

"I PROBLEMI FISICI DELL'IMMERSIONE SUBACQUEA"

Premessa

Questa trattazione, più che una tesi scientifica, vuole essere una guida esatta per chi si avvicina ai problemi del subacqueo, ed un utile aiuto a chi voglia imparare le regole ed i rischi dell'immersione.

Prima di considerare la problematica dell'immersione, è bene definire le regole fisiche che vi interverranno.

Costituzione della materia

La materia è formata di molecole, minuscole particelle che non possono essere spezzate meccanicamente, ma solo con reazioni chimiche.

Peso specifico e volume

Ogni molecola ha un peso, cioè viene attirata dalla Terra con una certa forza. Il peso di un oggetto è dato dalla somma dei pesi delle molecole che lo compongono. L'unità di misura del peso, nel sistema MKS (metro-chiogrammo-secondo), è il Kg.

In certi corpi le molecole sono molto leggere, in altri pesanti, ed inoltre possono essere più o meno vicine le une alle altre, per cui 1 Kg di una sostanza ed 1 Kg di un'altra possono non occupare lo stesso spazio. Si dice che la sostanza che occupa meno spazio ha un più elevato peso specifico: quest'ultimo si definisce quindi come rapporto fra il peso ed il volume di un corpo. Il volume si misura solitamente in m^3 , dm^3 (o litri), cm^3 .

Stati fisici della materia

Le molecole possono essere o fittamente incastrate fra di loro, pur conservando certi spazi tra di esse, o possono essere vicine ma non collegate; oppure distanti e libere le une dalle altre; nel primo di questi casi si dice che la materia è allo stato solido, indeformabile ed incomprimibile; nel secondo è allo stato liquido, deformabile ed incomprimibile; nel terzo è allo stato aeriforme, deformabile e comprimibile.

Calore e temperatura

Le molecole sono sempre in movimento e si urtano continuamente le une con le altre. Chiamiamo questo movimento "calore", e chiamiamo "temperatura" l'energia cinetica media (cioè di movimento) delle molecole: per cui, una grande quantità di calore significa molte molecole in movimento, mentre una elevata temperatura significa movimenti ampi e frequenti delle molecole. La stessa quantità di calore posta, ad esempio, in 100 molecole, provoca una certa temperatura; posta in 200, una temperatura minore della metà. Il calore si misura in calorie, la temperatura in gradi ($^{\circ}$), solitamente centigradi ($^{\circ}\text{C}$).

Passaggi di stato della materia

I differenti stati fisici della materia sono appunto dovuti alla temperatura: infatti, riscaldando un solido si nota che le molecole, oscillando, si allontanano le une dalle altre ed il corpo si dilata finché "fonde" ad una ben determinata temperatura. Tutto il calore che si continua a somministrare, viene impiegato per la fusione e finché il corpo non è passato tutto allo stato liquido la temperatura non sale. Continuando a riscaldar il fenomeno si ripete per il passaggio liquido \rightarrow aeriforme (che si chiama "vaporizzazione"), anche qui ad una ben determinata temperatura. Queste temperature, o "punti di passaggio di stato", dipendono, oltre che dalla natura del corpo, dalla pressione atmosferica, come vedremo in seguito.

Ovviamente, sottraendo calore ad un liquido, giunto alla temperatura alla quale era fuso, solidificherà.

La pressione

La pressione è il rapporto tra la forza che agisce su una superficie e l'area della superficie stessa. Si esprime quindi, solitamente, in Kg/cm^2 . Una pressione, ad esempio, può essere quella di un gas contenuto in un recipiente, o quella dell'aria. Ma può anche essere la pressione di un dito su un tavolo, ecc..

Comportamento dei fluidi compressi

Se esercitiamo una pressione su un fluido (gas o liquido) chiuso in un recipiente, osserviamo che essa si trasmette su tutti i punti del recipiente stesso, per cui possiamo concludere che, all'interno di un fluido,

una pressione si trasmette in tutte le direzioni. L'aria, ad esempio, esercita la pressione dovuta al suo peso tanto sopra che sotto ad un tavolo. Si può quindi enunciare il principio di Pascal: "la pressione esercitata in un punto di un fluido si trasmette con la medesima intensità in tutte le direzioni".

Influenza della pressione sui passaggi di stato

Abbiamo visto che i passaggi di stato avvengono a ben determinate temperature; abbiamo però considerato finora di trovarci a pressione atmosferica normale. Se la pressione dell'aria aumenta rispetto a quella normale, variano le temperature a cui avvengono i passaggi di stato; ovviamente, se la pressione diminuisce, la variazione è in senso opposto. Vi sono, inoltre, sostanze che, passando di stato, aumentano di volume, altre invece che diminuiscono: se una sostanza aumenta di volume nei passaggi nel senso solido \rightarrow liquido \rightarrow aeriforme, in quelli in senso opposto diminuisce di volume. Consideriamo i seguenti quattro possibili casi:

- a) Un corpo passa di stato nel senso solido \rightarrow liquido \rightarrow aeriforme, e, nel passare di stato in questo senso, aumenta di volume. In questo caso, la pressione atmosferica contrasta l'espansione del corpo; per cui, aumentando la pressione, il punto di passaggio di stato si innalza, ovvero aumenta la temperatura necessaria affinchè il passaggio avvenga.
- b) Un corpo passa di stato nel senso solido \rightarrow liquido \rightarrow aeriforme e, nel passare di stato in questo senso, diminuisce di volume. In questo caso, la pressione atmosferica favorisce la diminuzione di volume; per cui, aumentando la pressione, il punto di passaggio di stato si abbassa.
- c) Un corpo passa di stato nel senso aeriforme \rightarrow liquido \rightarrow solido e, nel passare di stato in questo senso, aumenta di volume. In questo caso, la pressione atmosferica ostacola l'espansione del corpo, ed aumentando la pressione è necessario raggiungere una temperatura inferiore affinchè il passaggio avvenga.
- d) Un corpo passa di stato nel senso aeriforme \rightarrow liquido \rightarrow solido e, nel passare di stato, diminuisce di volume. In questo caso, la pressione atmosferica favorisce la diminuzione di volume ed è necessaria una temperatura meno bassa, aumentando la pressione, affinchè il passaggio avvenga.

Vapori e gas

Visto ciò, dovrebbe essere possibile, comprimendo un aeriforme che liquefaccendo diminuisce di volume, far avvenire il passaggio aeriforme → liquido senza raffreddare. Si vede però che ciò avviene solo se la temperatura dell'aeriforme è sotto ad un certo valore, detto "critico": in questo caso si dice che l'aeriforme è un vapore, mentre se si trova al disopra di questa temperatura è un gas. Un gas, quindi, anche sottoposto a pressioni enormi, non liquefa.

Relazione fra pressione e volume di un gas (Vedi Figura 1)

Abbiamo parlato di comprimere un gas: ciò significa diminuire il volume in cui il gas è costretto, di modo che aumenti la sua pressione. Si verifica, infatti, sperimentalmente, che le due grandezze sono inversamente proporzionali, cioè raddoppiando o dimezzando il volume a disposizione di una massa di gas e mantenendo costante la temperatura, dimezza o raddoppia la sua pressione, e così via. Solo con pressioni molto basse o molto alte ciò non si verifica esattamente nella misura prevista. Si può quindi enunciare la legge di Boyle: "a temperatura costante, la pressione di una massa di gas è inversamente proporzionale al suo volume". Essa si esprime con la nota formula

$$P = \frac{\text{costante}}{V}$$

in cui P è uguale a pressione, V a volume e la costante dipende dalla temperatura.

Relazione fra temperatura e pressione di un gas

Anche la temperatura influisce sulla pressione di un gas, ma non con diretta proporzionalità. Infatti, passando da 10°C a 20°C la pressione di una massa di gas non tenuta in un recipiente non raddoppia, ma aumenta solo di poco. La proporzionalità invece è rispettata se consideriamo i gradi assolti.

P

FIGURA n° 1

ipessa di Boyie

V

100
P
e 90 P
r
c
o
n
t
u
a
i
s
a
t
u
r
a
z
i
o
n
e
0

FIGURA n° 2

Curva di saturazione

0 1 2 3 4 5 x

Multiplo del tempo richiesto per metà saturazione

soluti, cioè quelli che partono da -273°C con intervalli, di grado in grado, uguali a quelli centigradi. Per cui un gas, passando da 100° K (Kelvin cioè assoluti) a 200° K raddoppia effettivamente la sua pressione, a volume costante; se, invece, si mantiene costante la pressione, il volume raddoppia. Da questo fatto è stata enunciata la "Legge di Charles": "A volume costante, la pressione di un gas è direttamente proporzionale alla sua temperatura assoluta".

Inoltre, se comprimiamo un gas, questo si riscalda, mentre se lo facciamo espandere, esso si raffredda: questo interessa molto il subacqueo, poichè quando "carica" le bombole, cioè comprime aria in esse, l'aria, compressa, si riscalda e raggiunge una pressione più elevata di quella che avrebbe a temperatura ambiente; dopo un po' le bombole si raffreddano, ed ecco che in esse troviamo meno aria di quanto ci aspettavamo, e dobbiamo caricarle ancora un poco. Similmente, aprendo il rubinetto delle bombole, esce un getto d'aria che, espandendosi, si raffredda moltissimo, al punto che ponendovi un dito contro si riportano ustioni da congelamento.

Gas perfetti e reali

Abbiamo visto che queste regole non sono esatte al 100%, ma sempre leggermente approssimate; questo perchè esse varrebbero esattamente solo per un gas "perfetto", nel quale cioè le molecole fossero prive di dimensione; essendo invece, anche se poco, estese nello spazio e dotate di massa, si respingono quando sono molto vicine, mentre si attirano per coesione se molto distanti. Per cui un gas reale, con uno spazio enorme a disposizione, non lo occupa mai tutto, ed arriva a non esercitare più alcuna pressione; viceversa, se è molto compresso, l'aumento di pressione è maggiore di quanto dovrebbe avvenire in relazione alla diminuzione del volume. Tuttavia, nella pratica, gli scarti sono minimi ed i gas che interessano il subacqueo sono tutti, tranne il CO_2 , molto vicini alle condizioni del gas perfetto.

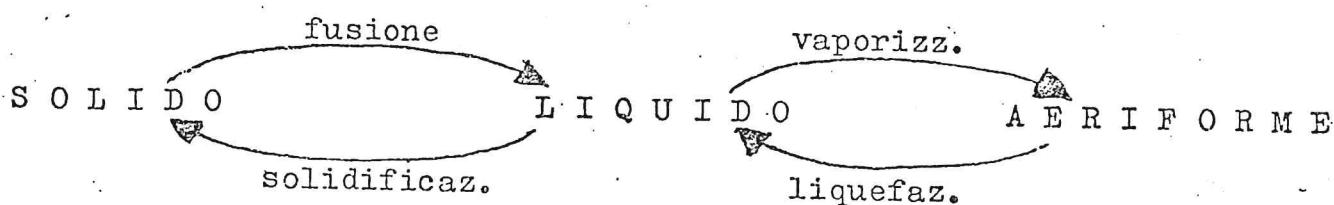
Breve riepilogo dei principi enunciati

Prima di passare alle considerazioni pratiche sui problemi del subacqueo, ricapitoliamo brevemente le grandezze fisiche e le rispettive unità di misura e le regole fisiche enunciate.

TABELLA RIASSUNTIVA

GRANDEZZA FISICA	DEFINIZIONE	UNITÀ DI MISURA	DEFINIZIONE
Peso	Forza con cui un corpo è attratto al centro della Terra	Kg	Peso di un litro di acqua distillata a 4°C
Volume	Spazio occupato da un corpo	m ³ , dm ³ , cm ³	Cubo con il lato di un m, un dm, un cm (il dm ³ è un litro)
Peso specifico	Rapporto fra peso e volume di un corpo	Kg/dm ³	Peso di un dm ³ del corpo (se è omogeneo)
Calore	Energia imprigionata nelle oscillazioni delle molecole	caloria (cal)	Quantità di calore necessaria per far aumentare di 1°C un litro di H ₂ O da 14,5°C a 15,5°C.
Temperatura	Energia cinetica media delle molecole	°C	Centesima parte dell'intervallo fra la temperatura del ghiaccio fondente e dell'H ₂ O bollente a pressione atmosferica normale.
pressione	Rapporto tra la forza agente su una superficie e l'area della superficie stessa	Kg/cm ²	Pressione esercitata dalla forza di un Kg sull'area di un cm ²

NOMENCLATURA DEI PASSAGGI DI STATO



RELAZIONE FRA PRESSIONE, VOLUME E TEMPERATURA ASSOLUTA DI UN GAS

$$P \times V = B \times T$$

in cui: P = pressione; V = volume; B = pressione x volume ad 1°K; T = temperatura assoluta.

Composizione dell'aria

Passiamo a considerare la composizione del miscuglio di gas che costituisce l'atmosfera; esso è costituito da due componenti principali, O_2 e N_2 , cioè ossigeno ed azoto, presenti circa nella seguente percentuale: O_2 20% ed N_2 78%. Il restante 2% è costituito per la maggior parte da gas inerti ed vapor d'acqua. E' presente anche il CO_2 nella percentuale di 0,03%. Quest'ultima viene immessa nell'atmosfera dagli organismi viventi (respirazione) e dalle combustioni. La pressione di ogni gas non è quella del miscuglio, ma solo la parte determinata dalla sua percentuale di ciascuno; ad esempio, se l'aria si trova alla pressione di 1 Kg/cm^2 , l' O_2 che è in essa si trova a 0,2 Kg/cm^2 e l' N_2 a 0,78 Kg/cm^2 . Infatti, si ha la Legge di Dalton, che dice: "La pressione di un miscuglio di gas è data dalla somma delle pressioni dei gas componenti il miscuglio".

Si verifica inoltre quanto enunciato dalla Legge di Henry: "Quando un gas preme (esercita pressione) su un liquido, vi passa in soluzione (cioè va ad occupare gli spazi fra le molecole del liquido) finché non raggiunge in esso (quindi negli spazi intermolecolari) la stessa pressione con cui vi preme sopra". Questo, nel caso di un miscuglio di gas, avviene indipendentemente un gas dall'altro, in relazione ciascuno alla propria pressione parziale. Quando un gas smette di esercitare la sua pressione, quello dissolto si libera sotto forma di minutissime bolle, come ad esempio nell'effervescenza dell'acqua minerale gassata.

Velocità dei passaggi in soluzione (vedi Fig.2)

La velocità del passaggio in soluzione e della liberazione (cioè il numero di molecole che attraversano la superficie del liquido in 1 sec.) è direttamente proporzionale alla differenza tra la pressione del gas premente e quella del soluto. Per cui, se il gas non esercitava prima alcuna pressione all'inizio questa differenza è massima ed il passaggio è rapidissimo; in seguito la velocità diminuisce rapidamente per raggiungere, dopo un certo tempo, il valore 0, poiché le due pressioni si sono equilibrate. Si dice allora che il liquido è saturo di quel gas a quella pressione. Osservando la figura 2, notiamo che il tempo di emisaturazione (saturazione a metà), cioè a pressione $\frac{1}{2}$ di quella del gas premente) è circa 1/6 del tempo necessario per la saturazione completa, e questo perchè all'inizio la velocità di passaggio è

molto più elevata.

Il tracciato ha la stessa forma anche se il liquido era saturo di gas ad una certa pressione e si aumenta la pressione del gas premente.

Ripetendo l'esperimento con gas prementi a diverse pressioni, si vede che tanto il tempo di emisaturazione che quello di saturazione restano gli stessi per qualunque pressione del gas, per cui si può concludere che sono caratteristici del comportamento di quel liquido con quel gas. *

Comportamento fisico del nostro organismo

Il nostro organismo contiene circa il 75 % di acqua, per cui si comporta come un liquido. Quando respiriamo, l' O_2 passa in soluzione nel sangue, dove la sua pressione parziale è mantenuta bassa dall'emoglobina, che lo fissa. Questo processo avviene finchè la pressione dell' O_2 nei nostri polmoni arriva a circa $0,16 \text{ Kg/cm}^2$; al di sotto di questa pressione l' O_2 trova molta difficoltà a passare in soluzione nel sangue.

Contemporaneamente ed indipendentemente, il CO_2 si libera dal sangue, fino a raggiungere nel miscuglio gassoso una pressione di circa $0,04 \text{ Kg/cm}^2$; i due rispettivi passaggi, anche se in senso inverso, non si intralciano, vista anche la grande superficie a disposizione (circa 70 m^2).

Ovviamente, con continui atti respiratori si ricambia il miscuglio nei polmoni, sicchè il doppio passaggio alveolare avviene in continuità.

Apnea e sue conseguenze

In caso di apnea, invece, cioè di sospensione dell'attività respiratoria questo passaggio si prolunga, fino quasi ad arrestarsi, quando l' O_2 rimasto nei polmoni è troppo poco ed il CO_2 accumulato è troppo. Ovviamente, occorre

(*) Si ricorda, per evitare confusione, che la pressione di un gas è direttamente proporzionale al numero di molecole del gas presenti. Ad esempio, in 1 litro di H_2 c'è lo stesso numero di molecole che in un litro di ossigeno, sempre che la pressione sia la stessa, come vuole il noto principio di Avogadro. Quindi è la stessa cosa parlare del numero di molecole dei gas in soluzione o della pressione del gas soluto.

sospendere l'apnea prima di arrivare ad uno di questi due limiti. (carsi:

Non è detto che questi due fatti avvengano insieme: Infatti, può verifi-

A) Sincope da ipercapnia. Se l'apnea è avvenuta dopo uno sforzo, nell'organismo è presente molto CO_2 , che satura ben presto il miscuglio polmonare, provoca desiderio di respirare, colpi al diaframma e, se l'apnea viene protratta, sincope. Questo, senza che venga a mancare l' O_2 , il quale continua a venir assorbito.

B) Sincope da ipossia. Se invece l'apnea avviene dopo una lunga e profonda ventilazione, il CO_2 nell'organismo è stato quasi completamente eliminato, ed in questo caso l' O_2 termina prima che il CO_2 raggiunga una pressione tale, nei nostri polmoni, da dare stimolo respiratorio e colpi diaframmatici; per cui si sviene senza accorgersene, e quel che è peggio, rilassandosi completamente, ed è quindi facile inalare acqua se ci si trova in immersione. Questa sincope è quindi ancora più pericolosa della precedente, che viene facilmente avvertita ed evitata.

Influenza della pressione dell'acqua sul miscuglio polmonare

In immersione, si aggiunge un altro fatto: l' H_2O e l'aria, ~~xxx~~ a causa del loro peso, esercitano una pressione, che è tanto maggiore quanto più alta è la colonna di gas o di liquido che ci sovrasta; per la precisione, infatti, la relazione di Stevino dice che "la pressione esercitata da un fluido è data dalla densità del fluido per l'altezza della superficie libera del fluido, dal punto considerato per l'accelerazione di gravità". Quindi l'aria ha, al livello del mare, una pressione di circa 1 Kg/cm^2 (per la precisione "1 atmosfera", cioè $1,033 \text{ Kg/cm}^2$), mentre l' H_2O esercita una pressione di circa 1 Kg/cm^2 ogni 10 m di profondità, pressione che si aggiunge a quella dell'aria.

Quindi, se ci immergiamo in apnea, anche l'aria che c'è nei nostri polmoni subisce un aumento di pressione ed una conseguente diminuzione di volume. Supponiamo di immergerci a 10 m di profondità: la pressione è variata da 1 a 2 Kg/cm^2 e, di conseguenza, se avevamo nei polmoni 5 litri d'aria, addesso ne avremo 2,5. In quest'aria è contenuto O_2 a pressione doppia del normale, che viene quindi assorbito molto più rapidamente ed in misura maggiore che in superficie. Il CO_2 , invece, si libera quasi normalmente, ma

avendo a disposizione un volume di gas minore della metà di quello alla superficie, lo satura molto prima e dà quindi molto prima lo stimolo a respirare e a risalire. Però, risalendo, il volume dell'aria nei polmoni aumenta, diminuisce la pressione del CO₂ e, con essa, la voglia di respirare. Ma diminuisce anche la pressione dell'O₂, che era stato assorbito di più di quanto possibile in superficie, per cui ci troviamo ancora una volta senza O₂, anche se il CO₂ non è ancora molto alto.

Quindi, ⁱⁿ immersionsi profonde in apnea bisogna sempre risalire il più velocemente possibile, anche se, risalendo, scompare lo stimolo a respirare.

Compensazione delle cavità nel nostro organismo

Come abbiamo visto, il subacqueo che si immerge vede diminuire il volume del gas contenuto nel suo organismo: e se ciò non crea troppi problemi nei polmoni, nelle cavità nasali ed auricolari, è necessario che la pressione si equilibri con quella esterna, per evitare rotture dei timpani, emorragie, ecc.. Per fortuna, la natura ci ha dotato di condotti che, con opportuni accorgimenti, permettono l'equilibrarsi delle pressioni interne. Queste manovre si chiamano compensazione, e la loro mancata esecuzione può provocare danni ai timpani già a partire da 4-5 metri di profondità. La necessità di queste manovre è massima nei primi metri, mentre diminuisce in profondità, poichè proprio nei primi metri è massima la variazione di pressione e, quindi, di volume.

Il "blood shift" (vedi Fig. 3)

Nel caso di apnee molto profonde (50 m o più), il volume di gas a disposizione nei polmoni diventa troppo ridotto per riempire le cavità toraciche e bronco-tracheali; per cui si ha, dapprima, l'impressione di avere i polmoni vuoti, poi, continuando a scendere, la cassa toracica si schiaccia ed arriverebbe a rompersi se il sangue non andasse, in seguito alla pressione, a riempire le cavità prima occupate dai gas.

E' questo il fenomeno del "blood shift", che inizia fin dai primi metri di immersione, ma diventa evidente solo a grandi profondità. Grazie a questo fenomeno la profondità massima teorica di immersione in apnea si sposta da circa 40 metri a oltre cento.

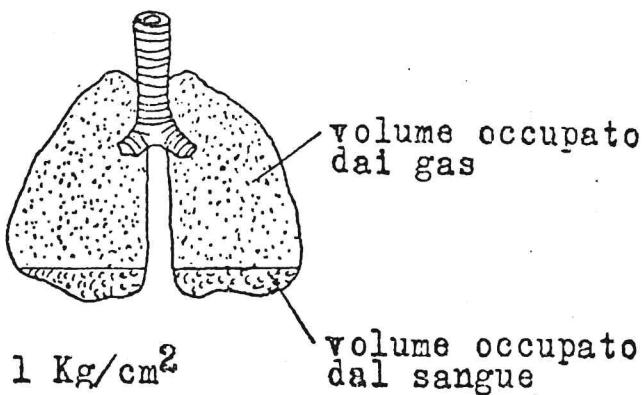
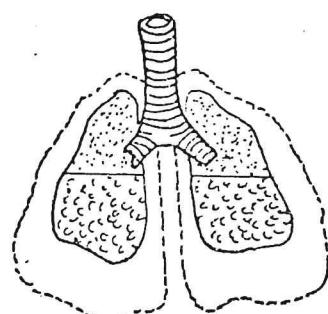
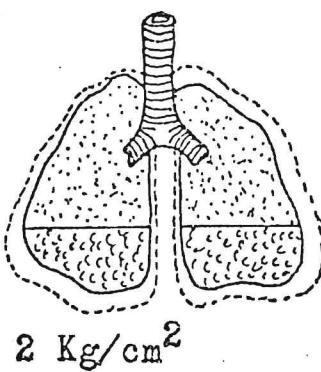


FIGURA n° 3

Blood shift

Vediamo in questi disegni la variazione subita dal volume dei gas, del sangue e dei polmoni in una immersione in apnea a 40 metri di profondità : il sangue occupa uno spazio sempre maggiore, ed arriverebbe a riempire totalmente i polmoni a circa 100 metri di profondità .



Principio di Archimede

Si è finora dato per scontato che il subacqueo si immerga in apnea, ma perchè ciò sia possibile, è necessario che non galleggi troppo. Infatti "qualsiasi corpo, immerso in un liquido, riceve una spinta dal basso verso l'alto pari al peso del volume del liquido spostato", conformemente al "principio di Archimede". Ad esempio, un uomo che ha un volume di 60 litri, immerso in acqua distillata, riceve una spinta verso l'alto di 60 Kg, mentre se l'acqua è salata, la spinta è di qualche chilogrammo superiore, poichè un litro di acqua salata pesa di più di un litro di acqua distillata.

Se ~~per~~ questo individuo pesa di più della spinta ricevuta affonda; se invece pesa di meno, galleggia. Si può anche dire che un corpo galleggia se il suo peso specifico è minore di quello del liquido in cui viene immerso, mentre se è maggiore affonda.

Problemi del galleggiamento

Il corpo umano, però, non ha un volume costante, ma esso varia a seconda del volume di gas che abbiamo nei polmoni: quindi, poichè il peso resta ovviamente lo stesso, a polmoni pieni si galleggia, mentre a polmoni vuoti si affonda (riferendosi a persone a peso specifico normale). Inoltre, essendo la cassa toracica, che è la parte più leggera del nostro organismo, posta nella parte superiore del corpo, un uomo che si abbandoni alla sola spinta di galleggiamento a polmoni pieni finisce in una posizione intermedia fra bocconi e in piedi, colla faccia sommersa. I subacquei indossano poi indumenti protettivi che, contenendo molta aria in piccole cellette, danno una spinta positiva di 4-5 Kg. Il subacqueo allora si zavorra, per ripristinare l'equilibrio idrostatico preesistente. Questi indumenti, però, come i polmoni dell'uomo, scendendo in profondità si schiacciano, per la pressione dell'acqua, e, diminuendo il loro volume, diminuisce anche la loro spinta idrostatica. In conseguenza di ciò, anche se in superficie si galleggia, sotto una certa profondità si affonda, e può essere difficoltoso risalire: se si sceglie un assetto di galleggiamento normale, questa profondità è di circa 10-15 metri. Questo fenomeno si risente meno se si respira da un autorespiratore, poichè i polmoni non si schiacciano, visto che respiriamo un miscuglio a pressione ambiente. S'aggiunge però la variazione di peso delle bombole: esse, da

arie, pesano circa 4,5 Kg in più che da vuote, per il peso dell'aria contenuta in esse. Visto che durante l'immersione le bombole si vuotano, alla fine ci troviamo più leggeri di qualche chilo e ciò ci mette in difficoltà.

l'equilibratore idrostatico (vedi Fig. 4)

Per ovviare a tutti questi fatti, sono stati costruiti gli equilibratori idrostatici. Essi sono costituiti, in pratica, da sacchi di gomma, gonfiabili con l'aria delle bombole e vuotabili con un pulsante.

Con essi, si può sempre raggiungere il perfetto equilibrio idrostatico, facendo variare il volume dei medesimi e, di conseguenza, la spinta idrostatica. Contrariamente a quanto si potrebbe pensare, l'equilibratore riduce il consumo di aria, nonostante ne attinga dalle bombole, poiché permette di muoversi con molta minor fatica e senza sprecare energie per non affondare o non emergere.

Il più grave rischio di questi apparecchi è la risalita "a pallone" incontrollata: se si gonfia troppo il sacco, si risale troppo rapidamente, e si rischia l'embolia. Infatti, la diminuzione di pressione conseguente alla risalita fa aumentare ulteriormente il volume del gas nel sacco, per cui la velocità di risalita aumenta continuamente. Ciò avviene però solo per subacquei che usano da poco questo apparecchio; in seguito, con la confidenza, è più difficile commettere errori simili.

li autorespiratori ad aria compressa (vedi Fig. 5 a, b, c;d)

Illustriamo ora il funzionamento di autorespiratore ad aria compressa, comunemente detto bombole. In esso l'aria, una volta attinta dalle bombole, viene respirata e quindi scaricata in acqua: per questo si dice che è un autorespiratore a "circuito aperto". Consta essenzialmente di due parti: il serbatoio e l'erogatore.

Il serbatoio è costituito da un numero variabile di bombole (solitamente a una a tre) di capacità e pressione di carica pure variabili. L'apparecchio più comune ha due bombole da 10 litri ciascuna, caricabili a 200 Kg/cm^2 : esse sono collegate mediante una rubinetteria, dotata di riserva. Quest'ultima è solitamente realizzata con un pistone che, spinto da una molla, tende a chiudere il collegamento di una bombola (vedi Fig. 5 b): quando la pressione nelle

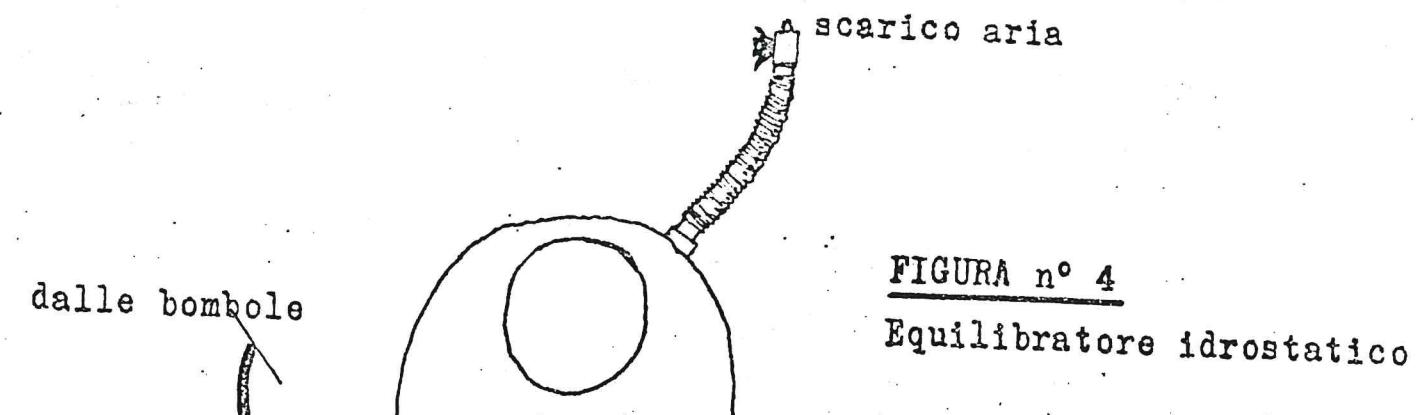


FIGURA n° 4

Equilibratore idrostatico

rubinetti

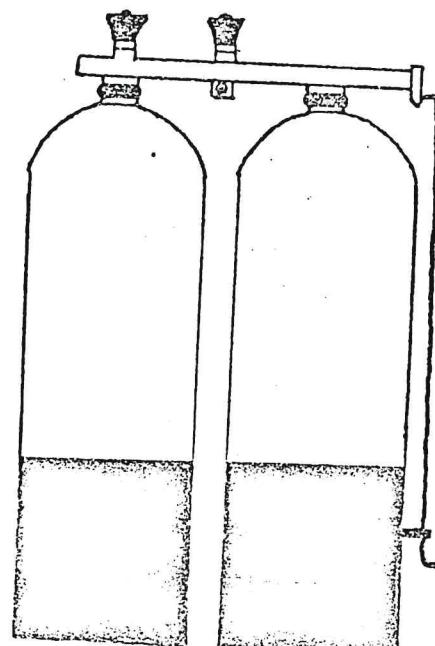
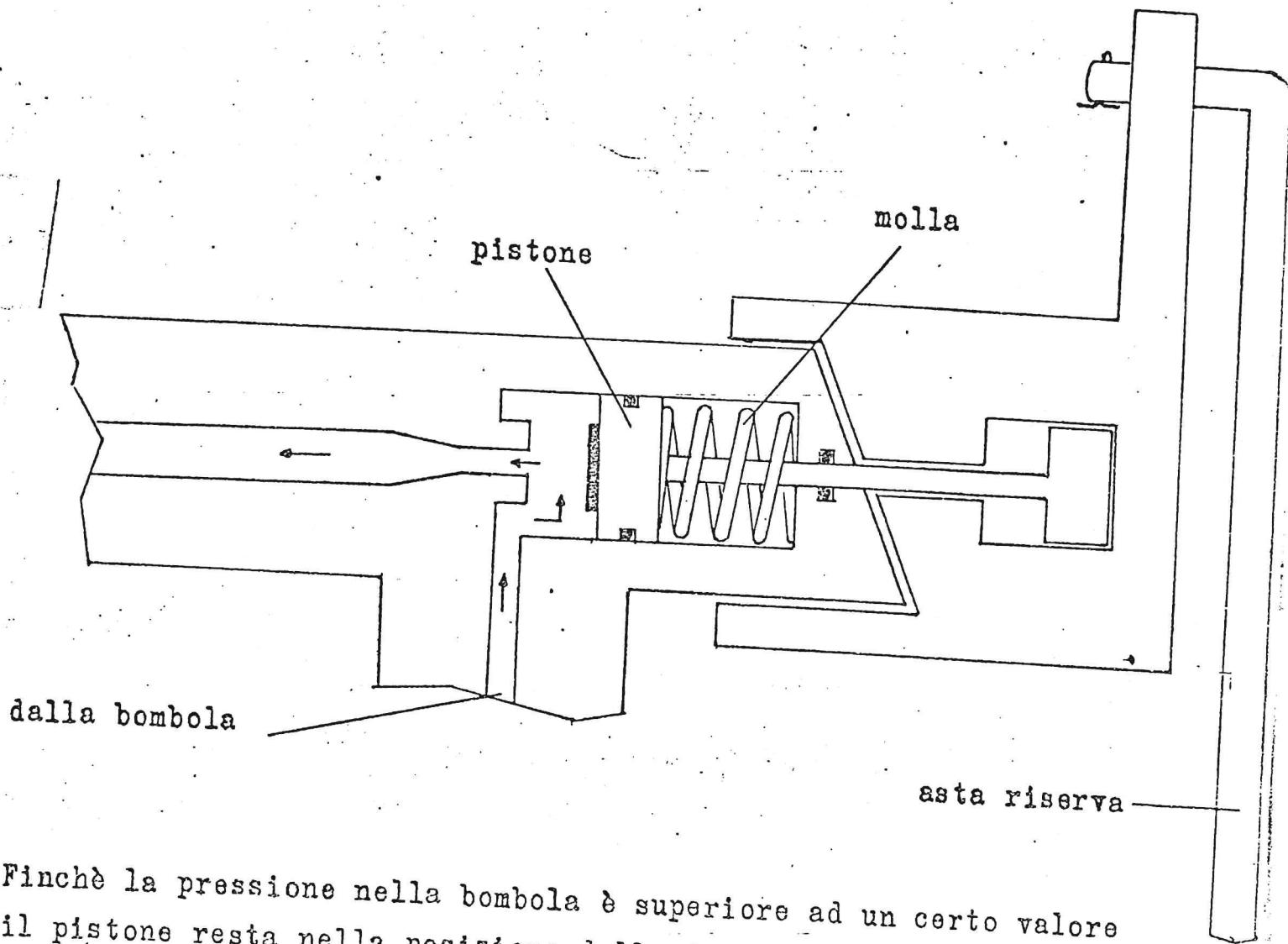


FIGURA n° 5/a

Bibombola completo

FIGURA n° 5/b

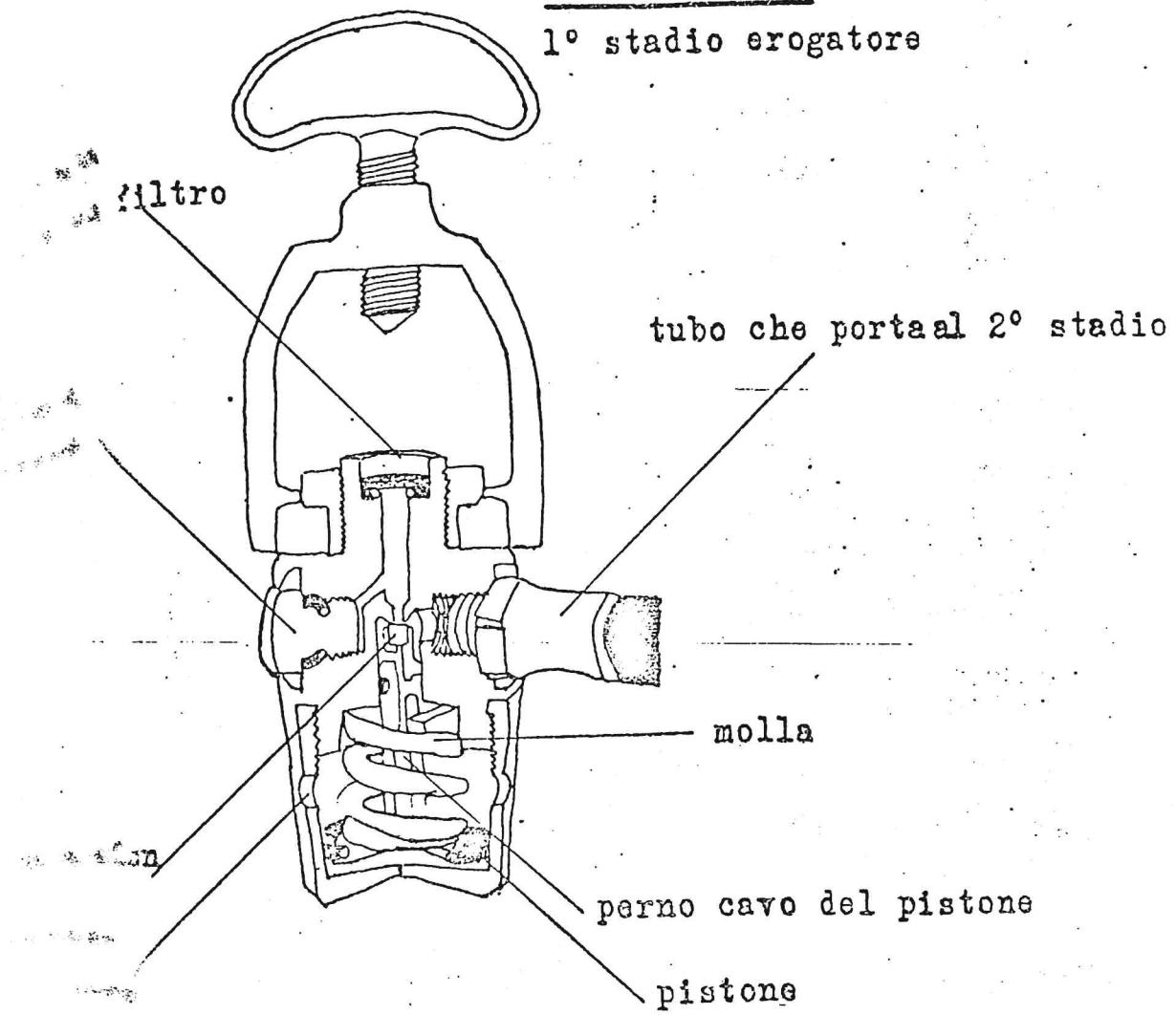
Riserva di un bibombola



Finchè la pressione nella bombola è superiore ad un certo valore il pistone resta nella posizione della figura ; quando però la pressione scende sotto questo valore, la molla spinge il pistone che chiude il collegamento . Si respira quindi solo dall'altra bombola. Quando anche questa è vuota, tirando l'asta della riserva si fa ruotare la parte girevole, e questa, ruotando, viene spinta fuori dal piano inclinato ; tira quindi in fuori il pistone e l'aria passa. Questo passaggio è caratterizzato dal tipico uono del travaso da una bombola all'altra ;

FIGURA n° 5/c

1° stadio erogatore

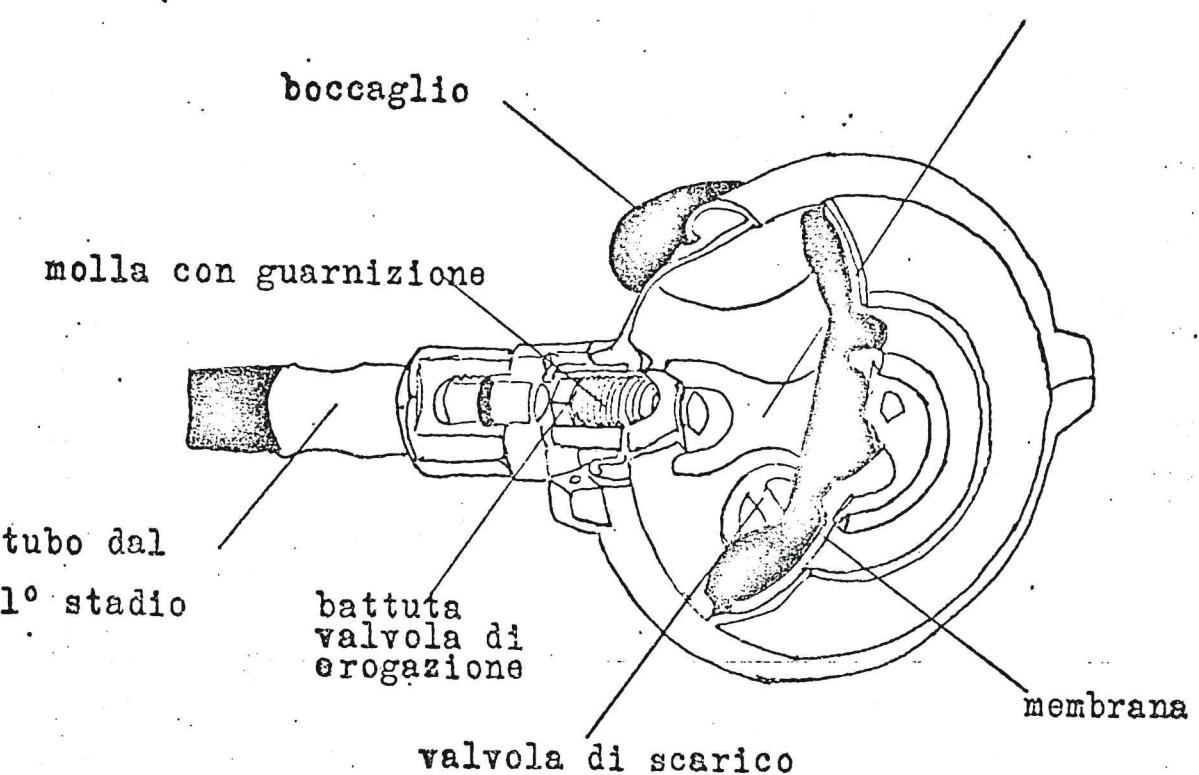


le bombole, la molla tiene spinto in basso il pistone e lascia aperto il collegamento con l'alta pressione delle bombole, l'aria supera il teflon, attraversa il pistone e spinge quest'ultimo in alto, cosicchè si chiude il collegamento. Quindi sotto al pistone e nel tubo di uscita dal 2° stadio, la pressione sotto il pistone supera quella esterna della quantità determinata dalla pressione determinata dal carico della molla ; questa pressione supera quella esterna e spinge giù, cosicchè entra nuova aria e la pressione si riconcentra. Al carico della molla si aggiunge poi la pressione atmosferica che attraverso i fori, cosicchè la pressione fornita è quella esterna della quantità determinata dal carico della molla.

FIGURA n° 5/d

2° stadio erogatore

leva di erogazione



Aspirando dal boccaglio la membrana si entroflette, preme la leva di erogazione che solleva la guarnizione dalla battuta, contro la quale era tenuta spinta dalla molla : si produce così l'erogazione di aria . Per far avvenire l'erogazione è quindi necessario un certo sforzo inspiratorio, necessario per comprimere la molla. al termine dell'inspirazione la molla richiude la valvola e si può espirare attraverso la valvola di scarico.

I più recenti tipi di erogatore hanno una vite che permette di regolare, anche in immersione, il carico della molla e con esso la "durezza" all'inspirazione.

bombole scende sotto un certo valore, stabilito dal carico della molla, il pistone chiude il condotto, ed il sommozzatore respira soltanto dall'altra bombola; quando questa è vuota, resta senz'aria, ma con una leva può sbloccare il pistone ed avere così l'aria sufficiente per risalire. Solitamente, azionando la riserva, si ottiene 1/4 dell'aria contenuta nel serbatoio. Prima di immergersi, il sommozzatore deve sempre controllare che il pistone della riserva non sia già sbloccato, per evitare di restare senz'aria.

Alla rubinetteria si collegano uno o due erogatori. Essi sono costituiti da due successivi riduttori di pressione: il primo porta l'aria dalla pressione che ha nelle bombole ad 8 Kg/cm^2 più dell'ambiente; il secondo, invece, porta l'aria da 8 Kg/cm^2 alla pressione ambiente, per cui la possiamo respirare naturalmente. Nella figura 5 c/d, vediamo lo spaccato dei due stadi di un erogatore; la spiegazione del funzionamento è in calce alle figure.

Se ci si mette l'erogatore in bocca sott'acqua, è necessario soffiare prima di inspirare, per spigere fuori l'acqua contenuta nella scatola attraverso la valvola di scarico; e se si inspira prima di espirare si beve.

Nel caso si debba prendere contatto con l'erogatore sott'acqua a polmoni vuoti, si può far uscire l'acqua schiacciando la membrana con un dito, in modo da produrre l'erogazione.

Il passaggio in soluzione dell'azoto nel nostro organismo

Abbiamo fin'ora considerato solo i passaggi in soluzione, nel nostro organismo, dell' O_2 e del CO_2 : ovviamente anche l' N_2 passa in soluzione nel nostro organismo e, normalmente, a livello del mare, ne abbiamo dissolto nel nostro corpo circa un litro, per le persone di taglia media.

Supponiamo ora di entrare in un'ambiente nel quale la pressione dell'aria venga portata ad un valore ~~di~~ 4-5 volte maggiore di quello abituale: l' O_2 passa in soluzione molto più facilmente, il CO_2 si libera con una difficoltà leggermente maggiore, poiché invece che $0,0003 \text{ Kg/cm}^2$ ora la sua pressione è di 4-5 volte maggiore e contrasta maggiormente la liberazione di CO_2 negli alveoli. Anche l' N_2 passa in soluzione nel nostro organismo, fino a saturarlo completamente se restiamo sufficientemente a lungo nell'ambiente sudetto. Non tutti i tessuti ^(corporali) si saturano alla stessa velocità; il

sangue è il più veloce, seguito dai muscoli, dalle ossa e dal grasso, che è il più lento, anche se è quello che ne assorbe di più. Ovviamente anche la liberazione avverrà con le stesse velocità, per cui il sangue si desaturerà subito, e trasporterà in seguito agli alveoli il gas liberato dagli altri tessuti. Infatti, ~~uscendo~~ dall'ambiente pressurizzato, l'azoto disiolto si libera, poiché la pressione dell'azoto esterno è diminuita, e nel sangue, come in tutti i tessuti, si formano minutissime bolle: ma se questo avviene troppo rapidamente, oppure se l'azoto disiolto era molto, le bolle d'azoto ostruiscono i vasi sanguigni, il sangue coagula contro di esse e si ha l'embolia gassosa, che può provocare paralisi ed anche la morte.

Anche il sommozzatore che respiri da un autorespiratore ad aria compressa corre i rischi suddetti: infatti, l'erogatore gli ~~fornisce~~ aria alla stessa pressione a cui si trova (altrimenti non riuscirebbe a respirare) e quindi, aumentando la pressione di 1 Kg/cm^2 ogni 10 metri di profondità, egli viene sottoposto a pressioni tali da far passare in soluzione nel suo organismo anche parecchi litri d'azoto, in un tempo che può essere anche di pochi minuti. Inoltre, anche se la quantità di azoto in soluzione non era così elevata da produrre embolia, una risalita molto veloce può provocare la rapida formazione di bolle, che causano la cosiddetta "embolia da risalita a pallone".

La curva di sicurezza (vedi Fig. 6).

Il sommozzatore deve quindi premunirsi, calcolando il massimo tempo ~~in~~ cui può rimanere ad ogni profondità senza incorrere in embolia, risalendo poi ad una certa velocità (solitamente 10 metri al minuto) in superficie. La tabella di questi tempi e queste profondità è detta "curva di sicurezza" e può venire rappresentata su un diagramma riportando in ascissa le profondità ed in ordinata i tempi massimi di immersione, come vediamo nella figura 6. Tutti questi valori sono stati calcolati empiricamente, cioè non si sono mai verificati incidenti da embolia rispettando questi limiti, mentre si verificano, non obbligatoriamente, superandoli. Il corpo umano, infatti, risente di molti fattori che possono aumentare o ridurre la predisposizione all'embolia, tra cui alimentazione, stato di salute, stanchezza, alcool,

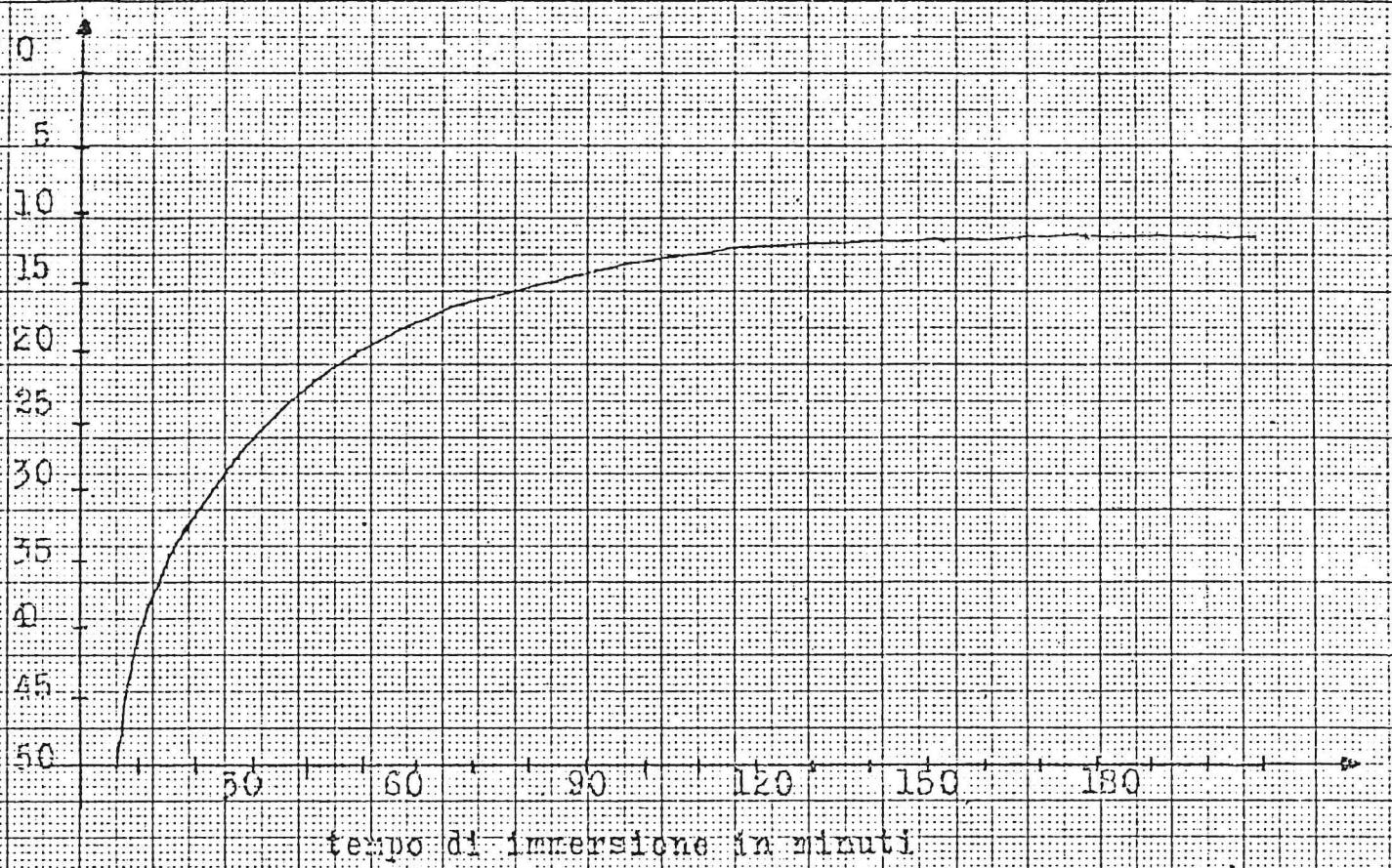


FIGURA n° 6
Curva di sicurezza

ecc..

Le tabelle di decompressione (vedi allegato)

Il sommozzatore vede così drasticamente limitate le sue possibilità di immersione, in quanto non potrebbe immergersi a più di 50 metri, e a profondità del genere la sua permanenza sul fondo non potrebbe superare qualche minuto. Quindi, per poter effettuare immersioni più profonde e più prolungate è stata elaborata da Haldane la decompressione a tappe, cioè una risalita con soste di durata stabilita a profondità calcolate, per permettere la graduale liberazione dell'azoto. In origine, le profondità ed i tempi di decompressione venivano calcolati empiricamente, ma all'inizio del secolo si trattò il problema su basi scientifiche: si era infatti appurato sperimentalmente che in un tessuto umano non si verificava l'embolia se la pressione dimezzava, con la solita gradualità di 1 Kg/cm^2 al minuto, mentre se si superava il valore di 2:1 comparivano i sintomi dell'embolia. Questo non in relazione alla pressione esterna, ma a quella del gas dissolto nei tessuti. Facciamo un esempio: supponiamo che restando per un certo tempo alla pressione di 4 Kg/cm^2 , nel nostro sangue (tessuto dalla saturazione molto veloce) sia passato azoto fino alla pressione di $2,5 \text{ Kg/cm}^2$ (il sangue avrebbe raggiunto la saturazione, cioè 4 Kg/cm^2 , in un tempo maggiore); si può quindi risalire non fino a ~~ma~~ 2 Kg/cm^2 , ma oltre, fino a 1,25, poiché il sangue non era saturo. Giunti a questa pressione, dobbiamo attendere che quella dell'azoto soluto, giunga a 2 Kg/cm^2 , per cui possiamo salire in superficie dove, come sappiamo, la pressione è di 1 Kg/cm^2 .

In modo analogo, considerando una decina di ipotetici tessuti con diversa velocità di saturazione, si è visto a quali profondità si poteva risalire senza embolia per ogni tessuto, ed ovviamente si tiene sempre presente la maggiore tra quelle di tutti i tessuti e, conoscendo la velocità di saturazione dei tessuti, si è stabilito il tempo necessario affinchè la pressione di N_2 nei tessuti scendesse a valori tali da permettere di risalire ulteriormente. Ovviamente non è sempre lo stesso tessuto a determinare la minima profondità a cui si può risalire, ma essi si succedono nel "comandare" la decompressione durante la risalita.

Esempio di una decompressione a tappe (vedi Fig. 7)

Presentiamo un'ipotetica immersione nella quale si sono tenuti presenti cinque tessuti, con i seguenti rispettivi tempi di emi-saturazione: 5, 10, 20, 40, 75 minuti. Dal tempo di emi-saturazione si calcola "facilmente" la quantità di azoto in soluzione in ogni istante, e in base alla seguente formula, ricavata con procedimenti di matematica superiore:

$$Y = A (1 - e^{-kt}) \quad \text{nella quale :}$$

Y = pressione dell'azoto disciolto;

A = pressione dell'azoto premente

t = tempo in secondi durante il quale avviene il passaggio;

$k = \frac{0,693}{\text{tempo di emi-saturazione}}$

e = base del logaritmo naturale.

Ovviamente in questo esempio, come nel calcolo delle tabelle di decompressione, si è tenuta presente la desaturazione avvenuta durante la risalita che avviene alla solita velocità di 10 metri al minuto.

Calcolando tutta una serie di ipotetiche immersioni, anche con tessuti ad altre velocità, sono state compilate le tabelle di decompressione oggi adottate; esse esistono in varie versioni, a seconda del lavoro svolto sul fondo e delle condizioni esterne. Quelle qui allegate sono state calcolate dalla Marina militare americana, e le istruzioni per usarle sono all'inizio dell'allegato.

Reimmersioni con tabelle

Dopo ogni immersione, anche dentro la curva di sicurezza, resta disciolta nel nostro organismo una certa quantità di azoto, che va tenuta presente nel caso di reimersioni entro qualche ora dalla prima; sono così state calcolate tabelle di reimersione, che tengono conto delle caratteristiche della prima immersione, del tempo trascorso tra la prima e la seconda, e danno un tempo da aggiungere, nelle tabelle normali, a quello effettivo

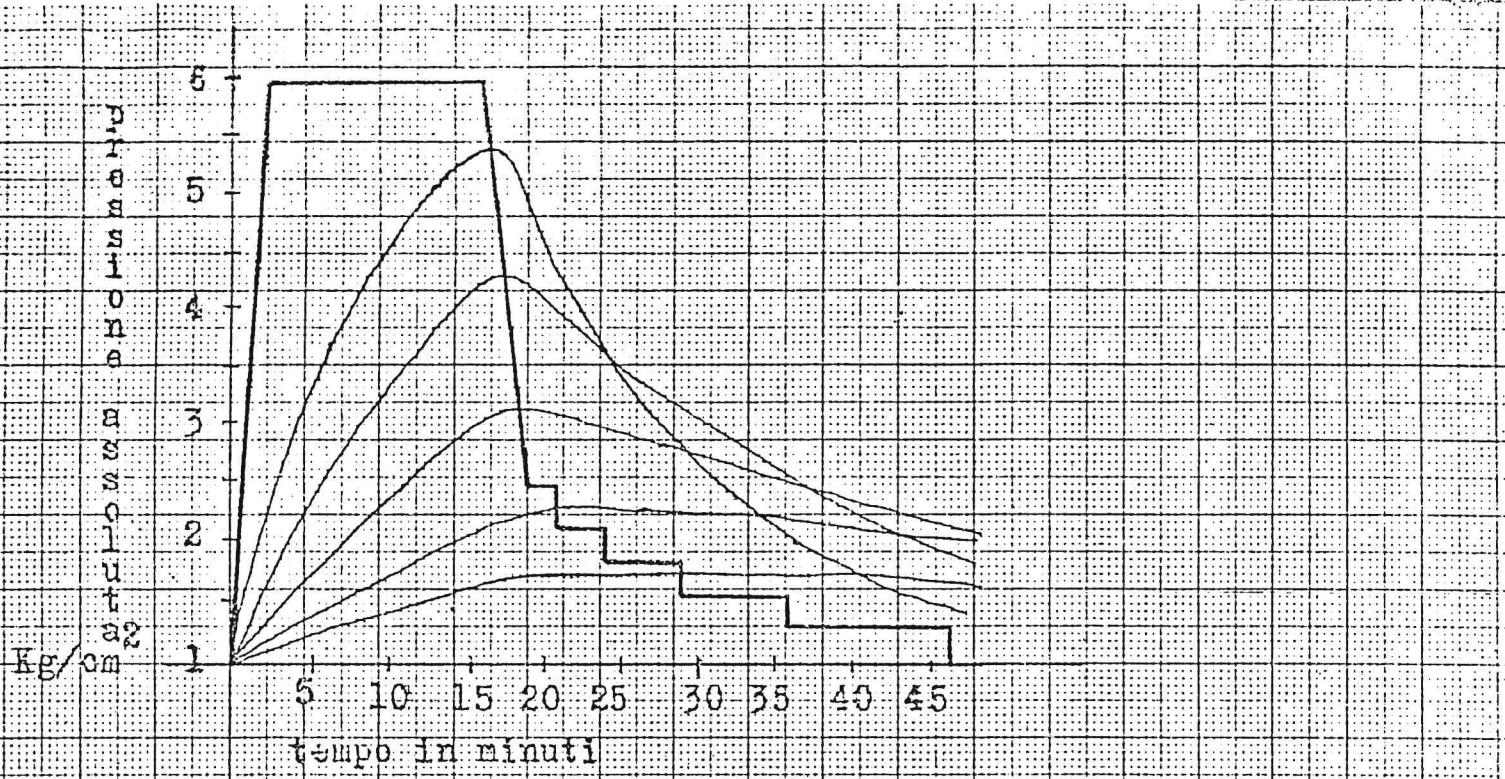


FIGURA n° 7 Esempio di risalita a tappe

La linea spezzata più grossa indica la pressione a cui è sottoposto il palombaro, durante l'immersione, la sosta sul fondo e la risalita a tappe. Le Curve più sottili rappresentano le pressioni di N_2 nei 5 tessuti a diverse tempi di emisaturazione. (Il più veloce è in alto e gli altri seguono in ordine). Il palombaro scende rapidamente sul fondo a 6 Kg/cm^2 e vi si ferma per 16 min. In questo periodo la pressione di azoto nei vari tessuti sale, seguendo le rispettive curve. Quando il palombaro risale la max. pressione di N_2 è nel 1° tessuto, ove ha $5,5\text{ Kg/cm}^2$: egli può quindi risalire fino a $2,5\text{ Kg/cm}^2$ in 2 minuti (intanto la press. nel tessuto è scesa a 5 Kg/cm^2) con un rapporto di decompressione di 2:1. Dopo 4 min. di sosta a questa prof. la max. pressione nei tessuti è scesa a $4,4\text{ Kg/cm}^2$ e il palombaro può risalire a $\approx 2,2\text{ Kg/cm}^2$, e così via. La pressione di N_2 in qualsiasi tessuto non è mai superiore al doppio della pressione esterna.

di immersione. L'azoto in eccesso disciolto nel sangue si libera tutto, indipendentemente dalla pressione a cui era, nell'arco di 12 ore circa, ma già dopo 6 ore la sua pressione è diventata trascurabile.

Il decompressimetro analogico (vedi Fig. 8 a,b,c)

Oltre alle tabelle di decompressione, è stato messo a punto un apparecchio che segnala automaticamente la quota e la durata delle tappe di decompressione da effettuare.

E' costituito da un sacchetto, contenente liquido, che comunica con una camera rigida, cilindrica, nella quale scorre un pistone, mediante un piccolo foro.

Il pistone in posizione normale è ad una estremità della camera cilindrica, e su entrambe le sue facce la pressione è quella atmosferica. Al pistone è collegato un indice, che scorre su una graduazione. Il sommozzatore porta con sè l'apparecchio e, scendendo in profondità, comprime il liquido nel sacchetto, la pressione dell'acqua lo fa passare nella camera ed il pistone viene spinto verso l'altra estremità della camera stessa. L'indice segna quindi la quantità di liquido presente nella camera; se si nota bene, questo processo è analogo a quello del passaggio in soluzione di un gas. Infatti, dopo un po' che il sommozzatore ha raggiunto una certa profondità, ai due lati del pistone la pressione viene ad essere la stessa, ed il decompressimetro è "saturo" a quella pressione. La velocità del passaggio è determinata, oltre che dalla differenza di pressione, dal diametro del foro di comunicazione, che viene scelto in modo da simulare un tessuto a tempo di emisaturazione medio fra quelli del nostro corpo.

La graduazione sui cui scorre l'indice non è divisa in Kg/cm^2 , ma riporta le profondità a cui la pressione è metà di quella segnata dall'indice. Il sommozzatore può quindi risalire fino alla profondità segnata dall'indice, e, giuntovi, deve attendere finché l'indice non si sia spostato nel settore indicante una profondità inferiore; quando esso giunge nella zona "risalita libera" può emergere.

Il liquido, però, non è ancora rifiuito tutto nel sacchetto, ma l'indice segna quanto azoto è rimasto nel nostro organismo; quindi, in una immersione successiva, il decompressimetro tiene già conto dell'azoto disciolto

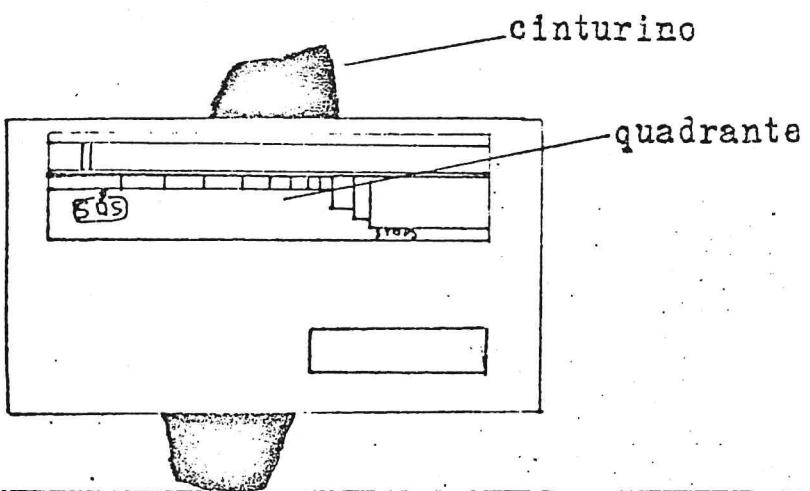


Figura n° 8/a
Decompressimetro

Figura n° 8/b Interno di decompressimetro

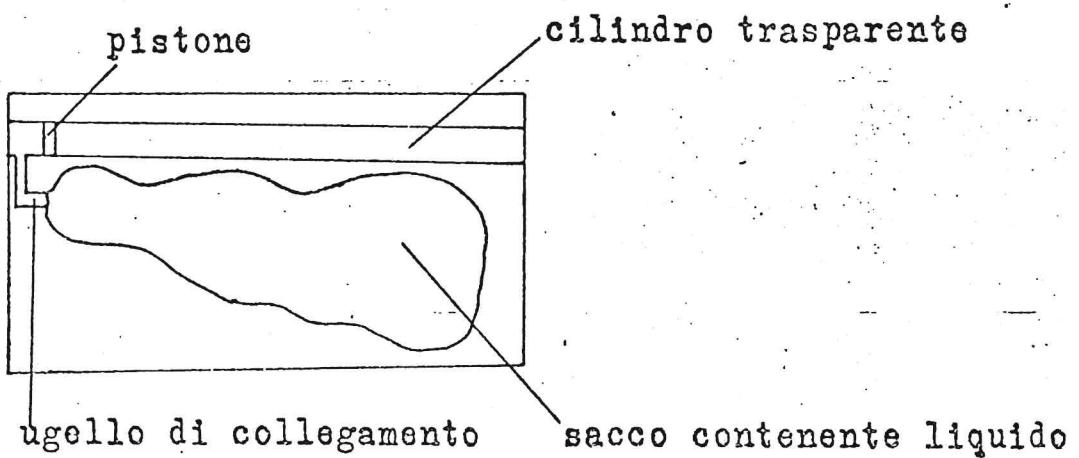
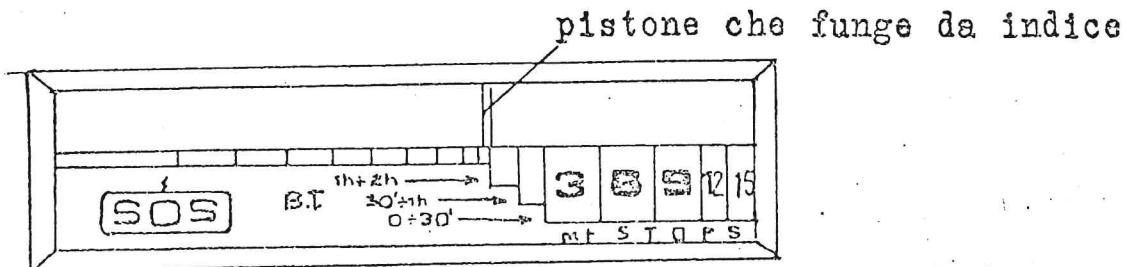


FIGURA n° 8/c

Quadrante in grandezza naturale



nel nostro corpo, e non siamo costretti a calcolare la r^eimmersione.

Il decompressimetro ha però un difetto, cioè quello di essere tarato su un tessuto medio: quindi immersioni straordinarie (lunghissime) a bassa profondità, oppure brevissime ad alta) sfuggono al suo controllo; bisogna inoltre fare sempre un po' di decompressione prudenziale a tre metri di profondità, anche se non è indicata dall'apparecchio. Altra regola importantissima è tenere sempre l'apparecchio con sé, anche se si fa il bagno o dell'apnea, prima dell'immersione; ed anche dopo, se se ne vuole fare un'altra.

Esistono poi decompressimetri professionali, costruiti riunendo quattro o sei decompressimetri normali, tarati su diversi tessuti. Essi sono molto più esatti, ma anche più delicati e più costosi. In pratica, è meglio servirsi di quelli normali, facendo cinque o dieci minuti in più a tre metri di profondità, cosa tra l'altro sempre indicata anche dopo immersioni con tabelle.

I pericoli dell'immersione con autorespiratori ad aria (ARA).

Esistono, poi, altri pericoli nell'immersione con autorespiratori ad aria; oltre all'embolia, sono essenzialmente tre: la sovradistensione polmonare, l'ebrezza da alto fondale, l'iperossia.

La sovradistensione polmonare

Supponiamo che un sommozzatore con autorespiratore ad aria respiri a fondo, quindi cinque litri d'aria, trovandosi a 10 metri di profondità, e poi risalga. L'aria che ha nei polmoni si espanderà, ed invece di cinque litri, in superficie ne avrà dieci (poichè la pressione è dimezzata).

Corre quindi il rischio di lacerazioni ai polmoni, e se persiste a non scaricare l'aria in eccesso, si può arrivare all'esplosione della gabbia toracica. E' quindi sempre necessario, mentre si risale, espirare oppure respirare continuamente, per scaricare l'aria in eccesso, specialmente negli utimi metri di risalita, perchè qui il rapporto di decompressione è massimo. Infatti, salendo da sessanta a cinquanta metri, il volume dell'aria nei nostri polmoni aumenta solo di 1/6, mentre passando da dieci metri alla superficie raddoppia.

L'ebrezza da alto fondale

L'azoto, come abbiamo visto, passa in soluzione nel sangue e nell'organismo; il grasso è il tessuto più lento a saturarsi, ma è quello che ne assorbe di più (quando è saturo contiene cinque volte, in numero di molecole, l'azoto che c'è in un pari volume di sangue saturo alla stessa pressione). Ma se ciò non crea problemi nel grasso sottocutaneo, ne crea invece parecchi nel grasso che riveste i collegamenti delle cellule nervose (le sinapsi), dove rallenta il passaggio degli stimoli elettrici.

Ecco quindi che il sommozzatore, quando si immerge oltre i 40 metri per un certo tempo, si sente intontito, quasi ubriaco, non riesce ad interpretare le indicazioni degli strumenti, fa cose senza senso (rincorre i pesci, cerca di farli respirare dall'erogatore, ecc.), e questo sempre di più, mano che scende. Esiste un punto, soggettivo, che si abbassa con l'allentamento, oltre il quale egli perde il controllo, e si lascia sprofondare verso l'abisso.

Non esistono rimedi a questo pericolo, se non l'autocontrollo e l'abitudine alle immersioni profonde. Parecchie volte è stato utile l'aiuto di un compagno di immersione, ma solitamente l'ebrezza assale tutti e rende incapaci di aiutarsi l'uno con l'altro. L'unico modo per ovviare all'inconveniente, metodo usato però solo in immersioni molti impegnative, è quello di caricare le bombole con una miscela di ossigeno ed elio, gas che limita fortemente il fenomeno dell'ebrezza; si possono così superare i 100 metri di profondità, mentre con l'aria ben difficilmente si può arrivare a 70 metri.

L'elio ha però due gravi difetti: allunga il tempo di decompressione e provoca dispersione di calore attraverso i polmoni, poiché è molto più conduttivo ed ha un più elevato calore specifico rispetto all'azoto.

Iperossia

Scendendo ad elevate profondità, l' O_2 che respiriamo assume una pressione parziale molto maggiore della solita e l'emoglobina del sangue non riesce a fissare tutto l'ossigeno che passa in soluzione, per cui i tessuti ne trovano in abbondanza dissolto nel sangue, e si servono di quello, lasciando l'emoglobina carica di O_2 . Quindi l'emoglobina non può fissare il CO_2 .

nei tessuti e trasportarlo agli alveoli, ed il CO_2 si accumula nei tessuti. L'effetto è uno svenimento improvviso, con contrazione (tipo crampo) di tutti i muscoli del corpo.

(oltre i)

Generalmente ciò avviene ~~a~~ 90 metri, per cui è difficile incorrere in questo incidente con ~~l'aria~~ ^{autorespiratore ad aria}. Ma con le miscele è bene tenere più bassa la pressione parziale di O_2 , rispetto a quella dell'aria, poiché si può superare facilmente questa profondità. Inoltre, può essere utile, con le miscele d'elio, effettuare la decompressione in aria, cosicchè l'elio si libera più rapidamente a causa della maggiore differenza di pressione.

Allo stesso modo, è utile, dopo un'immersione ~~con~~ ^{ad} aria, effettuare la decompressione in elio o in ossigeno puro, sempre per aumentare la differenza di pressione parziale e, con essa, la velocità di liberazione dell'azoto.

L'ipercapnia

Quest'ultimo incidente era già stato considerato nel capitolo relativo alle sincopi. Può avvenire anche con l'ARA, se l'aria con cui avevamo caricato le bombole non era pura, e conteneva un'eccessiva pressione di CO_2 . Scendendo in profondità, questa pressione aumenta ulteriormente per cui il CO_2 dà giramenti di testa ed infine svenimento.

Autonomia di un autorespiratore ad aria

In base alle nozioni precedentemente viste, è possibile calcolare l'autonomia di un autorespiratore, la quale ovviamente varia a seconda della profondità.

Un uomo che nuoti respirando da un autorespiratore consuma, a pressione normale di 1 Kg/cm^2 , venti litri d'aria al minuto; ovviamente a 10 metri di profondità, il consumo, in numero di molecole, è doppio, anche se si tratta sempre di 20 litri al minuto. Visto che un normale autorespiratore, con due bombole da dieci litri ciascuna, ~~ha~~ a 200 Kg/cm^2 contiene 4.000 litri d'aria, esso basterebbe, in superficie, per 200 minuti (tre ore e venti) di autonomia. L'autonomia è quindi di un'ora e quaranta a 10 metri, di un'ora e cinque a 20 metri, e così via.

Vogliamo stabilire, ad esempio, qual'è il tempo massimo di permanenza a 30 metri con un'autorespiratore da 4.000 litri. L'autonomia teorica è di

50 minuti, ma vediamo nelle tabelle che se restiamo a quella profondità per tanto tempo dobbiamo poi fare 27,5 minuti di decompressione, e non abbiamo aria per farla. Leggiamo quindi nelle tabelle che se facciamo una immersione a 30 metri di 40 minuti dobbiamo poi fare 16,5 minuti di decompressione. In 40 minuti a 30 metri, consumiamo 3.200 litri d'aria; gli altri 800, considerando di respirarli alla profondità intermedia di 10 metri (due atmosfere invece di quattro), ci danno 20 minuti di autonomia. Perciò potremmo affettivamente restare sul fondo 40 minuti a 30 metri.

Considerando però che dopo 3.000 litri, invece ~~di~~ 3.200 come calcolato, andiamo in riserva, possiamo adottare il criterio di risalire quando andiamo in riserva. Calcolando sulle tabelle, si vede che, in linea di massima, risalendo quando si va in riserva, si ha sempre ancora abbastanza aria per terminare la decompressione, con un certo margine d'autonomia.

Calcoli di immersioni in laghi alpini

Nel caso di immersioni in alta montagna, bisogna considerare la minore pressione esterna dell'aria; ad esempio in una immersione a 1.500 m di quota, la pressione iniziale dell'aria è di $0,75 \text{ Kg/cm}^2$. Quel che conta, ai fini della decompressione, è, come abbiamo visto, il rapporto tra la pressione a cui ci si trova, e quella a cui vogliamo arrivare.

Supponiamo quindi di immergerci a 30 metri in questo lago a 1.500 m^{di} quota. La pressione a 30 metri è $3,75 \text{ Kg/cm}^2$, ed il rapporto di decompressione è dunque $3,75/0,75$; un'analogia rapporto, al mare, si sarebbe avuto a 40 metri (pressione 5 Kg/cm^2): infatti, il rapporto $5/1$ è uguale a $3,75/0,75$. Dobbiamo quindi seguire le tabelle dei 40 metri e non quelle dei 30; se però dobbiamo fare decompressione, anche la quota delle "tappe" risulta cambiata. Invece di una tappa a 6 metri, con rapporto $0,6/1$, dovremo farla a 4,5 metri, con rapporto $0,45/0,75$, che è uguale al precedente; ed invece di una tappa a ~~X~~ 3 metri (rapporto $0,3/1$) dovremo farla a 2,25, e così via.

Per calcolare l'equivalente della profondità effettiva ad ogni quota di altitudine, vale la seguente proporzione

$$P : B = P_x : 1 \quad \text{in cui:}$$

P = pressione alla profondità effettiva;

B = pressione atmosferica del luogo;

P_x = pressione assoluta alla profondità da calcolare.

Conoscendo la pressione assoluta alla profondità da calcolare, si determina la profondità stessa sottraendo 1 Kg/cm^2 (pressione atm. a livello del mare), e moltiplicando il risultato per 10 (10 metri ogni Kg/cm^2).

L'autorespiratore a ossigeno (ARO) (vedi Fig. 9)

Oltre agli autorespiratori ad aria compressa o a miscele, caratterizzati dallo scarico in acqua dell'aria già respirata, esistono autorespiratori a "circuito chiuso," cioè nei quali il miscuglio respirato è sempre lo stesso, purificato da filtri ad ogni atto respiratorio. Il più comune apparecchio di questo tipo è l'ARO, costituito da un sacco di gomma, una bombola di O_2 con valvola, un filtro di calce sodata ed un boccaglio con rubinetto che comunica con il sacco attraverso il filtro.

Il funzionamento è semplice: gonfiato il sacco di ossigeno puro, e vuotati i polmoni dal miscuglio atmosferico, si entra in contatto con il sacco e si respira normalmente: il CO_2 che emettiamo viene fissato dalla calce sodata, mentre ad ogni atto respiratorio inaliamo O_2 quasi puro, per cui possiamo respirare finchè nel sacco l'ossigeno è troppo poco ed abbiamo il respiro mozzato; siamo allora costretti ad erogare un po' d'ossigeno dalla bombola, ed il processo si ripete per tempo indeterminato. In pratica, non si arriva mai a questo punto perchè sott'acqua, man mano che il sacco si sgonfia, affondiamo, e per tenere la quota voluta siamo costretti a mantenere costante il volume di O_2 nel sacco.

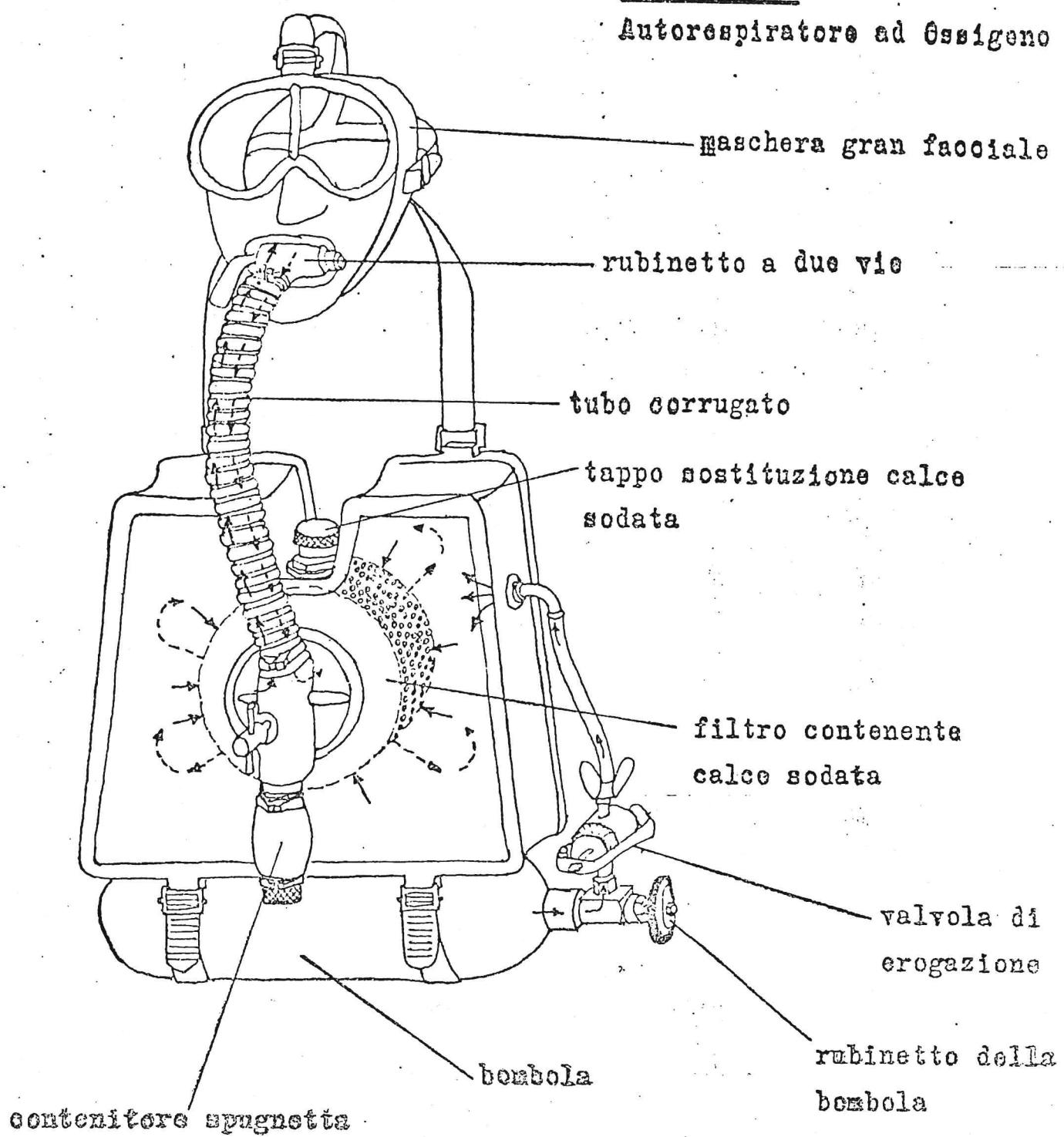
L'apparecchio, però, ha molti inconvenienti, in cambio del solo vantaggio di non fare bolle e di avere così una maggiore autonomia: si corrono infatti i seguenti pericoli.

L'ipossia

Se nel sacco, prima di gonfiarlo di O_2 , era rimasta un po' d'aria, e se non vuotiamo i polmoni prima di entrare in contatto, resta nel sistema di respirazione una certa quantità di N_2 , che di per sé non crea problemi, ma che non ci permette di valutare quando è ora di erogare ossige-

FIGURA n° 9

Autorespiratore ad Ossigeno



no. Infatti può accadere di consumare tutto l' O_2 e di avere ancora nel sacco abbastanza N_2 da permetterci di non affondare e di fare una ventilazione completa. Ovviamente un caso simile porta allo svenimento, senza sintomi premonitori se non una strana voglia di respirare a fondo.

L'iperossia

A parte l'intossicazione da ossigeno che tratteremo poi, e che avviene con la stessa meccanica già vista per l'ARA, si può riportare una iperossia da eccesso di ventilazione: se infatti ci ventiliamo troppo, con respiri troppo frequenti o lunghi, l'eccesso di O_2 si fa girare la testa e, se perseveriamo, ad esempio perchè facciamo un lavoro faticoso, può portare allo svenimento. Per evitare ciò, bisogna sempre respirare con ~~exp~~ respiri lenti e profondi e con apnee inspiratorie di circa mezzo minuto.

L'ipercapnia

Questo incidente può sorgere per due motivi: avaria al filtro (o calce sodata vecchia), e respirazione troppo breve e frequente. Ovviamente, nel primo caso ~~ixm~~ l'incidente è meccanico, e si può evitare con il controllo continuo dell'apparecchio, mentre nel secondo è provocato dal fatto che il miscuglio contenuto nel boccaglio e nel tubo che lo collega al filtro non viene filtrato, e con respiri brevi e mozzi non arriva ~~gaz~~ ossigeno fresco dal sacco, ma si respira sempre il miscuglio del tubo. L'ipercapnia insorge progressivamente, prima con dolori di capo, giramenti, convulsioni quindi sincope. L'evidenza dei sintomi fa sì che si possa evitare facilmente.

L'intossicazione da ossigeno

Nell'ARO l'ossigeno ha una pressione molto più alta di quella dell'aria normale, ed è sufficiente una profondità non elevata perchè esso arrivi a dare intossicazione. Infatti, oltre i 10 metri di profondità, la sua pressione parziale è già superiore di quella che avevamo ad 80 metri con le bombole, per cui non è possibile scendere con l'ARO sotto i 10 metri. Per poter scendere ulteriormente in profondità, alcuni subacquei lasciano di vuotare i polmoni prima di prendere contatto con l'ARO e si possono così avventurare invece che a 10 metri a 15 o 20. Ma ciò è pericolosissimo: infatti, si corre il rischio di restare senz'ossigeno, come

già spiegato, se non ci si immerge sufficientemente profondo; e, nello stesso tempo, non siamo sicuri di evitare l'intossicazione da O_2 , in quanto, scendendo, il volume di gas a nostra disposizione si riduce per l'aumento di pressione, e siamo costretti ad erogare dalla bombola parecchio ossigeno, che ne eleva la pressione parziale. E' quindi necessario non superare mai i 10 metri di profondità, e solo in casi di emergenza si può rischiare, non eseguendo lo svuotamento dei polmoni.

L'allagamento

Il boccaglio è dotato di una valvola a due vie che lo mette in comunicazione o col sacco o con l'esterno. Se si prende contatto sott'acqua, è necessario far uscire un po' d'aria prima di ruotare la valvola sulla posizione di comunicazione con il sacco, per far uscire l'acqua contenuta nel boccaglio. Se questa, invece, finisce nella calce sodata, si hanno reazioni chimiche che producono soda caustica, la quale, inalata, può produrre gravi danni al sistema respiratorio. Per limitare la possibilità di questo incidente, tra il boccaglio ed il filtro è posta una spugnetta, che però può assorbire una molto ridotta quantità d'acqua. Se si pensa, quindi, che un po' d'acqua sia entrata nel sacco, non bisogna respirare ma risalire immediatamente.

Altri respiratori a circuito chiuso

Oltre all'ARO sono stati costruiti respiratori a circuito chiuso non funzionanti ad O_2 puro, ma a miscele di elio: in essi, oltre al solito sacco con filtro, vi sono due bombole, una di elio ed una di ossigeno, ed un miscelatore che mantiene sempre costante il rapporto fra i due gas nel sacco, secondo un comando azionabile anche in immersione dal sommozzatore.

Inoltre, invece di un solo tubo di respirazione essi ne hanno due, uno di inspirazione ed uno di espirazione, con opportune valvole, che fanno sì che tutto il miscuglio venga filtrato prima di essere respirato. Con questi apparecchi sono state raggiunte profondità incredibili, oltre i 300 metri, ma il loro costo è proibitivo ed il loro uso molto complicato. Di recente, sono stati sperimentati apparecchi analoghi, dotati però di analizzatori elettronici del miscuglio nel sacco, direttamente collegati al miscelatore e pilotati da una centralina elettronica che mantiene sempre l' O_2 ad una

pressione tale da non essere tossico, ma da bastare in ogni caso alla respirazione.

++++++

NOTE CONCLUSIVE

Non può mancare un invito alla prudenza, a non immergersi mai da soli, a non partecipare a gare di pesca subacquea, nelle quali muore la gran parte dei subacquei di cui leggiamo sul giornale. Infine, chi voglia intraprendere attività subacquee si rivolga ad una scuola o ad un corso specializzato, ma non creda, perchè ha ottenuto il brevetto, di avere già imparato tutto: la strada da fare è tanta che non va fatta da soli, ma imparando da chi ci ha preceduto. Bisogna poi avere sempre attrezzature ottime e controllate, essere in buone condizioni fisiche e prendere sempre tutte le precauzioni possibili: le disgrazie capiteranno lo stesso, ma ciascuno deve avere sempre la coscienza tranquilla perchè ha fatto di tutto per evitarlo.

BIBLIOGRAFIA

anuale Federale di Immersione FIPS di Duilio Marcante

anuale Federale di Immersione FIAS di Autori vari

AYOL Jacques: "Jaques Mayol, apnea -100!" (Ed. F.lli Fabbri, 1976)

IFFNER Cap. Gerald J.: "Problemi di medicina subacquea" (Simposi Clinici CIBA, 1970)

anuale tecnico per erogatori Scubapro.