



DOSSIER DECOMPRESSIONE **di Stefano Ruia**

In questo Dossier vi accompagneremo, mano nella mano, nell'intricata foresta della teorie della decompressione, cercando di trattare l'argomento nel modo più semplice possibile. Sia che siate subacquei ricreativi alle prime armi o super-tecnici esperti scoprirete che in questo campo la realtà supera - di molto - qualunque immaginazione.

1 - ARTE O SCIENZA DELLA DECOMPRESSIONE?

Se siete poco più che adolescenti, già sapete che nella vita di tutti i giorni ogni decisione e ogni evento comportano vantaggi e svantaggi. Non bisogna essere adulti per scoprirlo, basta che nasca la prima peluria sul mento e sotto il naso: siamo contenti perchè finalmente sembriamo grandi e nel frattempo si avvera l'implacabile destino di dovere usare il rasoio quasi tutti i giorni della nostra vita. Dopo qualche anno cerchiamo di scampare a questa "condanna" facendoci crescere la barba; siamo finalmente liberi ... per pochi giorni. In seguito, infatti, siamo costretti ad acconciare spesso (quasi ogni giorno) l'irsuta decorazione del nostro mento. Nel contempo dobbiamo sopportare il caldo estivo e l'ingresso di acqua nella maschera.

Ops! Chiedo scusa alle lettrici. Rileggendo quanto scritto mi rendo conto di avere ragionato su un esempio tipicamente maschile. Non vedo benefici che possano derivare al sesso femminile dalla crescita della peluria sul mento o sotto il naso, anche se sembra che in Mongolia sia molto apprezzata. Bene la crescita della peluria per gli uomini può essere paragonata alla raggiunta pubertà femminile, con la manifestazione del primo ciclo mestruale, che segnala la trasformazione in donna e annuncia lunghi anni di giornate "storte" ogni mese, con persino qualche batticuore per le eventuali irregolarità.

Il bene e il male

In parole povere: per ogni beneficio di cui possiamo godere dobbiamo pagare un prezzo. Ciò è valido anche per le immersioni subacquee. Scendendo sul fondo la pressione aumenta e ci "comprimiamo"; quando torniamo in superficie la pressione diminuisce e ci "decomprimiamo". Quindi ogni immersione comporta obbligatoriamente una decompressione, a dispetto di tutti coloro che con il termine "immersioni con decompressione" indicano solo quelle con soste obbligate nella risalita.

Di per sé non è certo la decompressione il nostro problema (sarebbe peggio non riuscire a risalire!), ma tutte le patologie a essa correlate. Il che, tradotto in termini semplici, significa: il problema non è pagare le spese con la carta di credito, ma avere in banca i soldi per farlo. Ops... mi rendo conto che per alcune appassionate dello shopping "senza limiti" questo concetto può apparire molto ostico!

Patologie da decompressione

La possibilità che in una decompressione si abbiano complicazioni mediche ("PDD", ovvero Patologie Da Decompressione) è quindi implicita in ogni immersione. Ma quali potrebbero essere queste patologie? Concentreremo la nostra attenzione solo su quelle

correlate alla formazione di bolle dovuta al rilascio di gas in eccesso, tralasciando quindi tutte le altre (barotraumi, ecc.).

Il problema deriva dal fatto che con l'aumento di pressione i gas sono assorbiti nel nostro corpo. Le loro molecole si sciolgono nei liquidi come lo zucchero nell'acqua. Quindi, in immersione assorbiamo nel corpo una quantità di gas, che non c'era prima di iniziare a scendere. Per tornare in superficie senza problemi dobbiamo potere eliminare questa quantità in eccesso. In alcuni casi, tuttavia, durante questa eliminazione si formano bolle di dimensioni significative, che possono occludere un vaso sanguigno e quindi provocare una ischemia (mancato o ridotto afflusso di sangue) in una parte del corpo, danneggiando le cellule, provocando la loro necrosi (morte) per mancanza di ossigeno e infiammando i tessuti circostanti. Evitare la PDD significa evitare che si formino queste bolle. È possibile calcolare in modo scientifico tutto ciò? Non è certo semplice. Consideriamo solo i principali fattori che intervengono in questo fenomeno fisiologico: la miscela di gas respirati; la velocità e la profondità della respirazione; la temperatura alla quale respiriamo i gas e la temperatura dei tessuti corporei; la velocità dello scambio gassoso nei polmoni; la solubilità dei singoli gas componenti la miscela in tutti i diversi tessuti corporei; la "spinta" (variazione di pressione) all'assorbimento e la sua variazione nel tempo; la costituzione di ogni singolo tessuto corporeo (sangue, muscoli, pareti dei vasi, grassi, ossa, ecc.), che dipende da molti altri fattori fisiologici (alimentazione, riposo, ecc.); la presenza di nuclei gassosi preesistenti nei tessuti... e l'elenco continuerebbe ancora per pagine e pagine. Il tutto complicato dal fatto che le bolle non si sviluppano contestualmente all'evento decompressivo ma in ritardo rispetto a esso. Insomma le PDD non si possono "vedere", ma si devono "prevedere". Questo è il motivo per il quale non è possibile realizzare un dispositivo che valuti le bolle nel corpo, stabilendo in tempo reale se la decompressione debba essere rallentata o se si possa risalire subito in superficie. In definitiva la fisiologia della decompressione è un fenomeno ancora troppo complesso per essere chiarito con il metodo scientifico. Tanto è che è certamente vera la considerazione esposta da un medico iperbarico statunitense in un convegno di subacquei: «Se volete avere l'assoluta certezza di non subire patologie decompressive avete solo due possibilità. La prima è che non vi immergiate mai e non saliate mai di quota. Siccome come subacquei siete interessati a immergervi, l'unica possibilità di avere la certezza assoluta di non subire patologie decompressive è che una volta immersi non torniate mai più su. Ma anche questa è una eventualità che preferirei evitare...».

Scienza, arte o fantascienza?

Un approccio scientifico impone che si eseguano esperimenti riproducibili, in seguito, ottenendo gli stessi risultati. Evidentemente molti dei fattori prima indicati cambiano da persona a persona e persino da giorno a giorno nello stesso individuo. Avere risultati ripetibili, anche conoscendo tutte le leggi fisiche implicate (cosa che è ancora vera solo parzialmente), richiederebbe studi tanto complessi (con miliardi di variabili) che un super-computer impiegherebbe anni per calcolare una singola immersione, valida per un determinato individuo in un particolare momento della sua vita. Ovvio che questo approccio, sebbene auspicabile per il futuro, oggi non sia percorribile. Qualunque teoria della decompressione non può quindi essere definita "scienza".

Potrebbe essere meglio considerata "arte", visto che è proprio di questa branca della cultura umana creare capolavori unici e irripetibili, come è ogni decompressione che eseguiamo alla fine della nostra immersione!

Un altro punto di vista è quello di considerare la teoria della decompressione come fantascienza, in quanto ipotizza eventi ancora non conosciuti. In realtà quindi possiamo considerare i teorici della decompressione un poco artisti, un poco scienziati e... grandi appassionati di fantascienza!

I problemi dello studio teorico della decompressione sono sostanzialmente tre: "prevedere" e non "vedere", la suscettibilità locale (individuale) e le troppe variabili in gioco. Se

volessimo quindi fare un paragone con un'altra branca della conoscenza umana, quello che mi sembra più adatto è la meteorologia: dobbiamo guardare a ciò che è successo in passato, fare un previsione sulla base delle poche nozioni in nostro possesso e verificare tutto sul campo, cercando di capire in caso di errore come sia possibile migliorare l'attendibilità della previsione.

Preistoria della decompressione

Faremo quindi, con questa serie di articoli, un salto all'indietro nel tempo di cento anni e più, ripercorrendo, per meglio spiegare l'argomento, le congetture fatte dai pionieri della teoria della decompressione e la loro successiva evoluzione. Facendo un paragone con la storia umana possiamo dire che cento anni fa eravamo alla preistoria della teoria decompressiva... ma anche che oggi non siamo molto lontani da lì: forse abbiamo appena lasciato il Paleolitico per entrare nel Neolitico!

La pressione

Galileo scoprì che l'aria aveva un peso. Torricelli lo calcolò e scoprì come la pressione possa essere legata all'altezza della colonna d'acqua. Tutti noi subacquei sappiamo che in acqua salata la pressione aumenta di un bar (o atmosfera) ogni dieci metri di profondità. Questa è una approssimazione che possiamo prendere per buona, ma in realtà l'altezza della colonna dipende dalla densità (numericamente pari al peso specifico) dell'acqua.

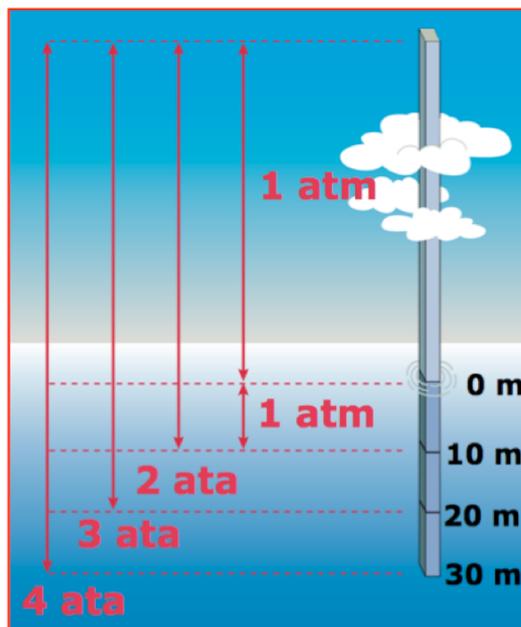
LA PRESSIONE IDROSTATICA

Non sempre si ha la variazione di una atmosfera ogni dieci metri di profondità.

Tutti i subacquei hanno studiato che la pressione idrostatica (dovuta all'acqua) in mare è pari a 1 bar (o atmosfera) per ogni **10 m di profondità**. In realtà non è proprio così. Per essere esatti dovremmo dire che si ha l'equivalenza fra la pressione atmosferica standard (oggi misurata in Pascal e pari a 101,300 Pa, equivalenti ai vecchi 1,033 kg/cm²) e quella idrostatica di **una colonna d'acqua pura alta 10,33 metri**. Infatti l'acqua pura ha densità 1 kg/litro. Un tubetto di vetro a sezione quadrata, di lato interno 1 cm, ha una superficie di 1 cm². Mettendo acqua pura al suo interno, per raggiungere l'altezza di 1 cm dovrò inserire un volume di acqua pari a (1 x 1) centimetri cubici, cioè 1 cm³. Poiché 1 centimetro cubico di acqua pura pesa 1 grammo (cioè 0,001 chilogrammi) alla base del tubetto il peso dell'acqua eserciterà una pressione pari a 0,001 kg/cm². Se volessi raggiungere una pressione di 1,033 kg/cm² (cioè quella atmosferica) dovrei sovrapporre molti cubetti di acqua alti 1 cm. Più precisamente ne dovrei sovrapporre $1,033/0,001 = 1033$ cm, cioè 10,33 metri.

Se l'acqua è salata ne basta meno perchè ogni centimetro cubico pesa più di un grammo. Se pesasse proprio 1,033 gr/cm³ basterebbero esattamente 1.000 cubetti di acqua, cioè 10 metri di colonna d'acqua. Se pesa molto di più, per esempio come il mercurio di Torricelli, di centimetri ne bastano solo 76 (cioè 760 millimetri), da cui deriva la misura della pressione in millimetri di mercurio (mm Hg).

Che la pressione sia più alta è **verificabile sperimentalmente** facendo un piccolo buco alla base di una normale bottiglia di plastica per l'acqua. Togliendo il tappo si vede chiaramente che la forza del getto che ne fuoriesce sarà tanto maggiore quanto più è alta la colonna d'acqua (quindi il livello) sopra il foro.



Questo aumento di pressione comporta diversi fattori, uno dei quali fu esposto dallo stesso Torricelli: la velocità di efflusso di un liquido da un recipiente forato dipende dall'altezza della colonna liquida soprastante, cioè dalla distanza verticale della superficie del liquido dal foro. Maggiore è l'altezza più veloce (quindi "forte") è l'efflusso del liquido, poiché chi muove il liquido verso l'esterno è la differenza di pressione fra esterno (pressione atmosferica) e interno (pressione atmosferica più pressione idrostatica dovuta al liquido) del recipiente. memorizzate questo concetto perché ci tornerà utile in futuro.

Gli studi di Torricelli influenzarono l'olandese Robert Boyle, che oltre ad avere il merito di scoprire molti leggi fisiche (fra cui quella omonima che lega pressione e volume) ha anche il demerito di avere prodotto, nel 1670, il primo embolizzato della storia: un serpente da lui compresso per scoprire gli effetti della pressione.

I cassoni

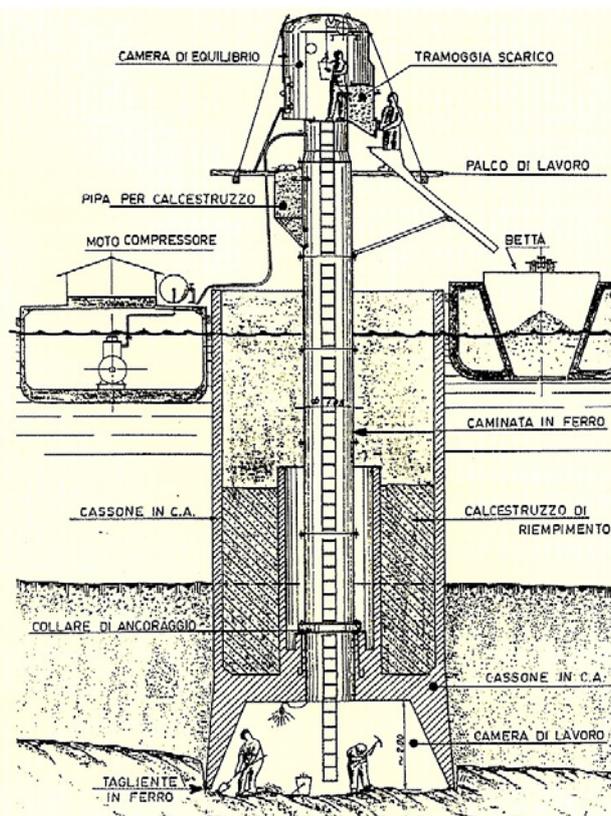
Ma l'uomo comune era ancora ben poco interessato agli effetti della decompressione. Fu solo verso la fine della prima metà del Milleottocento che alcune categorie ne riportarono seri danni. Nell'Inghilterra di quell'epoca lo scafandro da palombaro inventato da Charles e John Deane e perfezionato da George Edward fu portato al successo commerciale da Augustus Siebe (che molti ritengono erroneamente l'inventore dello stesso). Parallelamente il francese Triger, seguendo le tracce di Papin e Coulomb, sviluppò il "cassone", dapprima per perforare sabbie acquifere e raccogliere carbone, poi per gettare le fondazioni di ponti (Rochester, Inghilterra, 1851).

CASSONI E CASSONISTI

Cosa sono i cassoni e chi erano i cassonisti

Dennis Papin, medico molto interessato alla respirazione sott'acqua, aveva capito che per spostare l'acqua all'interno di un ambiente basta soffiarvi dell'aria compressa, mantenendola in pressione. Triger, sfruttando questo principio, realizzò un primo cassone per lavori subacquei. Il sistema, perfezionato, è in uso ancora oggi ed è illustrato in figura (tratta da "L'uomo e il mondo sommerso" di F. Molfino e D. Zannini – Ed. Minerva Medica, Torino, 1964). Un cassone per fondazioni di ponti, per esempio, è un grande cilindro in cemento al cui interno si trova un tubo metallico, in cui passano gli uomini, che porta a una piccola camera di lavoro ricavata sul fondo del cilindro. Tutto l'interno è pressurizzato. In testa al tubo si trova una camera di equilibrio nella quale ci si può

A cassoni e cassonisti è dedicato un interessante capitolo del libro "Subacquea, gocce di storia" di Faustolo Rambelli (Editrice La Mandragora, Imola 2006).



comprimere e decomprimere per passare da esterno a interno e viceversa. Gli operai "cassonisti" all'interno della camera di lavoro scavano e il cassone scende piano piano nel fondo. Quando arriva alla giusta quota l'intero cassone (in cemento armato) viene riempito di calcestruzzo, in modo da cementarlo definitivamente sul fondo.

Entrambe queste categorie cominciarono a soffrire di strani malanni. Già nel 1841 Triger si stupì che un cassonista, dopo sette ore di permanenza a una pressione equivalente a circa 20 metri di profondità, all'uscita si lamentasse di un forte dolore a un arto. Pensò che fosse un lavativo, visto che aveva lavorato solo sette ore contro le dodici usuali al tempo! A questo primo caso fece però seguito una lunga serie di incidenti, con morti e invalidità. I medici non sapevano che pesci prendere. Chi diceva fosse colpa della fatica e del freddo, chi dell'energia elettrostatica, altri azzardarono la rottura del tubo digerente nella risalita per l'aria presente, chi congestioni ematiche e così via. Intanto i poveri operai colpiti si contorcevano per alleviare i dolori, con gli altri che li deridevano. Durante la costruzione dei pilastri per il Ponte di Brooklyn gli embolizzati furono derisi dicendo che si muovevano alla "Grecian bend", goffa posizione di moda fra le dame dell'epoca. Da qui nacque il termine americano "bends" per le embolie.

Il primo passo

Fu solo nel 1857 che due medici francesi, B. Pol e T.J.J. Watelle (molti lo scrivono Wattelle), descrissero clinicamente la patologia, enunciando l'interessante affermazione: «Paghi quando te ne vai». Per un medico la patologia decompressiva è assolutamente anomala: si contrae solo quando una persona entra in un determinato ambiente, come se fosse una malattia infettiva che infesta una città. Tuttavia fino quando il paziente resta in "città" (cioè compresso) non sta affatto male. Solo quando si allontana dalla "città" (cioè si decomprime) la malattia si manifesta, per poi scomparire appena il poveretto rientra nel luogo infetto, cioè la "città". Dovete ammettere che vista come malattia infettiva è alquanto strana!

Osservazioni sperimentali permisero a Pol e Watelle, nel 1854, di relazionare pressione operativa, durata della permanenza in pressione ("esposizione"), velocità di decompressione e insorgenza dei sintomi. Permisero anche di scoprire che la ricompressione riduceva i sintomi.

Un primo passo verso la verità era stato compiuto, anche se passeranno alcuni decenni prima di arrivare a scoprire la causa delle embolie e, soprattutto, come prevenirle.

2 - LA NASCITA DELLA TEORIA DELLA DECOMPRESSIONE

Anche se i due medici francesi avevano instradato correttamente gli altri ricercatori sulle modalità di cura e prevenzione delle "bends", ancora non era stato scoperto il colpevole. Era come se fosse stata trovata una prima cura a questa strana malattia ma senza riuscire a identificare l'agente patogeno.

Già pochi anni dopo il lavoro di Pol e Watelle, Ernst Felix Hoppe-Seyler (lo scopritore dell'emoglobina) dimostrò che le bolle gassose possono rallentare e impedire la circolazione sanguigna attraverso i polmoni. Nel 1872 Friedberg rilevò la somiglianza fra le bends dei cassonisti (e palombari) e l'embolia gassosa che si sviluppava talvolta durante gli interventi di chirurgia. Ormai si era vicini a raggiungere l'obiettivo di scoprire cosa provocasse quei dolori lancinanti.

La scoperta del colpevole

Fu Paul Bert, nel 1878, a dimostrare che delle bolle gassose permanevano nel sangue e nei tessuti dopo la decompressione. Erano loro i colpevoli! Da questa sua osservazione possiamo così sentirci autorizzati a chiamare le "bends" o il "mal de caisson" con il nome che compete loro: embolie. La perspicacia di Bert fu eccezionale: non solo egli indicò che una decompressione lenta era migliore, ma evidenziò anche l'utilità della respirazione di ossigeno puro... quasi centotrenta anni fa! Pensare che molti subacquei ancora rifiutano di respirare ossigeno se hanno sintomi lievi tanto ... «non ce n'è bisogno!». Il povero Paul Bert si starà rivoltando nella tomba!

A quei tempi la decompressione era lenta e continua, in pratica come se, per evitare la formazione di bolle, svitassimo di pochissimo il tappo di una bottiglia di bevanda gassata, lasciando che la pressione si riduca lentamente. Bisognava solo mettersi d'accordo su quanto aprire il tappo. Bert indicò come velocità massima di risalita circa un metro al minuto, quasi la metà di quella allora utilizzata dai medici della Marina inglese. Le sue raccomandazioni permisero di spostare a circa 36 metri di profondità il limite operativo. Ma ancora siamo lontani dal compito delle scienze, che, come disse - ironicamente - il famoso matematico John von Neumann: «... non cercano di spiegare, a malapena tentano di interpretare e, soprattutto, fanno dei modelli».

Il modello matematico

Tutti i subacquei pensano che sia stato Haldane a concepire il modello matematico che simula l'assorbimento e l'eliminazione del corpo dai tessuti, ma non è così. Nel 1900 Heller, Mager e von Schrotter pubblicarono un colossale libro di 1200 pagine nel quale era anche indicato un modello matematico in grado di simulare quanto avviene nel corpo umano durante la compressione e la decompressione. Questo modello era molto elementare, se confrontato alla grande quantità di variabili che interessano l'assorbimento del gas e la sua eliminazione dal corpo umano.

Innanzitutto i tre studiosi applicarono la legge di Dalton all'aria in pressione. Secondo questa legge poiché l'azoto costituisce il 79% dell'aria, la pressione a esso dovuta (nota come "pressione parziale") è pari al 79% della pressione dell'aria. Questo doveva permettergli di calcolare la differente pressione dell'azoto, che loro considerarono un "inerte" (anche se non è del tutto vero), nell'aria respirata e nel corpo umano. Ma come potere calcolare la pressione dell'azoto in un oggetto complesso come il corpo umano? Facile: basta semplificare! Invece di un oggetto complesso i tre scienziati considerarono il corpo come un ammasso uniforme di tessuto, senza elementi differenziati. Stabilita questa enorme semplificazione bisognava capire "come" l'azoto si sciogliesse nei tessuti. Heller, Mager e von Schrotter decisero di applicare la legge di Henry. Per questa legge, in realtà valida solo per fluidi poco solubili, la quantità di azoto che si scioglie in un liquido è direttamente proporzionale alla pressione parziale dell'azoto. E qui arriva un'altra grande semplificazione: infatti quella che viene oggi chiamata tensione tissutale o pressione tissutale non è una pressione, ma semplicemente del gas disciolto. Ma poiché non è comodo paragonare quantità di gas disciolto e pressioni, i nostri ricercatori assunsero che l'ammasso informe di tessuto (in realtà il corpo umano) fosse assimilabile a un contenitore di gas in collegamento con l'esterno attraverso una membrana parzialmente permeabile. Quindi quando la pressione esterna sale, anche di colpo, quella interna salirà più lentamente, e così via. In pratica il concetto iniziale del modello decompressivo è lo stesso che sarà realizzato meccanicamente nei primi "decompressimetri".

IL DECOMPRESSIMETRO

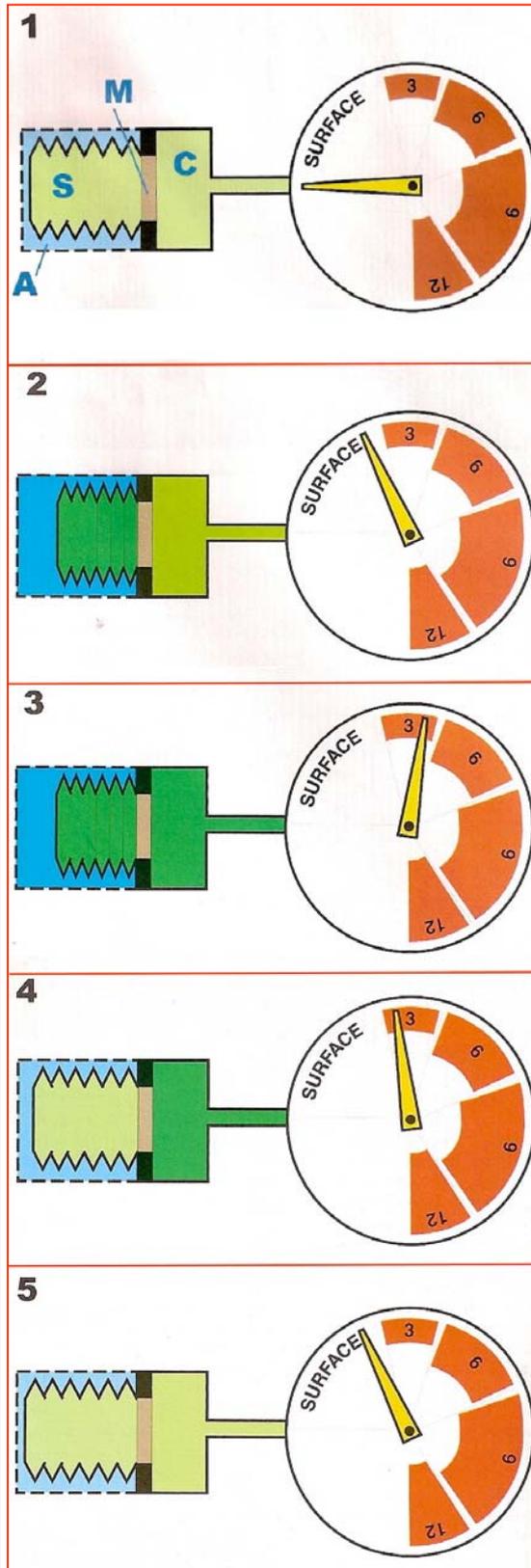
Il modello matematico originario ... trasformato in strumento.

Non molti subacquei ricorderanno il decompressimetro. A casa ne ho due. Uno di questi è proprio costruito come illustrato nello schema 1: in pratica il decompressimetro è formato da una cassa rigida "C", cui è collegato un manometro che ha una speciale scala con settori bianchi e rossi. La cassa rigida è in collegamento tramite una membrana semipermeabile all'aria ("M") con un soffietto estensibile "S", a contatto con l'acqua ("A").

Quando si scende (schema 2) il soffietto S viene compresso e quindi la pressione al suo interno è superiore a quella nella cassa rigida. Di conseguenza l'aria comincia a filtrare, attraverso la membrana, nella cassa, facendo alzare l'ago. Restando a profondità costante la velocità dell'ago è grande all'inizio, poi rallenta (segue la curva determinata da Heller, Mager e von Schrotter). Fin quando l'ago permane nel settore bianco si può risalire senza problemi (immersione "in curva").

Restando sul fondo più a lungo (schema 3) l'ago entra nel settore rosso con la scritta "3": significa che in risalita dobbiamo fermarci a tre metri fino a quando l'ago non è uscito da questo settore. Quando raggiungiamo questa quota (schema 4), infatti, il soffietto S si è espanso per via della caduta di pressione esterna, quindi la pressione al suo interno è inferiore a quella nella cassa rigida. Di conseguenza l'aria comincia a filtrare, attraverso la membrana, indietro verso il soffietto, facendo abbassare l'ago. Appena questo rientra nel settore bianco possiamo tornare in superficie (schema 5). Con il passare del tempo la pressione si riequilibrerà fra soffietto e camera rigida e l'ago tornerà a zero. Se invece facciamo un'altra immersione prima avremo ancora aria nella camera rigida (a simulare l'azoto residuo).

Un sistema molto ingegnoso con due difetti sostanziali: la variabilità della velocità con cui l'aria attraversa la membrana per sporcamento o rottura della stessa e, soprattutto, il fatto che simula tutto il corpo umano come un solo "tessuto uniforme", facendoci tornare a prima di Haldane.



La legge determinata da Heller, Mager e von Schrotter è quella, citata in tutti i libri, dei periodi di emisaturazione (nome corretto) o emitempi (abbastanza corretto) o emiperiodi (termine errato). Questa legge dice che dato un istante qualsiasi, dopo un intervallo di

tempo "T" (periodo di emisaturazione) da questo istante la tensione tissutale ha compiuto un salto pari alla metà di quanto all'istante di partenza mancava al raggiungimento della condizione di saturazione. La condizione di saturazione (che dipende dalla pressione parziale del gas) è quella in cui si ha la massima concentrazione di gas nel liquido. Infatti quando si raggiunge questa quantità, che dipende dalla solubilità del gas nel liquido, anche se si permane ore, giorni o mesi a quella condizione di pressione non si ha ulteriore scioglimento di gas.

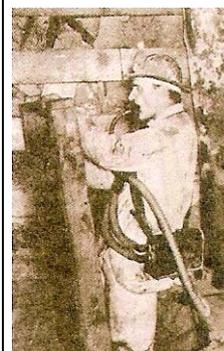
Quindi il parametro significativo determinato dai tre ricercatori è il periodo di emisaturazione "T", che definisce la condizione della tensione tissutale in funzione del passare del tempo. Se partiamo dall'istante iniziale, dopo un intervallo pari a T abbiamo che il salto fatto è il 50%, dopo 2 volte T arriva al 75% (il 50% di prima più la metà del rimanente 50%) dopo 3 volte T arriva all'87,5% (il 75% di prima più la metà del rimanente 25%) e così via fino a 6 volte T, quando si raggiunge circa il 98,5% che viene approssimato al 100% (altrimenti non si arriverebbe mai in quanto l'espressione matematica è asintotica).

L'equazione determinata dai tre scienziati è solo funzione del periodo di emisaturazione, della differenza fra la pressione parziale e la tensione tissutale e del tempo di esposizione. Una semplificazione enorme, quindi, rispetto alla complessità della realtà fisiologica, che viene tutta condensata nella sola scelta del valore "T". Heller, Mager e von Schrotter ipotizzarono che un uomo di media corporatura e con un flusso cardiaco normale potesse essere rappresentato da un tessuto uniforme con periodo di saturazione di 9,7 minuti. Questa asserzione li portò a ottenere una durata della decompressione pari a venti minuti per ogni atmosfera di pressione (quindi indicata per le condizioni di saturazione, le peggiori possibili). In realtà le loro osservazioni furono valide per permanenze a pressioni inferiori a 5-6 atmosfere assolute (pari a 40-50 metri in mare), ma non per esposizioni più lunghe o più profonde. Per risolvere questo problema fu necessario l'intervento di uno strano ricercatore, appassionato della sicurezza dei lavoratori: John Scott Haldane.

MR HALDANE

Uno sperimentatore puro

Molte immagini che raffigurano il nobile scozzese John Scott Haldane sono estremamente formali: ben curato nell'abbigliamento e nella cura del viso e dei baffi. In realtà mi fa piacere ricordarlo come appare nella fotografia a lato (tratta dal bel libro di Trevor Norton "I pionieri degli Abissi", Edizioni Piemme, Casale Monferrato, 2000). È molto più esplicita di tante parole. Haldane è in miniera, per provare un apparecchio respiratorio per minatori da lui inventato. Il fisiologo scozzese fu interessato per tutta la vita agli effetti dei gas respirati dall'uomo, amando soprattutto la ricerca "sul campo". Così respirò nei propri polmoni l'aria inquinata delle fabbriche, scese nelle fogne per ispirare quella proveniente dai residui industriali e umani, viaggiò nella metropolitana con la testa fuori dal finestrino, sempre per verificare quali effetti questi miasmi procurassero sui lavoratori che vi dovevano permanere. Risolse enormi problemi di qualità



ambientale; il suo lavoro nella metropolitana portò, per esempio, all'elettrificazione delle linee. Per verificare l'effetto dell'avvelenamento da monossido di carbonio, cominciò a respirarlo prelevando campioni del suo stesso sangue e misurando la saturazione dell'emoglobina. Lo fece fino quando non riuscì più a mantenersi in piedi. Bastavano ancora pochi punti di saturazione dell'emoglobina e sarebbe morto asfissiato. Durante la Prima Guerra Mondiale si spinse persino, in compagnia del figlio Jack, a respirare vapori di cloro per studiare rimedi contro i gas usati dai tedeschi: i suoi polmoni resteranno danneggiati per il resto della vita da questi esperimenti. Insomma via l'iconografia del professore... e ben venga quella dello sperimentatore sul campo, più consona a un tale personaggio!

Il ruolo di Haldane

La nascita del sottomarino aveva costretto le Marine a fare i conti con il problema più grande connesso a questo utile strumento bellico: la fuga dell'equipaggio in caso di blocco del mezzo sul fondo. Nel 1906 due sommergibili inglesi erano già affondati, in circa 20 metri di acqua, facendo annegare tutti i venticinque membri dell'equipaggio (per ogni sommergibile). Per questo la Royal Navy inglese incaricò J. S. Haldane di migliorare le procedure decompressive, per ottenere maggiore sicurezza nel recupero degli equipaggi bloccati.

Rispetto al modello matematico di Heller, Mager e von Schrotter il fisiologo scozzese non fece enormi cambiamenti, ma i pochi apportati furono sostanziali. Innanzitutto egli osservò, con i suoi fidati collaboratori Boycott e Damant, che l'incidenza di malattie decompressive cresceva in funzione del tempo di esposizione fino a un massimo ottenuto alle 5 ore, poi non aumentava più significativamente. Esperimenti ripetuti con capre, topi e altri animali confermarono la veridicità di questa osservazione. Quindi se il corpo umano deve essere paragonato a un tessuto uniforme il suo periodo di emisaturazione deve essere tale da raggiungere la quasi saturazione proprio dopo 5 ore. Haldane stimò quindi che questo tessuto dovesse avere un periodo di emisaturazione pari a 75 minuti (saturo al 95% dopo 5 ore).

D'altra parte però anche il tessuto con periodo di emisaturazione pari a 9,7 minuti di Heller, Mager e von Schrotter era valido, anche se limitatamente alle brevi esposizioni fino a 5 atmosfere. Come coniugare questo apparente contrasto? Con il pragmatismo che lo distingueva Haldane accettò l'idea che il corpo umano non potesse quindi essere rappresentato da un solo tessuto uniforme, ma dovesse essere considerato come un insieme di tessuti. Egli costruì un modello modificato in cui il corpo era visto come un insieme di cinque tessuti in parallelo (senza scambi di gas fra loro), con periodi di emisaturazione pari a 5, 10, 20, 40 e 75 minuti.

La sua seconda importante intuizione arrivò ancora una volta dal suo pragmatismo di sperimentatore. Le imprese eccezionali di alcuni palombari come Lambert (protagonista della liberazione del tunnel allagato sotto il fiume Severn), dimostravano che comunque il corpo era in grado di tollerare una condizione di limitata sovrasaturazione senza problemi. Questo fatto poteva accelerare notevolmente la risalita dell'equipaggio di un sommergibile dal fondo. Per questo motivo Haldane investigò quale fosse il limite massimo di sovrasaturazione accettabile. Visto che immersioni fino a 10 metri di profondità non davano problemi, Haldane ipotizzò che il dimezzamento della pressione esterna fosse il limite massimo accettabile. Gli esperimenti con gli animali e, successivamente, con due volontari della Royal Navy dimostrarono che questo era il limite accettabile. Questo risultato permise a Haldane di rivoluzionare il modo di decomprimersi: invece di una decompressione lenta e costante, il fisiologo produsse tabelle per una decompressione "a tappe", che per comodità erano poste a distanza di dieci piedi una dall'altra (i nostri classici tre metri). Ritornando all'esempio della bottiglia di bevanda gassata è come se, per limitare la formazione di bolle, aprissimo il tappo per poi richiuderlo dopo poco tempo. Con questo sistema, nei bui laghi scozzesi, Damant raggiunse ben 64 metri di profondità! Questo fu il limite operativo che le tabelle di Haldane permisero di raggiungere.

3 - DECOMPRESSIONE E U.S. NAVY

Come abbiamo visto Haldane aveva costruito le sue tabelle sulla base di diverse ipotesi fondamentali. Per prima cosa aveva assunto come valida equazione di Heller, Mager e von Schrotter, che descrive la curva logaritmica di assorbimento e cessione dell'azoto. Aveva poi ampliato il numero dei "tessuti" del corpo umano portandoli a cinque, definiti dai loro periodi di emisaturazione (5, 10, 20, 40 e 75 minuti). Grazie a questi due elementi, poteva calcolare quanto valesse, con il variare della pressione ambiente, la tensione tissutale in ognuno dei cinque tessuti matematici. Ma tutto questo a nulla sarebbe servito

se il fisiologo non avesse scoperto quale era il limite accettabile di sovrasaturazione nei tessuti.

La sovrasaturazione

Immaginiamo, infatti, di scendere in profondità. All'inizio nel nostro corpo si sarà sciolto meno azoto di quello possibile, perchè il tempo non è stato sufficiente a raggiungere la saturazione. I tessuti veloci (con periodi di emiasaturazione breve) saranno più vicini a questa condizione, mentre i lenti (con periodi di emiasaturazione lunga) saranno a condizioni pressochè simili a quelle precedenti l'immersione.

Se restiamo in profondità a lungo, man mano che passa il tempo i diversi tessuti, cominciando dal più veloce fino al più lento, arrivano alla condizione di saturazione, nella quale l'azoto disciolto è massimo e, pur permanendo ancora, non se ne scioglie altro. Poichè sappiamo che la saturazione, indipendentemente da quale sia il valore di pressione ambiente, si raggiunge dopo sei periodi di emiasaturazione, abbiamo che il tessuto dei 5 minuti sarà saturo dopo mezz'ora di immersione, quello dei 10 minuti dopo un'ora e così via fino a 75 minuti, che raggiungerà questa condizione solo dopo sette ore e mezzo in profondità. Questo ci fa capire che, in un determinato istante d'immersione, il valore della tensione nei vari tessuti è diverso e può diventare lo stesso solo dopo che tutti abbiano raggiunto la saturazione. Se invece di permanere sul fondo risaliamo, abbiamo che i tessuti si trovano in una condizione di sovrasaturazione, cioè nel corpo abbiamo una quantità di gas maggiore di quella presente in condizioni di saturazione per quella condizione di pressione ambiente (legata alla profondità alla quale siamo risaliti).

Altri scienziati pensavano di evitare questa condizione facendo effettuare una risalita lenta e continua, per esempio Sir Leonard Hill, sul quale torneremo più avanti. Al contrario, Haldane accettò l'idea, dimostrata praticamente, che un certo grado di sovrasaturazione fosse accettabile. In base a sue considerazioni e a esperimenti pratici, determinò nel rapporto 2:1 il limite massimo accettabile. Ciò significa che la tensione tissutale, in ogni tessuto, non deve mai superare il doppio della pressione ambiente in quel momento. Se, per esempio, la tensione tissutale è 4 atmosfere in un tessuto veloce, non possiamo risalire a meno di 2 atmosfere di pressione (pari a 10 metri), anche se negli altri tessuti la tensione di azoto è inferiore alle 4 atmosfere (magari per via del tempo limitato passato in profondità).

IL VERO RAPPORTO:

Cosa significa "2:1"?

Nel testo indichiamo il limite accettabile di sovrasaturazione determinato da Haldane con il valore 2:1, tuttavia nel corso del tempo questo rapporto si modificò in un valore che, sebbene non comportasse variazioni di decompressione, era qualitativamente molto più corretto: 1,58:1. Infatti quando parliamo di 2:1 non stiamo parlando di tensione tissutale di azoto, ma di una tensione dovuta a tutti i gas presenti. Poichè già Bert aveva individuato nelle bolle di azoto - e non in quelle di ossigeno - la causa del problema, quello che bisogna utilizzare è il rapporto fra la tensione tissutale di azoto e la pressione ambiente "Nell'aria l'azoto è il 79%, quindi al valore 2 per i gas corrisponde per il solo azoto il 79% di esso, cioè 1,58". Sembra un cambiamento di poco conto ma apre la via a una pratica molto diffusa: la decompressione con miscele diverse dall'aria. Infatti se a una determinata tappa decompressiva respirassi, per esempio, ossigeno puro, aumenterei la differenza fra tensione tissutale di azoto e pressione parziale di azoto nei polmoni, accelerando la decompressione, senza tuttavia variare il rapporto fra la tensione tissutale di azoto e la pressione ambiente, che resterebbe sempre sotto il valore massimo di 1,58:1. Quindi ho una decompressione più veloce senza aumentare il rischio di contrarre una embolia.

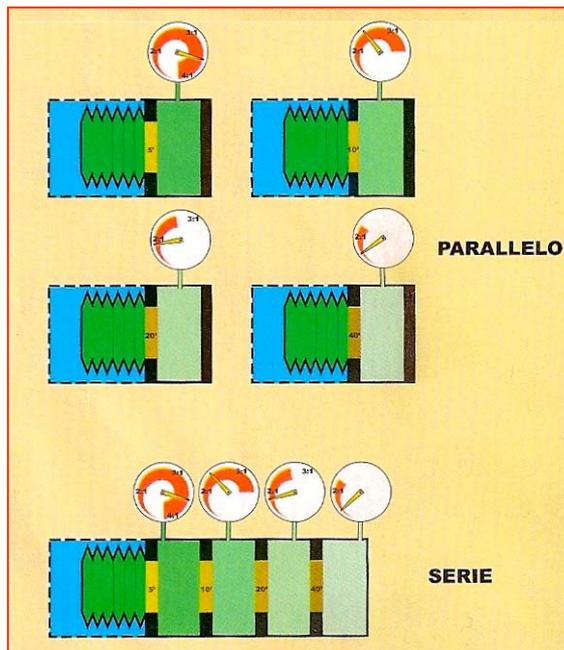


Ora è qualitativamente chiaro come sia possibile determinare per ogni immersione la decompressione: basta calcolare la tensione tissutale in funzione del tempo e della profondità, ipotizzare una determinata velocità di risalita e calcolare il grado di sovrasaturazione verificando se sia possibile ritornare fino alla superficie senza superare il valore 2 o se sia necessario fermarsi prima, per esempio a 3 metri di profondità. In questo caso si può calcolare quanto tempo bisogna fermarsi a questa quota prima che la tensione tissutale scenda sotto un valore tale che, risalendo in superficie (o alla prossima tappa), il grado di sovrasaturazione resti inferiore a 2 anche quando la si raggiunge. Anche Sir Leonard Hill dovette arrendersi al successo di Haldane, ma cercò di porre rimedio asserendo, nel 1912, che Haldane sbagliava a considerare il "rapporto" (divisione) fra tensione tissutale e pressione ambiente, Secondo Hill, quello che era importante era la "differenza" (sottrazione) fra i due elementi. Quindi, il valore di sovrasaturazione massimo accettabile era fisso e non dipendeva dalla profondità.

Per raggiungere il 2:1 di Haldane dalla condizione di saturazione a 50 metri (6 ata) bisogna arrivare a 20 metri (3 ata), risalendo di ben 30 metri, mentre se si sale dalla condizione di saturazione a 20 metri (3 bar) basta risalire di soli 15 metri, cioè a 5 m (1,5 ata) per arrivare al limite di 2:1. Quindi, la differenza di profondità in Haldane dipende dalla quota di partenza. Per Hill, invece, se il limite accettabile è 1 ata, questo vale da qualunque profondità; in condizioni di saturazione, basta risalire di 10 metri per raggiungerlo. Questo concetto tornerà di moda in epoche più recenti.

PARALLELO O SERIE?

Negli anni Cinquanta, Hemplemann adottò un concetto diverso da quello tradizionale di Haldane. Egli considerò che l'azoto arriva nei tessuti critici solo per diffusione e non trasportato dal sangue (perfusione). La teoria di Haldane, invece, considera che l'azoto nel compartimento abbia una diffusione istantanea, evento che nel corpo umano si può avere soli con una buona perfusione. Ma anche altri studiosi hanno in seguito rivoluzionato il concetto haldaniano. Un esempio tipico è il modello Kidd-Stubb (1962), alla base delle tabelle canadesi Dciem, molto utilizzate in alcune nazioni. La teoria alla base del modello è la stessa, solo che mentre Haldane considera i compartimenti come posti "in parallelo"; nel Kidd-Stubbs essi sono "in serie"! In pratica nel modello matematico di Haldane ogni compartimento è a se stante e scambia gas solo con l'ambiente esterno, ma non con gli altri compartimenti. Nel modello Kidd-Stubbs si segue più la catena fisiologica: il compartimento più veloce (il sangue, per esempio) è quello che porta il gas al compartimento subito meno veloce e così via fino all'ultimi compartimento. Poichè al modello di base (calcolato matematicamente) si appongono poi correzioni ricavate dall'esperienza sul campo, i risultati pratici finali (curva di sicurezza) dei due modelli sono poco differenti.



L'intervento della U.S. Navy

Haldane aveva costruito le sue funzionali tabelle per la Royal Navy, la Marina inglese. Visti i buoni risultati, altri paesi si interessarono alle sue teorie. Utilizzando il suo modello, French e Stillson, nel 1915, realizzarono le tabelle "C&R", per conto del Bureau of Constructions and Repairs (da cui il nome) della U.S. Navy, la Marina statunitense. Avevano la particolarità di utilizzare in decompressione, per le immersioni fra i 60 e i 90 metri, l'ossigeno puro come acceleratore di decompressione. Nel 1915 furono utilizzate con successo nel salvataggio dell'equipaggio del sommergibile F4 alla profondità di 91 metri!

Per venti anni le tabelle "C&R" furono utilizzate in Usa senza variazioni, ma gli studiosi della U.S. Navy andavano avanti con i tentativi di perfezionamento. Nel 1935, Hawkins, Shilling e Hansen cominciarono un lungo lavoro di analisi di più di tremila immersioni svolte dal personale U.S. Navy in passato. Nel 1937, al gruppo si aggiunse anche Yarborough. Le loro conclusioni ci appaiono oggi "fuori riga", Secondo questi ricercatori, i tessuti veloci potevano accettare valori massimi di sovrasaturazione di gran lunga superiori a 1.58:1 e la rapida cessione dell'azoto in eccesso faceva sì che le tappe di decompressione imposte da questi tessuti potessero essere cancellate. Per questo motivo, nel 1937 le tabelle "C&R" furono sostituite da altre, nelle quali erano stati cancellati i tessuti (anche se oramai sarebbe più corretto dire "compartimenti", trattandosi di mere simulazioni matematiche) con periodi di emisasaturazione di 5 e 10 minuti, accelerando la decompressione. Le immersioni della U.S. Navy ebbero comunque un tasso di incidenti dell'1.1%, del tutto accettabile per la Marina.

Per abbassare questa percentuale, 14 anni dopo, lo stesso lavoro di verifica delle tabelle (questa volta di Yarborough) fu svolto da Van der Aue, che considerò anche lunghe permanenze lavorative. Il risultato fu che i compartimenti (d'ora in poi useremo questo termine) dei 5 e 10 minuti furono riammessi fra quelli che contano, in quanto influenzavano gli stop decompressivi più profondi. Dall'altro lato Van der Aue introdusse un compartimento da 120 minuti, per meglio controllare gli stop decompressivi a minore profondità.

LE TABELLE DI HALDANE

Quando spiego qualche argomento di teoria della decompressione che includa il modello di Haldane, molti subacquei lo ritengono ormai superato e sicuramente foriero di embolie se fosse applicato oggi. La credenza diffusa nel mondo dei subacquei è infatti che le tabelle di Haldane fossero troppo poco conservative, cioè fornissero tempi di permanenza lunghi e decompressione limitata, Mi dispiace deluderli, ma la scarsa efficacia delle stesse tabelle è un'evenienza possibile solo per particolari profili d'immersione. Parlando di curva di sicurezza, per esempio, quella di Haldane era molto ristretta, sebbene garantisse una permanenza illimitata fino a 10 metri di profondità e tre ore fra i 10 e i 12 metri di profondità, la sua curva già scendeva a un'ora a 14 metri, mezz'ora ai 16 metri e venti minuti ai 18 metri. Tutte le altre profondità non erano più in curva di sicurezza. Se poi esaminiamo le profondità massime di queste tabella scopriamo che per un'immersione a 62 metri la durata unica prevista era di 12 minuti, ai quali dovevano seguire 3 minuti di risalita fino ai 18 metri e altri 32 minuti di decompressione a tappe, molto più di quanto richiederanno le tabelle di immersione degli anni successivi. Un'immersione a 30 metri per 15 minuti, oggi considerata in curva da tutte le tabelle e i computer d'immersione, per Haldane richiedeva una durata della decompressione (fra risalita e tappe) di ben 14 minuti! Sorpresi, vero?

Un approccio diverso

Nel 1954, Rashbass riprese il concetto di Hill della differenza di pressione come limite massimo accettabile e la quantificò in 9 metri. Nel frattempo, Hemplemann adottò un concetto completamente diverso da quello tradizionale. Osservando che nelle immersioni profonde il primo sintomo di embolia che si osservava era il dolore articolare alle cartilagini, egli considerò che il tessuto cartilagineo non presenta vasi sanguigni e quindi al suo interno l'azoto arriva solo per diffusione e non trasportato dal sangue (perfusione). La teoria di Haldane, invece, considera che l'azoto nel compartimento abbia una diffusione istantanea, evento che nel corpo umano si può avere solo se il tessuto è ben vascolarizzato e la circolazione sanguigna importante, Hemplemann quindi ritornò a considerare il corpo umano come una grossa fetta di tessuto omogeneo, con una faccia in contatto con l'azoto e l'altra no. A questo punto l'azoto diffonde all'interno con una distribuzione che è via via decrescente man mano che ci allontana dalla superficie in contatto con l'azoto.

Hemplemann calcolò quindi come variasse la tensione tissutale di azoto nei diversi livelli della fetta, Verificando che non si raggiungesse mai il limite di 9 metri suggerito da Rashbass, è stato possibile calcolare delle tabelle decompressive, che dal 1972 costituirono quelle ufficiali della Royal Navy inglese. La teoria di Haldane non era invece stata abbandonata dalla U.S. Navy, che anzi continuava a migliorarla.

4 - GLI ULTIMI SVILUPPI

La U.S. Navy continuò infatti a lavorare nella messa a punto del modello di teoria della decompressione ideato da Haldane e modificato dai propri ricercatori. Se è vero che a volte le indicazioni sembravano contrastanti (per esempio Yarborough nel 1937 tolse i compartimenti da 5 e 10 minuti perché ininfluenti, mentre nel 1951 Van der Aue li rimise perché imponevano stop decompressivi profondi) bisogna pur ammettere che la percentuale di incidenti (intorno all'1%) rimase accettabile per un ente militare.

Tuttavia, poiché un miglioramento era sempre possibile, la U.S. Navy periodicamente procedette con un riesame di tabelle e immersioni. Man mano che passava il tempo, infatti, la Marina acquisiva più dati sui profili di immersione che i suoi sub erano soliti effettuare. Inoltre l'avvento degli uomini rana modificò profondamente la tipologia di immersioni svolte dai subacquei della Marina.

La rivoluzione di Des Granges e Workman

Nel 1956 Dwyer, Des Granges e Workman si impegnarono in un vasto esame e ricalcolo delle immersioni. Assunsero per validi i compartimenti di 5, 10, 20 e 40 minuti pretesi nel tradizionale modello haldaniano. Portarono però a 80 minuti quello dei 75 e inclusero anche il 120 minuti introdotto da Van Der Aue. Accettarono inoltre l'osservazione di Hawkins, Shilling, Hansen e Yarborough che i compartimenti veloci imponevano a volte soste profonde non necessarie. Invece di cancellare questi compartimenti decisero di utilizzare per essi (5, 10, 20 e 40 minuti) valori massimi di sovrasaturazione superiori a 1,58 (rispettivamente 3,15 – 2,67 – 2,18 – 1,76), lasciando invariato il rapporto per il tessuto degli 80 minuti e abbassandolo per il più lento 120 minuti (1,55). Inoltre il trio di ricercatori stabilì che questi valori massimi di sovrasaturazione erano validi per il ritorno in superficie, cioè a profondità 0 metri. Ma se il subacqueo si ferma prima di raggiungere la superficie per un comportamento è possibile sopportare valori massimi superiori. Per esempio se il compartimento dei 5 minuti accetta un limite di 3,15:1 per il ritorno in superficie, secondo i loro studi fermandosi ai 3 metri sopporta un valore 3,69, fermandosi ai 6 metri 4,24 e così via con un andamento lineare (incremento di 0,545 per ogni 3 metri di aumento della profondità di stop).

Tutto ciò era estremamente complesso, pertanto Workman decise di utilizzare come valori M direttamente la profondità - misurata in piedi di acqua salata - dalla quale era possibile risalire in funzione del rapporto massimo accettabile. Così si calcolò, per esempio, che al rapporto 3,15:1 (valido per il compartimento dei 5 minuti nel caso di ritorno in superficie)

corrisponde una profondità massima di inizio risalita pari a circa 30 metri (infatti a questa profondità la pressione parziale di azoto nel gas respirato è circa 3,15 volte la pressione ambiente ai 0 metri di profondità).

TABELLA

LA MATRICE DEI “VALORI M”

Compartimento	M ₀	M ₁₀	M ₂₀	M ₃₀
5 minuti	104	122	140	158
10 minuti	88	104	120	136
20 minuti	72	87	102	117
40 minuti	40	54	68	82
80 minuti	54	67	80	93
120 minuti	52	64	76	88

Workman introdusse il concetto di “Valore M” come la profondità massima - misurata in piedi di acqua salata - dalla quale era possibile risalire in funzione del massimo grado di sovrasaturazione accettabile da ogni compartimento. I valori M₀ si riferiscono a una risalita fino alla superficie - per esempio possibile per il compartimento da 5 minuti da una profondità di 104 piedi in mare – mentre quelli M₁₀ valgono per una risalita fino ai dieci piedi (3 metri) di profondità e analogamente per gli altri.

Questo significa che se ci immergiamo a profondità inferiore ai 30 metri il compartimento dei 5 minuti non controllerà mai l'immersione, perché anche risalendo fino alla superficie il suo livello di sovrasaturazione sarà sempre inferiore al massimo accettabile. Con la matrice (insieme) dei valori M fu più semplice per loro calcolare le tabelle, che sono le U.S. Navy ancora oggi utilizzate da qualche subacqueo, salvo piccoli aggiustamenti fatti dallo stesso Workman nel 1965, quando aggiunse i compartimenti 160, 200 e 240 minuti.

Le immersioni ripetitive

Chi si immergeva per fare lavori subacquei (come i palombari) scendeva, completava il suo lavoro e risaliva, senza più scendere in acqua nelle ore successive. Con la nascita degli incursori, invece, le Marine di tutto il mondo si trovarono nella necessità di valutare anche la possibilità di svolgere immersioni ripetitive.

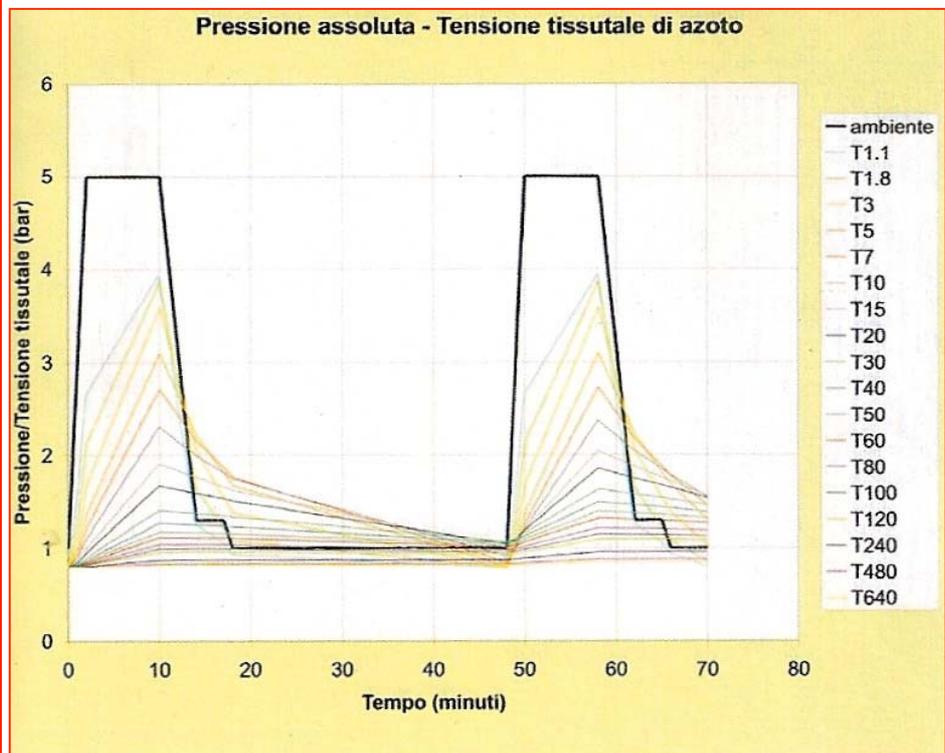
Quando si accinsero a considerare l'azoto residuo presente nei compartimenti dopo un determinato intervallo di superficie, i ricercatori compresero di essere nei guai. Infatti l'azoto in eccesso veniva eliminato dai compartimenti in più o meno tempo a secondo della loro velocità. Abbiamo visto nei precedenti articoli che dopo sei volte il periodo di emisaturazione un compartimento ha ceduto tutto il gas inerte in eccesso. Quindi il compartimento dei 5 minuti dopo sei volte tale tempo, cioè dopo mezz'ora, ha ceduto tutto l'azoto in eccesso. Invece al compartimento dei 120 minuti occorreranno ben 12 ore! In termini pratici questo significa che le tabelle per una immersione ripetitiva sono più di una, anzi sono moltissime, perché dipendono dal profilo della prima immersione. Se nella prima immersione abbiamo caricato solo i compartimenti veloci (immersione profonda ma breve) la seconda ne sarà meno influenzata. Per evitare troppa confusione alla U.S. Navy si decise di considerare che nell'intervallo di superficie tutti i compartimenti cedessero l'azoto in eccesso con la velocità del più lento, cioè del 120 minuti. Per questo le tabelle U.S. Navy considerano ripetitiva ogni immersione svolta entro 12 ore (6 volte 120 minuti) dal termine della precedente.

COMPUTER E TABELLE

Un diverso modo di considerare l'intervallo di superficie

Quando si resero conto che le tabelle per una immersione ripetitiva erano moltissime, perchè dipendono dal profilo della prima immersione, i ricercatori della U.S. Navy decisero di considerare che nell'intervallo di superficie tutti i compartimenti cedessero l'azoto in eccesso con la velocità del più lento, per loro il 120 minuti. I subacquei sportivi adottando le tabelle U.S. Navy si abituarono a questa forte penalizzazione. Se un subacqueo eseguiva una immersione a 40 metri per dieci minuti, anche senza considerare una opportuna sosta di sicurezza (introdotta successivamente), e voleva ridiscendere alla stessa profondità dopo mezz'ora in superficie, le tabelle U.S. Navy gli davano un tempo in curva di sicurezza nullo. Anzi appena raggiunta la quota dei 42 metri già si trovava con l'obbligo di effettuare una tappa di decompressione di due minuti a 3 metri. I computer d'immersione invece possono calcolare l'eliminazione di azoto in eccesso in ogni compartimento con la velocità che lo caratterizza anche nell'intervallo di superficie. In figura abbiamo graficizzato questo calcolo utilizzando addirittura 18 compartimenti, con periodo di emiasaturazione fra 1,1 e 640 minuti. Abbiamo eseguito lo stesso profilo

dell'esempio con le tabelle e il computer ci ha permesso di ripetere una seconda immersione di durata uguale alla prima! I motivi sono semplici: i compartimenti più carichi nella prima immersione sono quelli veloci, che in superficie si scaricano velocemente dell'azoto in eccesso. Infatti i picchi di tensione tissutale sono praticamente identici nelle due immersioni per i compartimenti fino a 10 minuti, crescono di poco (meno del 10% rispetto alla prima) nella



seconda immersione per quelli oltre gli 80 minuti, mentre crescono maggiormente per quelli fra i 20 e i 120 minuti, con un picco (+18 %) in quelli da 50 e 60 minuti. Sono questi quindi i compartimenti che controllano la seconda immersione e che ci permettono di svolgerla senza decompressione. Pensate che invece quando nacquero i primi computer d'immersione qualcuno gridò allo scandalo affermando che "si scordavano la prima immersione"!

Il Prof. Bühlmann

Il calcolo dei Valori M come profondità in piedi di acqua salata, che aveva semplificato il lavoro della U.S. Navy, era di impiccio per chi si volesse dedicare a calcolare le immersioni a quote differenti dal livello del mare. Fu così che negli anni '60 il Prof. Bühlmann, dell'istituto di Fisiologia Iperbarica dell'Università di Zurigo, utilizzò - per

determinare i valori massimi di sovrasaturazione accettabili - delle rette, che partivano non più dalla pressione assoluta 1 (cioè a livello del mare) ma da 0 (vuoto). In pratica per determinare la retta su un piano cartesiano bastano l'inclinazione e l'origine, cioè una coppia di coefficienti. Nel corso delle sue ricerche, che ebbero per oggetto anche immersioni in nitrox e con heliox, il Prof. Bühlman sviluppò diversi modelli, che prendono nome dalle coppie di coefficienti adottate. Il suo modello più semplice, ma di grande successo, fu lo ZH-L6, impiegato nei primi computer Aladin. Sviluppò anche lo ZH-L8 e lo ZH-L12 (a 16 compartimenti e 12 coppie di coefficienti). Il suo modello più famoso resta lo ZH-L16, a 16 compartimenti - con periodi di emisaturazione da 4 a 635 minuti - e 16 coppie di coefficienti. I coefficienti di questo modello furono calcolati matematicamente (ZH-L16A), poi ridotti per determinare le tabelle (ZH-L16B) e ulteriormente ridotti per programmare i software dei computer (ZH-L 16C). In realtà il famoso modello del grande ricercatore svizzero non è poi molto dissimile dall'ultimo proposto da Workman, in cui per i valori M abbandonava la matrice e adottava delle rette (anche se sempre con origine dal livello del mare). La maggiore diffusione degli algoritmi del prof. Bühlmann nel campo dei computer d'immersione è probabilmente dovuta a due fattori. Il primo è che il professore svizzero ha pubblicato tutto il suo lavoro in un libro edito prima in lingua tedesca e poi in lingua inglese ("Decompression-Decompression Sickness") mentre il lavoro dei ricercatori della U.S. Navy restava secretato a livello militare. Il secondo fattore è che, essendo stati pubblicati, i suoi algoritmi sono disponibili gratuitamente.

Altri contributi

Utilizzando sempre lo stesso modello matematico la DSAT elaborò nel 1987 le tabelle "Recreational Dive Planner" PADI. Il calcolo (Roger e Powell) fu effettuato sulla base di 14 compartimenti, con periodi di emisaturazione da 5 a 480 minuti. I valori M_0 sono circa il 10% inferiori a quelli della U.S. Navy. Non vengono considerati valori M in profondità perché le tabelle servono solo per immersioni in curva di sicurezza (con risalita diretta alla superficie). Con questo limite è stato possibile riferire l'eliminazione dell'azoto in eccesso nell'intervallo di superficie a un tessuto più rapido: 60 minuti contro i 120 minuti della U.S. Navy. Per tanto queste tabelle considerano ripetitive le immersioni svolte entro le sei ore (sei volte 60 minuti) dal termine della precedente. Tuttavia per elevati carichi di azoto residuo (gruppi di appartenenza W, X, Y e Z) sono state in seguito introdotte regole più restrittive per le immersioni ripetitive.

Nel 1988 il prof. Bill Hamilton, presentò il suo algoritmo DCAP MF11F6 a 11 compartimenti - con periodi di emisaturazione da 5 a 670 minuti e valori M per i compartimenti lenti inferiori ai corrispondenti di Workman.

Nel 1995 Baker propose il metodo dei Gradient Factors, per ridurre i valori M in generale. In pratica si stabilisce la massima percentuale accettabile (Gradient Factor min) del primo valore M interessato e quella del valore M_0 (Gradient Factor max), delineando una retta fra questi due punti, che limita tutti i valori M intermedi. In sostanza riducendo il GF min si aumenta la profondità della prima tappa di decompressione, mentre riducendo il GF max si allunga la durata delle tappe.

Anche la U.S. Navy (Prof. Thalmann) ha cercato di rivoluzionare il modello di base, concependo un modello probabilistico, basato cioè su una probabilità di incidente accettabile, rilevata su basi statistiche. Purtroppo si è verificato che la significatività del modello era ridotta. Per questo la stessa Marina statunitense continuò ad adottare un algoritmo di tipo classico (V-Val 18 a 18 compartimenti).

Il futuro è già iniziato

In passato si continuavano ad aggiungere compartimenti lenti per "coprire" tutte le immersioni; oggi si indicano invece come responsabili delle embolie i tessuti veloci.

In teoria per il modello classico si dovrebbe massimizzare l'eliminazione di gas aumentando il più possibile il gradiente locale, cioè arrivati al limite bisognerebbe tornare il

più rapidamente possibile in superficie o alla profondità della prima tappa decompressiva per favorire l'eliminazione del gas in eccesso. Ma tutti sanno che bisogna invece risalire lentamente. Queste contraddizioni dimostrano che l'evoluzione della teoria tradizionale sta portando alla luce i suoi limiti. In realtà tutti questi modelli di decompressione hanno lo scopo di prevenire eventuali embolie che sono dovute alla formazione di bolle. Lo sapeva anche il medico Paul Bert, citato nella seconda puntata. Ma in questi modelli tradizionali le bolle non sono affatto considerate.

Le ricerche sulla formazione e la crescita dei nuclei gassosi e delle bolle costituiscono la base su cui sono stati realizzati negli ultimi anni nuovi modelli decompressivi. Ma su questi modelli "a bolle" vale la pena di fare in futuro un altro dossier!

NOTE SULL'AUTORE

Stefano Ruia

Autore di numerosi articoli e libri dedicati al mondo sommerso. Collabora regolarmente alle riviste *Il Subacqueo* e *Nautica* e partecipa alla realizzazione di documentari e programmi RAI inerenti le attività subacquee.

Esperto di didattica subacquea, è responsabile del settore Technical Training della PSS Worldwide, per la quale si occupa anche della realizzazione di materiali didattici.

Da anni impegnato in campagne di esplorazione e documentazione subacquea, si è fatto promotore del programma di ricerca D.W.E.L.L.E.R. (Deep Wrecks Explorations with Light and Limited Equipment Research) che ha ottenuto buoni successi.



I testi riportati nel presente dossier sono stati concessi ad uso interno dei corsi PSS di IDRA Diving Club e non possono essere riprodotti o citati, anche solo in parte, senza il suo esplicito consenso. Può essere contattato: tek@pssworldwide.org