

CONSIDERACIONES SOBRE EL MODELO DESCOMPRESIVO

Por Raimundo Fernández, según textos mayoritariamente de Erik C. Baker.

LOS COMPARTIMENTOS

Características generales

En las inmersiones de larga duración con una mayor saturación de los tejidos, el perfil de descompresión está determinado siempre por el compartimento con el mayor half-time, es decir, el más lento.

En los estados de saturación parcial, la máxima presión permitida se obtiene de los tejidos con half-times más cortos que con los largos.

Cuanto mayor sea el número de compartimentos que definen el modelo mayor será la precisión en el cálculo de la descompresión necesaria (y por tanto se pueden minimizar las paradas de descompresión individuales).

El tejido que determina que presión parcial del gas inerte es tolerable se conoce como el tejido de control (*leading tissue*).

La situación ideal, es evidentemente una descompresión continua. En vez de pasar una serie de tiempos a unas profundidades específicas (tales como 3 m., 6 m., 9 m.) el buceador ascendería de manera continua de acuerdo con la tolerancia del tejido de control a medida que esta va aumentando.

Evidentemente esto es imposible de llevar a la práctica y, por tanto, la descompresión tiene lugar en unas profundidades de parada escogidas arbitrariamente. En estas profundidades (o a un rango de las mismas) el buceador permanece hasta que es seguro ascender hasta la siguiente parada.

A menudo sucede que el tejido de control va cambiando durante el ascenso. En estos casos los nuevos tejidos de control son siempre tejidos más lentos.

Es por este motivo que un ordenador de inmersión puede no mostrar la necesidad de una parada de descompresión, pero si hacerlo más tarde durante el ascenso. Esto no es un fallo del ordenador sino consecuencia directa de este cambio del tejido de control.

Se deben considerar un gran número de compartimentos con varios half-times con la intención de minimizar los riesgos en la descompresión y el tiempo que esta requiera, tanto para una inmersión de tan solo unos minutos como de una de varios días (buceo a saturación).

Características especiales de los compartimentos Bühlmann

El modelo de descompresión de Bühlmann o ZH-L16 (Bühlmann, 1995) se basa en 16 compartimentos definidos.

Como ya se ha comentado, anteriormente, hay dos juegos diferentes de valores para el compartimento 1: el 1 y el 1b.

La diferencia estriba en que el semiperiodo del compartimento 1 vale 4 minutos para el nitrógeno y 1.51 para el helio mientras que en el compartimento 1b los valores son de 5 y 1.88 minutos para el nitrógeno y el helio respectivamente.

Estos valores no corresponden a dos compartimentos diferentes, sino que se debe escoger entre los valores de uno y otro para el compartimento 1.

El motivo es que otros modelos consideran 5 minutos (nitrógeno) como el tiempo más rápido posible para cualquier compartimento y, por tanto, si se escogen los valores del 1b se consiguen resultados consistentes con otros modelos.

El tiempo de 4 minutos (para el nitrógeno) es demasiado rápido para la inmensa mayoría de las aplicaciones, pero es útil en las inmersiones especialmente profundas y por eso será el que tendríamos que utilizar para buceo técnico y profesional.

GAS ALVEOLAR. AJUSTE DE LA MEZCLA RESPIRADA.

Composición del gas alveolar

El gas alveolar (el gas que se encuentra en los alvéolos) no tiene la misma composición de gases que la mezcla respiratoria. Existen varios motivos que explican estas diferencias:

- El gas alveolar es solo parcialmente substituido por el gas respirado en cada inspiración.
- El oxígeno del gas alveolar es constantemente absorbido.
- El dióxido de carbono se está difundiendo constantemente desde la sangre pulmonar hasta el alvéolo.
- El gas respiratorio seco se humidifica al entrar en el circuito respiratorio, incluso antes de llegar al alvéolo.

Humidificación del gas

El gas respirado no contiene normalmente casi nada de dióxido de carbono y muy poco vapor de agua. Sin embargo, tan pronto como este gas penetra en el circuito respiratorio, se expone a los fluidos que cubren las superficies de los pasajes respiratorios llegando a saturarse de vapor de agua, incluso antes de llegar al alvéolo.

La presión parcial del vapor de agua a la temperatura normal del cuerpo humano de 37 ° C es de 47 mm de mercurio, que, por tanto es el valor de la presión parcial del vapor de agua en el gas alveolar.

Teniendo en cuenta que la presión en el alvéolo nunca puede superar a la presión ambiente (sin implicar un barotraumatismo) este vapor de agua expande el volumen del gas y por tanto diluyendo a todos los otros gases de la mezcla inspirada.

El cuerpo mantiene una presión constante de vapor de agua de 47 mm de mercurio en los alvéolos a temperatura normal. Por este motivo, las mezclas respiratorias secas contribuyen a la deshidratación durante una inmersión ya que el cuerpo debe suministrar agua para mantener esa presión de vapor.

Coeficiente respiratorio (alveolar)

La relación entre la producción de dióxido de carbono y el oxígeno consumido se denomina "coeficiente respiratorio". En función de la dieta y del ejercicio físico, su valor oscila entre 0.7 y 1.0. Según el manual de buceo de U.S. Navy 0.9 es un buen valor para realizar cálculos.

Ajuste de la composición de la mezcla

Durante la ventilación alveolar (Bennet y Elliot,1993) la presión total del 'gas seco' en el alvéolo más la de presión de vapor del agua serán esencialmente igual a la presión ambiente. Por tanto, a la presión ambiente se le debe sustraer la presión de vapor de agua. Tal como ya se ha comentado depende de la temperatura alveolar y presenta un valor de 6.25 kPa (47 mm Hg) a 37 ° C.

Si no se considerase la presión de vapor de agua, se calcularía una presión parcial más alta para el O₂, N₂, He, etc. (Bühlmann, 1995).

Según la investigación experimental sobre la descompresión, sin no se tiene en cuenta este hecho en el cálculo directo de las presiones parciales, los resultados producen valores superiores a los actuales para la sobrepresión del gas inerte tolerada especialmente en la inmersión en altitud.

A partir de todo lo anterior podemos plantear la ecuación de la ventilación alveolar para un determinado gas inerte:

$$P_{\text{alveolar}} = \left[\frac{(p_{\text{CO}_2} \times (1 - R_q))}{R_q} + P_{\text{amb}} - p_{\text{H}_2\text{O}} \right] \times \text{Fracción (gas inerte)}$$

Donde

- **R_q** es el coeficiente respiratorio
- **p_{CO₂}** es la presión parcial del dióxido de carbono
- **P_{amb}** es la presión ambiente
- **p_{H₂O}** es la presión parcial del vapor de agua

Si se usan los valores estándares de 40 y 47 mm Hg para p_{CO₂} y p_{H₂O} respectivamente, se pueden obtener, en función de los coeficientes respiratorios, las siguientes correcciones de la presión ambiente:

Rq	0.8 (Schreiner)	0.9 Navy)	(U.S.	1.0 (Bühlmann)
(mm Hg)	37	42.55		47
(bar)	0.05	0.06		0.06
(msw)	0.49	0.57		0.63
(fsw)	1.61	1.85		2.04

Por ese motivo, a la hora de implementar una modelización se debe escoger un coeficiente respiratorio, siendo el de Bühlmann el menos conservador, el de Schreiner el más conservador y el valor de la U.S. Navy un término medio.

CONSIDERACIONES SOBRE UNIDADES

La importancia del sistema de unidades es evidente, ya que establece la relación existente entre los aparatos de medición y los resultados del modelo.

Por este motivo se utilizan habitualmente unidades de longitud (columna de fluido) para expresar presiones, equivalentes a la profundidad (lectura del profundímetro), es decir, la profundidad se equipara a la presión (ambiente). Como los dispositivos de medición pueden utilizar diferentes sistemas de unidades es lógico pensar que los modelos deben poder trabajar con todos ellos.

A nivel práctico, se utilizan dos sistemas de unidades: el británico y el métrico. Ninguno de ellos es particularmente correcto ya que no se adaptan al sistema internacional (SI) de unidades, aunque, evidentemente el más similar es el métrico. El hecho de no utilizar el Pascal (SI) como unidad de presión se debe a su escaso uso (básicamente, porque es un valor muy pequeño). En cualquier caso, la definición de las unidades de presión (profundidad) es arbitraria e independiente para poder adaptarse a las necesidades del usuario.

La unidad británica de presión es el 'pie de agua de mar' o fsw (*feet of seawater*) y se define de la siguiente manera:

$$1 \text{ fsw} = 1/33 \text{ atmósfera estándar} = 3.0705 \text{ kPa} = 3.0705 \times 10^3 \text{ Pascales}$$

Esta definición se corresponde con un peso específico del agua de mar de 1.020.

La unidad métrica de presión es el 'metro de agua de mar' o msw (*meter of seawater*) y se define de la siguiente manera:

$$1 \text{ msw} = 1/10 \text{ bar} = 10 \text{ kPa} = 10^4 \text{ Pascales}$$

Esta definición se corresponde con un peso específico del agua de mar de 1.027.

Es importante recordar que estas unidades son de presión y no de longitud. Por tanto los factores de conversión de 3.2808 pies/metro y 0.3048 metros/pie no pueden aplicarse. Los valores correctos de los factores de conversión son 3.2568 fsw/msw y 0.30705 msw/fsw.

El peso específico del agua de mar varía entre 1.020 y 1.030 según la temperatura y salinidad del agua. Por este motivo ambos sistemas de unidades utilizan un valor dentro de estos límites.

Estas pequeñas diferencias no tienen ninguna importancia si se utiliza la presión para determinar la profundidad (el profundímetro muestra la profundidad a partir de la presión). Consecuentemente, una inmersión en agua dulce no requiere ningún ajuste si el profundímetro está calibrado de igual manera que como se han hecho los cálculos de descompresión.

Para que todo lo anterior sea válido se tienen que realizar las siguientes consideraciones:

En el sistema británico, se considera el nivel del mar como una atmósfera estándar = 101.325 kPa = 1.01325 bar = 760 mm Hg.

Algunos usuarios del sistema británico, como La U.S. Navy o el "Journal of Undersea and Hyperbaric Medicine", se desvían de la definición del fsw y definen 1 fsw = 1/33.08 atmósfera estándar, aunque la definición habitual es de 1 fsw = 1/33 atmósfera estándar.

En el sistema métrico se considera el nivel del mar como 1 bar. Sin embargo, la atmósfera estándar es de 1.01325 bares. Por tanto el sistema métrico difiere del británico en 13.25 mb (1.3%).

En cualquier caso, estas pequeñas diferencias pierden importancia frente las fluctuaciones diarias de la presión barométrica.

Lo que si es realmente importante, es la coherencia de unidades. Es decir, que todos los cálculos y medidas se hagan siempre con el mismo sistema de unidades (independientemente de cual se haya escogido). No se deben realizar conversiones entre los sistemas y las unidades deben mantenerse coherentes durante todo el proceso de cálculo.