

## ***APÉNDICE B. BOMBEO MEDIANTE AIRE COMPRIMIDO***

***Introducción***

***Principio general de funcionamiento***

***Aplicación práctica***

***Sumergencia***

***Relación de diámetros***

***Presión y volumen de aire***

***Pérdidas por rozamiento***

***Capacidad y rendimiento del compresor***

***Ejemplo resumen***

## APÉNDICE B

### BOMBEO MEDIANTE AIRE COMPRIMIDO

#### **Introducción**

En el presente apéndice se trata de exponer la aplicación del aire comprimido en el campo específico de desarrollos de sondeos.

A partir de los datos obtenidos, bombeando con esta técnica se puede estimar el grado de productividad de la obra de captación, así como obtener una primera aproximación sobre los valores de los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos bombeados.

El aire comprimido juega un importante papel en los sondeos perforados en formaciones que requieren un tratamiento de desarrollo para eliminar un cierto porcentaje de materiales finos, que no pueden ni deben ser retenidos por los distintos sistemas de filtros utilizados.

Debido a las peculiares y diversas características que se presentan en cada sondeo (profundidad, diámetro, nivel, caudal específico, etc.), resulta necesario un análisis detenido de las particulares condiciones de cada caso para elegir, con el mejor criterio, el equipo de aire comprimido que satisfaga los objetivos propuestos.

En el presente apéndice se tratará de exponer los conceptos básicos generales de funcionamiento del aire comprimido que, aunque conocidos, no son utilizados frecuentemente del modo más adecuado, procurando, una vez más, simplificar el desarrollo de los conceptos teóricos y abundar en las cuestiones de tipo práctico.

La utilización de las tablas que se adjuntan facilitarán de un modo notable el cálculo del equipo de aire comprimido en función de las diferentes condiciones de trabajo.

## Principio general de funcionamiento

La aplicación del aire comprimido para la extracción de agua en sondeos se debe a J. C. Pohle.

El fundamento teórico del método está basado en el sistema de vasos comunicantes, como puede verse en la figura 1.

Sea un recipiente R, y una tubería abierta por los dos extremos.

Si por un punto O, situado a poca distancia del extremos inferior, se inyecta aire comprimido a una presión superior a la necesaria para vencer la columna líquida D, por la tubería ascenderá una mezcla de agua-aire hasta una altura tal que los pesos interior y exterior se equilibren.

Eligiendo de modo conveniente la relación entre la parte sumergida D de la tubería y su longitud total H, debido a la diferencia de densidades por las burbujas existentes dentro de la tubería, se obtendrá una columna ascensional de altura A.

La entrada del aire se colocará a una distancia del extremo inferior de la tubería del agua, que puede variar entre 0,5 m, cuando la parte de tubería sumergida es del 75 por 100 de la total, y de 2 m cuando sólo alcance el 25, por 100.

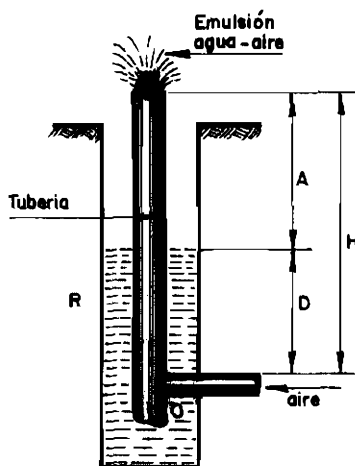


Fig. 1.

## Aplicación práctica

Para la aplicación práctica de bombeo mediante aire comprimido, es necesario disponer de dos tuberías de diferentes diámetros, guardando éstas una cierta relación, como se verá más adelante.

Las figuras 2 y 3 muestran, esquemáticamente, la disposición de un equipo de bombeo con aire comprimido.

La tubería de aire o «inyectora» puede colocarse indistintamente por el interior de la tubería de descarga, o totalmente exterior.

Normalmente, es más utilizado el sistema de tuberías concéntricas, aunque ambas instalaciones son igualmente correctas y funcionan con el mismo grado de eficacia.

Cuando el diámetro del sondeo es reducido puede ser obligado, por razones de espacio libre, la instalación correspondiente a la figura 2.

Si el entubado del sondeo tiene un diámetro lo suficientemente pequeño, éste puede ser utilizado como tubería de descarga, siendo suficiente la colocación de una tubería de aire para que el dispositivo funcione con normalidad.

Es evidente que el procedimiento de bombeo con aire, al no disponer de elementos mecánicos en movimiento, no presenta riesgo alguno en la extracción de aguas turbias o arenosas, puesto que no existen desgastes en este tipo de instalación.

El nivel dinámico, durante el bombeo, se puede medir con cualquier tipo de sonda. Para evitar oscilaciones, dicha sonda se dirige a través de un tubo guía de longitud suficiente para que, en todo momento, tenga su parte inferior sumergida.

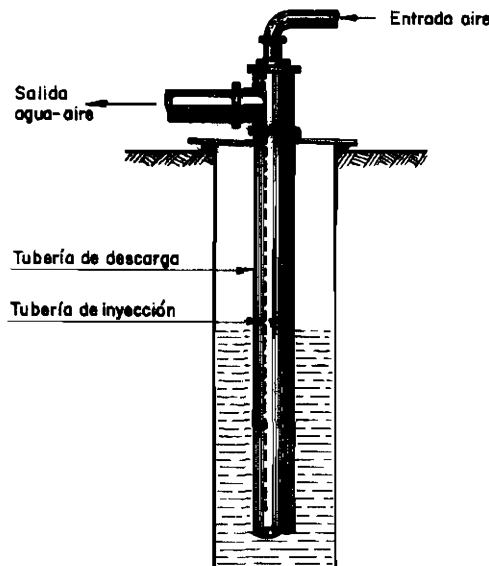


Fig. 2.

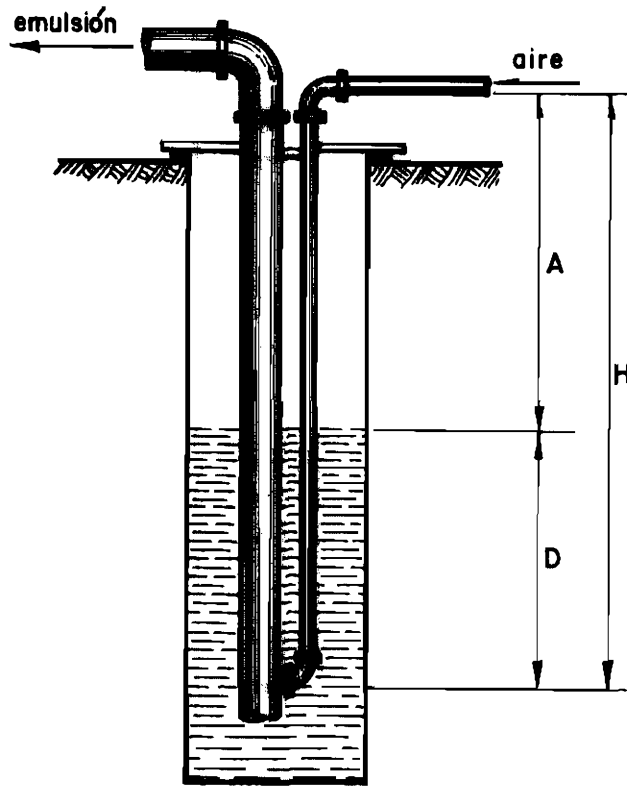


Fig. 3.

### Sumergencia

Se llama «sumergencia» o «coeficiente de sumersión» a la relación entre la longitud de tubería situada por debajo del nivel del agua y la longitud total de la misma.

En la figura 4, la sumergencia, expresada en tanto por ciento, viene dada por la relación:

$$\frac{D}{A + D} \cdot 100$$

Experimentalmente se ha podido comprobar que la sumergencia más conveniente es del 60 al 65 por 100, siendo admisible el 75 por 100 como máximo y el 30 por 100 como mínimo.

Como puede suponerse, la sumergencia varía en función de la evolución del nivel dinámico. Por este motivo, para que el sistema funcione dentro de los límites admisibles, es necesario estimar el descenso de nivel provocado como consecuencia del bombeo.

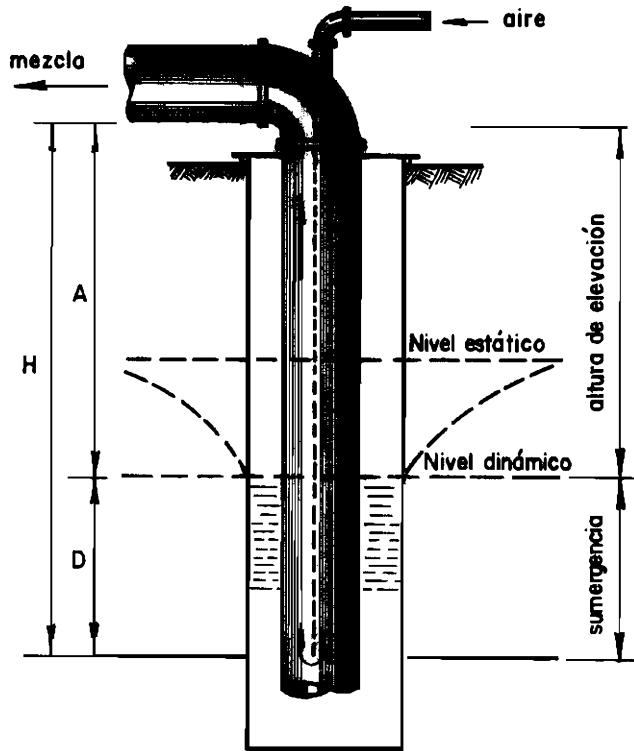


Fig. 4.

Para conocer la longitud total de tubería en función de la altura de elevación, fijando la sumergencia, se procederá del modo siguiente:

La longitud total  $H = A + D$ , si la sumergencia se supone que es del 40 por 100, se tiene:

$$H = A + \frac{40}{100} H$$

$$H = \frac{100 \cdot A}{100 - 40} = \frac{A}{1 - 0,40}$$

Cuando el nivel estático se encuentra a mucha profundidad, puede suceder que los dispositivos hasta ahora diseñados no funcionen por falta de la debida sumergencia.

En este caso es necesario utilizar un sistema de elevación por etapas, tal como el dibujado en la figura 5.

La campana juega el papel de pozo auxiliar, y su longitud ha de ser la apropiada para que la sumergencia, en la segunda etapa de elevación, sea la suficiente y el agua suba hasta la superficie.

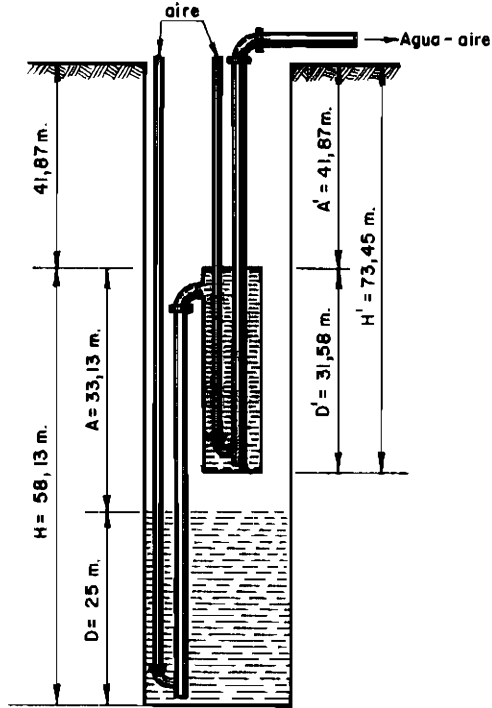


Fig. 5.

### Ejemplo 1

La profundidad total de un sondeo es de 100 m y tiene una columna de agua, en bombeo, de 25 m. Si se desea extraer agua mediante aire comprimido, con una sumergencia del 43 por 100, calcular:

- 1.º La altura de elevación que se conseguiría en la primera etapa de bombeo.
- 2.º La longitud que debe tener la campana para que el agua alcance la superficie (fig. 5).

— Con la sumergencia indicada del 43 por 100, y una columna de agua de 25 m, la altura de elevación (A) sería:

$$D = \frac{43}{100} \cdot H; 25 = \frac{43}{100} \cdot H$$

$$H = 58,13 \text{ m}$$

$$A = H - D = 58,13 - 25 = 33,13 \text{ m.}$$

Para alcanzar la superficie faltan 41,87 m. Es necesario, por tanto, instalar un nuevo dispositivo para vencer dicha altura.

— La campana auxiliar ha de tener la siguiente longitud:

$$H' = 41,87 \text{ m} + \frac{43}{100} H'; H' = 73,45 \text{ m}$$

Luego

$$D' = 73,45 - 41,87 = 31,58 \text{ m}$$

### Relación de diámetros

Los diámetros de las tuberías de agua y aire deben adecuarse a los caudales bombeados, y han de guardar una cierta relación para que las velocidades del agua y aire sean las más convenientes, evitando pérdidas de carga importantes.

En principio, y para una primera estimación, la relación entre los diámetros de las tuberías de agua y aire  $D/d$ , debe alcanzar valores comprendidos entre 3 y 4.

En la tabla I (según Johson) se dan los valores de los diámetros de las tuberías, en función de los caudales que se deseen extraer.

Teniendo en cuenta el grado de sumergencia, los diámetros de estas tuberías, para unos determinados caudales, se dan en la tabla 2.

TABLA I  
DIAMETROS DE TUBERIAS EN FUNCION DEL CAUDAL

Caudal l/m	Diámetro tubería agua (mm)	Diámetro tubería aire (mm)	D/d
120-240	50	13	3,85
240-300	75	25	3,00
300-360	90	25	3,60
360-540	100	32	3,12
540-960	130	38	3,42
960-1.500	150	50	3,00
1.500-2.640	200	64	3,12



TABLA 2  
DIAMETROS DE TUBERIAS EN FUNCION DEL  
CAUDAL Y LA SUMERGENCIA

Diámetros (mm)		Sumergencias					
Tubería agua	Tubería aire	33%	43%	50%	55%	60%	66%
		Caudal elevado en litros por minuto					
38	13	40	52	68	60	50	71
50	19	65	95	113	140	150	162
63	25	120	160	200	210	225	243
75	25	230	350	380	390	396	404
88	25	320	425	490	500	512	530
100	31	430	550	600	650	655	662
113	38	500	680	760	780	810	845
125	38	720	900	1.100	1.140	1.170	1.205
150	38	940	1.300	1.500	1.550	1.600	1.670

### Presión y volumen de aire

La presión mínima que debe tener el aire para que el sistema comience a funcionar deberá ser algo superior a la ejercida por la columna de agua sobre el punto en que se efectúa la inyección, tal como se indica en la figura 1.

La presión máxima requerida será, pues, en el momento del arranque. A partir de este instante, la columna de agua disminuye como consecuencia de la depresión originada por el bombeo y, paralelamente, la presión del aire decrece hasta que el nivel queda estabilizado.

Si se tiene una instalación de aire comprimido con una columna sumergida de 80 m, la presión mínima del compresor en el arranque deberá ser de ocho atmósferas o más. Si, por efecto del bombeo, el nivel inicial se deprime en 10 m, la presión de aire necesaria para extraer agua será ligeramente superior a siete atmósferas (70 m de columna de agua).

La presión que debe tener el aire para poder ser inyectado se calcula a partir de la fórmula:

$$P_a = 0,10 \cdot D + P_r$$

siendo:

- $P_a$  = presión del aire en atmósferas.
- 0,10 = presión de una columna de agua de un metro de altura, en atmósferas.
- $D$  = sumergencia en metros.
- $P_r$  = pérdidas de presión por rozamiento, en atmósferas.

El volumen de aire libre, en litros por minuto, que es necesario para elevar un litro por minuto de agua, viene dado por la fórmula experimental:

$$V = \frac{A}{9,5 \log \frac{D+10,33}{10,33}}$$

donde:

V = volumen de aire en l/minuto.

D = sumergencia en metros.

A = altura de elevación en metros.

En la tabla 3 se consignan los litros por minuto de aire y la presión necesaria para elevar un litro de agua, en el mismo tiempo, a diversas alturas, con las sumergidas que se expresan. La presión se ha calculado admitiendo una pérdida por rozamiento de 0,2 atmósferas por cada 100 m de tubería.

Como se ha dicho, la tabla expresa la presión y volumen de aire necesarios para obtener un caudal de agua de un l/minuto. Para obtener  $n$  l/minutos, será necesaria la misma presión y  $n$  veces el volumen de aire que marca la tabla.

TABLA 3

VOLUMEN DE AIRE Y PRESION NECESARIOS PARA ELEVAR UN LITRO DE AGUA CON DISTINTAS SUMERGENCIAS Y ALTURAS

Elevación en metros	SUMERGENCIAS																	
	25 % 1/3 a 1		33 % 1/2 a 1		43 % 3/4 a 1		50 % 1 a 1		55 % 1 1/4 a 1		60 % 1 1/2 a 1		66 % 2 a 1		70 % 2 1/2 a 1		75 % 3 a 1	
	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P
5	—	—	—	—	—	—	3,08	0,52	2,57	0,65	2,21	0,77	1,79	1,03	1,62	1,28	1,38	1,54
10	—	—	—	—	—	—	3,54	1,04	3,02	1,29	2,65	1,55	2,20	2,06	1,99	2,57	1,75	3,08
15	—	—	—	—	—	—	4,00	1,56	3,47	1,95	3,08	2,33	2,62	3,09	2,36	3,85	2,13	4,62
20	—	—	—	—	—	—	4,47	2,08	3,93	2,59	3,52	3,10	3,03	4,12	2,73	5,14	2,50	6,16
25	—	—	—	—	—	—	4,93	2,60	4,38	3,24	3,95	3,88	3,44	5,15	3,10	6,43	2,87	7,70
30	—	—	—	—	6,29	2,36	5,32	3,12	4,75	3,89	4,30	4,65	3,77	6,18	3,42	7,71	3,18	9,24
35	—	—	—	—	6,69	2,75	5,71	3,64	5,12	4,54	4,67	5,43	4,10	7,21	3,74	9,00	3,49	10,78
40	—	—	—	—	7,10	3,14	6,09	4,16	5,48	5,18	5,02	6,20	4,44	8,24	4,07	10,28	3,79	12,32
45	—	—	—	—	7,50	3,54	6,48	4,68	5,85	5,83	5,38	6,97	4,77	9,27	4,39	11,57	4,10	13,86
50	—	—	—	—	7,90	3,93	6,87	5,20	6,21	6,48	5,74	7,75	5,11	10,30	4,71	12,85	4,41	15,40
55	—	—	—	—	8,27	4,32	7,22	5,72	6,54	7,13	6,06	8,53	5,41	11,33	4,99	14,14	4,70	16,94
60	13,52	2,16	10,67	3,18	8,64	4,71	7,57	6,24	6,87	7,77	6,38	9,30	5,72	12,36	5,29	15,42	4,99	18,48
65	13,94	2,35	11,06	3,44	9,02	5,11	7,91	6,76	7,21	8,42	6,70	10,08	6,02	13,39	5,57	16,71	—	—
70	14,36	2,52	11,46	3,72	9,39	5,50	8,26	7,28	7,54	9,07	7,02	10,85	6,33	14,42	5,86	17,99	—	—
75	14,78	2,70	11,85	3,98	9,76	5,89	8,61	7,80	7,87	9,72	7,34	11,63	6,63	15,45	6,15	19,28	—	—
80	15,18	2,88	12,23	4,24	10,10	6,28	8,93	8,32	8,18	10,36	7,64	12,40	6,91	16,48	6,42	20,56	—	—
85	15,59	3,06	12,61	4,50	10,45	6,68	9,26	8,84	8,49	11,01	7,94	13,18	7,19	17,52	6,69	21,85	—	—
90	15,99	3,24	12,98	4,77	10,79	7,07	9,58	9,36	8,80	11,66	8,24	13,95	7,47	18,54	6,97	23,13	—	—
95	16,39	3,42	13,36	5,04	11,14	7,46	9,91	9,88	9,11	12,31	8,54	14,73	7,76	19,57	7,24	24,43	—	—
100	16,81	3,60	13,74	5,30	11,48	7,85	10,23	10,40	9,42	12,95	8,84	15,50	8,04	20,60	7,51	25,70	—	—
125	18,74	4,50	15,51	6,63	13,12	9,82	11,77	13,00	10,90	16,19	10,45	19,38	9,51	25,75	8,80	32,13	—	—
150	20,61	5,40	17,21	7,95	14,69	11,78	13,25	15,60	12,31	19,43	11,63	23,25	10,68	30,90	10,04	38,55	—	—
175	22,40	6,30	18,87	9,28	16,20	13,74	14,68	18,20	13,69	22,67	12,95	27,13	11,94	36,05	—	—	—	—
200	24,14	7,20	20,45	10,60	17,67	15,70	16,08	20,80	15,03	25,90	14,23	31,00	13,17	41,20	—	—	—	—
225	25,82	8,10	22,03	11,93	19,12	17,67	17,44	23,40	16,32	29,14	15,51	34,88	14,36	46,35	—	—	—	—
250	27,49	9,30	23,56	13,25	20,52	19,63	18,78	26,00	17,60	32,38	16,74	38,75	15,53	51,50	—	—	—	—
275	29,15	9,90	25,06	14,58	21,96	21,59	20,08	28,60	18,86	35,62	17,96	42,63	16,82	56,65	—	—	—	—
300	30,68	10,80	26,51	15,90	23,25	23,55	21,37	31,20	20,08	38,85	19,15	46,50	17,83	61,80	—	—	—	—

## Pérdidas por rozamiento

Son varios los factores que determinan las pérdidas por rozamiento, calculándose dichas pérdidas a partir de la fórmula de Darcy.

$$Pr = \frac{2}{d} \cdot l \cdot \beta \cdot \alpha \cdot v^2 \quad [1]$$

siendo:

Pr = pérdidas de presión en kg/m<sup>2</sup>

d = diámetro de la tubería en metros.

l = longitud de la tubería en metros.

β = peso específico del aire a la temperatura y presión existentes.

v = velocidad del aire en m/seg.

$$\alpha = 0,000507 + \frac{0,00001294}{d}$$

Llamando «q» a la cantidad de aire en m<sup>3</sup>/seg y sabiendo que:

$$q = s \cdot v = \frac{\pi d^2}{4} \cdot v$$

la fórmula [1] se puede escribir del modo siguiente:

$$Pr = \frac{2}{d} \cdot l \cdot \beta \cdot \alpha \cdot \frac{q^2}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)^2} = \frac{32}{9,86} \cdot l \cdot \beta \cdot \alpha$$

$$\frac{q^2}{d^5} = 3,25 \cdot \alpha \cdot \frac{q^2 \cdot l \cdot \beta}{d^5}$$

La pérdida de presión admisible es de 0,2 atmósferas por cada 100 m.

Para facilitar los cálculos se adjuntan las tablas 4 y 5. En la 5 se dan los pesos específicos del aire comprimido entre 0 y 20 atmósferas, para temperaturas comprendidas entre 0° y 50°. En la 4 se detallan los valores de α, d<sup>5</sup> y  $\frac{d^5}{\alpha}$ , para diámetros comprendidos entre 0,01 y 0,3 m.

### Ejemplo 2

Calcular la pérdida de presión por rozamiento en una tubería de 100 m de longitud y un diámetro de 0,10 m, sabiendo que circulan 60 m<sup>3</sup> por minuto de aire libre a la presión de cuatro atmósferas manométricas y 30° de temperatura.

TABLA 4  
VALORES DE LOS COEFICIENTES  $\alpha$ ,  $d^5$  y  $\frac{d^5}{\alpha}$  PARA DIFERENTES DIAMETROS  
DE TUBERÍA

Diám. en metros	$\alpha$	$d^5$	$\frac{d^5}{\alpha}$	Diám. en metros	$\alpha$	$d^5$	$\frac{d^5}{\alpha}$
0.10	0,0018010	0,000000001	0,000000056	0.160	0,0005879	0,0001048576	0,178359584
0.015	0,0013697	0,000000008	0,000000585	0.165	0,0005854	0,0001222981	0,208913734
0.020	0,0011540	0,000000032	0,000002772	0.170	0,0005833	0,0001419857	0,243417967
0.025	0,0010246	0,000000098	0,000009564	0.175	0,0005809	0,0001641309	0,282545877
0.30	0,0009383	0,000000243	0,000025897	0.180	0,0005789	0,0001889568	0,326406633
0.035	0,0008767	0,000000525	0,000059884	0.185	0,0005769	0,0002166999	0,375626626
0.040	0,0008305	0,000001024	0,000123300	0.190	0,0005751	0,0002476099	0,430551035
0.045	0,0007946	0,000001845	0,000232192	0.195	0,0005734	0,0002819506	0,491717125
0.050	0,0007658	0,000003125	0,000408069	0.200	0,0005717	0,0003200000	0,559734125
0.055	0,0007423	0,000005033	0,000678028	0.205	0,0005701	0,0003620506	0,635065076
0.060	0,0007227	0,000007776	0,001075965	0.210	0,0005686	0,0004084101	0,718273127
0.065	0,0007061	0,000011603	0,001643252	0.215	0,0005672	0,0004594014	0,809946651
0.070	0,0006919	0,000016807	0,002429108	0.220	0,0005658	0,0005153632	0,910857546
0.075	0,0006795	0,000023730	0,003492275	0.225	0,0005645	0,0005766504	1,021524181
0.080	0,0006685	0,000032768	0,004899521	0.230	0,0005633	0,0006436343	1,142613705
0.085	0,0006592	0,000044371	0,006731038	0.235	0,0005621	0,0007167031	1,275045544
0.090	0,0006508	0,000059049	0,009073294	0.240	0,0005609	0,0007962624	1,419615618
0.095	0,0006432	0,000077378	0,012030163	0.245	0,0005598	0,0008827352	1,576876027
0.100	0,0006364	0,000100000	0,015713387	0.250	0,0005588	0,0009765625	1,747606478
0.105	0,0006302	0,000127628	0,020251983	0.255	0,0005577	0,0010782039	1,933304464
0.110	0,0006246	0,000161051	0,025784662	0.260	0,0005568	0,0011881376	2,133867816
0.115	0,0006178	0,000201136	0,032556815	0.265	0,0005558	0,013068609	2,351315041
0.120	0,0006148	0,000248832	0,040473650	0.270	0,0005549	0,0014348907	2,585854568
0.125	0,0006105	0,000305176	0,049987879	0.275	0,0005541	0,0015727637	2,838411297
0.130	0,0006065	0,000371294	0,061219126	0.280	0,0005532	0,0017210368	3,111057122
0.135	0,0006029	0,000448403	0,074375186	0.285	0,0005524	0,0018802877	3,403851738
0.140	0,0005994	0,000537284	0,089727060	0.290	0,0005516	0,0020511149	3,718482415
0.145	0,0005962	0,000640973	0,107509728	0.295	0,0005509	0,0022341384	4,055433654
0.150	0,0005933	0,000759375	0,127991741	0.300	0,0005501	0,0024300000	4,4378658
0.155	0,0005907	0,000894661	0,176461736	—	—	—	—

A la presión de cuatro atmósferas, el volumen de 60 m<sup>3</sup>/minuto se convierte en:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2; V_2 = \frac{P_1 \cdot V_1}{P_2}$$

$$V_2 = 60 \frac{1}{1 + 4} = \frac{60}{5} = 12 \text{ m}^3$$

el caudal de aire será:

$$q = \frac{12}{60} = 0,2 \text{ m}^3/\text{seg}$$

TABLA 5

PESOS ESPECIFICOS DEL AIRE EN FUNCION DE LA PRESION Y TEMPERATURA

Temperaturas efectivas	Presiones manométricas en atmósferas								
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	1.293	1.940	2.586	3.233	3.879	4.526	5.172	5.819	6.456
5°	1.270	1.905	2.539	3.175	3.809	4.445	5.079	5.714	6.349
10°	1.247	1.870	2.493	3.117	3.739	4.363	4.986	5.610	6.232
15°	1.224	1.839	2.449	3.062	3.673	4.286	4.898	5.511	6.122
20°	1.204	1.806	2.408	3.010	3.611	4.214	4.815	5.417	6.019
25°	1.184	1.777	2.369	2.961	3.553	4.146	4.738	5.329	5.922
30°	1.164	1.746	2.327	2.910	3.491	4.073	4.655	5.237	5.819
35°	1.146	1.719	2.291	2.864	3.437	4.010	4.582	5.156	5.728
40°	1.127	1.693	2.255	2.819	3.382	3.947	4.510	5.074	5.637
45°	1.109	1.665	2.219	2.774	3.328	3.883	4.438	4.993	5.547
50°	1.093	1.639	2.185	2.732	3.278	3.824	4.370	4.917	5.463

(continuación)

Temperaturas efectivas	Presiones manométricas en atmósferas								
	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5
0°	7.112	7.758	8.405	9.051	9.698	10.344	10.991	11.637	12.284
5°	6.984	7.618	8.254	8.888	9.523	10.158	10.793	11.428	12.063
10°	6.856	7.479	8.102	8.725	9.349	9.972	10.595	11.218	11.842
15°	6.735	7.359	7.960	8.571	9.183	9.796	10.408	11.020	11.632
20°	6.621	7.223	7.825	8.426	9.029	9.630	10.233	10.884	11.436
25°	6.515	7.106	7.699	8.291	8.883	9.475	10.068	10.659	11.252
30°	6.401	6.982	7.565	8.146	8.728	9.310	9.892	10.473	11.056
35°	6.301	6.874	7.447	8.019	8.592	9.165	9.738	10.310	10.884
40°	6.202	6.765	7.329	7.892	8.457	9.020	9.584	10.147	10.712
45°	6.102	6.656	7.211	7.766	8.321	8.875	9.430	9.985	10.540
50°	6.010	6.556	7.102	7.648	8.195	8.741	9.287	9.833	10.380

(continuación)

Temperaturas efectivas	Presiones manométricas en atmósferas								
	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
0°	12.930	13.577	14.223	14.87	15,52	16,16	16,81	17,46	18,10
5°	12.697	13.333	13.967	14.60	15,24	15,87	16,51	17,14	17.78
10°	12.465	13.088	13.711	14.33	14,96	15,58	16,20	16,83	17.45
15°	12.245	12.857	13.469	14.08	14,69	15,31	15,92	16,53	17,14
20°	12.038	12.640	13.242	13.85	14,45	15,05	15,66	16,26	16.86
25°	11.844	12.437	13.028	13.62	14,21	14,81	15,40	15,99	16,58
30°	11.637	12.219	12.801	13.38	13,96	14,55	15,13	15,71	16,29
35°	11.456	12.029	12.602	13.17	13,75	14,32	14,89	15,47	16,04
40°	11.275	11.839	12.402	12.97	13,53	14,09	14,66	15,22	15,78
45°	11.094	11.649	12.203	12.76	13,31	13,87	14,42	14,98	15,53
50°	10.926	11.473	12.018	12,56	13,11	13,66	14,20	14,75	15,30

(continuación)

Temperaturas efectivas	Presiones manométricas en atmósferas								
	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5	17	17,5
0°	18,75	19,39	20,04	20,69	21,33	21,98	22,63	23,27	23,92
5°	18,41	19,05	19,68	20,32	20,95	21,59	22,22	22,86	23,49
10°	18,07	18,70	19,32	19,94	20,57	21,19	21,81	22,44	23,06
15°	17,76	18,37	18,98	19,59	20,20	20,82	21,43	22,04	22,65
20°	17,46	18,07	18,67	19,27	19,87	20,48	21,08	21,68	22,28
25°	17,17	17,77	18,36	18,95	19,54	20,13	20,73	21,32	21,91
30°	16,87	17,46	18,04	18,62	19,20	19,78	20,37	20,95	21,53
35°	16,61	17,18	17,76	18,33	18,90	19,48	20,05	20,62	21,19
40°	16,35	16,91	17,48	18,04	18,60	19,17	19,73	20,29	20,86
45°	16,09	16,64	17,20	17,75	18,31	18,86	19,41	19,97	20,52
50°	15,84	16,39	16,94	17,48	18,03	18,57	19,12	19,67	20,21

(continuación)

Temperaturas efectivas	Presiones manométricas en atmósferas				
	18	18,5	19	19,5	20
0°	24,57	25,21	25,86	26,51	27,15
5°	24,13	24,76	25,39	26,03	26,66
10°	23,68	24,31	24,93	25,55	26,18
15°	23,27	23,88	24,49	25,10	25,71
20°	22,88	23,49	24,09	24,69	25,29
25°	22,50	23,10	23,69	24,28	24,87
30°	22,11	22,69	23,27	23,86	24,44
35°	21,77	22,34	22,91	23,49	24,06
40°	21,42	21,99	22,55	23,11	23,68
45°	21,08	21,63	22,19	22,74	23,30
50°	20,76	21,31	21,85	22,40	22,94



Para un diámetro  $d = 0,10$  m, de la tabla 4,  $\alpha = 0,0006364$ , y para la presión de 4 atmósferas y  $30^\circ$ , el peso específico del aire,  $\beta = 5,819$  (tabla 5)

Aplicando la fórmula [1], se tiene:

$$Pr = 3,25 \cdot \alpha \frac{q^2 \cdot l \cdot \beta}{d^5}$$

$$Pr = 3,25 \times 0,0006364 \cdot \frac{0,2^2 \times 100 \times 5,819}{0,1^5} = 0,00206 \times \frac{23,27}{0,00001} =$$

$$= 4.793,62 \text{ kg/m}^2 = 0,479 \text{ atmósferas}$$

### Capacidad y rendimiento del compresor

Para calcular las dimensiones del compresor es necesario conocer el volumen de aire libre requerido y la presión en las distintas condiciones de trabajo.

La capacidad del compresor o volumen de aire que descarga por unidad de tiempo permanece invariable con la altitud del lugar, pero el peso del mismo volumen de aire disminuye con la altura. Para que el compresor, a mayor altura, pueda realizar el mismo servicio, será necesario un volumen de aire cuyo peso sea igual al del volumen primitivo para el que fue calculado.

Como norma referencial se ha tomado la cota del nivel del mar y una temperatura de  $15^\circ$ .

Cuando el compresor se ubica en un punto más elevado, se aspira menos peso de aire por embolada y, por tanto, para la misma presión final, el volumen comprimido disminuye con la altitud.

En la tabla 6 se dan los pesos específicos del aire para diferentes altitudes y temperaturas.

En la tabla 7 pueden verse los metros cúbicos de aire libre que, a distintas alturas y temperaturas, pesan lo mismo que un metro cúbico de aire a nivel del mar y  $15^\circ$  de temperatura.

#### Ejemplo 3

Sea un compresor situado a nivel del mar, que aspira un volumen de aire libre de  $10 \text{ m}^3/\text{minuto}$ , a una temperatura de  $15^\circ$ .

A esta altitud, el volumen de aire pesará (tabla 6):

$$10 \times 1,226 = 12,260 \text{ kg}$$

TABLA 6

PESOS ESPECIFICOS DEL AIRE LIBRE PARA DISTINTAS TEMPERATURAS Y ALTITUDES

Temperatures effective	ALTITUDES EN METROS																																						
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1.000	1.100	1.200	1.300	1.400	1.500	1.600	1.700	1.800	1.900	2.000	2.100	2.200	2.300	2.400	2.500	2.600	2.700	2.800	2.900	3.000	3.100	3.200	3.300	3.400	3.500	3.600	3.700	3.800
	PRESION EN ATMOSFERAS																																						
	1	0,988	0,976	0,964	0,953	0,942	0,930	0,919	0,908	0,897	0,886	0,876	0,865	0,855	0,844	0,834	0,823	0,814	0,803	0,795	0,784	0,775	0,764	0,755	0,746	0,737	0,727	0,718	0,709	0,700	0,692	0,682	0,673	0,666	0,655	0,648	0,640	0,631	0,623
PESOS ESPECIFICOS DEL AIRE LIBRE EN Kg/m <sup>3</sup>																																							
-20°	1,395	1,378	1,362	1,344	1,329	1,314	1,297	1,282	1,267	1,252	1,237	1,223	1,206	1,193	1,177	1,163	1,148	1,135	1,120	1,109	1,094	1,081	1,066	1,053	1,041	1,028	1,014	1,001	0,989	0,916	0,966	0,952	0,939	0,929	0,914	0,904	0,893	0,880	0,870
-15°	1,368	1,351	1,335	1,318	1,303	1,289	1,272	1,257	1,242	1,227	1,212	1,199	1,183	1,170	1,154	1,141	1,126	1,113	1,098	1,088	1,073	1,060	1,045	1,033	1,021	1,008	0,995	0,982	0,970	0,957	0,947	0,933	0,920	0,911	0,896	0,887	0,876	0,863	0,853
-10°	1,342	1,326	1,310	1,293	1,279	1,264	1,248	1,233	1,219	1,204	1,190	1,176	1,160	1,148	1,132	1,118	1,104	1,092	1,077	1,067	1,053	1,040	1,026	1,013	1,002	0,989	0,976	0,963	0,952	0,939	0,929	0,926	0,903	0,893	0,879	0,870	0,859	0,847	0,837
-5°	1,318	1,301	1,286	1,270	1,255	1,241	1,225	1,211	1,196	1,182	1,168	1,155	1,139	1,127	1,112	1,098	1,084	1,072	1,058	1,047	1,035	1,021	1,004	0,995	0,983	0,971	0,957	0,946	0,934	0,922	0,912	0,898	0,887	0,877	0,863	0,854	0,844	0,832	0,821
0°	1,293	1,277	1,262	1,246	1,232	1,218	1,202	1,188	1,174	1,160	1,146	1,133	1,118	1,106	1,091	1,078	1,064	1,052	1,038	1,028	1,014	1,002	0,988	0,976	0,965	0,953	0,940	0,928	0,917	0,905	0,895	0,882	0,870	0,861	0,847	0,838	0,828	0,816	0,806
5°	1,270	1,254	1,239	1,224	1,210	1,196	1,180	1,167	1,153	1,139	1,125	1,113	1,098	1,086	1,071	1,059	1,045	1,033	1,019	1,009	0,996	0,984	0,970	0,958	0,948	0,936	0,923	0,911	0,900	0,889	0,879	0,866	0,854	0,845	0,832	0,823	0,813	0,801	0,791
10°	1,248	1,232	1,218	1,202	1,189	1,175	1,160	1,146	1,133	1,119	1,106	1,093	1,079	1,067	1,052	1,040	1,027	1,015	1,002	0,992	0,979	0,967	0,953	0,942	0,931	0,920	0,907	0,896	0,885	0,873	0,863	0,851	0,840	0,831	0,817	0,809	0,799	0,787	0,778
15°	1,226	1,211	1,196	1,181	1,168	1,153	1,139	1,126	1,113	1,100	1,086	1,074	1,060	1,048	1,034	1,022	1,009	0,997	0,984	0,975	0,961	0,950	0,936	0,925	0,915	0,903	0,891	0,880	0,869	0,858	0,848	0,836	0,825	0,816	0,803	0,794	0,785	0,774	0,764
20°	1,205	1,190	1,176	1,161	1,148	1,133	1,120	1,108	1,094	1,081	1,068	1,056	1,042	1,030	1,017	1,005	0,992	0,980	0,967	0,958	0,945	0,934	0,920	0,910	0,899	0,888	0,876	0,865	0,853	0,843	0,834	0,822	0,811	0,802	0,789	0,781	0,772	0,761	0,751
25°	1,184	1,170	1,157	1,141	1,129	1,116	1,101	1,088	1,075	1,063	1,050	1,038	1,024	1,013	0,999	0,987	0,975	0,964	0,951	0,942	0,929	0,918	0,905	0,894	0,884	0,873	0,861	0,850	0,840	0,829	0,820	0,808	0,797	0,788	0,776	0,768	0,758	0,747	0,738
30°	1,165	1,151	1,138	1,123	1,110	1,097	1,083	1,070	1,058	1,045	1,033	1,021	1,007	0,997	0,983	0,971	0,959	0,948	0,933	0,926	0,914	0,903	0,890	0,879	0,869	0,859	0,847	0,836	0,826	0,815	0,806	0,795	0,784	0,775	0,763	0,755	0,746	0,735	0,726
35°	1,146	1,131	1,118	1,103	1,092	1,079	1,065	1,053	1,040	1,028	1,015	1,003	0,991	0,980	0,967	0,955	0,943	0,932	0,920	0,911	0,898	0,888	0,875	0,865	0,855	0,844	0,833	0,822	0,812	0,802	0,793	0,781	0,771	0,763	0,750	0,742	0,733	0,723	0,714
40°	1,127	1,114	1,098	1,087	1,074	1,062	1,048	1,036	1,024	1,012	0,999	0,988	0,975	0,964	0,951	0,940	0,928	0,917	0,905	0,896	0,884	0,874	0,862	0,851	0,841	0,831	0,820	0,809	0,800	0,789	0,780	0,769	0,759	0,751	0,739	0,731	0,722	0,712	0,703
45°	1,110	1,096	1,083	1,070	1,058	1,046	1,032	1,020	1,008	0,996	0,983	0,972	0,960	0,949	0,937	0,926	0,914	0,904	0,891	0,882	0,870	0,860	0,848	0,838	0,828	0,818	0,807	0,797	0,787	0,777	0,768	0,757	0,747	0,739	0,727	0,719	0,710	0,700	0,692
50°	1,093	1,081	1,068	1,055	1,043	1,031	1,017	1,005	0,993	0,981	0,969	0,958	0,946	0,935	0,923	0,912	0,900	0,891	0,878	0,870	0,858	0,848	0,836	0,826	0,816	0,806	0,795	0,785	0,776	0,757	0,746	0,736	0,729	0,717	0,709	0,700	0,690	0,682	

Si este mismo compresor se sitúa a 3.000 m de altura y la temperatura es de 10°, el peso del mismo volumen de aire sería:  $10 \times 0,863 = 8,63$  kg.

De lo expuesto se deduce que, para poder realizar el mismo trabajo a 3.000 m de altitud que a nivel del mar, es necesario emplear un compresor cuya capacidad sería de:

$$\frac{12,26}{0,863} = 14,20 \text{ m}^3/\text{minuto}$$

Haciendo uso de la tabla VII se tiene que, a 3.000 m y 10°, el número de m<sup>3</sup> de aire libre equivalente en peso a 1 m<sup>3</sup> tomado a nivel del mar y 15° es de 1,420. El compresor a instalar a la nueva altitud deberá tener una capacidad de:  $10 \times 1,42 = 14,2$  m<sup>3</sup>/minuto, cifra igual a la encontrada anteriormente.

#### *Ejemplo 4*

Calcular el volumen a que se reducen 30 m<sup>3</sup> de aire libre al nivel del mar y a 2.500 m de altura, cuando se comprime a 8 atmósferas absolutas.

A nivel del mar:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \text{ (tabla 7)}$$

$$V_2 = 30 \frac{10,330}{8,10330 + 10,330} = 3,33 \text{ m}^3$$

A 2.500 m:

$$V_2 = 30 \frac{7,613,2}{8,10330 + 7,613,2} = 2,53 \text{ m}^3$$

A la altitud de 2.500 m, el volumen obtenido es el 75,97 por 100 del que se alcanza a nivel del mar.

TABLA 7

Temperaturas efectivas	ALTITUDES EN METROS																																						
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1.000	1.100	1.200	1.300	1.400	1.500	1.600	1.700	1.800	1.900	2.000	2.100	2.200	2.300	2.400	2.500	2.600	2.700	2.800	2.900	3.000	3.100	3.200	3.300	3.400	3.500	3.600	3.700	3.800
	PRESION EN ATMOSFERAS																																						
	1	0,988	0,976	0,964	0,953	0,942	0,930	0,919	0,908	0,897	0,886	0,876	0,865	0,855	0,844	0,834	0,823	0,814	0,803	0,795	0,784	0,775	0,764	0,755	0,746	0,737	0,727	0,718	0,709	0,700	0,692	0,682	0,673	0,666	0,655	0,648	0,640	0,631	0,623
METROS CUBICOS DE AIRE LIBRE QUE EQUIVALEN EN PESO A UN METRO CUBICO DE AIRE LIBRE AL NIVEL DEL MAR Y 15°																																							
-20°	0,879	0,890	0,900	0,912	0,923	0,933	0,945	0,956	0,968	0,979	0,991	1,002	1,016	1,027	1,041	1,054	1,067	1,080	1,094	1,106	1,120	1,135	1,150	1,164	1,178	1,192	1,209	1,225	1,240	1,255	1,269	1,287	1,305	1,320	1,341	1,356	1,372	1,393	1,409
-15°	0,896	0,907	0,918	0,930	0,940	0,951	0,963	0,975	0,987	0,999	1,012	1,022	1,036	1,047	1,062	1,074	1,088	1,102	1,116	1,137	1,142	1,157	1,173	1,186	1,201	1,216	1,232	1,248	1,263	1,281	1,294	1,314	1,332	1,345	1,368	1,382	1,399	1,420	1,437
-15°	0,914	0,924	0,924	0,948	0,958	0,969	0,982	0,994	1,005	1,018	1,030	1,042	1,056	1,067	1,083	1,096	1,110	1,123	1,138	1,149	1,164	1,179	1,194	1,210	1,224	1,240	1,256	1,273	1,287	1,306	1,319	1,323	1,357	1,373	1,394	1,409	1,427	1,447	1,464
5°	0,930	0,942	0,953	0,965	0,976	0,988	1,000	1,012	1,025	1,037	1,049	1,061	1,076	1,087	1,102	1,116	1,130	1,144	1,158	1,171	1,184	1,200	1,221	1,232	1,247	1,263	1,281	1,295	1,312	1,329	1,344	1,365	1,382	1,398	1,420	1,435	1,452	1,475	1,493
0°	0,948	0,960	0,971	0,983	0,995	1,006	1,019	1,031	1,044	1,056	1,069	1,082	1,096	1,108	1,123	1,137	1,152	1,165	1,181	1,193	1,209	1,223	1,240	1,256	1,271	1,286	1,304	1,321	1,336	1,355	1,369	1,390	1,409	1,424	1,447	1,463	1,480	1,502	1,521
5°	0,965	0,978	0,989	1,001	1,013	1,025	1,032	1,050	1,063	1,076	1,089	1,101	1,116	1,128	1,144	1,157	1,173	1,187	1,203	1,215	1,230	1,245	1,263	1,279	1,293	1,310	1,328	1,345	1,362	1,379	1,394	1,415	1,435	1,451	1,480	1,489	1,507	1,530	1,549
10°	0,982	0,995	1,007	1,020	1,031	1,042	1,056	1,069	1,082	1,095	1,108	1,121	1,136	1,149	1,165	1,178	1,193	1,208	1,223	1,236	1,250	1,267	1,286	1,301	1,317	1,333	1,351	1,368	1,385	1,404	1,420	1,440	1,459	1,475	1,500	1,515	1,534	1,557	1,575
15°	1	1,012	1,024	1,038	1,049	1,061	1,076	1,089	1,101	1,114	1,128	1,141	1,156	1,169	1,185	1,199	1,215	1,230	1,246	1,257	1,275	1,290	1,309	1,325	1,340	1,358	1,375	1,393	1,410	1,428	1,445	1,466	1,486	1,502	1,526	1,544	1,561	1,583	1,604
20°	1,017	1,030	1,042	1,055	1,067	1,080	1,094	1,106	1,120	1,134	1,147	1,160	1,176	1,190	1,205	1,219	1,236	1,251	1,267	1,280	1,297	1,312	1,332	1,347	1,364	1,381	1,399	1,417	1,433	1,454	1,470	1,491	1,511	1,529	1,553	1,569	1,588	1,611	1,632
25°	1,035	1,047	1,060	1,074	1,085	1,098	1,113	1,126	1,140	1,153	1,167	1,181	1,197	1,210	1,227	1,242	1,257	1,272	1,289	1,301	1,319	1,333	1,354	1,371	1,388	1,404	1,423	1,442	1,459	1,470	1,495	1,517	1,538	1,556	1,579	1,596	1,617	1,641	1,661
30°	1,052	1,065	1,077	1,091	1,104	1,117	1,132	1,145	1,158	1,173	1,186	1,199	1,217	1,229	1,247	1,262	1,278	1,293	1,311	1,324	1,341	1,357	1,377	1,394	1,411	1,427	1,447	1,467	1,484	1,504	1,521	1,542	1,563	1,582	1,606	1,626	1,643	1,668	
35°	1,069	1,083	1,096	1,111	1,122	1,136	1,151	1,164	1,178	1,192	1,207	1,222	1,237	1,256	1,267	1,283	1,300	1,315	1,332	1,346	1,365	1,380	1,401	1,417	1,434	1,453	1,471	1,491	1,509	1,528	1,546	1,568	1,590	1,607	1,634	1,652	1,672	1,695	1,717
40°	1,087	1,100	1,116	1,127	1,141	1,154	1,169	1,183	1,197	1,211	1,227	1,240	1,257	1,271	1,289	1,304	1,321	1,336	1,354	1,368	1,386	1,400	1,422	1,440	1,458	1,475	1,495	1,515	1,532	1,553	1,571	1,594	1,615	1,632	1,658	1,677	1,698	1,721	1,744
45°	1,005	1,119	1,132	1,146	1,159	1,172	1,188	1,202	1,216	1,231	1,247	1,261	1,277	1,292	1,312	1,324	1,341	1,356	1,376	1,390	1,409	1,426	1,446	1,464	1,476	1,499	1,519	1,538	1,558	1,577	1,596	1,620	1,641	1,658	1,686	1,705	1,727	1,751	1,772
50°	1,122	1,134	1,148	1,162	1,175	1,189	1,206	1,220	1,235	1,250	1,265	1,280	1,296	1,311	1,328	1,343	1,362	1,376	1,396	1,409	1,429	1,446	1,467	1,484	1,502	1,521	1,542	1,561	1,580	1,601	1,620	1,643	1,666	1,682	1,710	1,729	1,751	1,777	1,798

### Ejemplo 5

Un compresor tiene una capacidad de 10 m<sup>3</sup>/minuto, a nivel del mar, y 15° de temperatura. Si se sitúa a 1.000 m de altitud y temperatura de 5°, calcular la pérdida de capacidad que experimenta el compresor.

El volumen de aire descargado por minuto es el mismo para las distintas cotas, pero su peso específico varía con la altura (tabla 6).

Peso del aire a 1.000 m y 5°: 1,125 kg.

El volumen de 10 m<sup>3</sup> pasará a esta altura: 11,25 kg.

Como el peso específico del aire a nivel del mar y 15° de temperatura, es de 1,226 kg, el volumen que corresponde, a ese mismo nivel e igual temperatura, al peso anterior, será:

$$\frac{11,25}{1,226} = 9,176 \text{ m}^3$$

Luego a 1.000 m hay una pérdida de capacidad, respecto al nivel del mar, de:

$$10 - 9,176 = 0,824 \text{ m}^3$$

### EJEMPLO RESUMEN

En un sondeo de 200 m de profundidad que tiene su nivel estático a 60 m se pretende extraer un caudal de 10 l/seg con una depresión de 20 m.

Calcular:

- 1) La longitud total de la tubería para una sumergencia mínima del 55 por 100.
- 2) El volumen de aire libre necesario para el caudal de 10 l/seg.
- 3) La presión que debe tener el aire, admitiendo una pérdida por rozamiento de 0,2 atmósferas por cada 100 m de tubería.
- 4) El diámetro de la tubería del agua para una velocidad de la mezcla de 2 m/seg.
- 5) El diámetro de la tubería del aire, sabiendo que la temperatura ambiente es de 20°.

RESOLUCION (Fig. 6)

- 1) Para una sumergencia del 55 por 100 se tiene:

$$H = A + \frac{55}{100} H$$

$$H = \frac{100 \times A}{100 - 55} = \frac{100 \times 80}{45} = 177,7 \text{ m}$$

- 2) El volumen de aire libre, en litros por minuto que se precisan para elevar un l/min. de agua, viene dado por la fórmula:

$$V_a = \frac{A}{9,5 \log \frac{D + 10,33}{10,33}};$$

$$V_a = \frac{80}{9,5 \log \frac{97,7 + 10,33}{10,33}} = 8,26 \text{ l/min}$$

La cantidad total de aire para extraer 10 l/seg de agua será:

$$10 \times 60 \times 8,26 = 4.956 \text{ l/min} = 4,956 \text{ m}^3/\text{min}$$

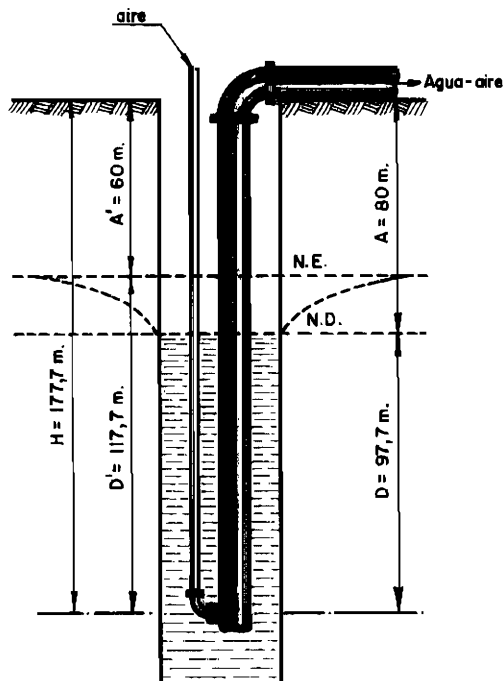


Fig. 6.

En la tabla 3 puede verse que, para una sumergencia del 55 por 100 y una altura de elevación de 80 m, el caudal es de 8,18 l/min. Este valor es muy semejante al calculado mediante la aplicación de la anterior fórmula y, a efectos prácticos, puede despreciarse el error cometido.

- 3) La presión del aire será la necesaria para vencer la columna de agua en el caso de mayor sumergencia. Esta sumergencia tiene lugar en el momento del arranque, estando el nivel en reposo.

La longitud de tubería sumergida para este supuesto es:  $177,7 - 60 = 117,7$  m.

La presión del aire:

$$P_a = 0,10 \times 117,7 + P_r$$

$$P_a = 11,77 + 0,35 = 12,13 \text{ atmósferas.}$$

En la tabla 3, para una sumergencia del 66 por 100 y 60 m de altura de elevación, la presión es de 12,36 atmósferas.

- 4) El volumen que circula por la tubería del agua es la suma de la mezcla de agua-aire.

El caudal de agua es de 0,01 m<sup>3</sup>/seg (10 l/seg). El del aire, para una sumergencia del 55 por 100, será:

$$\frac{4,965}{60} = 0,0826 \text{ m}^3/\text{seg}$$

que a la presión de 12,13 atmósferas se convierte en:

$$V_2 = V_1 \frac{P_1}{P_2} = 0,0826 \cdot \frac{1}{1 + 12,13} = 0,00629 \text{ m}^3/\text{seg}$$

El caudal total de la mezcla es:

$$0,01 + 0,00629 = 0,01629 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Admitiendo una velocidad de circulación de 2 m/seg, se tiene:

$$S = \frac{Q}{V} \qquad \pi r^2 = \frac{Q}{V}$$

$$r = \sqrt{\frac{Q}{V \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{0,01629}{2\pi}} = 0,05 \text{ m}$$

luego, el diámetro de la tubería del agua será de 10 cm.

En la tabla 2, el diámetro encontrado para estas condiciones está comprendido entre 88 y 100 mm.

- 5) El diámetro de la tubería del aire viene dado por la expresión:

$$\frac{d^5}{\alpha} = 3,25 \frac{q^2 \cdot 1 \cdot \beta}{p}$$

sustituyendo valores:

$$d^5/\alpha = 3,25 \frac{0,00629^2 \times 177,7 \times 16,86}{12,13 \times 1.033} = 0,0000307$$

En la tabla 4, para este valor de  $d^5/\alpha$  el diámetro de la tubería obtenido está comprendido entre 0,030 y 0,035 m; es decir, el diámetro de la tubería del aire es de 3,2 cm, que coincide con el valor de la tabla 2.