

## **LE IMMERSIONI PROFONDE IN SICUREZZA: CIRCUITO APERTO E AUTORESPIRATORE A RICICLO**

*Dott. Pasquale Longobardi*

Direttore Sanitario Centro Iperbarico Ravenna; Docente master in Medicina Subacquea e Iperbarica "Piergiorgio Data" Scuola Superiore S. Anna (Pisa)

indirizzo: Centro Iperbarico, via A. Torre 3, 48124 Ravenna, tel. 0544-500152, e-mail: [direzione@iperbaricoravenna.it](mailto:direzione@iperbaricoravenna.it); web: [www.iperbaricoravennablog.it](http://www.iperbaricoravennablog.it)

### **LA DECOMPRESSIONE**

In Italia nell'immersione ricreativa avanzata la decompressione viene effettuata prevalentemente in base ad un profilo elaborato da computer basati sul modello compartimentale, concettualmente simile a quello utilizzato per l'elaborazione delle tabelle U.S. Navy o delle tabelle francesi (Travaux en milieu hyperbare) oppure basati su modelli decompressivi basati sul controllo delle bolle, evidenziando le differenze rispetto ai classici modelli compartimentali.

I modelli compartimentali sono definiti ad una fase (fase disciolta) perché basati sul concetto che il gas inerte diffonde dai compartimenti nel sangue interamente in forma disciolta e per il calcolo della decompressione è tollerato un rapporto critico prestabilito tra la pressione parziale del gas inerte nei compartimenti di riferimento e la pressione idrostatica; se nei compartimenti si supera la massima saturazione consentita di gas inerte (valore M) vi è sovrasaturazione con innesco di bolle di gas inerte. Nel modello compartimentale è consigliato un distacco rapido dal fondo con risalita direttamente in superficie (immersioni in curva di sicurezza) e nelle immersioni che prevedono decompressione le tappe sono vicine alla superficie, in modo da massimizzare il gradiente della pressione parziale del gas inerte tra i compartimenti ed il sangue venoso favorendo l'eliminazione del gas inerte.

Ciò premesso, attualmente vi è un maggiore orientamento verso modelli orientati sul controllo dell'innesco delle bolle. Questi modelli sono definiti a due fasi perché presumono che in decompressione una parte del gas (dal 10% in su) diffonde dai compartimenti verso delle microbolle preesistenti nell'organismo (fase libera) mentre il rimanente gas inerte si dissolve nel sangue venoso (fase disciolta). Pertanto è necessario calcolare la decompressione in modo che il gradiente tra la pressione parziale del gas inerte nei compartimenti e la pressione idrostatica non superi mai un valore critico per l'innesco della formazione di bolle con dimensioni superiori a quanto pianificato prima dell'immersione. Difatti l'ipotesi è che la probabilità dell'incidente da decompressione (pDCI) aumenta in misura direttamente proporzionale con l'aumentare del raggio della bolla. La pDCI supera il 3% (per immersioni quadre le tabelle U.S. Navy hanno, in media, un rischio del 2,2%) quando il raggio delle bolle supera i 60 micron nelle immersioni entro i 40 metri di profondità o i 40 micron nelle immersioni oltre i 40 metri: questo supporta l'ovvia evidenza che nelle immersioni con maggior stress decompressivo (cioè immersioni oltre i 30 metri; immersioni con un tempo di decompressione totale superiore a 30 minuti; intervallo di superficie inferiore alle due ore; immersioni ripetitive con profilo inverso; immersioni multiday) aumenta la probabilità che si verifichi un incidente da decompressione.

La ricerca ha evidenziato che il picco delle bolle si manifesta dai 20 minuti fino alle due ore dopo l'emersione, poi decresce per ridursi significativamente dopo le quattro ore: ne consegue che un intervallo di superficie inferiore alle due ore comporta uno stress decompressivo maggiore nell'immersione ripetitiva. In generale nelle immersioni successive alla prima è particolarmente consigliata la discesa rapida, in modo da creare un gradiente di pressione idrostatica capace di ridurre significativamente il raggio delle bolle di gas inerte residue dopo la prima immersione. Per il calcolo del profilo di decompressione è importante anche la scelta della miscela respiratoria appropriata.

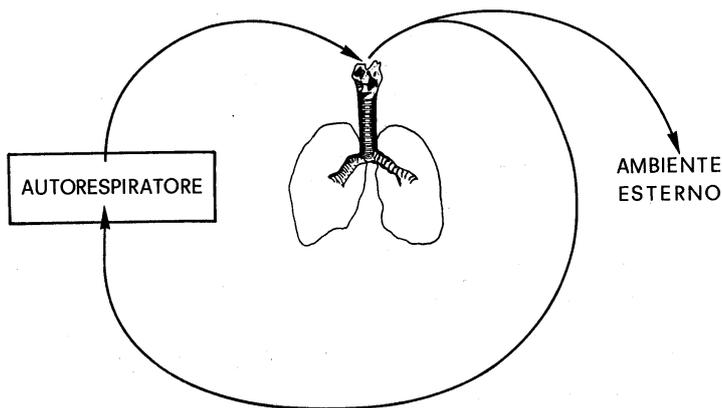
Nel caso di immersione con miscela contenete elio l'orientamento attuale, suggerito dall'Autore, è di utilizzare sul fondo una miscela respiratoria con una pressione parziale di 1,2 – 1,4 bar di ossigeno; per l'azoto è consigliata una pressione parziale di 2,4 - 2,5 bar che corrisponde ad un equivalente narcotico in aria di circa 21 metri (20 – 21.6 mt) e per il resto elio. È altresì

fondamentale calcolare che la pressione parziale dell'ossigeno nella miscela respiratoria rimanga sempre superiore almeno ai 0,5 bar (500 millibar) alle quote di cambio della miscela decompressiva o alle soste profonde. E' sconsigliato l'uso di miscele respiratorie con pressione parziale di ossigeno inferiore ai parametri indicati, sul fondo o durante la risalita, perché si riduce la tolleranza dell'organismo verso errori di decompressione. È altresì sconsigliato l'utilizzo di una pressione parziale di ossigeno superiore ad 1,6 bar nella miscela respiratoria decompressiva perché l'ossigeno di per sé ha un discreto peso molecolare ed è possibile la formazione di "bolle di ossigeno" quando l'offerta supera il fabbisogno del metabolismo cellulare. Inoltre l'eccesso di ossigeno facilita la produzione di radicali liberi, altamente reattivi, in quantità superiore alla capacità di compenso dei sistemi antiossidanti intra ed extracellulari e ciò comporta nell'immediato una vasocostrizione che riduce l'eliminazione del gas inerte e, nel tempo, un danno ossidativo all'endotelio vasale che è l'interfaccia fondamentale nei processi di scambio gassoso tra i tessuti ed il sangue venoso oltre ad avere un ruolo essenziale nella genesi dell'incidente da decompressione. L'ipotesi sulla quale si sta lavorando è che una pressione parziale elevata di elio e una pressione parziale di ossigeno nei limiti indicati per la miscela di fondo (1,2 - 1,4 bar) abbiano invece un effetto protettivo sulla barriera endoteliale, tramite meccanismi che sono ancora da verificare: questo supporta favorevolmente la consuetudine nell'immersione industriale di utilizzare l'eliox (ossigeno/elio).

Quando si utilizza per la decompressione le tabelle U.S. Navy o comunque un computer basato su un modello compartimentale, è prudente adottare alcuni sintetici suggerimenti pratici mutuati dalla ricerca sui modelli per il controllo delle bolle: discesa rapida compatibilmente con la capacità di compensazione dell'orecchio medio e di tolleranza alla narcosi o quantomeno diretta verso la massima profondità pianificata senza soste intermedie. Il distacco dal fondo deve essere graduale. Durante la risalita inserire delle soste di sicurezza profonde.

### L'IMMERSIONE CON AUTORESPIRATORE A RICICLO

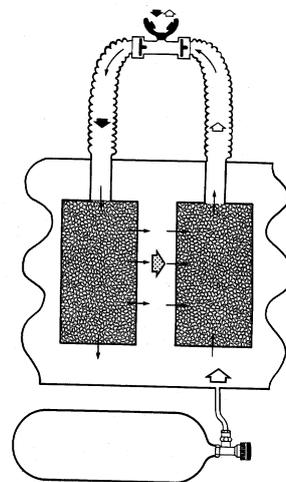
Gli autorespiratori che oggi il subacqueo ricreativo ha a disposizione per le sue immersioni sono fondamentalmente di due tipi: autorespiratore a circuito aperto ad aria (A.R.A.) e autorespiratore a riciclo (A.R.R. o "rebreather") che può essere a circuito semichiuso o chiuso. L'ARR a circuito chiuso può prevedere il controllo della pressione parziale dell'ossigeno, nel sacco polmone, di tipo elettronico, meccanico o misto.



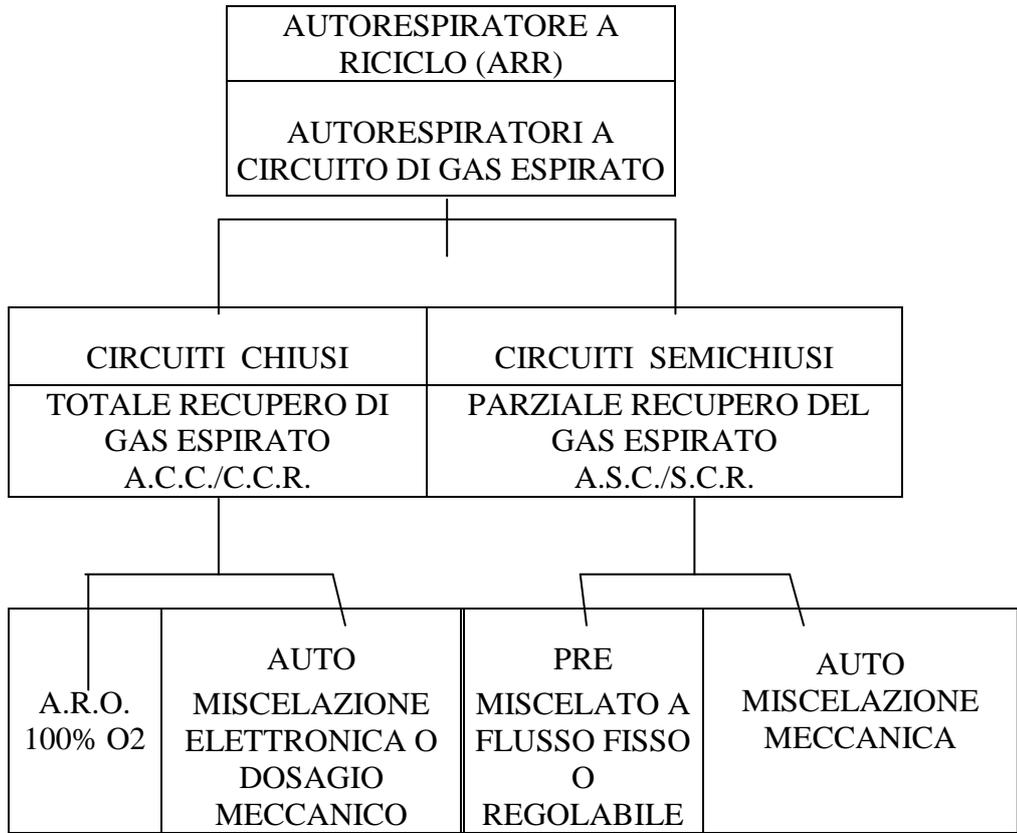
pressioni assolute superiori a quella atmosferica, per la legge di Dalton, la pressione parziale dell'ossigeno (PO<sub>2</sub>) è sufficientemente alta per l'assimilazione dell'ossigeno da parte dell'organismo. Nell'aria espirata è presente anidride carbonica (CO<sub>2</sub>). L'ARR, riciclando in parte o completamente l'aria espirata, la "ricondiziona" per la respirazione eliminando da essa la CO<sub>2</sub>. Si può pensare di riciclare solo una parte della miscela e, secondo lo schema della fig. 2, si ottiene un circuito semi-chiuso (o semi-aperto) oppure si può, come normalmente avviene, fare riciclare tutta la miscela espirata secondo lo schema del circuito chiuso

L'ARR a circuito chiuso offre una lunga autonomia (in quanto il consumo è ridotto alla quantità di ossigeno richiesta dalle funzioni metaboliche). Il dispositivo consente di sfruttare anche quel 16% di ossigeno che normalmente è presente nell'aria espirata.

Operando a

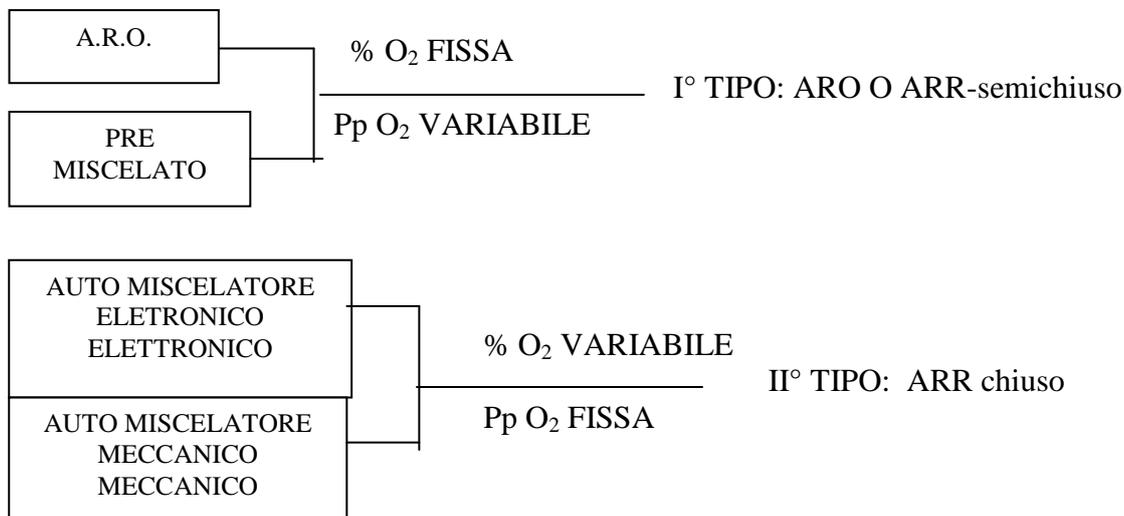


Suddivisione e classificazione degli autorespiratori a riciclo (ARR) in base al principio di funzionamento.



Dallo schema precedente emerge l'altra differenza fondamentale tra i vari concetti funzionali applicati agli autorespiratori a riciclo:

- I) quelli che impiegano solo ossigeno o una miscela precostituita lavorano a percentuale fissa e  $ppO_2$  variabile in funzione della profondità.
- II) Quelli automiscelanti elettronici o meccanici lavorano a percentuale variabile in funzione della profondità e quindi a  $ppO_2$  fissa e predeterminata all'inizio.



Il subacqueo ha, in media, un consumo metabolico di ossigeno di 0,70 l/min. Il consumo metabolico di un essere umano si misura in litri al minuto in superficie per comodità, in quanto sarebbe più corretto dire che il consumo metabolico di un essere umano è corrispondente a una certa quantità (massa) di molecole di ossigeno al minuto e, ovviamente, questo numero non cambia in base alla pressione parziale (profondità dell'immersione) ma solo in base a una variazione di attività fisica eseguita dal subacqueo durante l'immersione. Più elevata sarà la sua attività, più molecole di ossigeno saranno richieste dal metabolismo e viceversa, indipendentemente dalla profondità alla quale si trova il subacqueo. Quindi il consumo metabolico di ossigeno non dipende dalla profondità ma solo dal livello di attività del subacqueo.

Seguendo ora questo concetto fisiologico possiamo calcolare i consumi di gas nelle tre condizioni e cioè:

1- Subacqueo che si immerge in circuito aperto ARA (consumo di gas = 15 Lt/min)

PROFONDITA' metri	CONSUMO GAS lt/min	PROFONDITA' metri	CONSUMO GAS-lt/min
0	15	30	60
10	30	40	75
20	45	50	90

se il subacqueo avesse a disposizione una bombola da 10 Lt a 200 bar la sua autonomia sarebbe:

PROFONDITA' metri	TEMPO MAX min.	PROFONDITA' metri	TEMPO MAX min.
0	133'	30	33'
10	66'	40	26'
20	44'	50	22'

Quindi con l'aumentare della profondità, ci sarà un notevole aumento del consumo di gas da parte del subacqueo e si riduce, di conseguenza, il tempo di permanenza sul fondo. Con l'ARR a circuito chiuso questo problema non esiste in quanto il consumo di gas non dipende dalla frequenza respiratoria ma solo e sempre dal consumo metabolico del subacqueo stesso. Per meglio dire il subacqueo può respirare liberamente in quanto la frequenza respiratoria non cambierà il suo consumo di gas pressurizzato nelle bombole.

2- Subacqueo che si immerge con ARR a circuito chiuso (consumo di gas = 15 Lt/min, consumo metabolico di ossigeno = 0,7 lt/min)

PROFONDITA' metri	CONSUMO GAS Lt/min	PROFONDITA' metri	CONSUMO GAS Lt/min
0	0,7	30	0,7
10	0,7	40	0,7
20	0,7	50	0,7

Di conseguenza, se il subacqueo avesse a disposizione una bombola da 2 Lt a 200 bar la sua autonomia sarebbe:

PROFONDITA' metri	TEMPO MAX min.	PROFONDITA' metri	TEMPO MAX min.
0	571'	30	571'
10	571'	40	571'
20	571'	50	571'

Questi sono consumi ideali basati sulla possibilità di razionare al meglio il gas a disposizione. Nella realtà il subacqueo che utilizza l'ARR, specie se neofita, farà un largo uso dei BY-PASS durante le varie fasi di immersione e ciò riduce l'autonomia. In ogni caso il risparmio di gas è più che evidente e soprattutto costante indipendentemente dalla profondità

### ***Cenni di bibliografia***

1. N. Gaskins, RD Vann, D. Needham ed al., Atti UHMS Annual Meeting 2001;
2. Manuale U.S. Navy, edizione 1996, paragrafo 5-4.5.1;
3. J.W. Tyrrell, P. Attard . Phys. Rev. Lett. 87, 176104, 2001;
4. Francesco Clai, tesi Scuola di specializzazione in Medicina del Nuoto e delle Attività Subacquee - Università di Chieti, relatore: dott. P. Longobardi (direttore: Prof. P.G. Data), anno 1999-2000;
5. Bruce R. Wienke, "Technical Diving in Depth", Best Publishing Company, 2002 (book no. B1035)
6. Corrado Bonuccelli, "L'immersione tecnica con miscela", Edizioni La Mandragora, 2001.
7. J.M. Martin, S.R. Thom "Vascular Leukocyte Sequestration in Decompression Sickness and Prophylactic Hyperbaric Oxygen Therapy in Rats". Aviation, Space and Environmental Medicine vol. 73, No 6, June 2002.
8. Autorespiratore a riciclo: materiale didattico fornito dalla Human Breathing Technology (Trieste)