiegavano miscele iperossigenate, sono derivati da una impropria concentrazione di ossigeno nella miscela stessa.

Sono stati proposti vari limiti di sicurezza. In alcuni specifici campi, quale quello militare, esistendo particolari scopi dell'immersione e potendo contare su una popolazione di subacquei altamente selezionata, i limiti possono essere sensibilmente più elevati che nel campo dell'immersione sportiva, il cui fine è esclusivamente il diletto e nella quale la popolazione di subacquei è estremamente disomogenea e non sempre in ottime condizioni fisiche.

Per questi motivi la pressione parziale massima di ossigeno consentita nell'impiego delle varie apparecchiature viene compresa tra 1,3 e 1,6 ATA nel campo delle immersioni sportive, mentre può arrivare fino a 2,5 ATA, anche se per limitati periodi di tempo, in ambito militare.

Per quanto riguarda, invece, il secondo quesito, cioè quale deve essere la corretta pressione parziale di ossigeno durante la fase decompressiva, non tutto è chiaro.

Limitandosi a considerare gli effetti tossici dell'ossigeno, 1,6 ATA può apparire un limite sicuro, considerando le differenti condizioni nelle quali avviene la decompressione, rispetto alle altre fasi dell'immersione.

Non possiamo dimenticare però le osservazioni di Donald sugli **“oxygen bends”** e quelle di Yount e Lally, che notarono come, per pressioni parziali di ossigeno sopra le 2,4 ATA, la quantità di ossigeno disciolto nel sangue arterioso supera la quantità che il corpo può metabolicamente utilizzare.

Nel momento in cui si supera questa soglia, la pressione parziale di ossigeno nel sangue venoso comincia a salire andandosi a sommare a quella del gas inerte presente.

Inoltre vanno ricordati gli effetti dovuti alla tossicità polmonare dell'ossigeno che oltre a ridurre la capacità vitale, vanno ad alterare anche la diffusione dei gas a livello della membrana alveolo-capillare, riducendo, di fatto, gli scambi gassosi. Gli scambi gassosi sono anche ridotti dall'effetto vasocostrittivo esercitato dalle alte pressioni parziali di ossigeno, che in decompressione possono ridurre la perfusione ematica di vari distretti del nostro corpo, riducendo, quindi, di pari passo, l'eliminazione dell'inerte.

Sembra ormai dimostrato che gli effetti benefici dell'ossigeno, dal punto di vista decompressivo, si riducano drasticamente a partire dalle 2 ATA.

La scelta, quindi, di 1,6 ATA sembrerebbe quindi non solo idonea dal punto di vista della prevenzione della tossicità neurologica dell'ossigeno, ma anche ottimale per quanto riguarda l'efficacia decompressiva.