

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DESCOMPRESIVO DE FASE DISUELTA

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

ECUACIÓN DE SCHREINER

El modelo de fase disuelta se describe fundamentalmente con una ecuación diferencial:

$$dP/dt = k*(P_i - P)$$

Esta ecuación muestra la velocidad instantánea del cambio de presión del gas inerte (dP/dt) en un hipotético compartimento de tejido es directamente proporcional al producto de una constante de tiempo (k) por el gradiente definido entre la presión del gas inerte inspirado (P_i) y la presión parcial actual (o inicial) del gas inerte del compartimento (P).

Este tipo de ecuación es muy habitual en la naturaleza, como la ley de Newton de conducción térmica. El principio básico es que el gradiente es el motor que produce y define la velocidad de intercambio de alguna cosa.

Para poder resolver esta ecuación diferencial para P , presión parcial del gas inerte del compartimento, en función del tiempo, es necesario utilizar el cálculo integral.

Antes de realizar esto, se deben considerar dos condiciones. La primera es cuando la presión del gas inerte inspirado (P_i) permanece constante, como durante un perfil de inmersión a profundidad constante. La segunda es cuando P_i varía respecto del tiempo, como durante los ascensos y los descensos.

Con la intención de simplificar la integración en el segundo caso, estipularemos que en el segundo caso la velocidad a la que la presión del gas inerte inspirado cambia es constante, como una constante de ascenso o descenso, por ejemplo, 10 msw/min.

Obviando el cálculo involucrado, la solución en el primer caso es

$$P = P_o + (P_i - P_o)(1 - e^{-kt})$$

Esta es la clásica ecuación de "Haldane" o ecuación "instantánea" y puede escribirse también de cualquiera de las siguientes maneras:

$$\begin{aligned} P &= P_o + (P_i - P_o)(1 - e^{(-\ln 2t/\text{half-time})}) \\ P &= P_o + (P_i - P_o)(1 - e^{(-0.693t/\text{half-time})}) \\ P &= P_o + (P_i - P_o)(1 - 2^{(-t/\text{half-time})}) \end{aligned}$$

Donde:

- P es la presión final del gas inerte del compartimento
- P_o es la presión inicial del gas inerte del compartimento
- P_i es la presión del gas inerte inspirado

- t es el tiempo (o intervalo de exposición)
- k es la constante de tiempo (en este caso del semiperiodo o half-time)

La ultima ecuación es la que aparece en el libro "Tauchmedizin" de Bühlmann.

Para el segundo caso, ascenso o descenso a velocidad constante, la solución es una ecuación similar pero un poco más compleja:

$$P = P_{io} + c(t - 1/k) - [P_{io} - P_o - (c/k)]e^{-kt}$$

Esta ecuación es la solución general o ecuación de "Schreiner". También puede escribirse de la siguiente:

$$P = P_{io} + R(t - 1/k) - [P_{io} - P_o - (R/k)]e^{-kt}$$

Donde:

- P_{io} es la presión inicial del gas inerte inspirado (alveolar, es decir, menos la presión de vapor de agua a 37 ° C)
- P_o es la presión inicial del gas inerte del compartimento
- R o c es la relación de cambio de la presión del gas inspirados con la presión ambiente (es simplemente la velocidad de ascenso o descenso)

Nótese que cuando c (o R) son igual a 0, se obtiene la ya clásica ecuación instantánea de Haldane y que en caso de ascenso el valor de c será negativo y en el descenso será positivo.

TIEMPO DE NO DESCOMPRESIÓN

A partir de las ecuaciones anteriores, se puede obtener una ecuación para el calculo directo del tiempo de no descompresión, es decir, del tiempo máximo que se puede permanecer a una determinada profundidad que permita ascender directamente a superficie, sin requerir la realización de una parada de descompresión

La ecuación resultante de esa transformación es la siguiente:

$$TND = - t_{1/2} \cdot \log_2 [(P_{oI} - P_{i,tol.}(t_E)) / (P_{oI} - P_{i,t.}(t_0))]$$

Donde:

- TND es el tiempo de no descompresión, es decir, del tiempo máximo que se puede permanecer a una determinada profundidad que permita ascender directamente a superficie,
- $t_{1/2}$ es la constante de tiempo (en este caso del semiperiodo o half-time)
- $P_{i,tol.}(t_E)$ es la presión máxima tolerada del tejido que controla el ascenso a superficie.
- P_o es la presión inicial del gas inerte del compartimento
- P_i es la presión del gas inerte inspirado

El tejido que lidera la descompresión es aquel que tolera la menor presión ambiente

sin que se produzcan síntomas de descompresión, es decir, que no puede soportar más decrementos en la presión ambiente sin producir síntomas de accidente de descompresión.

TIEMPO PARA PODER VOLAR

Al volar nos enfrentamos a una situación donde la presión ambiente disminuye rápidamente después del despegue del avión. Si esta disminución de la presión llega a estar por debajo de la presión parcial permitida en algunos de los tejidos es factible la aparición de síntomas de un accidente de descompresión.

Para evitar esta situación es necesario dar un tiempo de margen (tiempo para poder volar). Muchos ordenadores de buceo calculan y muestran este periodo que puede corresponder al periodo de tiempo necesario para una completa desaturación.

Sin embargo existe una gran variedad de valores de este periodo entre diferentes ordenadores de buceo. A partir de estas diferencias cobra especial importancia la cuestión de cómo se calcula este periodo y porque existen esas diferencias tan significativas entre los diferentes ordenadores y programas de buceo.

Según Bühlmann, el tiempo para poder volar es el periodo de tiempo requerido para que el más lento de los tejidos haya podido desaturarse lo suficiente para que una disminución instantánea de la presión atmosférica hasta un valor específico no exceda la presión parcial tolerada por ese tejido.

Este valor específico es habitualmente el valor de la presión de la cabina de un avión de línea comercial, que equivale aproximadamente a la presión atmosférica a una altitud de 6000 pies.

Si se deseara añadir un mayor nivel de seguridad se podría utilizar un valor de 13000 pies que es el valor de presión atmosférica a la altitud de vuelo y que se podría producir en un caso de emergencia en que la cabina se despresurizara.

A nivel de referencia destacar que los ordenadores Aladin utilizan una altitud de 15000 pies para mayor seguridad.

Muchas de las diferencias existentes entre los diferentes ordenadores de buceo se deben a que con inmersiones muy largas y/o profundas se puede producir el problema del valor negativo en el argumento del logaritmo de una de las ecuaciones de saturación.

Al producirse esta situación esos tejidos (los más lentos) no pueden usarse en los cálculos. Son los tejidos más lentos posibles y que den un valor positivo para el logaritmo los que controlan entonces el cálculo de este periodo y por tanto dan tiempos menores que los reales.

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO ZH-L16

Como ya se ha comentado anteriormente, es realmente muy importante 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.

Como el poder trabajar con ambos sistemas de unidades es un requerimiento del presente proyecto, se definirán los parámetros por duplicado y se realizarán los cálculos de manera que se garantiza la coherencia de unidades.

Valores de los parámetros generales del modelo

Humidificación del gas

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 y por tanto el valor que se utilizara en la implementación del modelo.

Coefficiente 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. El valor intermedio 0.9 es bastante significativo y es el valor utilizado para realizar cálculos.

Con este valor las correcciones necesarias para el ajuste de la composición de mezcla utilizada son las siguientes:

Rq	0.9 (U.S. Navy)
(mm Hg)	42.55
(bar)	0.06
(msw)	0.57
(fsw)	1.85

Valores de los compartimentos

El modelo ZH-L16 estipula que la velocidad de suministro de sangre a un tejido (compartimento) determina el half-time. La absorción de nitrógeno y la velocidad de suministro de sangre determinan por tanto la magnitud del incremento de presión parcial del gas inerte que el compartimento puede tolerar.

A nivel de referencia, los valores para el nitrógeno que especifica el modelo ZH-L16 para estos compartimentos son los siguientes:

comp.	$t_{1/2} \text{ N}_2$ [min]	b	a (teórico)	a (tabla)	a (ordenador)
1	4,0	0,5050	1,2599	1,2599	1,2599
2	8,0	0,6514	1,0000	1,0000	1,0000
3	12,5	0,7222	0,8618	0,8618	0,8618
4	18,5	0,7825	0,7562	0,7562	0,7562
5	27,0	0,8126	0,6667	0,6667	0,6200
6	38,3	0,8434	0,5933	0,5600	0,5043
7	54,3	0,8693	0,5282	0,4947	0,4410
8	77,0	0,8910	0,4710	0,4500	0,4000
9	109,0	0,9092	0,4187	0,4187	0,3750
10	146,0	0,9222	0,3798	0,3798	0,3500
11	187,0	0,9319	0,3497	0,3497	0,3295
12	239,0	0,9403	0,3223	0,3223	0,3065
13	305,0	0,9477	0,2971	0,2850	0,2835
14	390,0	0,9544	0,2737	0,2737	0,2610
15	498,0	0,9602	0,2523	0,2523	0,2480
16	635,0	0,9653	0,2327	0,2327	0,2327

Los compartimentos con half-times menores toleran mayores excesos de presión de gas inerte que los compartimentos rápidos

El orden de los compartimentos (tejidos) en el modelo es el siguiente:

Numero 1 - 4	Tejidos rápidos: sistema nervioso central, medula espinal
Numero 5 - 11	Piel

Numero 9 - 12	músculos
Numero 13 - 16	Tejidos lentos: tejidos grasos, ligamentos, cartílagos y huesos

Para las tablas de inmersión se añaden elementos de tiempo, profundidad y presión parcial inicial de nitrógeno, mientras que para los ordenadores de inmersión utilizan la presión ambiente real y el perfil de inmersión concreto. Por este motivo, Bühlmann proporciona dos elementos más para corregir la parametrización del modelo para cada caso.

Estas modificaciones generan dos versiones del modelo para cada caso que se conocen como los modelos ZH-L16b y ZH-L16c respectivamente.

CONSIDERACIONES PARA EL CALCULO DE TABLAS DE DESCOMPRESIÓN

Es evidente que las tablas de descompresión no pueden reflejar en ningún caso un perfil de inmersión real. Tal como destacó Max Hahn (autor de las tablas "Deco 92" que usan habitualmente en Alemania y Europa) en unas determinadas tablas se asumen unas determinadas velocidades de ascenso (en su caso es de 10 m por minuto y no 18 como en las tablas clásicas de la U.S. Navy).

Los periodos de espera de las paradas de descompresión requeridas se deben pasar estacionarios a la profundidad asociada a la parada.

El procedimiento es fácil de realizar con la única ayuda de un reloj, especialmente si lo comparamos con un ascenso gradual a través de las paradas de descompresión.

Desde el momento en que en la inmensa mayoría de las ocasiones el tiempo de fondo no se pasa en su totalidad en el fondo (profundidad máxima) sino que se pasa un cierto tiempo hasta llegar hasta el y entonces, gradualmente, se inicia el ascenso lentamente, los tejidos no están saturados en el perfil real de igual manera que en el perfil equivalente de las tablas.

Por este motivo siempre hay una mayor seguridad si se usan las tablas de buceo, siempre y cuando estas se usen de manera correcta. Debido también a este redondeo conservador de las tablas, un ordenador de buceo permite siempre un mayor tiempo de no descompresión y un menor tiempo en las paradas.

En cualquier caso eso no supone que utilizar un ordenador de inmersión suponga un mayor riesgo, sino que en este caso el margen de seguridad es constante, cosa que no sucede con las tablas ya que este varía en función de si el perfil real es más o menos parecido al definido por estas.

Un aspecto que puede parecer intrigante es que las tablas de inmersión comienzan a profundidades de inmersión de 10 o 12 m. Para las inmersiones del tipo de buceo recreativo no se necesitan paradas de descompresión para inmersiones que no alcancen estas profundidades y por eso no aparecen reflejadas.

Esto no quiere decir que necesariamente no exista la posibilidad de requerir una parada de descompresión. El motivo real es que a 22 pies el argumento de un logaritmo de una de las ecuaciones de saturación se vuelve negativo y por tanto

invalido.

En cualquier caso, la evidencia experimental muestra que los tejidos completamente saturados pueden ascender bruscamente hasta la superficie desde esas profundidades debido al hecho de que la variación de presión no es tan grande.

A nivel de norma general las tablas se formulan en intervalos de 3 metros (10 pies) y esta misma profundidad puede ser la primera para el calculo del tiempo de no descompresión.

