

ESIGENZA DI UNA NORMATIVA SUL LAVORO IPERBARICO

Enrico Marchetti, Angelo Tirabasso

ISPESL, Dipartimento di Igiene del Lavoro, Laboratorio Agenti Fisici, Monte Porzio Catone (RM)

INTRODUZIONE

L'attività lavorativa effettuata respirando miscele ad una pressione maggiore di quella atmosferica è in crescita e si sta differenziando notevolmente. Agli inizi del ventesimo secolo le categorie di lavoratori che respiravano aria iperbarica erano limitate a due sole: quella dei cassonisti e quella dei palombari.

I lavoratori che sbancavano il terreno in cassoni appoggiati sul fondo del mare erano i cosiddetti "cassonisti"; per tenere l'acqua fuori dal cassone si pompa aria compressa alla pressione esterna, legata alla profondità del fondo. I palombari, indossando scafandri in cui si pompa aria compressa, operavano in acque libere. Dopo il secondo conflitto mondiale si è avuta un'altra categoria di lavoratori dell'ambiente marino: quella dei subacquei professionisti. Questi si dividono in tre sottocategorie: alto fondale, basso fondale e porti. I primi sono impegnati principalmente nelle operazioni sussidiarie alle trivellazioni petrolifere basate su piattaforme lontano dalle coste e ad alta profondità (oltre 50 e fino a 400 metri). I secondi si occupano dei terminali di arrivo del greggio in prossimità delle coste, ma operano anche sulle piattaforme per operazioni che non richiedono l'accesso a quote operative oltre i 50 metri di profondità. I lavoratori del terzo gruppo operano esclusivamente nei porti al servizio delle navi che vi sostano, per effettuare riparazioni o recuperi [1].

In tempi più recenti si è approdati al turismo subacqueo di massa, con la contemporanea introduzione di due nuove figure professionali: l'istruttore subacqueo e la guida subacquea. Nello stesso periodo si è diversificata la figura del cassonista, che adesso non è più impegnato soltanto nelle operazioni sul fondo dei porti ma si occupa dello scavo delle gallerie autostradali o per metropolitane cittadine che devono passare sotto corsi d'acqua.

Un'altra attività lavorativa che ha preso consistenza in tempi recenti è quella dei ricercatori subacquei. Questi portano le caratteristiche proprie della loro attività di ricerca (biologica, ittiologica, geofisica, etc.) sott'acqua e quindi le aggiungono alla respirazione di aria iperbarica, rendendo necessaria l'adozione di procedure specifiche per limitare i rischi lavorativi.

Oltre a queste categorie di lavoratori iperbarici si deve contare anche il personale sanitario, operatori e medici, che presta la propria opera nelle numerose camere iperbariche distribuite sul territorio nazionale. Tale personale è soggetto a fluttuazioni periodiche della numerosità dovute all'aumentare, nel periodo estivo, della pratica subacquea nelle località di mare. Sono, comunque, persone molto preparate e dal punto di vista del rischio iperbarico sono quelli meno esposti.

Ciascuna di queste categorie, oltre ad avere una propria caratterizzazione dal punto di vista della sicurezza lavorativa, ha in comune una esposizione a miscele respiratorie a pressione maggiori di quella del livello del mare.

È possibile suddividere sommariamente l'esposizione ad atmosfere iperbariche in quattro fasi: 1) pressurizzazione, in cui si porta il soggetto alla pressione di lavoro; 2) permanenza in pressione, in cui si svolge il lavoro previsto; 3) depressurizzazione, in cui si riporta il soggetto alla pressione del livello del mare; 4) desaturazione completa, in cui il soggetto libera tutto il gas inerte assorbito durante le tre fasi precedenti e torna alla condizione di saturazione pre-immersione. Le differenze tra le categorie viste precedentemente risiedono principalmente nella seconda fase. In essa i lavoratori effettuano una diversa attività fisica in ambiente umido o asciutto e quindi, come vedremo in seguito, modificano l'assorbimento del gas inerte.

La respirazione di una miscela di gas contenente una pressione parziale di ossigeno variabile tra il 10 ed il 21 per cento, a pressione totale maggiore di una atmosfera, comporta il passaggio in soluzione del gas inerte che fa da riempitivo e che, in fase decompressiva, deve essere rilasciato nell'ambiente mediante l'attività respiratoria. Solitamente questo gas è azoto o elio, più raramente idrogeno.

Il processo attraverso il quale il gas inerte passa in soluzione nell'organismo è controllato dalla legge di Henry: due gas a pressione differente tendono ad equilibrarsi quando siano posti in contatto, in maniera direttamente proporzionale al tempo ed alla differenza di pressione. Questa proporzionalità diretta tra pressione parziale del gas inerte e tempo porta ad una legge esponenziale di aumento della saturazione nel tessuto che ha la pressione più bassa. Quando il lavoratore in iperbarismo torna ad una pressione corrispondente al livello del mare, il gas soluto in eccesso deve tornare, per effetto della stessa legge fisica, in aria. Questo avviene per mezzo dell'attività respiratoria e del trasporto del gas inerte da parte del circolo sanguigno. In questa fase possono avvenire degli incidenti, in ragione della rapidità con cui si riporta la pressione dal valore massimo raggiunto a quello del livello del mare. Questa è la terza fase detta anche di decompressione ed è l'oggetto del presente studio. I problemi conseguenti una inefficace decompressione possono andare da un lieve prurito cutaneo fino alla morte, passando per tutta una serie di affezioni patologiche del sistema respiratorio e del sistema nervoso. A questi effetti acuti se ne aggiungono altri cronici quale l'osteonecrosi asettica e i danni cerebrali asintomatici (visibili solo a RMN o con l'elettroencefalografia) [2]. Un'adeguata prevenzione, per mezzo di un uso accorto di idonee procedure di decompressione, riduce a valori molto bassi la probabilità di insorgenza della patologia da decompressione (PDD). Questo trasferisce alla scelta della corretta procedura decompressiva il problema della valutazione del rischio di insorgenza di PDD.

Lo sviluppo delle procedure di decompressione inizia con il volgere del secolo diciannovesimo e si è protratto fino al ventunesimo, ma è evidente che la parola fine non è ancora stata scritta.

1 - BREVE STORIA DELLE PROCEDURE DI DECOMPRESSIONE

Il diciannovesimo secolo vide affermarsi la pratica, nelle costruzioni portuali, di far ricorso a cassoni appoggiati sul fondo in cui veniva pompata aria compressa. Il lavoro era svolto da operai che entravano da un sistema di camere di compensazione della pressione e, una volta appoggiati i piedi sul fondo marino, lavoravano come sulla terra ferma: di piccone, pala e carriola. Ci si accorse ben presto che accadevano un numero rilevante di incidenti ai poveri operai: alla fine della giornata lavorativa essi ritornavano all'aria aperta attraverso lo stesso sistema di camere di compensazione e si ammalavano di misteriose affezioni che li costringevano in posizioni piegate dal dolore (*bends*) [1, 3]. La prima descrizione di un incidente di decompressione è stata fatta da Triger nel 1841 in una miniera di carbone sotto il livello del mare [4]. Nei casi più gravi essi cominciavano ad avere difficoltà respiratorie che talvolta portavano al decesso dell'operaio (*chokes*). Ben presto si identificò con l'esposizione a pressione iperbarica la causa delle patologie che si osservavano tra gli operai. Paul Bert fece numerose osservazioni e nel 1879 pubblica la fondamentale ipotesi che si tratti di un effetto della desaturazione dell'azoto [1]. Egli stabilisce anche dei tempi di decompressione lineari: mezz'ora di decompressione per immersioni fino a 3 atmosfere oltre quella ambientale¹; un'ora per le immersioni a pressioni superiori. Heller nel 1897 trovò, in sede autoptica, una presenza estesa di bolle in operatori deceduti a seguito di lavoro iperbarico, sia nei tessuti che nei vasi sanguigni e nei capillari. Riscontrarono anche la presenza di emorragie polmonari e tessutali [1]. Nell'Inghilterra industriale dell'inizio del ventesimo secolo questo portò ad una indagine scientifica svolta per incarico governativo. La Royal Navy (ossia la Marina Militare inglese), affidò nel 1907 lo studio ad un affermato fisiologo: John Scott Haldane. Egli impostò il lavoro in maniere da fare delle esperienze in laboratorio che fossero riproducibili e semplici al tempo stesso [3]. Nel corso della propria attività lavorativa gli operai respiravano aria compressa. L'aria è composta in minor parte di ossigeno (20 %) ed in gran parte di azoto (79 %), che ha la funzione di riempitivo ed è inerte rispetto ai processi biologici connessi con la respirazione: infatti l'ossigeno a pressioni parziali² elevate e per tempi prolungati risulta tossico. A pressione maggiore di una atmosfera l'azoto passa nell'organismo compensando la differenza di pressione. Al termine

¹ L'unità di misura della pressione del Sistema Internazionale (SI) è il Pascal (Pa). Questa è un'unità poco adatta perché piccola rispetto alle pressioni in gioco (la pressione atmosferica è pari a 1013 Pa) e poco immediata quando ci si confronta con quella atmosferica. Si preferisce usare la pressione assoluta (ATA) che è la pressione misurata in unità di pressione al livello del mare (1 ATA). Talvolta si fa uso della pressione relativa, ossia la pressione misurata rispetto a quella presente al livello del mare, che viene indicata come atmosfera relativa (ATM). Alternativamente si usa la profondità equivalente ad una atmosfera in acqua salata. Una colonna di questo liquido esercita una pressione di 1 ATA ogni 10 metri.

² Il concetto di pressione parziale è quello del contributo di un determinato gas di una miscela alla pressione totale della stessa. Quindi sarà data dalla pressione totale per la percentuale di quel gas nella miscela. Ad esempio per l'ossigeno nell'aria si avrà una pressione parziale (PPO₂) pari a $(20 \cdot 1 \text{ATA}) / 100 = 0,2 \text{ATA}$ (O₂).

dell'esposizione, quando si torna in superficie, l'azoto in eccesso rispetto alla pressione atmosferica deve essere eliminato dall'organismo (decompressione). Se non si effettua questo processo di eliminazione con sufficiente gradualità, la sua eliminazione diventa causa di formazione di bolle di azoto all'interno dell'organismo. Il grande merito riconosciuto ad Haldane è di aver ipotizzato e quindi confermato sperimentalmente il criterio da adottare per distinguere tra una decompressione graduale ed una che non lo è. Sulla base di osservazioni sperimentali egli propose come rapporto, in decompressione, tra la pressione esterna e quella interna un valore massimo di uno a due. Il rispetto di questa condizione avrebbe garantito l'assenza di patologia da decompressione e quindi di bolle, mentre l'eccesso rispetto a questo rapporto avrebbe portato ad evidenti manifestazioni di patologia da decompressione. Tale malattia ha preso storicamente il nome da coloro che lavorano nei cassoni ad aria compressa, malattia dei cassonisti, ma attualmente è meglio nota come patologia da decompressione (PDD) che meglio racchiude collettivamente tutte le fenomenologie patologiche collegate.

Haldane formulò sperimentalmente l'ipotesi del rapporto due a uno (2:1) allestendo un apparato sperimentale estremamente efficace. Egli osservò che le capre avevano la stessa costituzione corporea degli uomini (in termini di rapporto tra massa grassa e muscolare), avevano un tasso di perfusione simile ed avevano una suscettibilità simile alla patologia da decompressione. Pertanto condusse una nutrita attività sperimentale sulle capre, esponendole a pressioni iperbariche per tempi prolungati ed effettuando quindi le decompressioni, andando poi a verificare l'insorgenza della patologia. In questo modo poté appurare che dopo immersioni a 15 metri in acqua salata (equivalenti a 1,5 atmosfere), quando si riportava il soggetto rapidamente alla pressione atmosferica, non si evidenziavano sintomi gravi di patologia da decompressione negli animali da esperimento. Adottando un margine di sicurezza di 10 metri, egli evidenziò come il rapporto 2:1 tra pressioni interna ed esterna del gas sia un rapporto sicuro e conservativo. Inoltre ripetendo lo stesso esperimento a varie profondità, arrivò alla conclusione che a qualsivoglia profondità il rispetto del rapporto 2:1 è una condizione ragionevolmente esente da rischi. Pertanto il passaggio effettuato secondo le procedure messe a punto da Haldane da una pressione di 4 atmosfere deve avvenire a una pressione di 2 atmosfere, prima di poter tornare ad 1 atmosfera (1 ATM, ossia livello del mare). Infine stabilì anche il concetto che, per garantire tempi di decompressione brevi, si doveva raggiungere rapidamente il massimo rapporto ammissibile tra la pressione interna ed esterna (ossia proprio 2:1); quindi si doveva attendere, alla pressione raggiunta, un tempo sufficiente ad eliminare la pressione in eccesso rispetto a quella della successiva fase decompressiva. In questo modo stabilì una procedura tuttora applicata: la decompressione a tappe. In effetti Haldane non considerava il corpo intero come un unico solvente, ma lo immaginava suddiviso in 5 compartimenti (talvolta chiamati "tessuti" in maniera equivoca) aventi un tempo di emisaturazione rispettivamente di 5, 10, 20, 40 e 75 minuti.

Il modello così introdotto da Haldane ha segnato la rotta delle procedure di decompressione che l'hanno seguito e perfezionato; questo modello è rimasto comunque per molti anni alla base delle teorie decompressive più evolute.

Solo in anni recenti si è giunti a mettere in discussione il modello in base alle conoscenze accumulate sulla formazione delle bolle gassose e si è arrivati a

formulare un modello che non rispetta più la simmetria della fase compressiva e di quella decompressiva. Questi modelli recenti non mettono in discussione la durata delle soste di decompressione, già adeguatamente lunghe da aver superato tutti i controlli sul campo, ma ne introducono di più profonde rispetto a quanto valutato secondo il modello di Haldane [5].

2 - LA TEORIA DELLA DECOMPRESSIONE

La legge fisica fondamentale che fa da base al modello decompressivo di Haldane è la legge di Henry, la quale afferma che due gas a pressione differente tendono ad equilibrarsi quando siano posti in comunicazione.

La tendenza a raggiungere l'equilibrio (livello di saturazione o tensione T) ha un andamento proporzionale al tempo trascorso ed alla differenza di pressione tra i due gas:

$$dT = \beta \cdot t \cdot dP$$

Questa proporzionalità tra livello di saturazione, pressione e tempo porta ad una legge esponenziale di aumento della saturazione nel compartimento che ha la pressione più bassa:

$$T(t) = c \cdot e^{\beta \cdot t}$$

$$\text{con } \beta = \frac{1}{\tau}$$

Il principio di Haldane prevede che l'aumento della pressione (saturazione) e la sua diminuzione in fase decompressiva (desaturazione) siano due fenomeni simmetrici ed equivalenti. Però non tutti i tessuti che costituiscono il corpo umano sono uguali dal punto di vista della velocità di saturazione e di desaturazione. Già Haldane [3] differenziò il corpo umano in cinque compartimenti (costituiti da tessuti omogenei rispetto alla velocità di saturazione) con differenti tempi caratteristici di saturazione (emitempi) $1/\tau_i$ (con $i=1, 2, \dots, 5$) rispettivamente uguali a 5, 10, 20, 40, 75 minuti. Successivamente il numero dei compartimenti è passato da cinque a sei (tabelle USN anni 50' ÷ '60) [6, 7] e poi da sei a dodici (tabelle della Marina Francese del 1990) [8] che costituiscono i compartimenti in cui ricadono, come velocità di saturazione, tutti gli organi e i tessuti del corpo. Ognuno di questi compartimenti ha un suo tempo caratteristico (emitempo) di raggiungimento dell'emisaturazione. Ossia una saturazione del 50 % del gas che può essere contenuto come soluto in quel determinato solvente ad una data temperatura e pressione. Questo emitempo caratterizza la forma della curva esponenziale. Si è potuto osservare che, in conseguenza della differente velocità di saturazione e desaturazione, ogni tessuto riesce a tollerare un maggiore o minore rapporto di sovrasaturazione critica (sovrappressione) [7]. Si va dai valori più piccoli del rapporto di sovrasaturazione critica³ di 1,54 per il tessuto con un emitempo di 120 minuti⁴ (rappresentativo di compartimenti lenti come il grasso o il sistema nervoso) ai valori più elevati di 2,72

³ Pressione interna diviso pressione esterna.

⁴ Questi valori sono riferiti alle tabelle della Marina Francese denominate MN90.

relativi ai compartimenti veloci come muscolo, reni e sangue. Questo modello, più articolato di quello originale di Haldane ma costruito secondo gli stessi principi, rende bene conto delle decompressioni più estreme e consente di effettuare compressioni e decompressioni successive, oltre che compressioni multilivello (ossia con diversi livelli di pressione di lavoro nel corso della stessa pressurizzazione).

I nuovi modelli elaborati negli anni '90 sono costruiti con la stessa logica ma hanno adottato un profilo della compressione diverso da quello della decompressione, rinunciando alla simmetria tra le due fasi [9]; inoltre fanno ricorso ad un maggior numero di compartimenti per tenere conto di tessuti con velocità intermedie tra quelli considerati in precedenza. Il modello adottato per la decompressione prevede la formazione di bolle per accrescimento gassoso su micronuclei preesistenti [5]. Questo nuovo meccanismo di saturazione/desaturazione porta ad una formulazione delle soste di decompressione più profonde di quello che era la prassi precedente. Nella pratica subacquea questa soste sono conosciute con il termine *deep stop*.

I modelli costruiti nel corso degli ultimi anni, inoltre, tengono conto anche dell'attività fisica esercitata dal personale in atmosfera iperbarica. Infatti abbiamo visto che quanto fatto nella fase di compressione (fase due) influenza abbastanza profondamente quanto avviene nelle fasi tre e quattro. Per comprendere questo aspetto dobbiamo entrare più nel dettaglio della saturazione. Rispetto all'organismo umano l'interfaccia tra la pressione esterna e quella interna del gas inerte è costituita dall'apparato respiratorio. La superficie degli alveoli polmonari è l'area in cui avvengono gli scambi da fuori a dentro e viceversa [3]. Se nel corso della compressione noi effettuiamo una attività fisica elevata, dobbiamo aumentare corrispondentemente anche l'attività respiratoria per compensare le richieste metaboliche dell'organismo. Questo aumento della ventilazione rende più rapido l'assorbimento del gas inerte accelerando il ritmo di ricambio dell'aria inspirata. A parità di pressione e di permanenza si può avere un maggior assorbimento di gas inerte che varia tra il 10 ed il 30 % in più in ragione dell'attività fisica esercitata. Questo gas deve essere desaturato in seguito e può richiedere soste più profonde e più prolungate. Mentre questo si faceva passando alla tabella successiva con le vecchie procedure, le tabelle più recenti cominciano a tenerne conto già in fase di compressione attraverso cardiografometri che forniscono una misura, sia pur imprecisa e approssimativa, dell'attività metabolica.

La periodica e successiva variazione delle procedure di decompressione vista nei paragrafi precedenti mostra che il progresso delle conoscenze in materia di decompressione non è lineare ed ha subito alcuni rapidi avanzamenti separati da periodi di relativa minor crescita. Questo indica, per tutti i fini pratici, una difficoltà a effettuare una previsione sull'evoluzione temporale dello stato dell'arte delle procedure decompressive. Conseguentemente non è possibile stabilire delle procedure che devono tassativamente essere adottate con uno strumento relativamente poco flessibile come una legge. Tale definizione deve essere lasciata ad allegati tecnici o, meglio ancora, a linee guida che possono seguire più da presso il progresso delle conoscenze e quindi l'avvicinarsi delle teorie e dei modelli decompressivi.

3 - LA SITUAZIONE NORMATIVA ITALIANA

Alcune delle attività lavorative implicanti esposizione a pressioni iperbariche sono state prese in considerazione dal punto di vista normativo in Italia sin dal 1956, quando è stato varato il D.P.R. 321/56 sul lavoro nei cassoni in aria compressa. Questo decreto costituisce tutt'oggi l'unico quadro normativo esistente, se si esclude la normativa riguardante i subacquei dei porti. Sebbene sia stato molto lungimirante nella protezione dei lavoratori dal rischio iperbarico ha alcuni punti che sono ormai obsoleti e che devono essere rivisti per renderlo attuale, data l'evoluzione vista sopra delle conoscenze acquisite, soprattutto con le immersioni ricreative, che oggi costituiscono una base statistica per studi epidemiologici e di modellistica estremamente ampia.

Il DPR prevede tutta una serie di condizioni igienico-sanitarie per coloro che lavorano nei cassoni o luoghi di lavoro assimilabili tuttora attuali, ma indica procedure di decompressione ormai inapplicabili. Infatti nello scavo delle gallerie delle metropolitane cittadine (ad esempio Roma) si applicano procedure di decompressione sostanzialmente differenti da quelle prescritte nel citato DPR, che sono però vincolanti. Infatti nel DPR non è previsto alcun aggiornamento delle procedure, che sono rimaste ferme a quanto noto negli anni 50-60 e che le rende ampiamente superate. I tempi di una decompressione sicura sono quasi raddoppiati rispetto alla pratica degli anni '60. Inoltre, come abbiamo notato, le procedure proposte da Haldane non facevano esplicito riferimento al tempo di permanenza in pressione degli operai, mentre attualmente sia il tempo che l'attività fisica effettuata sono diventati parametri fondamentali per calcolare la durata delle soste di decompressione. Il DPR 321 non considera il tempo di permanenza in pressione, e nemmeno l'attività fisica svolta, ma fornisce delle procedure totalmente svincolate da tali fattori.

Due ulteriori aspetti devono essere presi in considerazione nel valutare le procedure decompressive previste dal DPR 321/56; il primo è quello della suddivisione dei turni in compressione, mentre il secondo è il profilo stesso della decompressione. Mentre il citato decreto prevede l'obbligatorietà del lavoro iperbarico su due turni⁵, altri autori hanno messo in evidenza la estrema pericolosità di tale pratica nei cassoni ad aria compressa [2]. Per quanto riguarda il profilo decompressivo già Haldane si esprimeva contro il profilo continuo in un lavoro del 1908 e ne dimostrava la pericolosità con le statistiche dei sintomi e dei decessi [3]. Il profilo a soste di decompressione è superiore non solo come durata della decompressione totale, ma anche come incidenza di casi di *bends* e di decesso.

Le altre attività che espongono ad atmosfere iperbariche non hanno nessuna definizione normativa nazionale. Solo alcune Regioni hanno promulgato delle leggi regionali per la codifica dell'attività subacquea ricreativa, a tutela dei soggetti che la praticano.

Questo, ed altri aspetti altrove evidenziati, suggeriscono di rivedere almeno le procedure di decompressione proposte in una norma attuale; purtroppo questa occasione è stata mancata nella stesura del D. Lgs. 81/08 a causa della scarsità di tempo con cui è stato redatto e varato. Questo però non impedisce di pensare di

⁵ Concede l'unificazione solo con autorizzazione dell'Ispettorato del Lavoro.

mettere mano ad un rapido aggiornamento della parte relativa a questo negletto agente fisico e di darne una regolamentazione sistematica sulla falsariga di quanto fatto per gli altri agenti fisici già normati, inserendo degli idonei allegati tecnici o delle linee guida per le buone prassi.

4 - MATERIALI E METODI

Si vuole evidenziare come la progressiva crescita dei tempi di decompressione previsti dalle tabelle che si sono avvicinate negli anni hanno portato, in più occasioni, le procedure previste dal DPR 321/56 ad essere non solo definitivamente obsolete ma eccessivamente pericolose. Il confronto delle “immersioni” effettuate dai cassonisti, già elaborato parzialmente in [10], verrà fatto calcolando, sulla falsariga di quanto già fatto da altri autori [11], la durata delle procedure di decompressione con cinque diverse metodologie: secondo il DPR 321/56, secondo le tabelle USN del '90 [7, 12], secondo le tabelle della Royal Navy inglesi [13], secondo le tabelle francesi MN90 [8] e secondo le tabelle canadesi del 1985 [14]. Le compressioni studiate nel presente lavoro sono riportate sommariamente in Tabella 1.

Tabella 1: Compressioni effettuate nello scavo della metropolitana di Roma nel tratto da Ottaviano a Mattia Battistini.

Distribuzione delle compressioni in relazione all'impegno decompressivo (pressione massima in metri) ed alla durata delle compressioni ripartite in intervalli di durata.				
Pressione (m)	n° compressioni con durata breve	n° compressioni con durata media	n° compressioni con durata lunga	n° compressioni tot. per l'impegno decompressivo
3 ÷ 10 (impegno basso)	108 (44%)	51 (21%)	87 (35%)	246
11 ÷ 18 (impegno medio)	106 (20%)	158 (29%)	272 (51%)	536
19 ÷ 22 (impegno elevato)	4 (4%)	68 (65%)	32 (31%)	104

I dati delle compressioni sono stati gentilmente concessi dal Dott. Corrado Costanzo

Il DPR 321/56 prevede delle procedure piuttosto rigide all'articolo 28 che recita:

Art. 28. Compressione e decompressione.

La compressione deve essere condotta con velocità uniforme.

La decompressione deve essere effettuata a velocità uniforme per le pressioni non superiori a 1,5 atmosfere. Quando la pressione supera tale limite, la decompressione deve essere effettuata in modo da ridurre rapidamente la pressione iniziale alla metà con la velocità di un decimo di atmosfera al

minuto primo; la restante pressione, in particolare quella compresa tra 0,5 e l'atmosfera, deve essere ridotta più lentamente, in modo, tuttavia, che la durata totale della decompressione risulti pari a quella indicata nella tabella di cui all'art. 36.

Qualora l'Ispettorato del lavoro abbia, ai sensi del secondo comma, del successivo art. 37, consentito l'unificazione dei periodi di lavoro, i tempi stabiliti per la decompressione devono essere aumentati:

- a) di 5 minuti per le pressioni non eccedenti le 1,5 atmosfere;
- b) di 10 minuti per le pressioni comprese tra 1,5 e 2,5 atmosfere;
- c) di 15 minuti per le pressioni eccedenti le 2,5 atmosfere.

I tempi di decompressione possono essere ridotti di non più della metà nel caso di lavoratori che non abbiano svolto lavori fisici e che non siano rimasti in aria compressa per più di un'ora.

Il controllo dei tempi di compressione e di decompressione, da eseguirsi mediante l'orologio e la lettura dei manometri, devono essere affidati a persona esperta.

Mentre l'articolo 36 dice:

Art. 36. Durata del lavoro. Per la durata dell'orario giornaliero di lavoro in aria compressa e per i periodi di compressione e di decompressione devono essere osservati i limiti indicati nella seguente Tabella 2:

Tabella 2

<i>Pressione in atmosfere (oltre la pressione normale)</i>	<i>Durata massima del lavoro in aria compressa durante le 24 ore, esclusi i periodi di compressione e di decompressione</i>	<i>Durata minima dei tempi di compressione</i>	<i>Durata minima dei tempi di decompressione</i>	<i>Durata minima dei riposi intermedi tra un periodo e l'altro di lavoro per ciascun lavoratore</i>
<i>da 0 a 1</i>	<i>ore 7,30</i>	<i>1 minuto ogni 0,2 atmosfere</i>	<i>minuti 10</i>	<i>ore 1</i>
<i>da 1 a 1,5</i>	<i>ore 7</i>		<i>minuti 21</i>	<i>ore 1</i>
<i>da 1,5 a 2</i>	<i>ore 5,45</i>		<i>minuti 30</i>	<i>ore 1,30</i>
<i>da 2 a 2,5</i>	<i>ore 4</i>		<i>minuti 45</i>	<i>ore 2,30</i>
<i>da 2,5 a 2,8</i>	<i>ore 2,45</i>		<i>minuti 55</i>	<i>ore 3</i>
<i>da 2,8 a 3</i>	<i>ore 2</i>		<i>minuti 60</i>	<i>ore 4</i>
<i>da 3 a 3,2</i>	<i>ore 1,30</i>		<i>minuti 70</i>	<i>ore 5</i>

Qualora la pressione di lavoro ecceda le 3,2 atmosfere, l'Ispettorato del lavoro stabilisce, di volta in volta, in base alle limitazioni previste nella precedente tabella, la durata complessiva dell'orario giornaliero di lavoro, l'eventuale effettuazione del turno lavorativo in un unico periodo e i tempi di compressione e di decompressione, tenendo conto della pressione massima da raggiungersi e delle altre condizioni ambientali e di lavoro, che possono costituire causa di pericolo.

Per i lavoratori che siano adibiti al lavoro in aria compressa per la prima volta o che lo riprendano dopo un'interruzione di almeno un anno, la durata del lavoro deve essere ridotta a metà:

- a) per il primo giorno, quando la pressione non superi le due atmosfere;*
- b) per i primi due giorni quando la pressione superi detto limite.*

Il quale si collega ai seguenti articoli 37 e 38:

Art. 37. Periodi di lavoro e di riposo.

L'orario giornaliero di lavoro di ciascun turno deve essere diviso in due periodi separati da riposi intermedi, da trascorrere all'aria libera.

L'Ispettorato del lavoro può consentire l'effettuazione del turno in un unico periodo.

In tal caso:

a) per le pressioni fino a 2,5 atmosfere, deve essere concesso agli operai un riposo intermedio di almeno mezz'ora da trascorrere nel cassone, fermi restando i limiti di durata massima del lavoro in aria compressa;

b) per le pressioni eccedenti le 2,5 atmosfere, deve essere ridotta di un quinto la durata massima del lavoro.

Per il lavoro svolto a pressioni superiori a 1,5 atmosfere, i lavoratori, dopo l'uscita all'aria libera, devono sostare nel cantiere per un periodo di tempo non inferiore a mezz'ora; per pressioni superiori a 2,5 atmosfere, tale periodo è elevato ad un'ora.

Durante i periodi di riposo previsti dal presente articolo e dall'art. 36, i lavoratori non devono compiere attività fisiche intense.

Art. 38. Intervalli. Tra la fine di un turno giornaliero di lavoro, effettuato in uno o due periodi, e l'inizio del turno successivo per gli stessi lavoratori devono trascorrere di norma almeno 12 ore. In caso di cambiamento di turni, in lavori eseguiti a pressione non superiore a 1,5 atmosfere, detto intervallo può ridursi fino a 8 ore, purché tale evenienza non si verifichi più di una volta la settimana.

Una lettura attenta delle enunciate procedure decompressive del DPR 321/56 ci mostra che esse sono direttamente desunte dalla rielaborazione degli anni '50 ÷ '60 delle tabelle secondo il metodo di Haldane calcolate però, conformemente all'abitudine dei cassonisti, con una decompressione progressiva e non a tappe e con frammentazione dei turni. Infatti si vede che il tempo di superficie per una completa desaturazione è di 12 ore. Un tale analogo tempo per le tabelle di Haldane sarebbe stato di cinque ore. Infatti per Haldane [3] la desaturazione completa avveniva dopo quattro emiperiodi trascorsi in superficie ed il compartimento con l'emiperiodo più lungo era quello che aveva un valore pari a 75 minuti. Negli anni '60 si giunse alla conclusione che, come per qualsiasi altro processo esponenziale, fosse necessario attendere il trascorrere di sei emiperiodi per una completa desaturazione e che il compartimento con l'emiperiodo più lungo fosse quello di 120 minuti. Questo porta appunto a 12 ore di desaturazione completa ($120 \cdot 6 = 720$ ossia 12 ore). In effetti negli anni 90 in Francia si aggiunsero quattro compartimenti, arrivando ad un totale di dodici, il più lento dei quali è sempre quello con emitempo pari a 120 minuti.

Questo lascia inalterata la durata della desaturazione completa, ma rende più aderente al fenomeno fisiologico il calcolo matematico.

Il confronto con le altre procedure viene fatto con profondità fissate e tempi crescenti. Per l'intervallo tra le due compressioni viene considerato quello dettato dalla Tabella 2 del DPR 321/56. Le denominazioni delle varie fasi della compressione e della successiva decompressione sono indicate in figura 1. Al termine della prima compressione l'organismo non è completamente desaturato, ma ha ancora una pressione parziale dell'azoto definita dal rapporto di sovrasaturazione critica del compartimento guida e comunque inferiore al rapporto 2:1 tra pressione interna e pressione esterna. L'azoto residuo nei tessuti è definito con una lettera che indica il gruppo di appartenenza del lavoratore iperbarico per quanto concerne l'azoto residuo. Quanto più la lettera si avvicina alla A, tanto minore è la pressione parziale dell'azoto presente nel corpo; se la lettera si avvicina alla Z, la pressione parziale è più alta.

Questa lettera definisce il gruppo di appartenenza all'atto dell'uscita in aria libera. Per avere il gruppo al momento della ricompressione è necessario, infatti, sapere quanto tempo trascorre in aria libera prima del suo inizio. Maggiore sarà la durata del Tempo di Sosta ad Aria Libera (TSAL) e più la lettera del gruppo ad inizio sosta decrescerà, portandosi verso la A. Questa nuova lettera definisce così un nuovo gruppo di appartenenza, quello cioè dell'inizio della compressione successiva.

Durante la seconda compressione quindi, in dipendenza del nuovo gruppo di appartenenza e della nuova pressione relativa raggiunta, si individua in tabella il tempo (Tempo di Azoto Residuo) da aggiungere al Tempo Totale della seconda Compressione (TTC), così da ottenere il Tempo di Singola Compressione Equivalente (TSCE), da utilizzare come fosse un normale tempo di prima compressione.

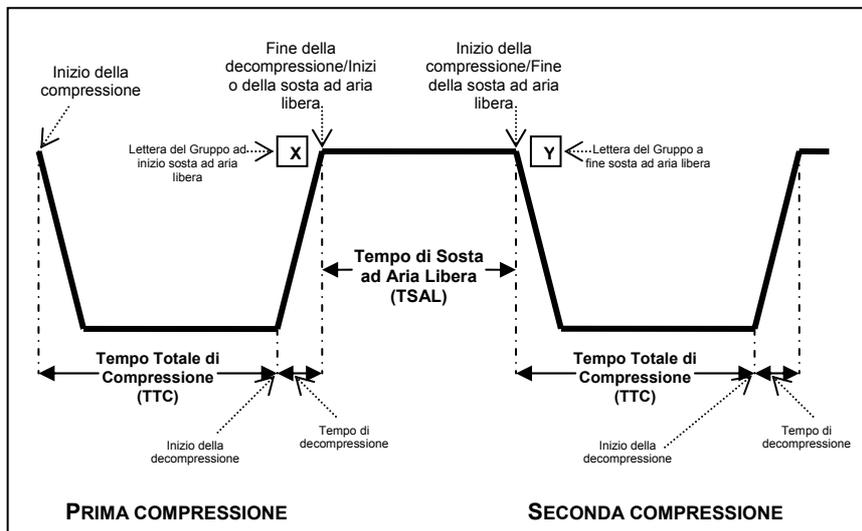


Figura 1. Schema dei tempi di compressione, decompressione e sosta in aria libera.

5 - DISCUSSIONE DEI RISULTATI

In Figura 2 vengono confrontati i tempi di decompressione per i lavoratori in aria compressa imposti dagli artt. 28 e 36 del DPR 321/56 con quelli fissati dalle principali procedure internazionali per l'attività subacquea, nel *range* di profondità operative raggiunte dai cassonisti nel corso dell'attività di scavo della metropolitana di Roma (tratto Ottaviano - Mattia Battistini della linea A, Tabella 2). In particolare, i tempi di decompressione stabiliti dal DPR 321/56 sono presi ipotizzando l'unificazione dei periodi di lavoro giornalieri, aggiungendo ai normali tempi quanto previsto dall'art. 28 del suddetto Decreto.

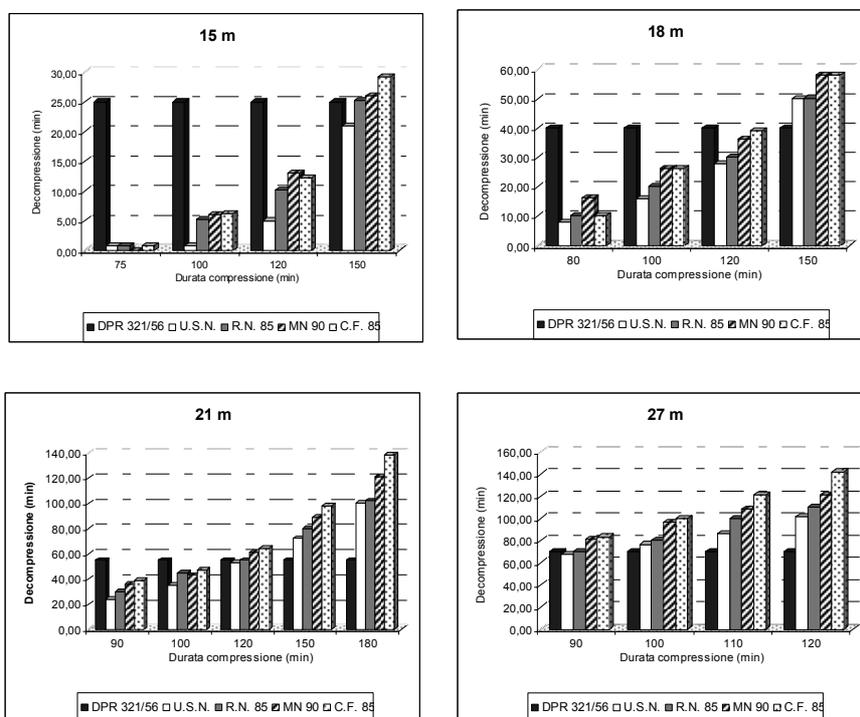


Figura 2: Confronto tra i tempi di decompressione stabiliti dal DPR 321/56 e quelli fissati dalle tabelle della U.S. Navy (U.S.N.), della Marine Nationale (M.N.90), della Royal Navy (R.N.85) e delle Canadian Forces (C.F.85), per le varie profondità.

Due sono le cose che si notano immediatamente. La prima è che, tra i tempi di decompressione estratti dalle tabelle internazionali, quelli che risultano essere maggiori, e quindi intrinsecamente più sicuri, sono quelli canadesi (C.F. 85) [14]. La seconda è che i tempi estrapolati dalle tabelle internazionali e dal DPR 321/56 (Tabella 2) si discostano molto, sia qualitativamente che quantitativamente. Infatti i tempi di decompressione imposti dal sopra citato DPR sono, fissata la profondità di

lavoro in aria compressa, costanti e assolutamente indipendenti dal tempo di permanenza del lavoratore in ambiente iperbarico (TTC). Inoltre, per basse profondità (< 21 m), gli stessi tempi risultano di gran lunga superiori ai tempi ricavati dalle tabelle internazionali per brevi periodi di lavoro e, al contrario, molto inferiori per periodi di lavoro più lunghi. All'aumentare della pressione (e quindi dei metri di profondità), invece, questa distinzione tra brevi e lunghi periodi di lavoro si va via via assottigliando e i tempi di decompressione imposti dal Decreto risultano essere sistematicamente più bassi rispetto a qualunque delle procedure omologhe internazionali.

Si comprende, quindi, come il concetto di decompressione inteso dal DPR diverga completamente da quello introdotto da Haldane con il modello a compartimenti precedentemente descritto. Inoltre lo stesso Haldane aveva criticato il concetto di decompressione progressiva [3], come contrapposta a quella con soste di decompressione (modello a tappe), in quanto il suo profilo non è adeguato a garantire la corretta e sicura desaturazione.

Il confronto dei turni frazionati con le compressioni ripetitive mostra come anche in questo caso i tempi stabiliti dal DPR 321/56 risultino estremamente inadeguati. L'uso della frammentazione del turno deriva dall'idea che immersioni corte sono migliori di compressioni lunghe ai fini decompressivi. Però sono poi state scartate dalla comunità internazionale [2] in quanto espongono il lavoratore ad un doppio *stress* decompressivo, inoltre la decompressione prevista è troppo corta. Questo è evidenziato in Figura 3, in cui sono mostrati due turni successivi giornalieri di lavoratori iperbarici a due profondità diverse (18 e 20 metri), separati dal TSAL (Tempo di Sosta in Aria Libera) riportato in Tabella 2 dell'art. 36 del DPR 321/56 per quelle determinate pressioni. Il confronto dei tempi di decompressione qui viene fatto con i dati estrapolati soltanto dalle tabelle americane (U.S.N.) e francesi (M.N.90). Questo è stato fatto unicamente per rendere più chiara la rappresentazione grafica, sebbene, per evidenziare quanto di seguito verrà esposto, si sarebbero potuti utilizzare i dati di qualunque delle altre tabelle citate.

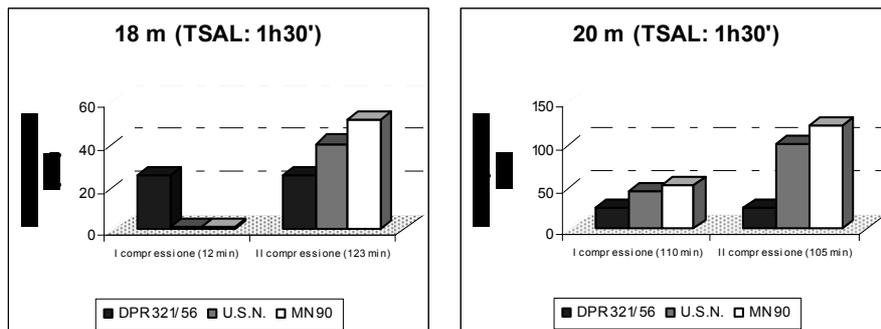


Figura 3. Confronto tra i tempi sperimentali di decompressione e quelli fissati dalle tabelle U.S.Navy e M.N.90, per due compressioni successive separate dal Tempo di Sosta ad Aria Libera (TSAC) stabilito dal DPR 321/56.

Anche in questo caso si nota l'enorme diversità dei valori dei tempi di decompressione stabiliti dal Decreto rispetto a quelli delle tabelle americane e francesi. Mentre i tempi di decompressione del DPR 321/56 non hanno alcuna relazione né con la durata del periodo di lavoro (come illustrato anche in Figura 2), né con il TSAL (e quindi con la ripetitività delle compressioni), i valori ricavati dalle tabelle M.N. 90 e U.S.N., invece, dipendono fortemente da entrambi. Si osserva, in particolare per la profondità di 20 metri, come, nonostante la seconda compressione sia "meno impegnativa", i tempi di decompressione previsti dalle tabelle americane e francesi siano molto maggiori, e quindi sostanzialmente più cautelativi, anche di quelli delle stesse tabelle relativi alla prima compressione. Ciò significa che, a differenza del DPR 321/56, le tabelle internazionali tengono conto di quella parte di pressione parziale di azoto ereditata dalla precedente compressione e che contribuisce a determinare il Tempo Equivalente TSCE descritto nei precedenti paragrafi.

Tutto quanto sin qui esposto sottolinea come le principali tabelle internazionali di decompressione, alcune delle quali utilizzate in questo lavoro, siano da considerarsi frutto del progresso tecnologico e delle sempre maggiori conoscenze fisiologiche, rappresentando ad oggi lo strumento più sicuro e aggiornato per programmare qualsiasi attività iperbarica.

6 - CONCLUSIONI

Il calcolo delle procedure di decompressione si è storicamente biforcuto tra i due percorsi lavorativi delle immersioni e del lavoro nei cassoni ad aria compressa (compressioni). Le caratteristiche dei due tipi di procedure di decompressione che si sono sviluppati si sono differenziate in ragione dei tempi di fondo e delle profondità raggiunte nel corso dell'attività lavorativa. Le tabelle per le immersioni devono avere poche profondità operative e molti tempi, per poter gestire meglio le immersioni multilivello. Le procedure per le compressioni devono avere molte profondità operative e pochi tempi, poiché le compressioni sono quadre ma a profondità variabili e per tempi quasi sempre uguali. Le procedure per i cassonisti sono vincolate dall'economicità di gestione del lavoro iperbarico (decompressioni brevi e molto standardizzate).

Le due tradizioni decompressive non hanno mai dato luogo a contaminazioni reciproche, nonostante tale fenomeno sia stato auspicato ripetutamente nella letteratura scientifica [9].

Il tempo e il progresso tecnologico hanno però, negli ultimi decenni, portato ad una convergenza evolutiva delle due categorie di procedure decompressive. Infatti, se dal lato delle immersioni si è sviluppato l'uso dei computer personali subacquei, dal lato delle compressioni si è andato riducendo il lavoro manuale. L'uso delle talpe meccaniche ha ristretto l'ambito del lavoro manuale alla manutenzione delle talpe e del fronte dei scavi. Questo ha portato alla crescita delle profondità operative ed alla riduzione dei tempi di permanenza. Quindi le compressioni tendono ad assomigliare alle immersioni dal punto di vista del profilo d'immersione/compressione (diagramma tempo-profondità come in Figura 1).

Differentemente dal lavoro nei cassoni il lavoro in immersione, soprattutto per quanto riguarda le nuove figure subacquee legate al tempo libero, non ha mai ricevuto la dovuta attenzione da parte del legislatore. Questo implica una eccessiva *deregulation* nelle attività *off-shore*, che sono molto lontane dagli sguardi della vigilanza. E vi è anche una scarsa attenzione alle attività svolte in prossimità della costa a fini ricreativi, che pure impiegano un personale numeroso ed in crescita. Questo ha portato da un lato alla nascita di leggi regionali che, in alcuni casi, sono eccessivamente polarizzate verso didattiche di settore, dall'altro all'incapacità degli organi di vigilanza di intervenire preventivamente a salvaguardia dell'incolumità degli operatori e degli utenti, in quelle regioni prive di regolamentazione autonoma. Le conseguenze di quanto detto è che le procedure di decompressione dettate dal DPR 321/56 oltre ad essere antiquate e pericolose sono anche inutili, poiché rimangono ancorate a vecchi concetti operativi ormai abbondantemente superati. Inoltre mancano procedure operative e decompressive per il settore subacqueo. Il DPR 321/56 era un dispositivo all'avanguardia per il periodo in cui è stato emanato, ma è poi lentamente diventato obsoleto. Questo destino accompagna tutte le normative che contengono una forte componente tecnica. Infatti nel D. Lgs. 81/08 si è scelto di mettere questi aspetti prettamente tecnici in linee guida o di buona prassi e non nel testo. Questo consente un più agevole aggiornamento al progresso tecnologico. Tale struttura dovrebbe essere adottata anche per una eventuale aggiunta per le atmosfere iperbariche. Si auspica, pertanto, la veloce attuazione della redazione di una legge che regolamenti le attività iperbariche all'interno del D. Lgs. 81/08 al pari delle altre attività lavorative e fornisca agli operatori una adeguata protezione contro i rischi lavorativi.

7 - BIBLIOGRAFIA

- [1] Elliott D. H., Vorosmarti J., *An outline history of diving physiology and medicine*, in Bennett and Elliott's "Physiology and medicine of diving", Saunders, London GB, 2003.
- [2] Kindwall E P, Caisson decompression, 38 Undersea and Hyperbaric Medical Society Workshop: "The physiologic basis of decompression", Vann R D ed., USA, 1987.
- [3] Boycott AE, Damant GCC, Haldane JS, *The prevention of compressed air illness*, J Hyg (London), 1908, 8:342-443.
- [4] Loiseau S., *Les tables de decompression*, Mémoire pour le Diplôme InterUniversitaire de Médecine Subaquatique et Hyperbare, Université d'Angers, Année 2001-2002.
- [5] Wienke B R, Reduced gradient bubble model, Int J Biomed Comput, 26:237-256, 1990.
- [6] Workman R.D., *Calculation of air saturation decompression tables*, Navy Experimental Diving Unit, Research Report 11-57, Washington USA, 1957.
- [7] Workman R. D., *Calculation of decompression schedules for nitrogen-oxygen and helium-oxygen dives*, U.S. Navy Naval Experimental Diving Unit, Washington, USA, 1965.

- [8] Molle Ph. (1995), *Plongée de loisir et professionnelle en sécurité*, Paris, Amphora, 1995.
- [9] Thalmann ED, Parker EC, Survanshi SS, et al., *Improved probabilistic decompression model prediction using linear exponential kinetics*, Undersea Hyperb Med, 24(4):255-274, 1997.
- [10] Marchetti E., Valente G., *Valutazione delle procedure decompressive del DPR 321/56*, atti del 19° Congresso Nazionale A.I.D.I., Napoli, 2001.
- [11] Weathersby P.K., Survanshi S.S., Hays J.R. and MacCallum M.E., *Statistically based decompression tables III: comparative risk using U.S. Navy, British and Canadian standard air schedules*, Naval Medical Research Institute, Bethesda, Maryland, USA, 1986.
- [12] National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce (2001) *NOAA Diving Manual – Diving for Science and Technology*, Flagstaff, AZ, USA.
- [13] Crocker W E, *Investigation into decompression tables. IX revised tables*, Royal Navy Physiological Laboratory Report n° 58/902, Her Majesty's Stationers Office, London, 1957.
- [14] Lauckner G.R., Nishi R.Y., *Canadian forces air decompression tables*, Defence and Civil Institute of Environmental Medicine Report No. 85-R-03. Downsview, Ontario, Canada, 1985.