MECÁNICA DE LOS FLUIDOS Y MÁQUINAS

UNIDAD N°6: Golpe de ariete y Cavitación

Docentes:

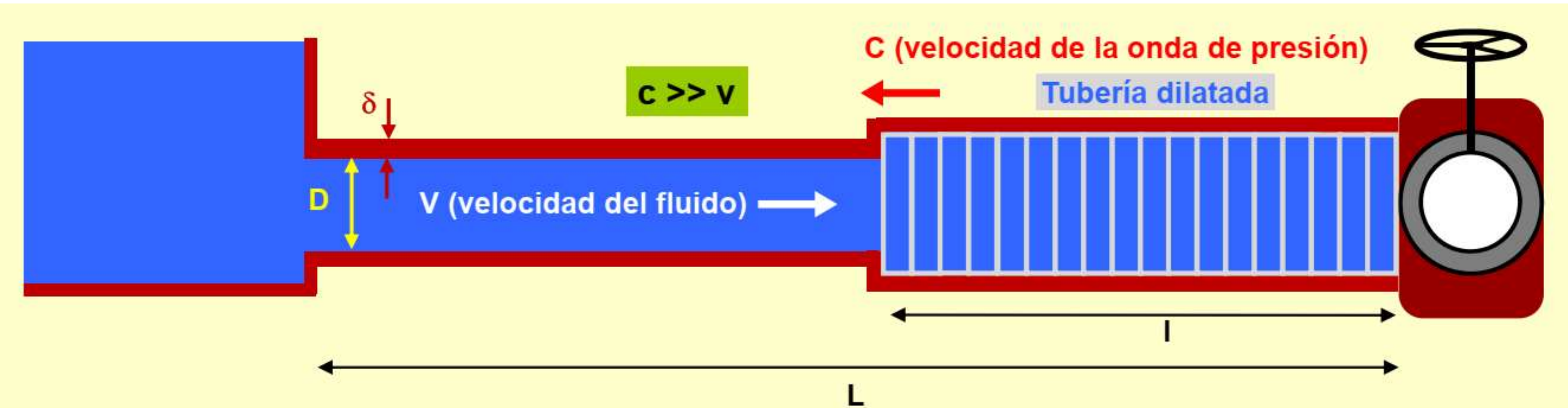
- Ing. RODRIGUEZ, Carlos
- Ing. CORREA, Gustavo
- Ing. POLISCZUK, Dario

INTRODUCCIÓN

~~Fluido incompresible.~~

~~Régimen permanente.~~

El golpe de ariete es un fenómeno ***transitorio*** y por lo tanto de ***régimen variable***, en que la tubería ya no es rígida y el líquido es ***compresible***.

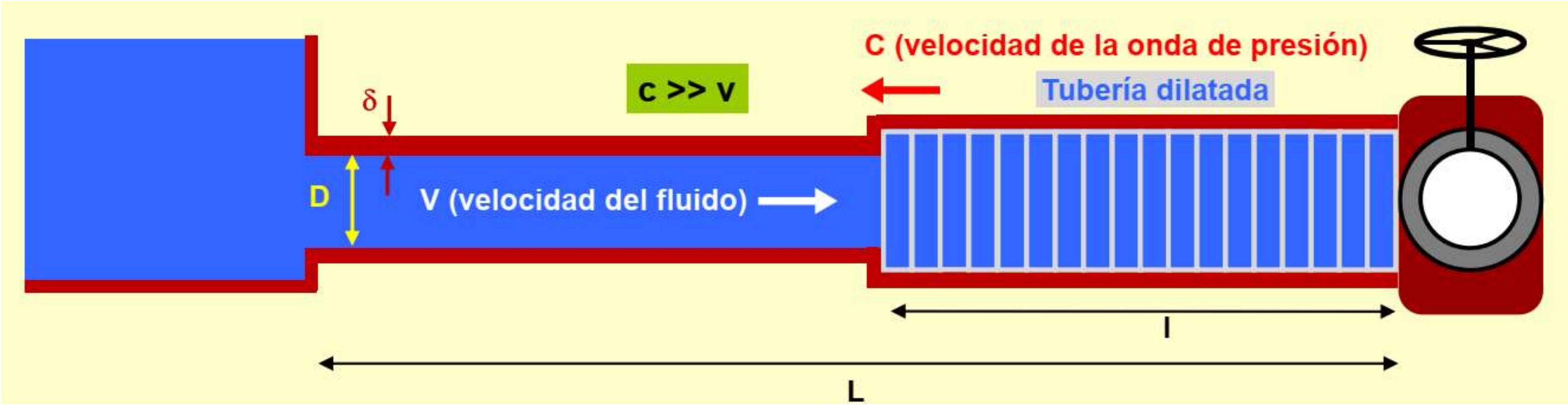


$$\boxed{C_{Aire} = 343\,\frac{m}{s}}$$

$$\boxed{C_{Agua} = 1425\,\frac{m}{s}}$$

INTRODUCCIÓN

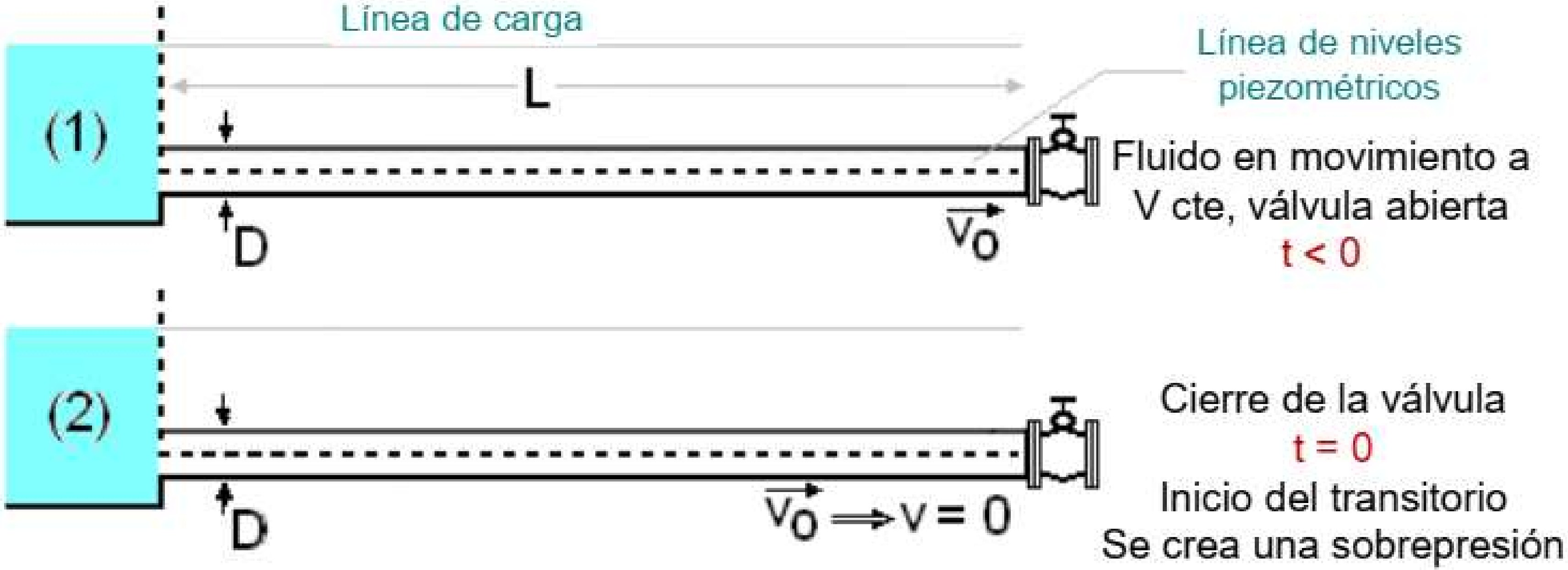
Este fenómeno se produce en los conductos al cerrar o abrir una válvula y al poner en marcha o parar una máquina hidráulica, o también al disminuir bruscamente el caudal. Un caso importante ocurre en las centrales hidroeléctricas donde se ha de reducir bruscamente el caudal suministrado a las turbinas hidráulicas acopladas a alternadores, cuando se anula la carga en el alternador.



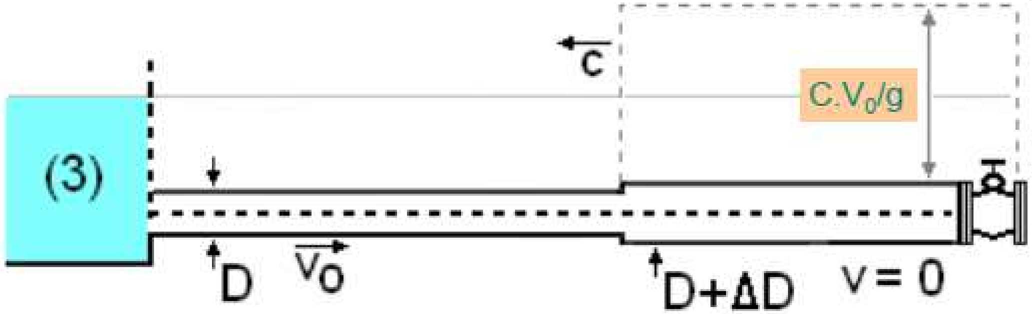
$$C_{Aire} = 343 \frac{m}{s}$$

$$C_{Agua} = 1425 \frac{m}{s}$$

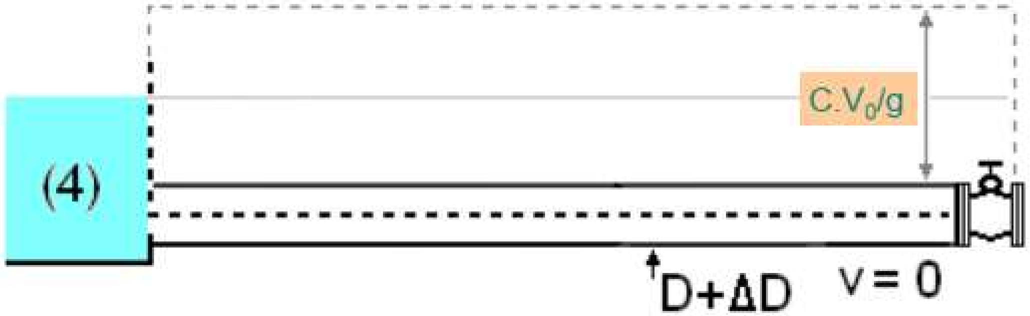
GOLPE DE ARIETE: FENÓMENO



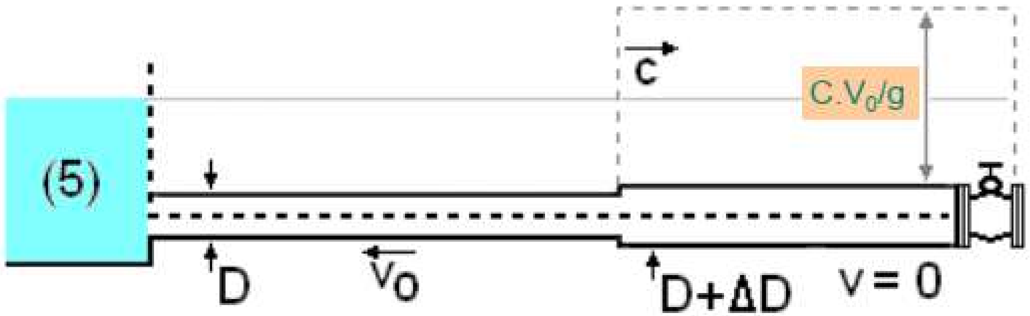
GOLPE DE ARIETE: FENÓMENO



La onda de sobrepresión
se traslada al estanque
$0 < t < L/C$

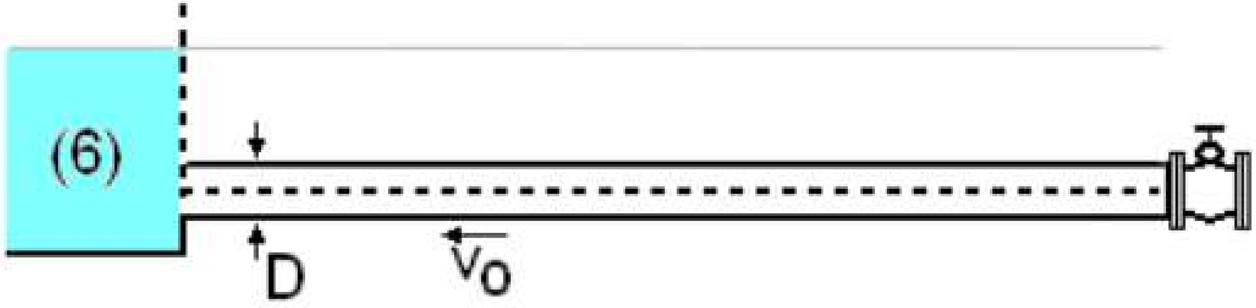


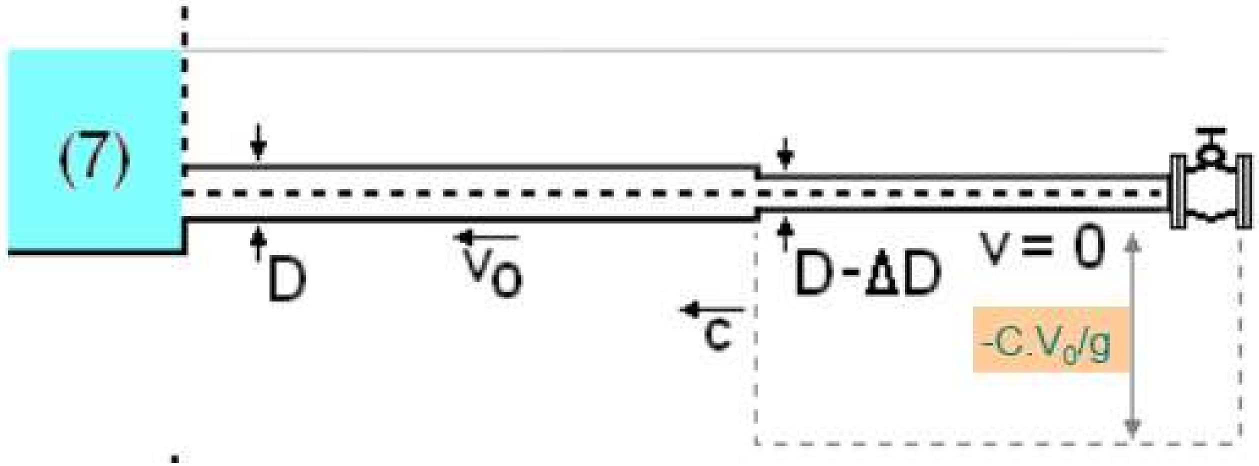
Onda (de sobre P)
llega al estanque
$t = L/C$



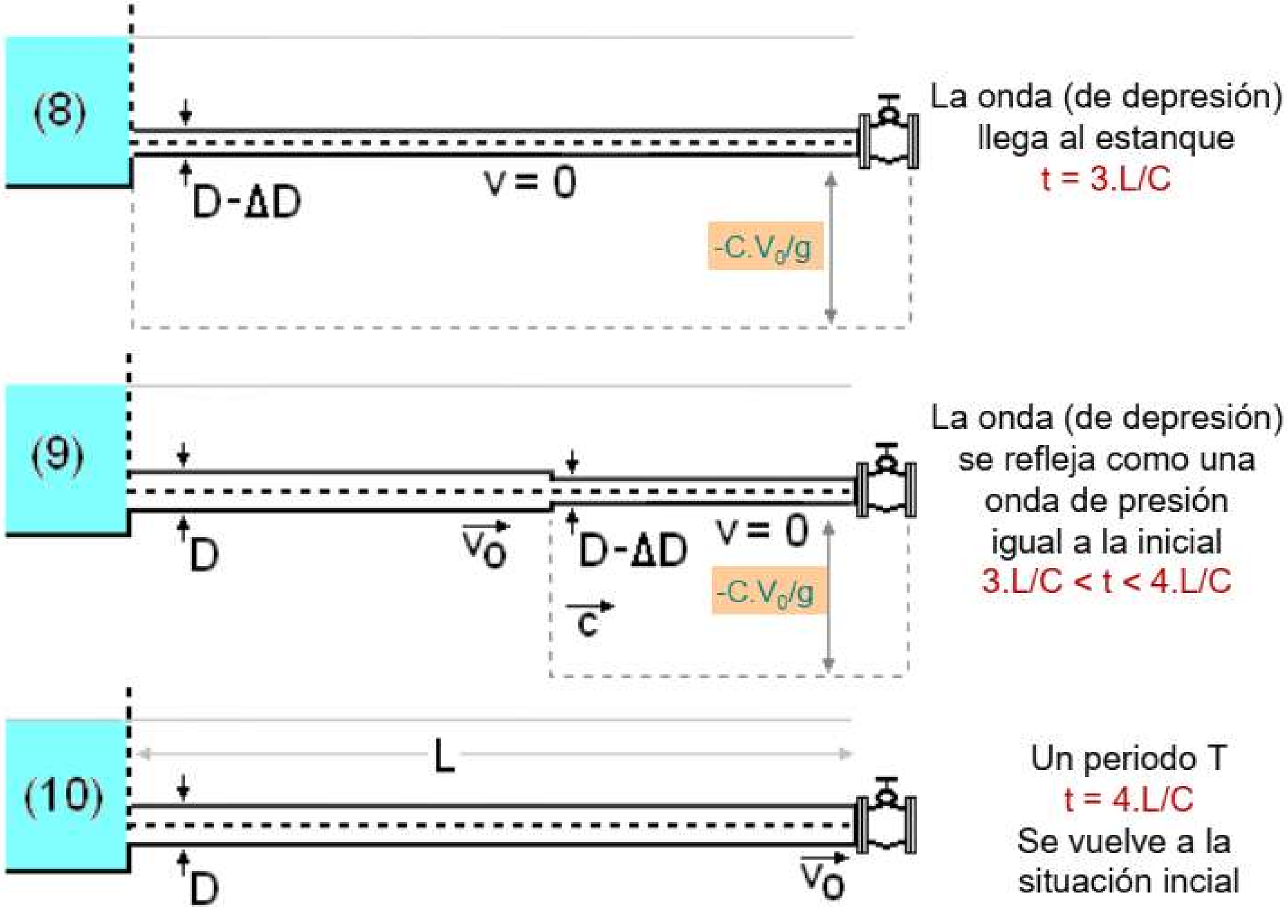
La onda (de sobre P)
se refleja en el
estanque como una
onda de P inicial
$L/C < t < 2.L/C$

GOLPE DE ARIETE: FENÓMENO





GOLPE DE ARIETE: FENÓMENO



La deformación de la tubería y la viscosidad del fluido disipan la energía y las oscilaciones se van amortiguando.

GOLPE DE ARIETE: FENÓMENO

FUERZAS DE PRESIÓN MÁXIMA O SOBREPRESIÓN

$\boldsymbol{Instant\acute{a}neo}$: $\boldsymbol{t_c = 0} \rightarrow Caso\ te\acute{o}rico$

$$\boldsymbol{R\acute{a}pido}: \boldsymbol{0 < t_c < 2t_0 = \frac{L}{C} = \frac{T}{2}} \rightarrow La\ presi\acute{o}n\ m\acute{a}xima\ es\ la\ misma\ que\ en\ el\ cierre$$

instantáneo; aunque la curva de presiones en la tubería en función del tiempo sea distinta. En el cierre rápido una onda de presión no tiene tiempo de ir al estanque, reflejarse y volver a la válvula, antes de que termine medio ciclo.

$$\boldsymbol{Lento}: \boldsymbol{t_c > 2t_0 = \frac{L}{C} = \frac{T}{2}} \rightarrow La\ presi\acute{o}n\ m\acute{a}xima\ es\ menor\ que\ en\ los\ dos\ casos$$

precedentes, porque la depresión de la onda elástica llega a la válvula antes de que se complete el medio ciclo e impide el aumento ulterior de la presión. Este último caso es el más frecuente en la práctica.

FUERZAS DE PRESIÓN MÁXIMA O SOBREPRESIÓN

Presión máxima en el cierre total o parcial instantáneo de la válvula en una tubería elástica

$$F_i = -m\frac{\Delta v}{\Delta t} \rightarrow Fuerza\ de\ inercia\ del\ fluido\ desacelerandose, donde\ \Delta t\ no\ es\ el\ tiempo\ de\ cierre\ de\ la\ válvula\ (por\ hipótesis\ t_c = 0); sino\ el\ tiempo\ finito\ que\ ha\ transcurrido\ para\ que\ una\ cierta\ masa\ m = \rho l A\ de\ fluido\ que\ ocupa\ una\ longitud\ finita\ de\ tubería\ l\ reduzca\ su\ velocidad\ un\ cierto\ valor\ finito\ \Delta v.$$

$$En\ el\ cierre\ total\ \rightarrow \Delta v = -v$$

$$En\ el\ cierre\ parcial\ \rightarrow \Delta v = v' - v$$

FUERZAS DE PRESIÓN MÁXIMA O SOBREPRESIÓN

<u>Presión máxima en el cierre total o parcial instantáneo de la válvula en una tubería elástica</u>

$$En\ el\ cierre\ total \rightarrow F_i = -\rho l A \frac{v}{\Delta t}$$

$$En\ el\ cierre\ parcial \rightarrow F_i = \rho l A \frac{v - v'}{\Delta t}$$

$$l \rightarrow longitud\ recorrida\ por\ la\ onda\ elástica\ a\ partir\ de\ la\ válvula\ en\ el\ tiempo\ \Delta t$$

$$C = \frac{l}{\Delta t} \rightarrow velocidad\ de\ propagación\ o\ celeridad\ de\ la\ onda$$

FUERZAS DE PRESIÓN MÁXIMA O SOBREPRESIÓN

Presión máxima en el cierre total o parcial instantáneo de la válvula en una tubería elástica

$$\Delta p = \frac{F_i}{A}$$

Fórmula de Joukowski

$$\Delta p = \rho c v \rightarrow \textit{Sobrepresión en cierre instantáneo total de la válvula}$$

$$\Delta p = \rho c (v - v') \rightarrow \textit{Sobrepresión en cierre instantáneo parcial de la válvula}$$

FUERZAS DE PRESIÓN MÁXIMA O SOBREPRESIÓN

Fórmula de Joukowski para la celeridad de la onda de presión en una tubería

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E_0}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_0 D}{E\delta}}}$$

$c \rightarrow$ *Celeridad de la onda elástica del fluido en la tubería,* m/s.

$E_0 \rightarrow$ *Módulo de elasticidad de volumen de fluido,* N/m^2.

$\rho \rightarrow$ *Densidad del fluido,* kg/m^3.

$D \rightarrow$ *Diámetro de la tubería,* m.

$E \rightarrow$ *Módulo de elasticidad del material de la tubería,* N/m^2.

$\delta \rightarrow$ *Espesor de la tubería,* m.

FUERZAS DE PRESIÓN MÁXIMA O SOBREPRESIÓN

$$Celeridad\ de\ la\ onda\ elástica\ en\ el\ agua.$$

$$c_0 = \sqrt{\frac{E_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{2{,}03x10^9\,\frac{N}{m^2}}{1000\,\frac{kg}{m^3}}} = 1425\,\frac{m}{s}$$

FUERZAS DE PRESIÓN MÁXIMA O SOBREPRESIÓN

<u>Presión máxima en el cierre lento uniforme total de una válvula en una tubería rígida</u>

$$F_i - m\frac{dv}{dt} = -\rho l A\frac{dv}{dt}$$

$$\Delta p = \rho l\frac{dv}{dt} \rightarrow Movimiento\ uniforme \rightarrow \Delta p = \rho l\frac{0-v}{t_c}$$

$$\Delta p = \frac{\rho l v}{t_c} \rightarrow tubería\ rígida, cierre\ lento\ y\ uniforme$$

Sobrepresión en cierre lento de una válvula

$$\Delta p = k\frac{\rho l v}{t_c} \rightarrow tubería\ elástica, cierre\ lento, k = 1\ a\ 2$$

FUERZAS DE PRESIÓN MÁXIMA O SOBREPRESIÓN

<u>Ejercicio</u>:

Al final de una tubería de acero $\left(E = 2 \times 10^{7}\ {}^{N}/_{cm^2}\right)$ *de diámetro interior* $D = 600mm$ *y espesor* $\delta = 10mm$, *se encuentra una válvula. La velocidad del agua en la tubería es* $v = 2{,}50\ {}^{m}/_{s}$. *La válvula cierra instantáneamente.*

Calcular:

a) La velocidad de propagación de la onda de presión.

b) La sobrepresión producida por el golpe de ariete.

Dato: Módulo de elasticidad del agua, $E = 2{,}03 \times 10^{5}\ {}^{N}/_{cm^2}$

CAVITACIÓN

A una presión determinada, la temperatura a la cual una sustancia pura cambia de fase se conoce como *Temperatura de Saturación* "T_{sat}". De manera semejante, a una temperatura dada, la presión a la cual una sustancia pura cambia de fase se llama *Presión de Saturación* "P_{sat}".

La *Presión de Vapor* "P_v" de una sustancia pura se define como la presión ejercida por su vapor en equilibrio de fases con su liquido a una temperatura dada. La P_v es una propiedad de la sustancia pura y resulta ser igual a la P_{sat} del liquido.

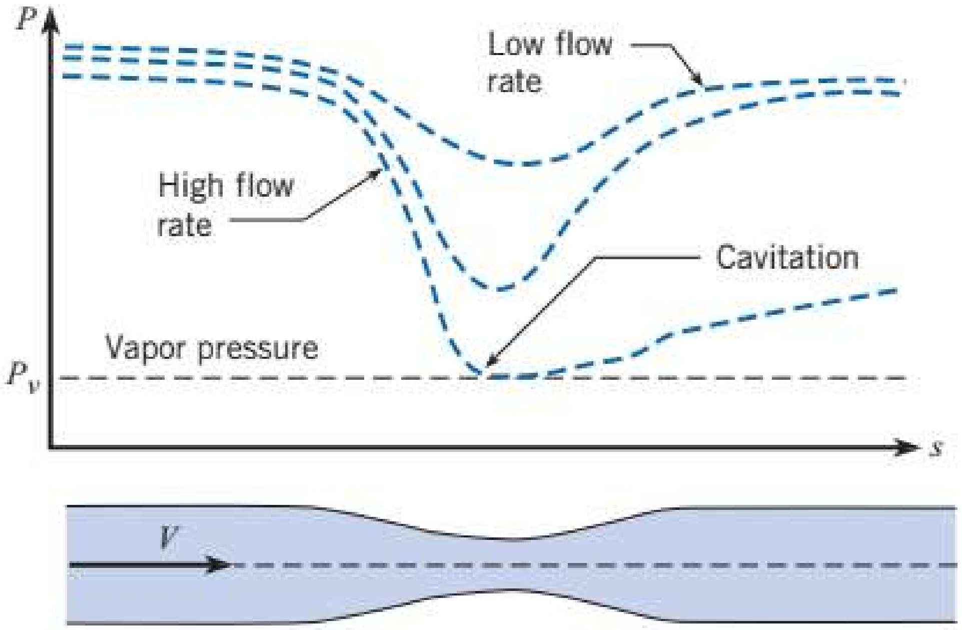
Presión de saturación (o de vapor) del agua a varias temperaturas

Temperatura T, °C	Presión de saturación P_{sat}, kPa
−10	0.260
−5	0.403
0	0.611
5	0.872
10	1.23
15	1.71
20	2.34
25	3.17
30	4.25
40	7.38
50	12.35
100	101.3 (1 atm)
150	475.8
200	1 554
250	3 973
300	8 581

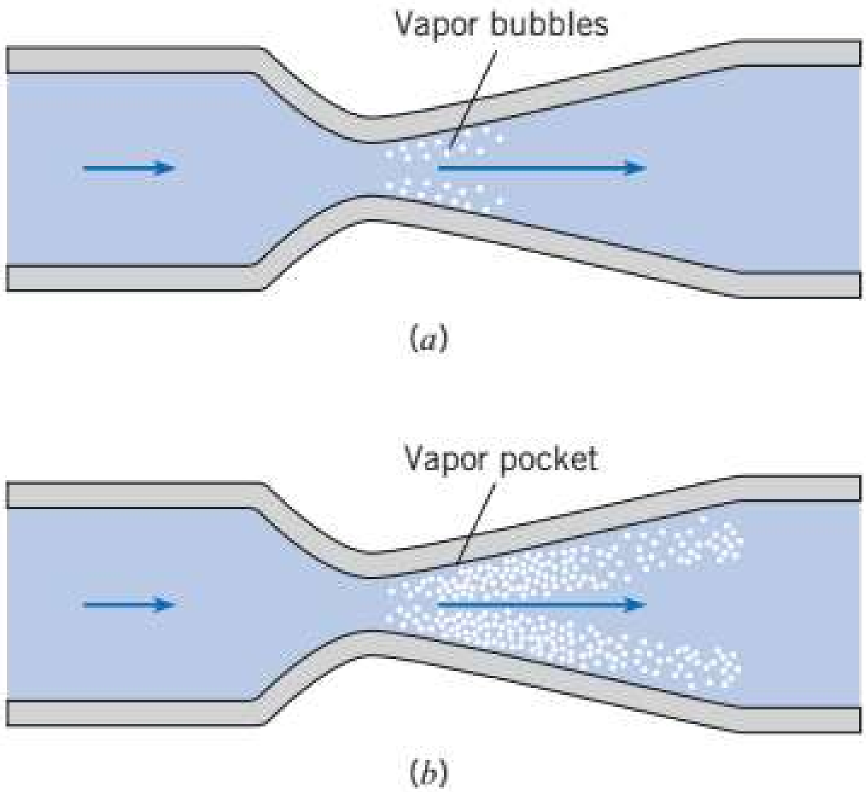
CAVITACIÓN

Por efecto de la disminución de la presión, o el incremento de la temperatura, se producen burbujas de vapor que terminan colapsando en nuevas condiciones de presión y temperatura, originando incrementos puntuales de presión, de tal magnitud que provocan la erosión de los sólidos que están en contacto con el líquido (erosión por cavitación).

CAVITACIÓN

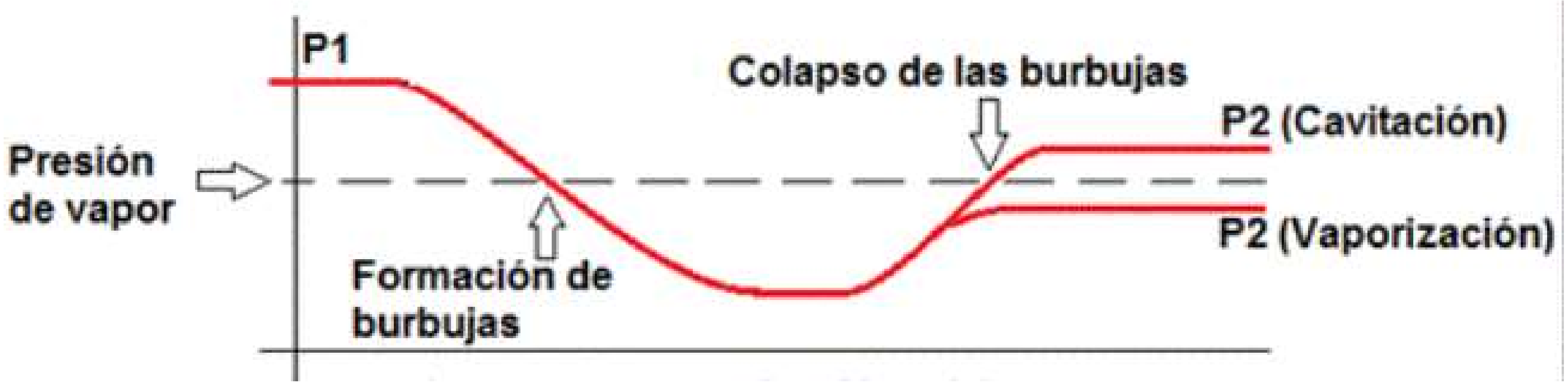


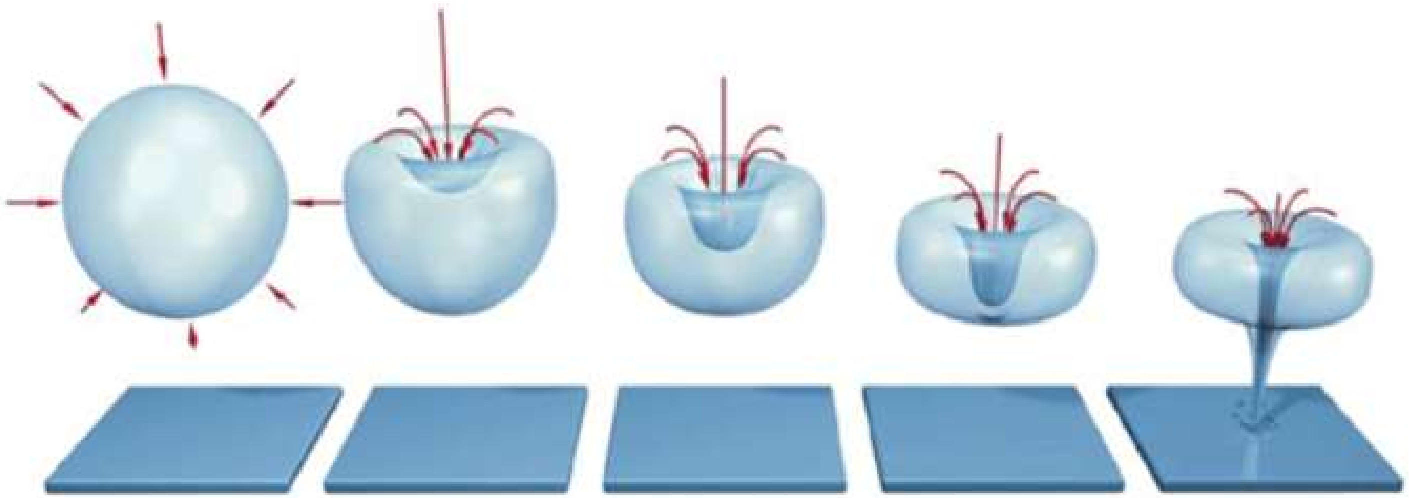
P
Low flow
rate
High flow
rate
Cavitation
Vapor pressure
P_v
s
V



Vapor bubbles
(a)
Vapor pocket
(b)

CAVITACIÓN


P1
Colapso de las burbujas
P2 (Cavitación)
Presión
de vapor
P2 (Vaporización)
Formación de
burbujas



CAVITACIÓN

Tipos de daño

1) Erosión.
2) Ruidos.
3) Vibraciones.

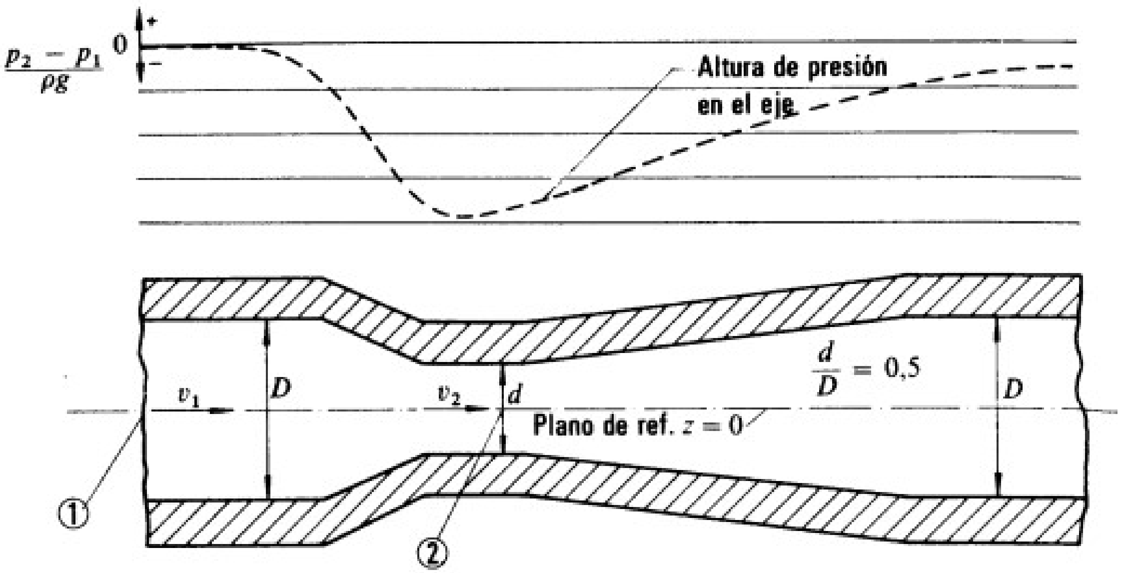
Tener en cuenta:

1) Por comodidad se trabaja con presiones absolutas.
2) Las presiones calculadas en cada caso debe ser mayor o igual a la presión de saturación, si esto no sucede aparece el fenómeno de cavitación.

$$\boxed{p \geq p_{sat}}$$

CAVITACIÓN

Tubo de Venturi



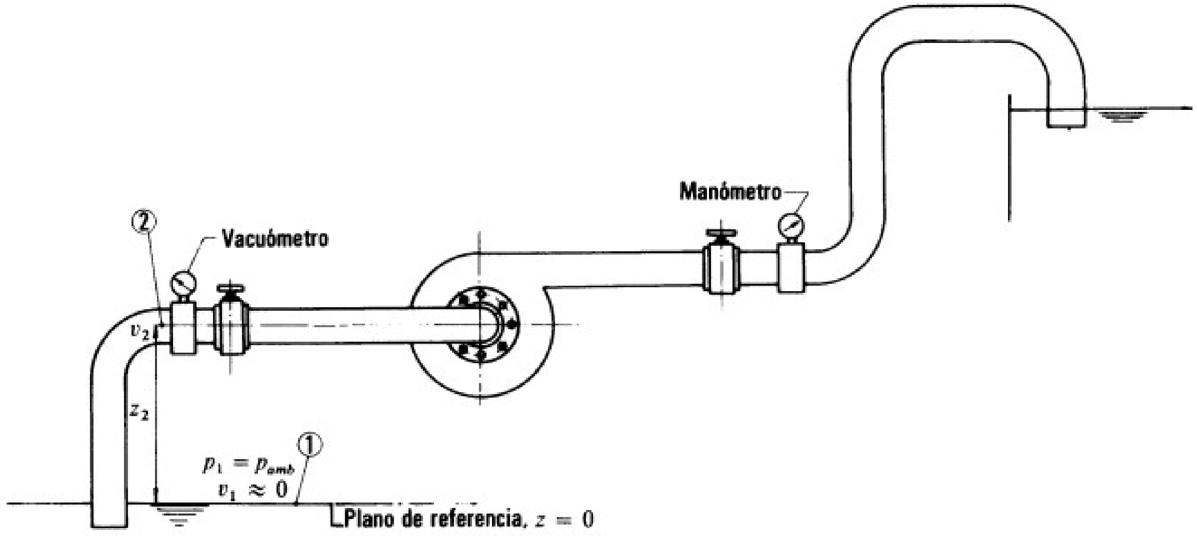
$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 - H_{r1-2} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

$$Considerando$$
$$z_1 = z_2$$

$$\boxed{\frac{p_2}{\gamma} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} - H_{r1-2}}$$

CAVITACIÓN

Bomba centrífuga



$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 - H_{r1-2} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

$$Considerando$$

$$p_1 = p_{atm}$$

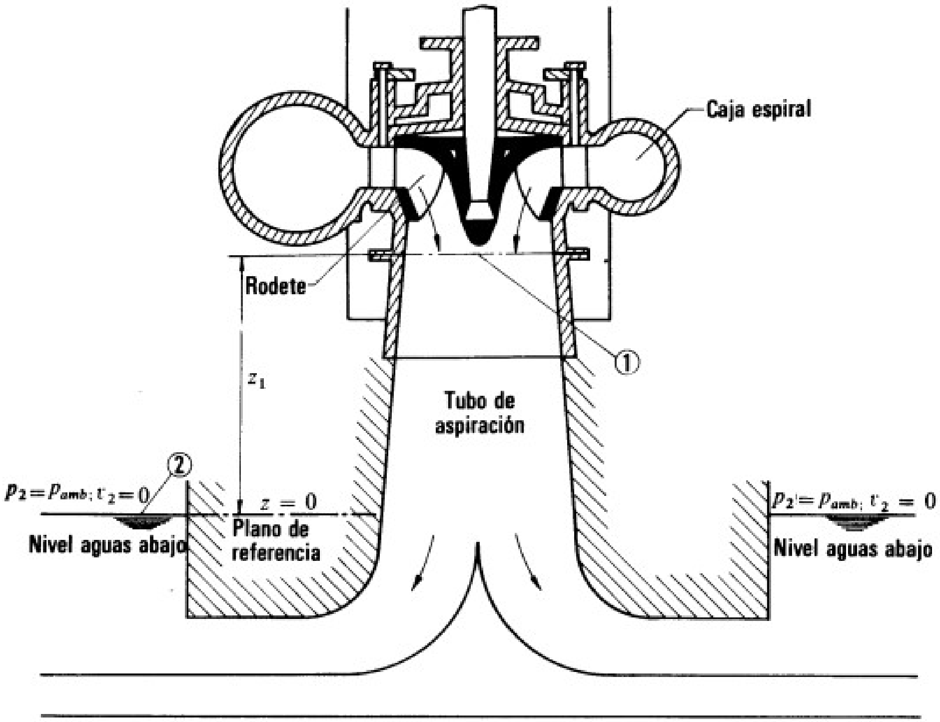
$$z_1 = 0$$

$$v_1 \approx 0$$

$$\boxed{\boldsymbol{\frac{p_2}{\gamma} = -\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_{atm}}{\gamma} - z_2 - H_{r1-2}}}$$

CAVITACIÓN

Turbina de reacción



$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 - H_{r1-2} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

$$Considerando$$

$$p_2 = p_{atm}$$

$$z_2 = 0$$

$$v_2 \approx 0$$

$$\boxed{\frac{p_1}{\gamma} = \frac{p_{atm}}{\gamma} - z_1 - \frac{v_1^2}{2g} + H_{r1-2}}$$

CAVITACIÓN

Existirá un mayor riesgo de cavitación, cuando:

1) Cuando menor sea la p_{atm}, es decir la presión barométrica.
2) Cuando mayor sea la velocidad creada en la zona de depresión o cuando el diámetro de la garganta sea menor (Venturi).
3) Cuando mayor sea la altura z_2 ó z_1, según corresponda.
4) Cuando mayor o menor sean las pérdidas H_{r1-2}, según corresponda.

CAVITACIÓN

Una bomba centrífuga aspira agua de un depósito por una tubería de 100 m de longitud y 200mm de diámetro. El eje de la bomba se encuentra 4 m por encima del nivel de agua en el depósito. La bomba impulsa por una tubería de 100mm de diámetro y 1000 m de longitud a otro depósito, cuyo nivel se encuentra 50 m por encima del nivel de depósito de aspiración. El coeficiente λ de pérdidas primarias de las dos tuberías es de 0,025. Todas las pérdidas secundarias (incluso la debida a la entrada del agua en el depósito de impulsión) se han tenido en cuenta en el cómputo de la longitud de la tubería, que ha de interpretarse coma longitud equivalente. La temperatura del agua es de 10°C y la presión atmosférica 1 bar.

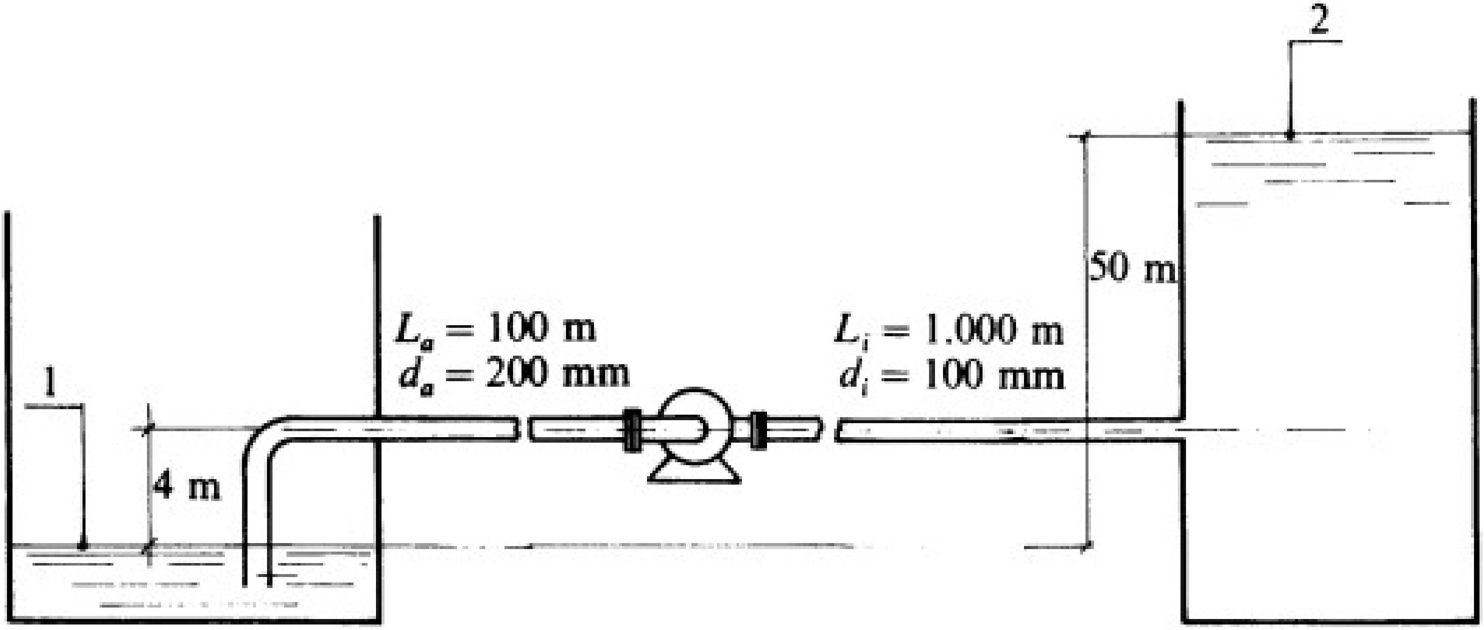
Calcular:

a) *Potencia que la bomba debe comunicar a la corriente para bombear un caudal de* $8\ {}^{l}/_{s}$.

b) *Máximo caudal que puede bombearse con la instalación.*

c) *Máximo caudal que puede bombearse con la instalación anterior, pero sustituyendo la tubería de aspiración por otra de 100mm.*

CAVITACIÓN



$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 - H_{r1-2} + H_B = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

$$\frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_2}{\rho g} = 0\ ;\ \frac{c_1^2}{2g} \cong 0\ ;\ \frac{c_2^2}{2g} \cong 0$$

CAVITACIÓN

$$H_B = z_2 - z_1 + H_{r1-2}$$

$$H_{r_{1-2}} = \lambda\left(\frac{L_a}{D_a}\frac{v_a^2}{2g} + \frac{L_i}{D_i}\frac{v_i^2}{2g}\right)$$

$$v_a = v_i\left(\frac{D_i}{D_a}\right)^2 \rightarrow \frac{v_a^2}{2g} = \frac{v_i^2}{2g}\left(\frac{D_i}{D_a}\right)^4$$

$$v_a = \left(\frac{100\cancel{mm}}{200\cancel{mm}}\right)^4 \cdot \frac{v_i^2}{2g} = \left(\frac{1}{2}\right)^4 \cdot \frac{v_i^2}{2g} = \frac{1}{16}\cdot\frac{v_i^2}{2g}$$

$$H_{r_{1-2}} = \lambda\frac{v_i^2}{2g}\left(\frac{L_a}{D_a}\frac{1}{16} + \frac{L_i}{D_i}\right) = 0{,}025\left(\frac{100}{0{,}200}\frac{1}{16} + \frac{1000}{0{,}100}\right)\frac{v_i^2}{2g}$$

$$H_{r_{1-2}} = 250{,}781\frac{v_i^2}{2g}$$

CAVITACIÓN

$$v_i = \frac{4Q}{\pi D^2} \rightarrow \frac{v_i^2}{2g} = \frac{16 \cdot Q^2}{2g\pi^2 D_i^4} = \frac{16 \cdot \left(0{,}008\,\frac{m^3}{s}\right)^2}{2 \cdot 9{,}81\,\frac{m}{s} \cdot \pi^2 \cdot (0{,}1m)^4} = 0{,}0529m$$

$$H_{r_{1-2}} = 250{,}781 \cdot 0{,}0529m = 13{,}262\ m$$

$$H_B = 50 + 13{,}262m = 63{,}262\ m$$

$$P = Q\rho g H_B 10^{-3} = 0{,}008 \cdot 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 63{,}262 \cdot 10^{-3} =$$

$$\boldsymbol{P = 4{,}965kW}$$

CAVITACIÓN

b) Calculemos la presión absoluta a la entrada de la bomba. p_E*, escribiendo la ecuación de Bernoulli entre 1 y E en presiones absolutas.*

$$\frac{p_1}{\gamma}+\frac{c_1^2}{2g}+z_1-H_{r1-E}=\frac{p_E}{\gamma}+\frac{c_E^2}{2g}+z_E$$

$$\frac{p_1}{\gamma}=\frac{10^5}{1000m\cdot 9{,}81\,\frac{m}{s}}=10{,}194m\,;\frac{c_1^2}{2g}=0$$

$$z_E-z_1=4m$$

$$H_{r_{1-E}}=\lambda\frac{L_a}{d_a}\frac{c_E^2}{2g}$$

$$c_E=\frac{4Q}{\pi d_a^2}\rightarrow\frac{c_E^2}{2g}=\frac{16Q^2}{2g\pi^2 d_a^4}=51{,}642Q^2$$

CAVITACIÓN

b) Calculemos la presión absoluta a la entrada de la bomba. p_E*, escribiendo la ecuación de Bernoulli entre 1 y E en presiones absolutas.*

$$H_{r_{1-E}} = \lambda \frac{L_a}{D_a} \frac{c_E^2}{2g} = \frac{0{,}025 \cdot 100 \cdot 51{,}642}{0{,}200} \cdot Q^2 = 645{,}522 Q^2$$

$$\frac{p_E}{\rho g} = 10{,}19 - 4 - 645{,}522 Q^2 - 51{,}642 Q^2 = 6{,}194 - 697{,}164 Q^2$$

Para t=0°C, según tabla que se indica a continuación $p_s = 0{,}012270\ bar$.

El caudal máximo es el que hará:

$$\left(\frac{p_E}{\rho g}\right)_{min} = \frac{p_s}{\rho g} = \frac{0{,}012270 \cdot 10^5}{1000 \cdot 9{,}81} = 0{,}1251 m$$

CAVITACIÓN

PRESION DE SATURACION p_s DEL VAPOR DE AGUA A DIVERSAS TEMPERATURAS, t_s

t_s (°C)	p_s (bar)	t_s (°C)	p_s (bar)
63	0,2286	85	0,5780
64	0,2391	86	0,6011
65	0,2501	87	0,6249
66	0,2615	88	0,6495
67	0,2733	89	0,6749
68	0,2856	90	0,7011
69	0,2984	91	0,7281
70	0,3116	92	0,7561
71	0,3253	93	0,7849
72	0,3396	94	0,8146
73	0,3543	95	0,8453
74	0,3696	96	0,8769
75	0,3855	97	0,9094
76	0,4019	98	0,9430
77	0,4189	99	0,9776
78	0,4365	100	1,0133
79	0,4547	101	1,0500
80	0,4736	102	1,0878
81	0,4931	103	1,1267
82	0,5133	104	1,1668
83	0,5342	105	1,2080
84	0,5557		

CAVITACIÓN

Se tiene pues:

$$Q = \sqrt{\frac{6{,}194 - 0{,}1251}{697{,}164}} = \mathbf{0{,}0933}\,\frac{\boldsymbol{m^3}}{\boldsymbol{s}}$$

c) Si la tubería de aspiración es de 100mm, se tiene:

$$\frac{c_E^2}{2g} = \frac{16Q^2}{2g\pi^2 d_a^4} = 826{,}269Q^2$$

$$H_{r_{1-E}} = \frac{0{,}025 \cdot 100 \cdot 826{,}269}{0{,}100} \cdot Q^2 = 20656{,}7Q^2$$

$$0{,}1254 = 6{,}19 - 21483Q_{máx}^2$$

$$Q_{máx} = \sqrt{\frac{6{,}19 - 0{,}1251}{21483}} = \mathbf{0{,}0168}\,\frac{\boldsymbol{m^3}}{\boldsymbol{s}}$$