

La ricerca sulla decompressione per i non “addetti” alla medicina subacquea.

Prof. Pasquale Longobardi

(contributo al Convegno “Iperbarica 2001” – Bologna, 1 dicembre 2001)

Il Consiglio Direttivo della *Società Italiana di Medicina Subacquea ed Iperbarica* ha promosso la sessione subacquea del convegno “Iperbarica 2001” per consentire un incontro tra medici specialisti in medicina subacquea e tutti i subacquei.

Questo lavoro è una raccolta di articoli da me scritti per una rivista del settore ed ha un taglio essenzialmente divulgativo.

Per i colleghi medici e per chi desidera un approccio più scientifico allego una serie di tre lavori sulle ricerche del DAN presentati a Convegni internazionali del settore.

1. Il viaggio di una bolla di azoto

Prova a descrivere esattamente: che cosa è una bolla? Pausa di riflessione. Risposta probabile: “una bolla è ... una bolla!”. In effetti la bolla è facile da immaginare ma difficile da descrivere. Per l'attività subacquea si può definirla come una raccolta di gas di forma sferica che si forma nei liquidi del corpo umano durante la decompressione. Zero punti, ritenta!

Altro quiz: perché i subacquei temono le bolle? Qui la probabile risposta è immediata: “le bolle determinano la malattia da decompressione”. Va bene, un punto a favore. Prosegui.

Quando si formano le bolle? La risposta più probabile è “le bolle si formano quando non si rispetta la velocità massima di risalita e quando si saltano le tappe di decompressione”. Mi dispiace, non è del tutto sbagliato ma è troppo generico. Non arrossire, nessuno ti ritira il brevetto. Sono in molti a pensare che rispettando le tabelle o le indicazioni del computer si evita la formazione delle bolle e che queste si generano solo in seguito ad un errore. Del resto su questo presupposto sono basate le tabelle U.S. Navy (elaborate inizialmente dal professor Haldane) e la maggior parte dei computer in commercio basati sui programmi del professor Bühlmann o citati con il termine “Haldane modificato”, ai quali affidiamo la nostra decompressione.

Un'altra idea molto diffusa è che la malattia da decompressione sia dovuta al fatto che le bolle vanno ad occludere meccanicamente un vaso sanguigno. Semplice e lineare, vero? Certamente, però ho un dubbio: se ci immergiamo in coppia e facciamo lo stesso errore in risalita, l'eventuale incidente dovrebbe colpire entrambi. Invece l'esperienza insegna che, a parità di errore, io posso avere dei problemi e tu no. Perché? Inoltre ho un altro dubbio: se le bolle bloccano il passaggio del sangue, il danno si dovrebbe manifestare subito, visto che i tessuti a valle dell'ostruzione soffrono immediatamente per la carenza di ossigeno e zuccheri. Invece l'esperienza insegna che la malattia da decompressione si può manifestare nelle 24 ore successive all'immersione ed anche oltre. Perché?

A questo punto ti ho rovinato la rilassante tintarella ma forse ti sei incuriosito. Suggerimento: fai un bel tuffo in compagnia degli amici e poi prosegui con la lettura dell'articolo che è dedicato ad un approfondimento sull'argomento della decompressione.

In un viaggio immaginario visualizzeremo la nascita, la crescita ed il destino delle bolle nel nostro organismo durante un'immersione.

Decidiamo: quando inizia il nostro racconto? In generale un'immersione inizia quando ci viene l'idea di farla: è bella tutta la fase della pianificazione e della preparazione, compreso il viaggio in barca, la vestizione ed il tuffo. Ai fini del calcolo della decompressione è importante la durata dell'immersione dall'entrata in acqua fino al distacco dal fondo o, come alcuni fanno per prudenza, fino alla prima tappa. Sempre in generale un'immersione finisce con il ritorno in superficie, eventualmente con la lieta appendice di un lauto piatto di spaghetti. La nostra storia però riguarda le bolle e quindi il nostro viaggio inizia con la loro formazione, cioè al momento del distacco dal fondo, per terminare circa quattro ore dopo il ritorno in superficie. Questa è la prima novità: l'orizzonte temporale è inconsueto. Percepisco la tua perplessità: "non mi dirai che il tempo trascorso in discesa e sul fondo non incide per nulla sulla decompressione!". Beh, no! Per questo aspetto vedi il box sul modello compartimentale, qui parliamo delle bolle ed il loro viaggio inizia dal momento del distacco dal fondo.

Appena incominciamo a risalire si riduce la pressione esterna sul nostro organismo e l'azoto accumulato fuoriesce dai tessuti per passare nel sangue. Solo il 10% dell'azoto liberato dai tessuti contribuisce allo sviluppo delle bolle mentre il restante 90% rimane sciolto liberamente nel sangue e, quando raggiunge i polmoni, viene eliminato con la respirazione. Ci sono due considerazioni da fare. La prima è che parliamo di percentuale, quindi è normale che nelle immersioni "facili" si libera poco azoto ed il 10% di poco è quasi niente! Nelle immersioni impegnative (profonde, ripetitive, multiday) si libera molto azoto ed il 10% di molto è qualcosa che non si può trascurare. La seconda osservazione è che siccome solo una piccola parte dell'azoto forma le bolle questo costituisce un importante fattore di protezione che riduce il rischio di incidente anche quando viene commesso qualche errore durante la decompressione. Seguiamo il viaggio delle bolle.

Anche adesso mentre leggi questo contributo, nel tuo sangue ci sono delle piccole bolle (microbolle) con un diametro inferiore a 10 micron (un micron è mille volte più piccolo di un millimetro). In immersione, quando inizi la risalita, quel 10% dell'azoto che si è liberato dai tessuti bussa alla parete delle microbolle e cerca di entrare dentro per scroccare un passaggio verso i polmoni. La microbolla però si oppone all'ingresso dell'azoto visto che la poverina ha sudato sette camicie per raggiungere un delicato equilibrio. Difatti per un fenomeno ben conosciuto dai fisici (legge di Laplace) e dai bambini (bolle di sapone), le bolle troppo piccole collassano e quelle troppo grandi scoppiano. L'azoto però è prepotente, così alla fine riesce a superare la resistenza della parete ed entra dentro la microbolla che così cresce e diventa bolla a tutti gli effetti. Lungo il viaggio verso il polmone, nel sangue venoso, la nostra bolla incamera altro azoto che fuoriesce dai tessuti oppure si unisce con altre bolle e diventa sempre più grande. A volte la bolla diventa troppo grande e ... bum! Si rompe. In alcuni casi nascono delle bolle figlie più piccole che continuano la loro corsa verso il polmone.

Arrivata qui la bolla entra in un filtro di piccoli vasi (capillari) che trattengono le bolle più grandi di 10 micron. È il capolinea. L'azoto esce dalla bolla ormai bloccata e passa negli alveoli, la parte più piccola del polmone, per essere scaricato all'esterno con la prima espirazione. Il viaggio dell'azoto è iniziato al momento del distacco dal fondo con la liberazione dai tessuti, si è accelerato nel sangue venoso grazie al passaggio scroccato alle bolle e finisce con la scintillante ascesa verso la superficie del mare delle bolle che fuoriescono dal nostro erogatore. L'azoto è finalmente libero nell'aria! Lo recupereremo alla prossima ricarica delle bombole ed il viaggio ricomincerà alla prossima immersione.

Tutto qui? Per fortuna sì, di solito la storia è a lieto fine. Quando però l'immersione è impegnativa o c'è un errore in decompressione le bolle che arrivano al polmone sono tante e grosse. Può succedere che la bolla viene riconosciuta come un nemico dal nostro sistema di difesa ed attaccata. Peggio ancora se la grossa e goffa bolla malauguratamente gratta la parete di un vaso sanguigno e lo

danneggia: si liberano delle sostanze chimiche che provocano una infiammazione. I segni sono quelli classici della malattia da decompressione: rossore, gonfiore, dolore, difficoltà a muovere la parte danneggiata. Non c'è un rapporto diretto tra la quantità o la dimensione della bolla ed il danno. In genere è più pericolosa la grandezza delle bolle che non il loro numero.

La probabilità di un incidente da decompressione supera il 3% (le tabelle U.S. Navy per le immersioni quadre hanno, in media, un rischio del 2,2%) quando il diametro delle bolle supera i 120 micron nelle immersioni entro i 40 metri di profondità o gli 80 micron nelle immersioni oltre i 40 metri. Ergo: le immersioni più profonde, respirando aria, sono più a rischio perché anche bolle di azoto meno grandi possono fare danno. Meditate gente! Se proprio vi piace l'immersione profonda imparate ad utilizzare le miscele (immersione tecnica). Sento dire: "Io sono esperto, scendo profondo in aria tutte le settimane, ho una buona attrezzatura ed i miei compagni sono scelti...tutta gente in gamba e poi la mia guida è un ex-corallaro.

Le immersioni tecniche costano una follia perciò basta con queste storie, io continuo ad immergermi profondo in aria e sono tranquillo". Diamo a Cesare quel che è di Cesare: immergersi spesso (più di 20 immersioni per anno) comporta uno schiacciamento delle microbolle e quindi si riduce l'"innesco" per la formazione delle bolle grandi. Inoltre onore ai corallari. Molto prima che noi medici capissimo qualcosa sul meccanismo della malattia da decompressione, loro avevano già imparato, sulla loro pelle, ad utilizzare alcuni accorgimenti che aumentano la sicurezza dell'immersione: discesa rapida (almeno 15-20 metri al minuto); distacco lento dal fondo perché è in questo momento che si formano le prime bolle; tappe profonde che servono per scaricare un po' di azoto; negli ultimi 15 metri risalita molto lenta, l'ideale sarebbe dai 3 ai 5 metri al minuto, i corallari risalgono palmo dopo palmo lungo una cima, invece i computer subacquei più diffusi consentono una velocità di risalita di 7-8 metri al minuto negli ultimi 10 metri. Riconosciuto quanto sopra, non c'è dubbio però che non esiste l'immunità dall'incidente da decompressione. È solo un problema di statistica. Quale rischio sei disposto ad accettare? Numeri tipo 2%, 3%, 5% di fatto non ci dicono nulla. È più interessante prevedere quali saranno le 2, 3, 5 immersioni su 100 nelle quali si potrebbe avere un problema. Noi ricercatori stiamo lavorando su questo e ci sono molte novità ma questa è un'altra storia!

Pensierino finale per i lettori più tranquilli: le immersioni in curva di sicurezza entro i trenta metri di profondità sono del tutto sicure o, per essere più precisi, per avere un problema dovuto alle bolle di azoto dovresti immergerti duemila volte l'anno per 40 anni. Buone immersioni!

Le tabelle US Navy ed i computer con l'algoritmo di Buhlmann e Haldane modificato (il modello compartimentale).

Quanto incide la discesa ed il tempo di fondo sulla successiva decompressione? Una discesa rapida è utile per schiacciare le microbolle, sempre presenti nel nostro organismo. Cosa succede se invece si raggiunge il fondo con calma, per esempio in 7-8 minuti? I tessuti che assorbono l'azoto un po' più lentamente cominciano a caricare il gas inerte già mentre ci avviciniamo al fondo. In genere questo non è un problema ma nelle immersioni più impegnative conviene pianificare l'immersione in modo che l'accumulo dell'azoto avvenga mentre rimaniamo alla massima profondità, quindi è preferibile una discesa rapida e diretta verso il fondo.

Analizziamo la decompressione. I modelli classici (sui quali sono basati le tabelle della U.S. Navy e i computer con il programma di Bühlmann o Haldane modificato) calcolano matematicamente la quantità di azoto disciolto in un compartimento (simulazione di un tessuto) che

il ricercatore ha scelto come punto di riferimento per i calcoli in base ad una serie di parametri: durata dell'immersione, profondità e miscela respirata, più recentemente anche temperatura dell'acqua e consumo d'aria. Poi il computer (ma il discorso vale anche per le tabelle, dove i calcoli sono stati fatti a tavolino) verifica la possibilità di risalire direttamente in superficie con il presupposto che, in media, il nostro organismo tollera il doppio dell'azoto normalmente presente prima dell'immersione.

Se il calcolo evidenzia che la quantità di azoto che si libera dai tessuti in risalita è superiore al doppio del normale allora ti segnala che devi fermarti per una tappa di sicurezza. Il computer verifica qual è la tappa più vicina alla superficie alla quale puoi risalire: prima 3 metri, in subordine 6 metri poi 9 metri, ecc. Facciamo qualche esempio, è semplice ma ti avverto: se sei allergico ai numeri, passa direttamente all'ultimo paragrafo. In superficie nel nostro organismo ci sono circa 800 Millibar di azoto (questo valore deriva dal fatto che una atmosfera è uguale a 1000 Millibar e che nell'aria c'è l'80% di azoto: $1000 \times 0,8 = 800$). Ogni volta che iniziamo la risalita il computer si chiede: se risalgo in superficie quanto azoto c'è nel compartimento che ho preso come riferimento? Fa i calcoli e se ci sono meno di 1600 Millibar, cioè il doppio dell'azoto presente prima dell'immersione, compare l'ok per la risalita ("dec 99"). Le immersioni in curva di sicurezza sono calcolate in modo che per ogni profondità il tempo massimo di permanenza sul fondo sia tale che, una volta in superficie, nel nostro organismo ci siano al massimo 1600 Millibar di azoto; in questo caso non sono necessarie tappe di decompressione. Oltre questo quantità di azoto il computer non ci permette di risalire direttamente in superficie altrimenti, in teoria, si formerebbero le bolle con il rischio di un incidente da decompressione.

Nelle immersioni fuori curva il computer analizza i conti relativi al compartimento che ha scelto come riferimento e si chiede: visto che non posso risalire direttamente in superficie, posso almeno andare alla tappa dei 3 metri? Fa i calcoli e se ci sono meno di 2100 Millibar di azoto, cioè 1300 Millibar corrispondenti alla pressione esterna di 1,3 atmosfere assolute più gli 800 Millibar di azoto che normalmente sono tollerati dal nostro organismo, il computer ci segnala la possibilità di risalire a 3 metri. Altrimenti, se ci sono più di 2100 Millibar, si chiede se è possibile risalire alla tappa dei 6 metri e così via.

La decompressione viene impostata dal computer nel momento in cui iniziamo la risalita, quindi un suggerimento: nelle immersioni oltre i 30 - 40 metri di profondità rimani sul fondo fin quando non ti viene segnalata la necessità di eseguire una tappa di decompressione almeno a 3 metri. Questo significa che il computer ha selezionato come riferimento per i suoi calcoli un compartimento con una velocità media di assorbimento dell'azoto e la decompressione sarà un po' più sicura. In sostanza evita le immersioni con toccata e fuga dal fondo. Pensierino finale: il modello "compartimentale" presuppone che, rispettando le indicazioni date dal computer o dalla tabella, le bolle non si formano; nella realtà si è invece visto che questo non è vero (vedi l'articolo principale). Di contro la casistica del DAN evidenzia che, nelle immersioni entro i 30 metri ed in curva di sicurezza, il modello è estremamente sicuro ed affidabile

Consigli pratici in breve

Questo fuoritestò è per quelli che proprio non sono riusciti a distogliere dalla tintarella e che non hanno nessuna voglia di discorsi "complicati". Ecco alcuni accorgimenti che aumentano la sicurezza dell'immersione:

- una discesa rapida, diciamo circa 15-20 metri al minuto, è utile per schiacciare le microbolle che sono sempre presenti nel nostro organismo e rendere più sicura la decompressione;

- nelle immersioni oltre i 30 - 40 metri di profondità rimani sul fondo fin quando non ti viene segnalata la necessità di eseguire una tappa di decompressione almeno a 3 metri. Questo significa che il computer ha selezionato come riferimento per i suoi calcoli un compartimento con una velocità media di assorbimento dell'azoto e la decompressione sarà un po' più sicura. In sostanza evita le immersioni con toccata e fuga dal fondo;
- distaccati lentamente dal fondo perché è in questo momento che si formano le prime bolle;
- esegui almeno una tappa profonda, serve per scaricare un po' di bolle;
- negli ultimi 15 metri risali molto lentamente, l'ideale sarebbe dai 3 ai 5 metri al minuto.

I corallari risalgono palmo dopo palmo lungo una cima; considera che i computer subacquei più diffusi negli ultimi 10 metri consentono una velocità di risalita di 7-8 metri al minuto.

2. La velocità di discesa

Prima di approfondire il discorso, preferisco recuperare i lettori perplessi che stanno perdendo la navicella che ci guida nel nostro fantastico viaggio verso i segreti delle bolle. Ergo, chiarisco un po' di dubbi. Qualche curioso, erede di San Tommaso, chiede come si fa ad esser certi delle cose dette dai ricercatori. Beh! Non esiste una piccola telecamera che segue la formazione e lo sviluppo delle bolle.

Gli studi sperimentali sui quali sono basate le nuove teorie vengono effettuati su modelli artificiali di tessuto, per lo più si tratta di gelatine o derivati delle alghe. Poi si verificano i risultati sugli animali considerando però che questi sono diversi da noi: per esempio un topo ha una frequenza cardiaca di circa 450 battiti al minuto, pesa circa 30 grammi e quindi i tessuti accumulano e liberano azoto molto più velocemente degli esseri umani. Per ogni tipo di animale c'è qualche diversità. Così alla fine le cavie migliori siamo proprio noi subacquei sportivi: i ricercatori preparano un programma per la decompressione, noi lo proviamo e poi...si vede che succede. Per carità, sto esagerando ma...non troppo!. Consentitemi una considerazione filosofica: i ricercatori non inventano niente di nuovo, la natura segue il suo corso e si cerca solo di capirne il meccanismo di funzionamento nella maniera più verosimile possibile. Comunque, per essere pratici, i modelli basati sul controllo delle bolle finora hanno dimostrato di funzionare e di non presentare molti problemi. Forse non abbiamo centrato la realtà ma ci siamo avvicinati.

Siccome ho affermato che è preferibile scendere velocemente sul fondo, qualcuno chiede di chiarire il perché considerando che questa procedura facilita l'insorgere dell'ebbrezza da profondità. Il messaggio è: anche se le bolle in circolo sono un po' più grandi, in fin dei conti, a chi importa? Sappiamo che, secondo il modello basato sul controllo delle bolle, in risalita solo il 10% dell'azoto che si libera dai tessuti passa nelle bolle che già sono in circolo mentre l'altro 90% arriva ai polmoni come gas disciolto nel sangue e lì viene tranquillamente eliminato. Ora immaginiamo la bolla come una finestra ed il tessuto come una stanza: in risalita è un po' come se volessimo cambiare aria nella stanza aprendo una finestra. Se la finestra (bolla) è stretta passa meno gas e la bolla rimane piccola e stabile, se la finestra è larga il gas entra più facilmente e la bolla cresce. In termini un po' più tecnici, le dimensioni delle bolle sul fondo dipendono da quanto sono state schiacciate durante la discesa, se questa è veloce verso il fondo (circa 15-20 metri al minuto) le bolle saranno pressate e spremute finché rimane una bolla piccola e stabile che durante la risalita tenderà a non incamerare altro azoto.

Se invece, per esempio, scendiamo rapidamente fino a 20 metri e poi bighelloniamo lentamente verso i 40 metri, la bolla viene schiacciata solo nella prima fase di discesa rapida poi

essa viene un po' rimpicciolita per il fatto che lentamente aumenta la pressione esterna perché continuiamo a scendere ma contemporaneamente essa si ingrandisce un po' perché entra l'azoto che sta riempiendo i tessuti circostanti la bolla. È un tira-e-molla per il quale la bolla alla meglio non cambia di molto le proprie dimensioni. In termini tecnici: se si scende lentamente, sul fondo la riduzione delle dimensioni della bolla non dipende dalla somma di tutti i piccoli aumenti di pressione (per esempio da 0 a 20 metri, poi da 20 a 25, da 25 a 33, ecc.) ma conta solo la fase più rapida (da 0 a 20 metri).

In merito al rischio dell'ebbrezza da profondità ricordo ancora che l'importanza di mantenere le bolle piccole si ha nelle immersioni avanzate, cioè profonde oltre 30-40 metri, ripetitive, ripetute per più giorni. Queste immersioni dovrebbero essere riservate a subacquei allenati, con almeno 25-30 immersioni per anno e che quindi sanno come prevenire e gestire l'ebbrezza.

Nei programmi di decompressione basati sul controllo delle bolle tutti i calcoli sono fatti presupponendo una velocità di discesa tra i 18 ed i 23 metri al minuto, in realtà spesso i subacquei scendono verso il fondo più lentamente ed il ritardo che c'è la velocità teorica e quella reale viene definito effetto Maiken. Questo ricercatore ribadisce che, in un subacqueo che scende lentamente, sul fondo la bolla è più grande di quanto previsto teoricamente e quindi in risalita essa cresce più di quanto calcolato a tavolino. Si tratta di un accorgimento matematico per rimediare al fatto che tra la teoria che corre attraverso la tastiera del computer e la reale immersione c'è di mezzo...il mare!

Uno dei tanti vantaggi pratici della discesa rapida si ha nelle immersioni ripetitive. Se nella prima immersione della giornata arrivo rapidamente sul fondo e quindi schiaccio le bolle preesistenti poi la mia seconda immersione, spesso meno profonda e più lunga, sarà più sicura perché le bolle in circolo rimangono piccole e stabili.

Attualmente, eccetto forse uno o due, i computer non applicano ancora i modelli basati sul controllo della formazione e sviluppo delle bolle, conosciuti con nomi come modello a permeabilità variabile (**VPM, Varying Permeability Model**), modello con gradiente per la riduzione delle bolle (**RBGM, Reduced Bubble Gradient Model**) in parte inserito nel software Abyss, modello sulla dinamica delle bolle tessutali (**TBDM, Tissue Bubble Dynamics Model**) ed altri. Questi modelli basati sul controllo delle bolle prevedono che in decompressione solo il 90% dell'azoto contenuto nei tessuti diffonde nel sangue per essere eliminato tranquillamente a livello dei polmoni mentre un altro 10% penetra nelle bolle che sono sempre in circolo e l'attenzione viene concentrata proprio su questa piccola parte. È l'argomento che stiamo affrontando nell'ambito della serie di articoli relativi al viaggio di una bolla di azoto e che quindi approfondiremo nel tempo.

In conclusione ci sono grossi sviluppi in corso per quanto riguarda la tecnica di decompressione, il consiglio che posso darti è quello di mantenerti aggiornato e di continuare ad immergerti tranquillamente con il tuo solito computer. Al limite per aumentare la sicurezza nelle immersioni più impegnative, segui alcune semplici regole: evita qualsiasi sforzo subito prima e dopo l'immersione, come scendere e salire la scaletta della barca indossando tutta l'attrezzatura, perché questo causa una "spruzzatina" di bolle. Inoltre in decompressione è utile un po' di movimento, basta anche solo pinneggiare, ciò per facilitare la circolazione del sangue nei tessuti e quindi l'eliminazione dell'azoto. Alcuni studi effettuati dalla NASA, l'Agenzia spaziale statunitense, evidenziano che un tessuto lento il quale, per esempio, libera normalmente metà dell'azoto assorbito in 360 minuti, può liberare la stessa quantità di azoto in soli 40 minuti quando si aumenta il carico di lavoro in decompressione.

3. Il distacco dal fondo e la velocità di risalita

Prosegue il nostro viaggio all'interno del corpo umano di un subacqueo in decompressione. Nel box 1 trovi delle informazioni riassuntive su come viene calcolata la quantità di azoto assorbita in immersione. Qui visualizziamo l'inizio del vero e proprio viaggio della bolla che corrisponde al momento del distacco del subacqueo dal fondo. L'azoto si libera dai tessuti per raggiungere i polmoni attraverso il sangue. Per la maggior parte (90%) l'azoto si discioglie nella parte liquida del sangue e non crea problemi mentre un'altra piccola parte (10%) di azoto entra nei nuclei di bolla che sono sempre presenti nel sangue e nei tessuti, scroccando un passaggio più rapido verso i polmoni. E' bene precisare che quando ti immergi entro i trenta metri di profondità ed in curva di sicurezza puoi stare tranquillo: l'azoto accumulato nei tessuti è relativamente poco e pertanto in risalita non ci sono problemi (il 10% del poco azoto che entra nelle bolle è praticamente nulla) ciò sia in teoria che nella pratica. Difatti il DAN riporta una casistica di un incidente ogni ottantamila immersioni per questo tipo di profilo.

Maggiore attenzione ti è richiesta quando fai immersioni più impegnative: profonde oltre i 30-40 metri, che richiedono il rispetto di tappe di decompressione, ripetitive, multiday.....e stai attento: la virgola sta per "oppure"! Qui l'azoto accumulato in immersione diventa significativo ed in risalita quel 10% che entra nei nuclei di bolla può assumere un ruolo importante.

Sto introducendo un concetto che va meglio precisato: quando iniziamo la risalita sono già presenti dei nuclei di bolla nel circolo sanguigno e nei tessuti. Cosa sono? Da dove vengono? Quanto incide l'esercizio fisico prima dell'immersione? Secondo te Rambo necessita di meno decompressione rispetto al ragioniere Fantozzi? Le risposte sono nel box 2. Il distacco dal fondo, secondo i nuovi modelli basati sul controllo delle bolle, deve essere lento altrimenti si crea una differenza di pressione tra i tessuti e l'ambiente esterno che favorisce l'ingresso dell'azoto nei nuclei di bolla, questo ne innesca l'espansione durante la risalita ed aumenta la probabilità che qualcosa vada storto. Il distacco lento dal fondo è una novità rispetto a quanto prevedono le tabelle U.S. Navy in base alle quali, terminato il tempo di fondo, si deve prontamente risalire fino alla prima tappa senza comunque superare la velocità prefissata (10 metri al minuto mentre prima era 18 metri al minuto).

Le tabelle richiedono il distacco rapido dal fondo perché, secondo il modello compartimentale, meno tempo si rimane sul fondo oltre quello stabilito meno azoto viene assorbito nei compartimenti. Secondo questo modello, rispettando i tempi di decompressione previsti dal profilo, le bolle non si formano o comunque rimangono di dimensioni non preoccupanti (bolle silenziose). La recente ricerca del DAN ha però evidenziato che ciò è vero solo nelle immersioni tranquille mentre è falso nelle immersioni più impegnative. Se trenta minuti dopo l'emersione si rileva con un Doppler la quantità di bolle che passano attraverso il cuore e si dà a questo numero di bolle un punteggio da 0 a 4 su una scala convenzionale (grado 0 nessuna bolla, grado 4 tante bolle da sovrastare il rumore del battito cardiaco), il modello compartimentale prevede che tutte le immersioni, sia quelle tranquille che quelle più complesse, terminano con un grado Doppler di bolle compreso tra 0 e 2 mentre in realtà si è visto che nelle immersioni impegnative si può raggiungere anche il grado 3.

Questo è importante perché il passaggio dal grado 2 al grado 3 comporta un aumento repentino della probabilità di incidente da decompressione di oltre il 3%. La ricerca internazionale è arrivata a tali conclusioni solo recentemente mentre in Italia i corallari già da tempo avevano capito che la risalita doveva essere lenta e tra una tappa e l'altra risalivano lungo una cima palmo dopo palmo. Anche il Prof. Damiano Zannini, dell'Università di Genova, ha sempre consigliato di preferire una velocità di risalita di 10 metri al minuto rispetto a quella allora vigente di 18 metri al

minuto e dopo tanti anni anche gli americani hanno riconosciuto che avevamo ragione...onore al merito!. Meditate, meditate gente: bisogna sempre essere critici verso le informazioni che ci vengono fornite. Per esempio la velocità di 18 metri al minuto prevista per le tabelle U.S. Navy non era frutto di accurate ricerche bensì era nata nell'ambito di una riunione dove gli incursori della Marina statunitense chiedevano di poter risalire alla velocità di 30 metri al minuto ed i palombari invece volevano risalire ad una velocità di 6 metri al minuto...così si decise di fare a metà: $30 + 6 = 36$ diviso $2 = 18$ metri al minuto, con buona pace di tutti!

L'assorbimento dell'azoto in immersione

Per calcolare quanto azoto si assorbe durante l'immersione, per lo più durante la discesa e la permanenza sul fondo, si utilizzano dei modelli matematici. I classici modelli compartimentali (quelli di Haldane, Bühlmann, Priolo ed altri sui quali sono basate le tabelle U.S. Navy e quasi tutti i computer attualmente in commercio) sono basati sul concetto che il corpo umano è diviso in tante parti omogenee. Ciascuna di queste parti, chiamate compartimenti, è stata simulata da modelli costruiti con gelatine, alghe, tessuti animali o ricreata al computer. Inizialmente nel 1908 il Prof. John S. Haldane, il papà delle tabelle U.S. Navy, sosteneva che risalendo da una immersione l'organismo del subacqueo poteva tollerare senza nessun problema fino al doppio dell'azoto in esso normalmente presente, per esempio da 10 metri di profondità (2 bar) si poteva risalire in superficie (1 bar) senza problemi. Poi a metà degli anni '60, un altro ricercatore della Marina Militare degli U.S.A., il dott. Robert D. Workman trovò che la massima quantità di azoto tollerata non era uguale per tutto il corpo ma variava per ogni compartimento ed a secondo della profondità.

Questa quantità massima di azoto è chiamata valore M (dove M sta per Maximum) ed è espressa in pressione parziale (bar o meglio Millibar) con una scala che è basata sulla pressione relativa a partire dal livello del mare (cioè 10 metri di profondità equivalgono ad 1 atmosfera relativa, ATR o 1 bar). Sin dal 1959 il Prof. Albert Bühlmann, svizzero, ha calcolato dei nuovi valori per meglio definire le proprietà dei vari compartimenti. Nel 1983 pubblicò una prima serie di valori M ed il programma si chiamava ZH-L12, nel 1990 pubblicò una nuova serie di valori chiamando il programma ZH-L16, dove "ZH" sta per Zurigo che è la città dove lui lavorava, "L" sta per limiti e "12" o "16" rappresentano il numero di coppie di coefficienti "a" e "b" necessari per calcolare i valori M e cioè quanta decompressione è necessaria. Solo per i più pignoli: tecnicamente "a" è l'intercetta della linea dei valori M di Bühlmann rispetto alla pressione ambiente assoluta mentre "b" è l'inverso della pendenza della linea dei valori M (per i meno inclini alla matematica...non confondetevi e siate pazienti!). In entrambi i programmi è previsto sempre lo stesso numero di 16 compartimenti, essi differiscono perché le coppie di coefficienti "a" e "b" sono come delle coordinate (pensa alla battaglia navale o alle piantine di TuttoCittà): il ZH-L16 garantisce una maggiore precisione del programma con il prezzo di una decompressione più lunga. Altra differenza è che le coppie di valori "a" e "b" nel programma ZH-L12 sono state determinate sperimentalmente (cioè con immersioni reali o in camera iperbarica), nel programma ZH-L16 invece sono state determinate al computer. Ci sono tre versioni del programma ZH-L16: nella versione A ci sono i veri valori calcolati dal prof. Bühlmann ed è disponibile solo ai fini della ricerca, la versione B è stata utilizzata per il calcolo delle tabelle di decompressione e la versione C è quella più conservativa e viene utilizzata da molti computer subacquei.

A differenza del modello alla base delle tabelle U.S. Navy, i valori M di Bühlmann sono espressi in pressione assoluta e non relativa. Quindi i computer hanno un sensore che legge la pressione atmosferica prima dell'immersione (a livello del mare questa di solito è intorno ai 1040

Millibar) e ciò consente di calcolare meglio le immersioni in altitudine a partire da una pressione ambiente di 0,5 ATA o 500 Millibar.

Su quale algoritmo si basa il tuo computer? Cerca nelle istruzioni, adesso spero che saprai orientarti meglio nelle sigle!. Per esempio: “Haldane modificato” significa che qualche ricercatore ha elaborato una propria serie di valori M in base al quale il computer calcola la decompressione. In software più complessi come Abyss, Proplanner, Decoplan, GAP, Zplan viene fornita l’opzione di scegliere tra il programma ZH-L16 nella versione B o C. Abyss consente di utilizzare ZH-L16C (chiamato Abyss 120) ma anche il più permissivo ZH-L12 (chiamato Abyss 100) ed un nuovo programma molto più conservativo basato sul modello per il controllo delle bolle (Reduced Bubble Gradient Model, RBGM, chiamato Abyss 150).

Qualche subacqueo tecnico forza il sistema utilizzando il programma ZH-L12 come base di partenza per poi introdurre dei fattori di sicurezza nella parte di immersione che potrebbe presentare maggiori problemi: massima profondità, percentuale di elio nella miscela, velocità di risalita o altro. La procedura è impropria ed i subacquei che la utilizzano lo fanno a proprio rischio anche se devo egoisticamente ammettere che come ricercatore è interessante seguire i risultati del loro procedere a tentoni.

Ognuno dei programmi che ho citato consente di scegliere il livello di prudenza che si vuole adottare, naturalmente solo in maniera più conservativa di quanto già previsto dal programmatore stesso. Spesso tale livello di prudenza è espresso in percentuale (per esempio in **GAP – Gas Absorption Program** - è indicato come **Low Gradient Factor, LoGF** e **High Gradient Factor, HiGF**) ed agisce sui valori M riducendo la massima quantità di azoto che un compartimento può tollerare. Un errore che molti commettono è quello di considerare il valore M come un punto di riferimento assoluto entro il quale si è al sicuro dall’incidente da decompressione. In realtà la ricerca ha dimostrato che l’incidente da decompressione segue un criterio probabilistico: entro il valore M la probabilità che qualcosa vada storto è bassa (meno del 2,2% per le immersioni quadre), oltre il valore M la probabilità di incidente aumenta progressivamente.

Quando il programmatore consiglia di utilizzare un fattore conservativo del 20% (**LoGF** = 0,20) invita l’utente ad impostare il programma in modo che non si possa mai superare il 20% della massima pressione parziale di azoto (valore M) tollerata nel compartimento che il programma automaticamente sceglie, a secondo del profilo dell’immersione, come riferimento per il calcolo della decompressione (per i pignoli preciso che in realtà si parla di gradiente di sovrasaturazione ma entreremo nel dettaglio prossimamente). In realtà ognuno di noi ha una propria suscettibilità all’incidente da decompressione che varia di giorno in giorno e che nessun programma può prevedere: pensa alla disidratazione, allo stress, al freddo, alla stanchezza, alla possibile presenza di una pervietà del forame ovale a livello cardiaco. Pertanto prima di modificare i fattori conservativi di un qualsiasi programma per il calcolo della decompressione, ti consiglio di capire bene cosa stai facendo.

I nuclei di bolla

I “nuclei di bolla” si possono considerare come dei semi che si svilupperanno durante la risalita, hanno un diametro inferiore ai 10 micron (un micron è mille volte più piccolo di un millimetro) e per immaginarlo considera che un globulo rosso ha un diametro di circa 8 micron e che la capocchia di uno spillo misura già qualche millimetro. Relativamente alla loro origine si possono distinguere due tipi nuclei di bolla. Un primo tipo con vita breve (qualche ora al massimo)

che deriva dai movimenti muscolari, delle articolazioni, delle valvole cardiache. Un secondo tipo con vita più lunga (fino a qualche giorno) che deriva da precedenti immersioni. Recentemente ho sentito un subacqueo affermare “siccome di solito pratico molta attività fisica (corsa, bicicletta ed altro) prima dell’immersione, sicuramente i miei tessuti hanno un metabolismo più rapido: di quanto posso ridurre i tempi di decompressione?”. Cosa risponderesti? Pensi che Rambo necessita di meno decompressione rispetto al ragioniere Fantozzi, a parità di un’ipotetica immersione? Pausa di riflessione!.

I movimenti articolari e muscolari effettuati durante l’attività fisica praticata poche ore prima dell’immersione aumentano il numero di nuclei di bolla a breve vita presenti in circolo così, se poi l’immersione è impegnativa, l’azoto che si libera dai tessuti durante la risalita troverà in circolo un maggior numero di nuclei e potrà più facilmente scroccare un passaggio ai polmoni. Stesso discorso vale per i nuclei di bolla a vita più lunga che residuano dall’immersione precedente, se nell’immersione successiva la discesa è lenta, ci saranno più nuclei di bolla in circolo come facile preda per l’azoto che si libera dai tessuti durante la risalita. Per fortuna c’è un rimedio per tutelarsi almeno in parte da un eccessivo numero di nuclei di bolla in circolo: se ti immergi spesso ed ogni volta hai l’accortezza di effettuare una discesa rapida fino al fondo, i nuclei di bolla in circolo verranno schiacciati e così in risalita i nuclei, ridotti a dimensioni minime grazie alla discesa rapida, consentiranno a meno azoto di entrare dentro di loro e ci sarà un minore innesco per lo sviluppo della bolla. Ergo: l’immersione sarà più sicura.

Prof. Pasquale Longobardi