

# TEORIA DEL BUCEO FISICA

I. <b>ADAPTACION AL MUNDO SUBMARINO</b> .....	2
A. PÉRDIDA DE CALOR EN EL AGUA.....	2
B. EL COMPORTAMIENTO DE LA LUZ BAJO EL AGUA.....	2
C. EL COMPORTAMIENTO DEL SONIDO BAJO EL AGUA.....	3
D. FLOTABILIDAD (PRINCIPIO DE ARQUIMEDES).....	3
1. Fórmulas para el cálculo de peso de objetos en el agua:.....	4
2. Cálculos de Flotabilidad :.....	4
E. PRESION:.....	6
1. PRESION/FUERZA.....	6
2. TERMINOLOGIA DE PRESION.....	6
3. CALCULOS DE PRESION BAJO EL AGUA.....	7
F. EL COMPORTAMIENTO DE LOS GASES BAJO EL AGUA: RELACIÓN ENTRE PRESIÓN, VOLUMEN, DENSIDAD Y TEMPERATURA.....	8
1. PRESION y VOLUMEN.....	8
2. PRESION y DENSIDAD.....	9
3. PRESION y TEMPERATURA.....	16
4. PRESION, VOLUMEN Y TEMPERATURA.....	17
G. EL COMPORTAMIENTO DE LOS GASES BAJO EL AGUA :.....	19
1. PRESIONES PARCIALES (LEY DE DALTON).....	19
2. ABSORCIÓN Y ELIMINACIÓN DE GAS.....	20

# FISICA

## I. ADAPTACION AL MUNDO SUBMARINO

Los humanos funcionamos dentro de un estrecho envoltorio atmosférico presente en la superficie terrestre y lo hacemos muy bien. No obstante, una vez fuera de ese ambiente, el medio se nos hace hostil y nuestra existencia depende de la habilidad que tengamos para interactuar con él. Si como buzos debemos estar seguros, tenemos que entender las características del medio ambiente acuático y las técnicas que tenemos a nuestro alcance para modificar sus efectos.

### A. PÉRDIDA DE CALOR EN EL AGUA

**Objetivo:** *Explicar por qué el agua es capaz de disipar el calor corporal más rápido que el aire, a que rata ocurre y que efecto tiene esto en el buzo.*

Debido a su naturaleza molecular polar, el agua es capaz de absorber grandes cantidades de calor y éste aunado al hecho que sus moléculas están más unidas, hacen que el agua conduzca más efectivamente el calor que el aire, características éstas que la convierten en un buen aislante del calor.

Como resultado de la gran capacidad térmica del agua, el cuerpo humano pierde calor **20 VECES MAS RAPIDO** cuando está sumergido en ella que en el aire. Esto explica porqué los buzos se enfrían tan rápido en aguas con temperaturas que en el aire les resultarían agradables.

### B. EL COMPORTAMIENTO DE LA LUZ BAJO EL AGUA

**Objetivos :** 1) *Explicar el comportamiento de la luz cuando ésta pasa a través de una interface aire/agua y que efecto tiene esto sobre el buzo.* 2) *Explicar el fenómeno de visual reversal y explicar sus efectos en el buzo.*

La velocidad con que viaja la luz es dependiente de la densidad del medio que atraviesa - mientras más denso el medio más lenta será la velocidad.

Cuando la luz del sol cae sobre la superficie del océano, es parcialmente reflejada y parcialmente transmitida dentro del agua. La cantidad de luz que es reflejada

depende del ángulo de inclinación del sol (hora del día) y del estado de la superficie del agua. Las olas pueden cambiar el ángulo en que los rayos del sol caigan sobre cualquier punto determinado de la superficie del agua y pueden causar que la luz sea reflejada o transmitida con gran intensidad, dependiendo de la forma de la ola y donde penetra la luz cuando llega a ella.

Una vez que la luz ha pasado la interface aire-agua, es inmediatamente “doblada” (cuando la luz pasa de un medio a otro de diferentes densidades, cambia su velocidad y el haz de luz se “dobla”). Este doblaje es conocido como **refracción**. La luz que llega al ojo del buzo se mueve a través de tres medios diferentes -agua, vidrio y aire- y es refractada cada vez. La refracción resulta en una magnificación aparente de los objetos, la cual hace que éstos aparezcan más cerca (como si se vieran a través de un lente de aumento). **Los objetos aparecen más cerca en un radio de 4 :3** de acuerdo a su distancia actual y aparente. Cuando se ven bajo el agua, los objetos tienden a ser magnificados por un **factor de alrededor del 25%**.

Debido a factores tales como profundidad, contraste y turbidez (el factor principal), muchas veces el buzo puede percibir los objetos más lejos de lo que están, fenómeno conocido como **visual reversal**.

### **C. EL COMPORTAMIENTO DEL SONIDO BAJO EL AGUA**

**Objetivo :** *Explicar porqué el sonido viaja más rápido en el agua que en el aire, por aproximadamente cuánto y que efectos tiene esto sobre el buzo.*

Debido a que el sonido es transmitido como ondas de presión que producen vibraciones, mientras más denso el medio, mejor viaja el sonido. Los sonidos viajan alrededor de **CUATRO VECES MÁS RÁPIDO** en el agua que en el aire.

Como el sonido viaja más eficientemente en el agua, los buzos tienen dificultad para percibir la dirección de origen del mismo. **Por el aumento de la velocidad de transmisión, el cerebro es incapaz de percibir la demora de un oído a otro.** Debido a que el cerebro interpreta que el sonido proviene de todas las direcciones por igual, es imposible determinar su origen.

### **D. FLOTABILIDAD (Principio de ARQUIMEDES)**

El matemático griego Arquímedes determinó que “todo objeto total o

parcialmente sumergido en un fluido, experimenta una fuerza hacia arriba igual al peso del fluido desplazado por el objeto ". Por lo tanto, para determinar la flotabilidad de un objeto uno debe ser capaz de determinar :

- El peso del objeto en el aire (**P.aire**)
- Cuanto fluido desplaza el objeto (**Vo**)
- El peso del fluido desplazado (**Pfl**)

**Cuando se calcula la flotabilidad de los objetos en el agua, utilice las siguientes constantes :**

- 1 pie cúbico de agua de mar = 64,0 lbs
- 1 pie cúbico de agua dulce = 62.4 lbs
- 1 galón de agua de mar = 8.6 lbs
- 1 galón de agua dulce = 8.0 lbs
- ó
- 1 litro de agua de mar = 1.03 kg.
- 1 litro de agua dulce = 1.00 kg.

#### 1. Fórmulas para el cálculo de **peso de objetos en el agua:**

$$\mathbf{P_{air} = D_o \times V_o}$$

donde : **P<sub>air</sub>** = peso del objeto en el aire en lbs  
**D<sub>o</sub>** = densidad del objeto el lbs/pc  
**V<sub>o</sub>** = volumen del objeto en pc.

$$\mathbf{P_{sum} = D_o V_o - D_a V_o} \quad \text{ó} \quad \mathbf{P_{sum} = V_o(D_o - D_a)}$$

donde : **P<sub>sum</sub>** = peso del objeto sumergido en lbs  
**D<sub>a</sub>** = Densidad del agua

NOTA : las densidades se pueden observar en la Tabla XX anexa.

#### 2. **Cálculos de Flotabilidad :**

Comúnmente se utiliza el aire para contrarrestar el peso de los objetos sumergidos. Como el aire pesa virtualmente cero comparado con un volumen igual de agua, su capacidad de flotación podría igualar el peso del agua que desplaza. Sin embargo, el aire debe ser muy bien almacenado para que sea útil para las operaciones

de reflotación, debemos asegurarnos que no se está escapando. Un contenedor fuerte usualmente tiene un peso que debe ser sustraído de la capacidad de flotación del aire. Cuando el objeto va en ascenso, el agua que fluye a su alrededor ejerce una resistencia al movimiento de elevación del contenedor que causa una fuerza de roce. Si el objeto que está siendo reflotado presenta un área muy grande, la fuerza de roce también será grande. Sin embargo, en general, como podemos calcular el Coeficiente de Flotación (CF) que tendrá un contenedor cualquiera:

$$CF = (D_a V_c) (C_d) - P_c$$

donde :

CF	Capacidad de flotación en lbs
D <sub>a</sub>	Densidad del agua en lb/pc
V <sub>c</sub>	Volumen del contenedor en pc
C <sub>d</sub>	Coeficiente de Roce
P <sub>c</sub>	Peso del contenedor en lbs

para la mayoría de los cálculos de flotación :

$$C_d = .75 ; D_{am} = 64 \text{ lb/pc mar} \quad D_{ad} = 62 \text{ lb/pc agua dulce}$$

Cuando el contenedor llega a la superficie (se aboya), estará parcialmente fuera del agua. Por lo tanto debemos usar el peso del aire del contenedor para P<sub>c</sub> ya que estará parcialmente en el aire al final de la reflotación.

$$\begin{aligned} \text{Agua de mar } CF &= 48 V_c - P_c \\ \text{Agua dulce } CF &= 46.5 V_c - P_c \end{aligned}$$

donde :

CF	Capacidad de Flotación en lbs
V <sub>c</sub>	Volumen del contenedor
P <sub>c</sub>	Peso del contenedor

### **Ejemplos:**

- Un motor de 300 lbs, el cual desplaza 2 pies cúbicos, es recuperado (mar). Cuánto aire debe ser añadido a un elemento de flotación (tambor de 55 galones) para que el motor alcance flotabilidad neutra ?.

*Respuesta:* El motor que desplaza 2 pie cúbicos de agua de mar, pesa 300 lbs menos el peso del agua que desplaza. Como 2 pie cúbicos de agua de mar pesan 128 lbs, el motor pesa 172 lbs bajo el agua (300-128= 172). Un buzo que desee elevar el motor sabe que 1 galón de agua de mar pesa 8.6 lbs. El amarra el tambor de 55 galones y lo llena con 20 galones de aire para igualar el peso del motor (8.6 x 20 = 172). El buzo puede ahora elevar el motor.

- Un objeto que pesa 750 lbs y desplaza 10 pies cúbicos se encuentra a 50 pies de

profundidad en agua dulce. Si se va a usar un tambor de 55 galones de capacidad para elevar el objeto a la superficie, que cantidad de aire mínima debe ser añadida (en galones) ?.

*Respuesta:* Aproximadamente 16 galones. El objeto pesa 750 lbs. Desplaza 10 p.c., lo cual representa  $62.4 \text{ lbs} \times 10 = 624 \text{ lbs}$ . De aquí que el objeto realmente pesa bajo el agua dulce =  $750 - 624 = 126 \text{ lbs}$ . Para igualar las fuerzas tanto de hundimiento como de flotación, debemos añadir 126 lbs de flotabilidad al objeto. Como estamos usando un tambor de 55 galones de capacidad y sabemos que un galón de agua dulce pesa aproximadamente 8 lbs, podemos calcular cual es la mínima cantidad de aire que necesitamos al dividir  $126 / 8 = 15.75$  galones de aire.

- Si un tambor de 55 galones pesa 20 lb, cual será su capacidad de flotación en agua de mar ?
- Una campana de acero de 8 pies de diámetro y  $\_ \text{ ''}$  será usada para elevar una gabarra de 5 toneladas hundida en el mar. Tendrá la capacidad ?
- Un bote de pesca debe ser reflotado. El plan es despegar el bote del fondo con aire y luego subirlo con winche. Durante el proceso se observó que el bote descansaba en fondo rocoso, por lo que el winche era capaz de romper con la tracción del fondo y subirlo del todo. Por lo tanto, ahora el trabajo es poner al bote neutro en el agua. Fuera del agua, el bote pesaba 20 tons, todo acero. Si quieres llevarlo a que pese 2 tons, cuantos tambores de acero de 1ton de peso con capacidad de 1000 galones se deben usar ?

## **E. PRESION:**

### **1. PRESION/FUERZA**

La presión es igual a  $F/A$  o peso sobre área y es expresada en libras por pulgada cuadrada ó  $\text{Kg} \times \text{cm}^2$ , según sea el sistema que se esté utilizando.

En el mar, la presión es el resultado de dos factores : 1º) El peso del agua alrededor y sobre el buzo y ; 2º) el peso de la atmósfera sobre el agua. Hay, por lo tanto, un factor que se debe tener presente todo el tiempo: un buzo, a cualquier profundidad, debe estar en balance de presión con las fuerzas a esa profundidad.

### **2. TERMINOLOGIA DE PRESION**

a) Presión ATMOSFERICA : Usualmente expresada como  $1 \text{ kg/cm}^2$ , 14.7 psi o 1 Atm absoluta (1 ATA).

b) Presión del MANOMETRO : es una medida que ignora la presión atmosférica.

c) Presión ABSOLUTA : Es una medida que incluye la

presión atmosférica, más la del manómetro, de modo que indica la presión total.

d) Presión AMBIENTE : Es una medida de la presión total del área circundante, de manera que presión “ambiente” es lo mismo que presión “absoluta”.

e) Presión HIDROSTÁTICA

### 3. CALCULOS DE PRESION BAJO EL AGUA

Ciertas propiedades físicas del agua le brindan una dimensión extra para estudiar la presión y como afecta a los buzos.

La presión aumenta/disminuye a medida que se desciende/asciende. Probablemente, de todas las variables subacuáticas aplicadas al buceo, la presión es la única predecible. Por cada 33 fsw de profundidad, la presión aumenta 1 atm o 14.7 psi, la misma presión

En agua dulce la rata de cambio es de .432 lb/in<sup>2</sup> por pie de descenso. En agua de mar es de .445 lbs/in<sup>2</sup>

Para determinar la presión a cualquier profundidad, multiplique la constante (presión del manómetro) por la profundidad y añada la presión atmosférica (14.7 psi/1.07 Kg/cm<sup>2</sup>) para determinar la presión absoluta/ambiente.

Cada pie de agua salada genera una presión de  $P = (0.445) (D) + 14.7$  o lo que es lo mismo

$$\frac{64.043 \text{ lb/ft}^3}{144 \text{ in}^2/\text{ft}^2} = .445 \text{ psi/ft}$$

$$P_{\text{absoluta}} = P_{\text{manómetro}} + P_{\text{atmósfera}}$$

#### Ejemplo :

Cuál es la presión ambiental a 30 msw ?

$$\frac{30}{10.3} = 3.09 + 1 = 4.09 \text{ ATA}$$

#### Problema :

Una pelota de ping-pong es sumergida a una profundidad de 25 pies, donde colapsa. Cuál fue la presión absoluta a dicha profundidad ?

Si el área de superficie de la pelota era de 4 pulg. cuadr., cuántas libras de presión absoluta estaban en la parte exterior de la pelota ?

Cuál fue la fuerza neta en la superficie de la pelota si la presión interna fue de 5 psig

Solución :

$$P = (.445) (D) + 14.7 \quad ( (.445)(25) + 14.7 = 25.825 \text{ psig}$$

$$\text{Fuerza} = (\text{Presión}) (\text{Area}) = (25.825 \text{ psig}) (4 \text{ pulg}^2) = 103.3 \text{ lbs}$$

$$P_{\text{absoluta interna}} = P_{\text{manómetro}} + P_{\text{atm}} = 5 \text{ psi} + 14.7 \text{ psi} = 19.7 \text{ psia}$$

$$P_{\text{neta}} = P_{\text{exterior}} - P_{\text{interna}} = 25.825 \text{ psi} - 19.7 \text{ psi} = 6.125 \text{ psi}$$

$$\text{Fuerza Neta} = (\text{Presión Neta}) (\text{Area}) = (6.125 \text{ psi}) (4 \text{ pulg}^2) = 24.5 \text{ lbs}$$

## ***F. EL COMPORTAMIENTO DE LOS GASES BAJO EL AGUA: Relación entre Presión, Volumen, Densidad y Temperatura.***

### 1. PRESION y VOLUMEN

**La ley de Boyle** es una de las más utilizadas para los cálculos subacuáticos. La consecuencia de la presión ejercida en un gas, produce profundos efectos debido al medioambiente acuático. Todos los buzos tienen especial cuidado con la reducción del suministro de aire con la profundidad y el peligro de la expansión de los gases en el ascenso. Como la presión aumenta durante el descenso, el volumen de un contenedor flexible disminuye. El descenso en el volumen es proporcional al número de atmósferas. Por ejemplo : 1/2 del volumen superficial a 2 atm ; 1/3 del volumen superficial a 3 atm ; etc.

Como la presión disminuye al ascender, el volumen de un contenedor flexible puede aumentar. El incremento en el volumen es además proporcional al número de Atms. Por ejemplo, un globo que asciende a la superficie desde 2 atm de presión tendrá 2 veces el volumen original; un globo que asciende desde 3 atm tendrá 3 veces el volumen... ; etc. Esta relación constante puede ser usada como un medio rápido para calcular, en incrementos de atmósferas completas, cambios en relaciones presión/volumen.

De aquí que podemos expresar la relación entre Presión y Volumen como:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad T = \text{constante}$$

$$V_1 = \frac{(P + 10.06)}{10.06} V_2 \quad (\text{pies}) \quad V_1 = \frac{(P + 33)}{33} V_2 \quad (\text{metros})$$

Problemas simples pueden ser fácilmente resueltos expresando el problema como una fracción donde la cantidad en cuestión es el numerador (número de arriba) y la profundidad (en Atms) es el denominador (número de abajo).

Ejemplo :

Si un globo tiene un volumen de 10 pc de aire en la superficie, cuál será su volumen si se lleva a 99 pies ?.

Si la cantidad de 10 es llevada a 99 ft o 4 atm, entonces el problema puede ser expresada como  $10/4$  o 2.5

Aún los problemas más complejos pueden ser resueltos llevando siempre el objeto a la superficie.

Ejemplo : Si un globo tiene un volumen de 10 pc a 33 ft, cuál será su volumen a 132 ft ? Primero, si el globo es llevado a la superficie su volumen aumentará a 20 pc. Ahora el problema puede ser resuelto como en el ejemplo anterior. Si la cantidad de 20 es calculada a 132 ft o 5 atm, entonces el problema puede ser expresado como  $20/5$  o 4 pc.

Ejemplo : En la superficie, usted infla su BCD 40 pulgadas cúbicas para compensar el peso de algunas herramientas que está cargando. Cuando desciende a 150 pies, cuanto aire permanecerá en su chaleco ?.

Ejemplo : Cuál será el cambio en el volumen de un gas ascendiendo desde 30 m hasta 10 m ?

## 2. PRESION y DENSIDAD

Como el Volumen disminuye, las moléculas de aire son “unidas”, por lo tanto aumenta la densidad del aire dentro del espacio aéreo. Por ejemplo, a 2 Atms el aire es 2 veces más denso que en la superficie (1 Atm); a 3 Atms es 3 veces más denso, etc.

Cuánto tiempo puede un buzo permanecer bajo el agua con un equipo scuba ?.  
No es una pregunta tan simple. Deben considerarse varios factores: el tamaño del tanque, el número de tanques usados, la presión actual del tanque. El aumento en la densidad afecta la tasa de consumo de aire del buzo porque en

una toma de aire éste puede aspirar más moléculas de aire del tanque. (El volumen físico del tanque nunca cambiará debido a la presión) ya que es un contenedor rígido.

Para la mayoría de los casos, en el buceo recreativo, no es necesario calcular la cantidad de aire que se consumirá durante la inmersión. Menos ahora cuando las computadoras de buceo, en consola o con transmisores inalámbricos, monitorean nuestra tasa de consumo, el aire consumido, el aire restante y el tiempo disponible en función del consumo y de la profundidad. Con los buceos que están dentro de los LND (Límites de No Descompresión) y con acceso directo a la superficie, esto es completamente satisfactorio.

Los problemas vienen cuando el acceso directo a la superficie no es posible debido a una parada de descompresión, porque el buzo entró en una cueva o en un barco hundido, o porque debe completar alguna actividad antes de subir (terminar de inflar una boya antes de que el objeto a recuperar sea arrastrado por la corriente).

Existen una serie de productos muy útiles diseñados para permitir calcular el consumo de aire del buzo, como se mencionó anteriormente. Sin embargo, a veces es ventajoso saber calcular el consumo por nosotros mismos, cuestión de principios. A continuación se presentan algunas técnicas.

Nuevamente, la relación constante puede ser usada como un medio rápido de calcular , en aumentos de atmósferas completas, cambios en la relación presión/volumen para poder estimar cambios en el consumo de aire del buzo.

## a) CALCULOS DE CONSUMO DE AIRE :

### (1) *SUMINISTRO DE AIRE*

Primero debemos conseguir cuanto aire está disponible para ser utilizado por el buzo. Para encontrar el volumen actual en superficie de un tanque en pies cúbicos a cualquier presión use la siguiente relación:

$$V = \frac{nV_r P}{P_t}$$

**V** = Volumen actual de aire en pies cúb.

**N** = Número de tanques

**V<sub>r</sub>** = Capacidad del tanque en pies cúb.

**P** = Presión del manómetro en lbs

**P<sub>t</sub>** = Presión de trabajo del tanque

Se usa presión del manómetro en vez de absoluta porque el volumen de aire residual en el tanque cuando la presión del manómetro es 0 (cero), no está disponible para el buzo.

Ejemplo :

Para un tanque de aluminio de 80 pc, cuál será el aire disponible en superficie ?

$$V_{80} = n(79.5)P_g/3000 = V_{80} = n(0.0265)P_g$$

Ejemplo :

Para un tanque de acero de 72 pc

$$V_{72} = n(71.1)P_g/2475 = V_{72} = n(0.0288)P_g$$

Ejemplo :

Calcular el volumen de aire en un tanque de 80 pc, con presión de trabajo de 3000 psi, cuando el cilindro tiene 500 psi. (en lts y en pc). 1 lt = 28 pc.

Ejemplo :

Calcular el volumen de aire en un cilindro de 50 pc, rateado a 2475 psi, cuando el cilindro tiene una presión de 2000 psi.

Ejemplo :

Calcular el volumen de aire en un tanque de 80 pc, rateado a 3000 psi, cuando el manómetro indica 150 bar.

En algunos países el contenido o volumen del cilindro es dado en litros. Esto es porque se mide la capacidad del cilindro en litros de agua. Se llena con agua dulce y luego se pesa la cantidad de agua que contiene. Eje. : Si contiene 10 kg. de agua dulce, su capacidad es de 10 lts. Por lo que, si se conoce la capacidad de agua del cilindro, podemos calcular su volumen de aire usando la siguiente fórmula :

**Vol. (lts) = WC (Capacidad de agua) x Presión del manómetro**

La profundidad afecta el consumo de aire, como bien sabemos (**Ley de Boyle**), de aquí que:

$$V_{\text{prof}} = \frac{V_s (1)}{(P + 1)}; \quad \text{donde:}$$

**V<sub>prof</sub>** = Volumen en la profundidad

**V<sub>s</sub>** = Vol. en superficie

**P** = Profundidad en mts.

La Temperatura también tiene su efecto en los cálculos de consumo de aire, ya que

$$V_t = \frac{V_p T_2}{T_1}$$

La tasa respiratoria del buzo es el factor que más se ve afectado durante una

inmersión. Si el buzo está fatigado o con frío, si está en mala forma física o excitado, su tasa respiratoria aumentará drásticamente, lo cual es el factor que se debe vigilar. Por esta razón, las tasas respiratorias deben ser estimadas en base a la experiencia. El buzo debe monitorear su reloj y su aire ó su computadora para comprobar que está respirando a la tasa esperada durante la inmersión. Se pueden realizar ajustes observando la caída de presión del manómetro y estimando mentalmente el consumo.

Generalmente, la tasa de consumo de aire de un buzo varía entre  $\_ \text{cfm}$  (pies cúbicos por minuto) bajo condiciones de calma extrema y  $4 \text{ cfm}$  en condiciones de máximo stress. Para los cálculos en condiciones normales, un buzo en buenas condiciones físicas consume acerca de  $1 \text{ cfm}$  de aire ó  $6 \text{ lts/min}$ . Bajo ejercicio puede aumentar a  $3 \text{ cfm}$  ( $1 \text{ cfm} = 0.4720 \text{ lts/seg.}$  ó  $28.32 \text{ lts/min.}$ ). Un buzo experimentado consume entre  $14\text{-}28 \text{ lts/min}$  ( $0.5\text{-}1 \text{ cfm}$ ), pero puede aumentar considerablemente, más de tres veces la tasa normal, si el buzo está bajo stress o extenuación.

La duración del suministro de aire para un buzo, en minutos, se obtiene de la división del volumen de aire disponible (ajustado a la profundidad y si es necesario a la temperatura) entre la tasa de consumo estimada. Por razones de seguridad, se debe considerar una presión aunque sea mínima como presión de reserva en tanques de buceo. La reserva es de  $300\text{-}500 \text{ psi}$ . Para calcular la duración del suministro de aire en minutos de un tanque de buceo, dejando la reserva:

$$S = \frac{nV_t (P_m - P_r) (33) T_2}{R (P + 33) P_t T_1}$$

de donde:

S = Duración del Suministro de aire en min.  
agua

n = Número de tanques

V<sub>t</sub> Volumen del tanque

P<sub>m</sub> Presión del manómetro (psi)  
del tanque

P<sub>r</sub> Presión de Reserva (psi)  
superficie

T<sub>2</sub> = Temperatura absoluta del

R = Tasa Respiratoria (cfm)

P = Profundidad (pies)

P<sub>t</sub> = Presión de trabajo

T<sub>1</sub> = Temperatura absoluta en

Si descartamos los efectos de la temperatura, podemos reducir la ecuación a tanques específicos bajo temperaturas normales :

Para tanques de acero de 72 pc  $S_{72} = \frac{n(0.95)(P_m - P_r)}{R(P+33)}$

aluminio de 80 pc  $S_{80} = \frac{n(0.875)(P_m - P_r)}{R(P+33)}$

Ejemplo : A una profundidad de 90 pies, debe ser volteada una nasa que está en el fondo con la boca hacia arriba. La temperatura del agua es de 50° F, la del aire es de 65° F. El manómetro da una lectura de 2900 psi en la doble compuesta por 2 tanques de Al 80 pc. Cuál será la duración del suministro de aire si estimamos una tasa de consumo en superficie de 0,75 cfm y deseamos una reserva de 500 psi ?. Cuántos minutos adicionales nos podría proporcionar la reserva para un trabajo de último minuto si fuese necesario ?. Cuál será el máximo tiempo de fondo sin usar la reserva ?.

Respuesta :

$$S_{80} = \frac{n(.875) (P_m - P_r)}{R(P+33)}$$

usando una tasa de consumo de 3 cfm ;  $S_{80} = \frac{2(.875)(2900-500)}{3(90+33)} = 11$  minutos de duración con  $P_r = 500$  psi

$$3(90+33)$$

la reserva permitirá

$$S_{80} = \frac{2(.875)(500)}{3(123)} = 2.5$$
 minutos de trabajo a 90 ft

El máximo tiempo de fondo sin usar la reserva (duración del suministro de aire)-(Tiempo total de ascenso), incluyendo descompresión, si es necesario:

a 90 ft NDL = 30 min      Tiempo total de ascenso para NDL = 1:30    T. Máx. Fondo = 11:00 - 1:30 = 9:30 min

## ***(2) CALCULOS DE CONSUMO PROPIAMENTE DICHO***

**METODO 1** : El método más simple y conservador es asumir que el tiempo de la inmersión (completo) es gastado a la máxima profundidad.

Ejemplo : Si un buzo tiene una tasa de consumo de 25 psi/min en la superficie, cuanto consumirá a 99 ft ?

Como el aire respirado del tanque será cuatro veces más denso que en la superficie (ya que 4 veces más moléculas de aire son respiradas del tanque), la tasa de consumo aumentará a 100 psi/min.

Ejemplo : Calcular la cantidad de aire que se espera consumir durante una inmersión de no descompresión a 66 p/20 m por 25 min de tiempo de fondo. La tasa de consumo del buzo es de 30 psi/min. Como será el cálculo si realiza una parada a 3 m de 3 min?. Resultado en psi, lts, atm y pies cúbicos.

Como se señaló antes, problemas aún más complejos pueden ser resueltos siempre convirtiendo una rata bajo el agua a una rata en superficie.

Ejemplo: Si un la rata de consumo de un buzo es 100 psi/min a 33 ft, cuál será a 132 ft ?

Primero, si la rata es 100 psi/min a 33 ft (2 atm), ésta será la mitad o 50 psi/min que en la superficie. Con la rata de superficie determinada, es fácil ver que a 132 ft (5 atm) el aire será 5 veces más denso. Por lo tanto, la rata aumentará a 250 psi/min (5x50).

Ejemplo: Calcular la cantidad que se espera consumirá (en psi/min) un buzo que tiene una TR de 30 psi/min, si ella está planeando una inmersión de no descompresión a 66 ft/20 m con un tiempo de fondo de 25 min.

Nota: Si ya sabe que la velocidad de ascenso es de 60 p/min o de 18 m/min, no olvide estimar el tiempo de ascenso/descenso.

**Método 2**: Este método permite asumir que no todo el tiempo se estuvo a la profundidad máxima. Durante el descenso y el ascenso la presión varía entre la mínima en superficie y la máxima a la mayor profundidad.

Promediando la presión para el ascenso :

Considere un buzo en una inmersión a 66 ft/20 m. Durante el ascenso la presión cambia entre un máximo de 3 ata a 66 ft (20 m) y un mínimo de 1 ATA en la superficie. Por lo que la presión promedio durante el descenso y el ascenso se consigue:

$$P_{pro} = \frac{1 + 3}{2} = 2 \text{ ATA} \text{ o lo que es lo mismo : } P_{m\acute{a}x} + P_{m\acute{i}n} \text{ entre } 2.$$

Según esto, podemos resolver con mejor precisión el cálculo del segundo ejemplo del Método 1.

Paso 1.                    Calcular el aire consumido durante el tiempo de fondo (AC fondo)

$$AC_{fondo} = P_{m\acute{a}x} \times t_{fondo} \times TC = 4 \times 20 \times 25 = 2000 \text{ psi}$$

Paso 2.                    Calcular el aire consumido durante el ascenso (AC ascenso)

Aquí, calculamos el aire necesario para ascender directamente a la superficie a una tasa de 30 pies por minuto (9 m/min).

$T_{\text{ascenso}} = \text{máxima prof.} / 30 = 100 \text{ ft} / 30 \text{ ft/min} = 3.3 \text{ min}$ , redondeando, 4 min.

Promedio de la Presión en el Ascenso  $P_{\text{prom}} = (1 + 4)/2 = 2.5 \text{ ATA}$

$$AC_{\text{asc}} = P_{\text{prom}} \times T_{\text{asc}} \times TC = 2.5 \times 4 \times 25 = 250 \text{ psi}$$

Paso 3. Cálculo del aire consumido durante cualquier parada de descompresión ( $AC_{\text{deco}}$ )

Chequee los requerimientos de descompresión con las tablas apropiadas.

$$AC_{\text{deco}} = P_{\text{deco}} \times T_{\text{deco}} \times TC$$

Cuando se requieren dos paradas de descompresión, el cálculo tiene dos partes.

En este caso, usando las tablas de U.S. Navy, no se requieren paradas, pero los buzos deciden hacer una parada de seguridad, por lo que debe computarse el aire consumido durante la parada.

Presión a 10 ft / 3 m,  $P_{10} = 1.3 \text{ ATA}$

Tiempo de parada =  $t_{10} = 3 \text{ min}$

Aire consumido a 10 ft,  $AC_{10} = 1.3 \times 3 \times 25 = 97.5 \text{ psi}$  ó 98 psi.

Paso 4. Calcular el Consumo Total de aire,  $Act$

$$Act = AC_{\text{fondo}} + AC_{\text{asc}} + AC_{\text{deco}} = 2000 + 250 + 98 = 2348 \text{ psi}$$

Ejemplo: Un par de buzos han sido comisionados para inspeccionar las paredes de una represa (Figura). Ellos planean entrar al agua en A, descender a B, a la máxima profundidad de 90 ft (27 m), nadar a través de C y, finalmente, ascender a D. Ellos nadarán a una rata de 50 ft/min y esperan tener una TC de 25 psi/min. Si los buzos siguen la Tabla de la U.S. Navy, cuanto aire deberían consumir ellos ?

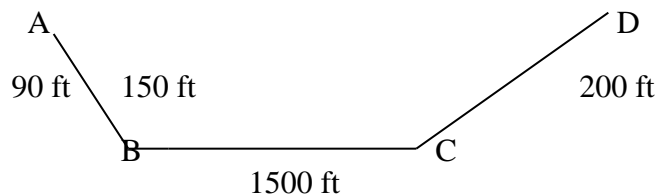


Figura. Perfil de la Inmersión del ejercicio anterior.

Este ejercicio se resuelve en cuatro partes: El descenso, el tiempo de fondo, el

ascenso y cualquier parada.

Siempre añada un MARGEN DE SEGURIDAD. Siempre existe la posibilidad de que haya un aumento en la TC, por lo que es recomendable añadir un margen de seguridad al consumo de aire esperado. El margen recomendado es de al menos 20% en buceo general y al menos un 33% cuando sea buceo de “penetración” (cavernas, barcos hundidos) o con paradas de descompresión.

Ejercicio:

Un buzo, cuya TC es de 20 psi/min, está planeando una inmersión a 100 ft / 30 m por 20 min de tiempo de fondo, y hacer una parada de 3 min a 20 ft antes de salir. Su tanque (capacidad=79.87 pc ; presión de trabajo=3000 psi) está lleno a 2900 psi. Tendrá suficiente aire para completar con seguridad la inmersión ?.

Nota : Es importante saber que la TC calculada en cualquier unidad es dependiente del tamaño del cilindro que se está usando, por lo que se debe calcular para cada tanque. Esto se hace consiguiendo un factor, con la siguiente fórmula :

$$FC = \frac{\text{Capacidad del tanque A} \times \text{Presión de Trabajo del Tanque B}}{\text{Capacidad del tanque B} \times \text{Presión de Trabajo del Tanque A}}$$

### 3. PRESION y TEMPERATURA

El calor es energía ; por lo tanto, si esa energía es transmitida a los gases dentro de un contenedor, las moléculas ganarán energía y se moverán más rápidamente.

Este estado “excitado” resultará en que las moléculas impactarán el interior del contenedor con más fuerza, lo que aumentará la presión. Por el contrario, al enfriar el contenedor, se restará energía a las moléculas, reduciendo su impacto y disminuyendo su presión.

Ejemplo : Un tanque de buceo es llenado a su capacidad a temperatura ambiental. Describa que podría pasar al tanque si fuese puesto en un freezer ?

El Volumen permanecería inalterado ; la Presión disminuiría.

Como una regla general, por cada cambio de 1° F habrá un cambio de 5 psi y por cada

1° C habrá un cambio de 0.6 atm o 60 kpa.

Ejemplo : Un tanque es llenado a 3200 psi a una temperatura ambiental de 80°F. Si el tanque es usada en agua con una temperatura de 40°F, cual será la presión aproximada del tanque ?

La presión será 3000 psi. Hay una forma rápida de estimar el efecto de la temperatura en la presión dentro de un tanque de buceo. Cuando se usa la escala Fahrenheit, la regla es que por cada cambio de un grado en la temperatura, ocurrirá un cambio de 5 psi. En la escala Centígrados/Celsius, la regla dice que por cada cambio en un grado ocurrirá un cambio respectivo de 9 psi. Como la pregunta es expresada en Fahrenheit, y ocurre una caída de 40 grados, esto resultará en una reducción aproximada de 200 psi (40 x 5 = 200). Por lo tanto, 3200 psi - 200 psi = 3000 psi.

Debemos recordar que la Temperatura es expresada en grados Celsius o Fahrenheit, pero en cálculos científicos debe ser convertida a Grados Rankine si está en Fahrenheit o a Grados Kelvin si está en Grados Celsius. Las escalas Kelvin o Rankine son conocidas como Escalas de *Temperatura Absoluta*. El Cero Grados (0°) en la escala de Temperaturas Absolutas marca el Cero Absoluto, donde teóricamente se detiene toda acción molecular.

Para convertir de Grados Celsius a Temperatura Absoluta, súmele 273 = °K = °C + 273 y

Para convertir de Grados Fahrenheit a Temp. Absoluta, súmele 460 = °R = °F + 460

#### 4. PRESION, VOLUMEN Y TEMPERATURA

La ley general de los gases combina las ecuaciones antes mencionadas en una sola ecuación que puede ser usada para todos los cálculos de Presión, Volumen y Temperatura. Si una variable es mantenida constante, entonces la ley general de los gases se reduce a una de sus formas previas. **La Ecuación de la Ley General de los Gases, es :**

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

Ejemplo : A una profundidad de 99 pies, usted infla una boya de 2 pies cúbicos de aire. La boya tiene una válvula de sobrepresión de 10 psig. La temperatura del agua a 99 pies es 35°F. A 75 pies hay una termoclina donde la temperatura aumenta instantáneamente a 60°F. Si la boya puede expandirse otro pie cúbico sin caída de la temperatura, cuando se abrirá la válvula de sobrepresión ?.

El problema presenta cuatro posibilidades:

La caída de presión desde 99 a 75 pies debe ser suficiente para expandir la boya a 3 pies cúbicos, entonces sobrepasa el valor. Demostrar.

Si no, cuando la boya alcance los 75 pies, el aumento de la temperatura puede ser suficiente para abrir la válvula. Demostrar.

En cualquier momento después de los 75 pies, la válvula puede abrirse. Demostrar

No habrá suficiente aumento de presión bajo estas circunstancias para hacer abrir la válvula.

### Demostración:

Vamos a examinar que ocurre entre los 99 y los 75 pies. La temperatura es constante y la boya puede expandirse 1 pie cúbico sin aumento de la presión. La Ley General de Gases se reduce de :

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2} \text{ a } P_1V_1 = P_2V_2 \text{ y } T = \text{Constante}$$

donde  $P_1 = 4 \text{ atm}$  y  $P_2 = 3.3 \text{ atm}$  ;  $V_1 = 2 \text{ ft}^3$  y  $V_2 = ?$ , de aquí que :

$$V_2 = \frac{P_1V_1}{P_2} = \frac{(4)(2 \text{ ft}^3)}{3.3} = 2.42 \text{ ft}^3$$

Puede observarse claramente que la boya no aumenta en presión por ascender hasta los 75 pies porque su volumen está aún por debajo de los 3 pc máximos. Analicemos ahora que pasa a la boya ante la diferencia de temperatura. Asumamos un cambio instantáneo en la temperatura a 75 pies y que la boya no asciende mientras analizamos el efecto de la Temp. La presión permanecerá constante a menos que el volumen de la boya exceda los 3 pc debido al cambio de la temperatura. Por lo tanto, la ecuación se reduce a :

$$V_2 = \frac{V_1T_2}{T_1} \quad P = \text{constante}$$

$$V_1 = 2.42 \text{ pc.} \quad T_1 = (35 + 460)^\circ\text{R.} \quad T_2 = (60 + 460)^\circ\text{R} \quad V_2 = \frac{(2.42)(520)}{495} = 2.54 \text{ pc}$$

La boya ha aumentado su volumen con las dos primeras posibilidades pero no ha habido un aumento de presión dentro de la misma para permitir la expansión permitida de 1 pc. La tercera posibilidad permitirá una tercera expansión de 0.46 pc que tampoco la presión. Calcularemos a que profundidad la boya alcanzará este límite:

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad T = \text{constante}$$

estamos buscando la profundidad a la que el  $V_2 = 3 \text{ pc}$

$$P_1 = 3.3 \text{ atm} \quad V_1 = 2.54 \text{ pc} \quad V_2 = 3 \text{ pc} \quad P_2 = \frac{(3.3)(2.54)}{3} = 2.79 \text{ atm} = 59.2 \text{ pc}$$

Después de los 59.2 pc la boya no se expandirá mucho más. Por lo tanto, el volumen permanecerá constante y la presión dentro de la boya aumentará a medida que la presión externa disminuya durante el ascenso. La temperatura es constante, por lo que la ecuación será:

$$P_1 - P_2 = P_{\text{final}} ; \text{ donde } P_1 = 2.79 \text{ atm}$$

$$P_f = \frac{(10 \text{ psi})}{33} = 0.68 \text{ atm} \quad \text{y} \quad P_2 = \frac{D + 33}{33} \text{ psi/atm}$$

$$\text{de aquí que} \quad 2.79 - \frac{(D + 33)}{33} = .68$$

$$D = (2.79 - .68)33 - 33 = 36.63 \text{ ft}, \quad \text{que será la profundidad a la que abrirá la válvula.}$$

## **G. EL COMPORTAMIENTO DE LOS GASES BAJO EL AGUA :**

### **1. PRESIONES PARCIALES (LEY DE DALTON)**

En una mezcla de gases, tal como el aire, cada gas ejerce su propia presión "individual" independientemente de todos los otros gases en la mezcla. Esas presiones independientes son conocidas como presiones parciales.

Lo que es a menudo confuso es que mientras la presión aumenta con la profundidad, los porcentajes de los gases dentro de una mezcla no aumentan -solamente la presión parcial.

Calcular la presión parcial de un gas es tan simple y consiste en multiplicar la presión absoluta del gas por su porcentaje en la mezcla.

Ejemplo : En una mezcla de aire comprimido de 20% oxígeno y 80% nitrógeno, cual es la presión parcial del oxígeno en psi a 132 ft/40 m ?

Fisiológicamente, no hay diferencia para el cuerpo humano en respirar oxígeno puro en la superficie (15 psi/1 bar) o respirar aire a 132 ft/40 m. Ambos resultan en un aporte a los pulmones de 15 psi de oxígeno. Este concepto es conocido como **equivalencia de superficie**.

El cuerpo alcanza el equivalente de respirar oxígeno puro cuando respira aire a 132 ft/40 m. Motivo por el cual el máximo límite de profundidad para el buceo recreacional se establece a dicha profundidad, en adición a los límites de no descompresión y problemas de narcosis de nitrógeno.

Igualmente importante es que los contaminantes en el suministro de aire pueden estar dentro de un rango “seguro” en la superficie, pero pueden convertirse rápidamente a “peligrosos” en profundidades.

Ejemplo: Cuál será el efecto del equivalente de o en superficie de respirar una mezcla de aire contaminado con 0.5% de monóxido de carbono a una profundidad 132 ft/40 m ?

**NOTA: Respirar de una mezcla de gas con monóxido a 2.5% en la superficie puede ser extremadamente peligroso !.**

## 2. Absorción y Eliminación de GAS

Las experiencias con bebidas carbonatadas nos muestran como los gases pueden disolverse en los líquidos. Y justamente como el dióxido de carbono se disuelve en agua, el aire se disuelve en nuestra sangre. No obstante, mientras el metabolismo consume el oxígeno, el nitrógeno no es usado -debe ser expulsado.

Los gases dentro de un líquido ejercen una presión, lo cual se conoce como tensión del gas.

Se ha demostrado que una cantidad de gas que puede disolverse en un líquido es proporcional a la presión del gas en contacto con él (**Ley de Henry**). Esto es lógico ; mientras más presión en contacto con el líquido, más gas se disolverá en él.

Este gas disuelto continuará hasta que la presión del gas dentro del líquido sea igual a la presión del gas en contacto con él. Este equilibrio es conocido como “saturación”.

Si el gas en contacto aumenta (como cuando el buzo desciende), entonces el líquido será ahora capaz de retener aún más gas que antes. El intercambio de gas continuará hasta que se alcance el nuevo nivel de equilibrio.

Este fenómeno también trabaja a la inversa. Como se reduce la presión en contacto con el líquido (lo que ocurre cuando el buzo asciende), la tensión del gas dentro de un líquido será mayor que la presión en contacto con el líquido. Este líquido es denominado como “supersaturado”.

Si esta reducción de presión en el gas en contacto toma lugar gradualmente, entonces el gas comenzará a dejar el líquido gradualmente (sin formar burbujas). Sin embargo, si la reducción de presión ocurre rápidamente, el gas dentro del líquido

comenzará a escapar demasiado rápido para permanecer en solución -por lo que se formarán las burbujas.

Este fenómeno explica el mecanismo básico de la enfermedad de descompresión y por qué la condición no ocurre hasta que el buzo no deja las profundidades, es decir, cuando se reduce la presión en contacto con la sangre.