MECÁNICA DE LOS FLUIDOS Y MÁQUINAS

UNIDAD N°6: Golpe de ariete y Cavitación

Docentes:

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

GOLPE DE ARIETE

- Introducción
- Golpe de ariete: fenómeno
- Fuerzas de presión máxima o sobrepresión
- Como mitigar el impacto

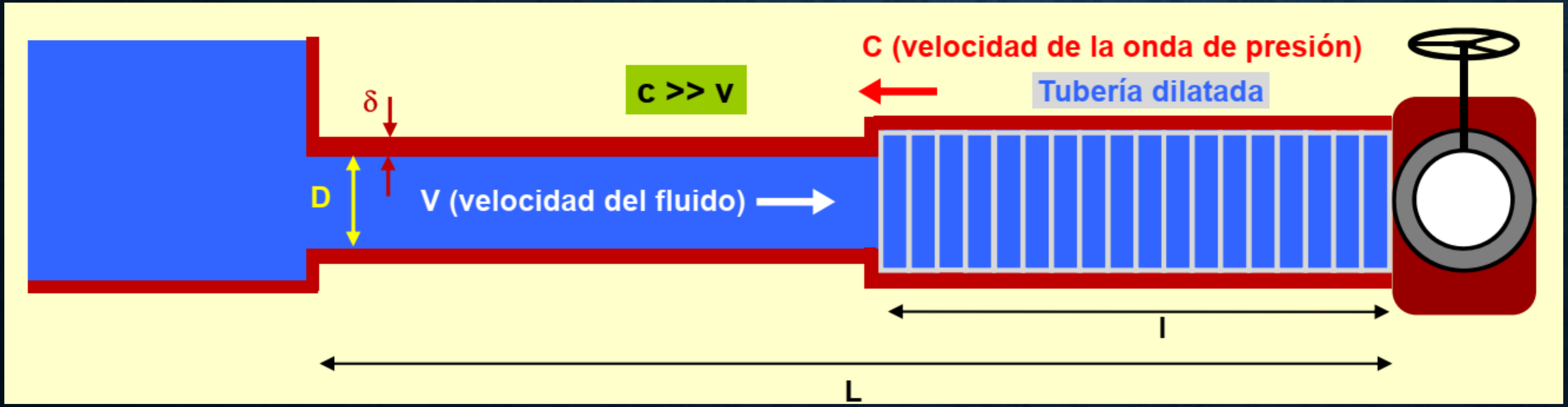
INTRODUCCIÓN

~~Fluido incompresible.~~

~~Régimen permanente.~~

➡

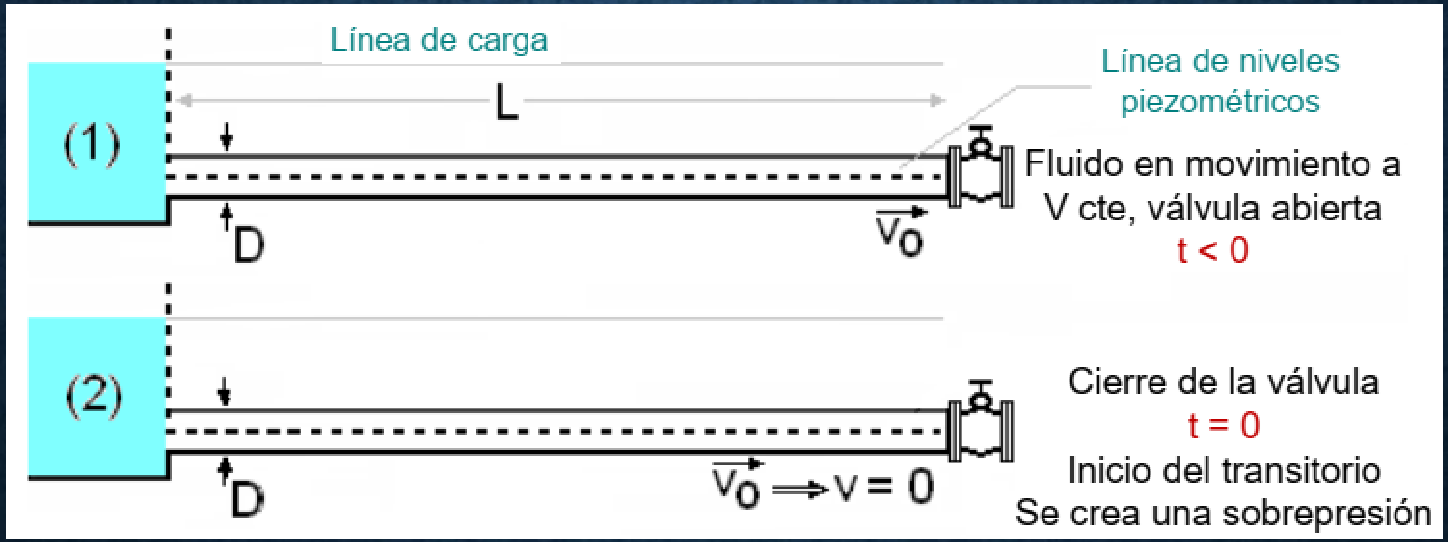
El golpe de ariete es un fenómeno ***transitorio*** y por lo tanto de ***régimen variable***, en que la tubería ya no es rígida y el líquido es ***compresible***.



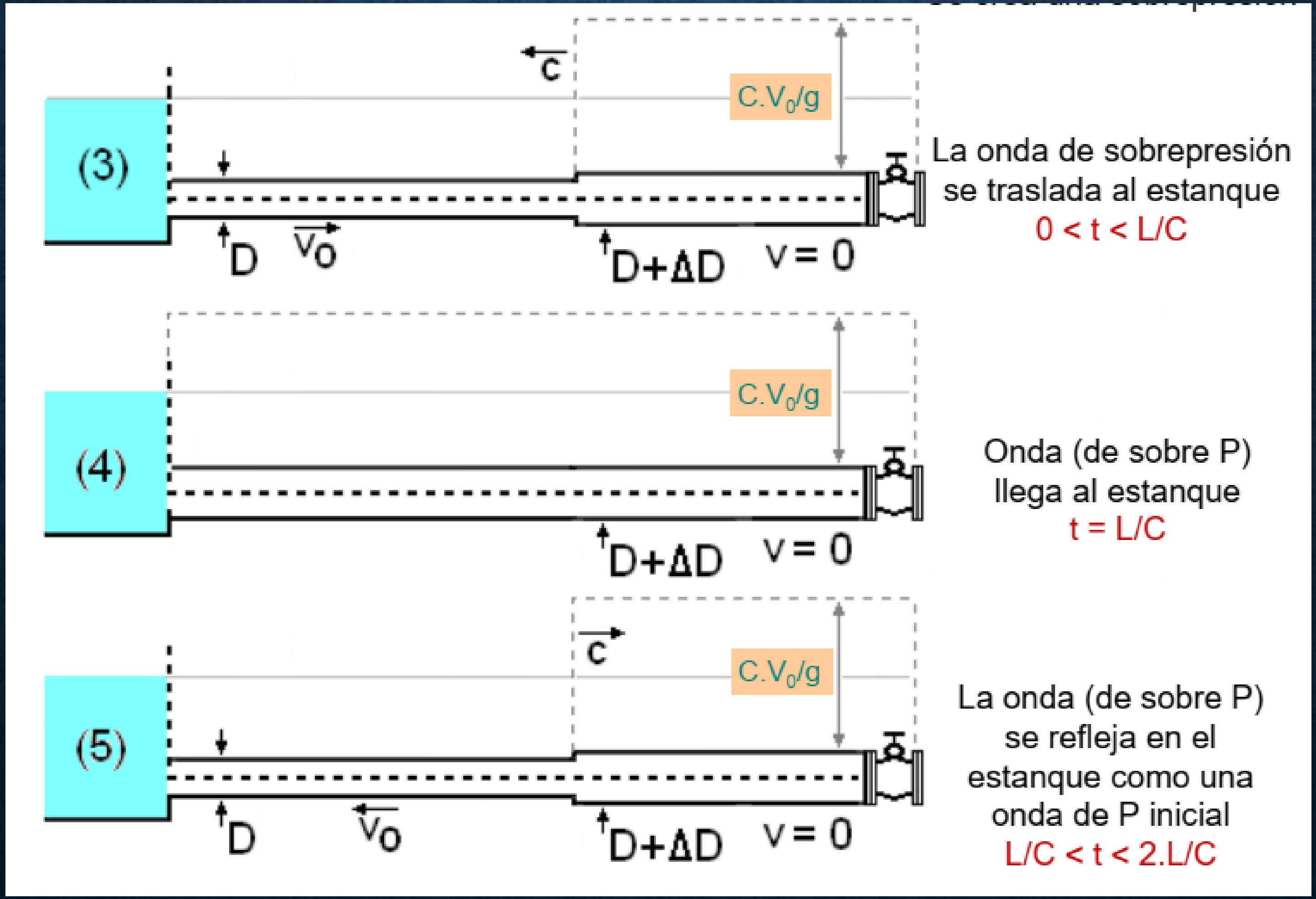
$$\boxed{C_{Aire} = 343\,\frac{m}{s}}$$

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

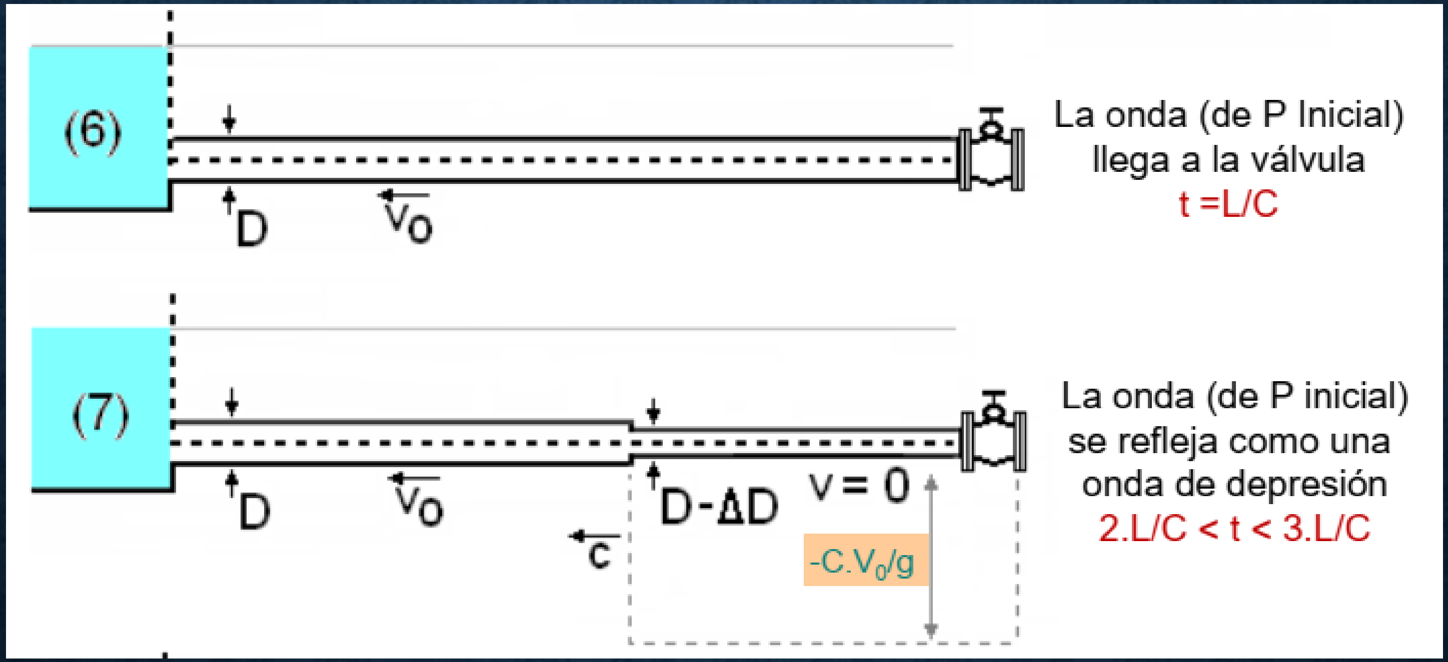
GOLPE DE ARIETE: FENÓMENO



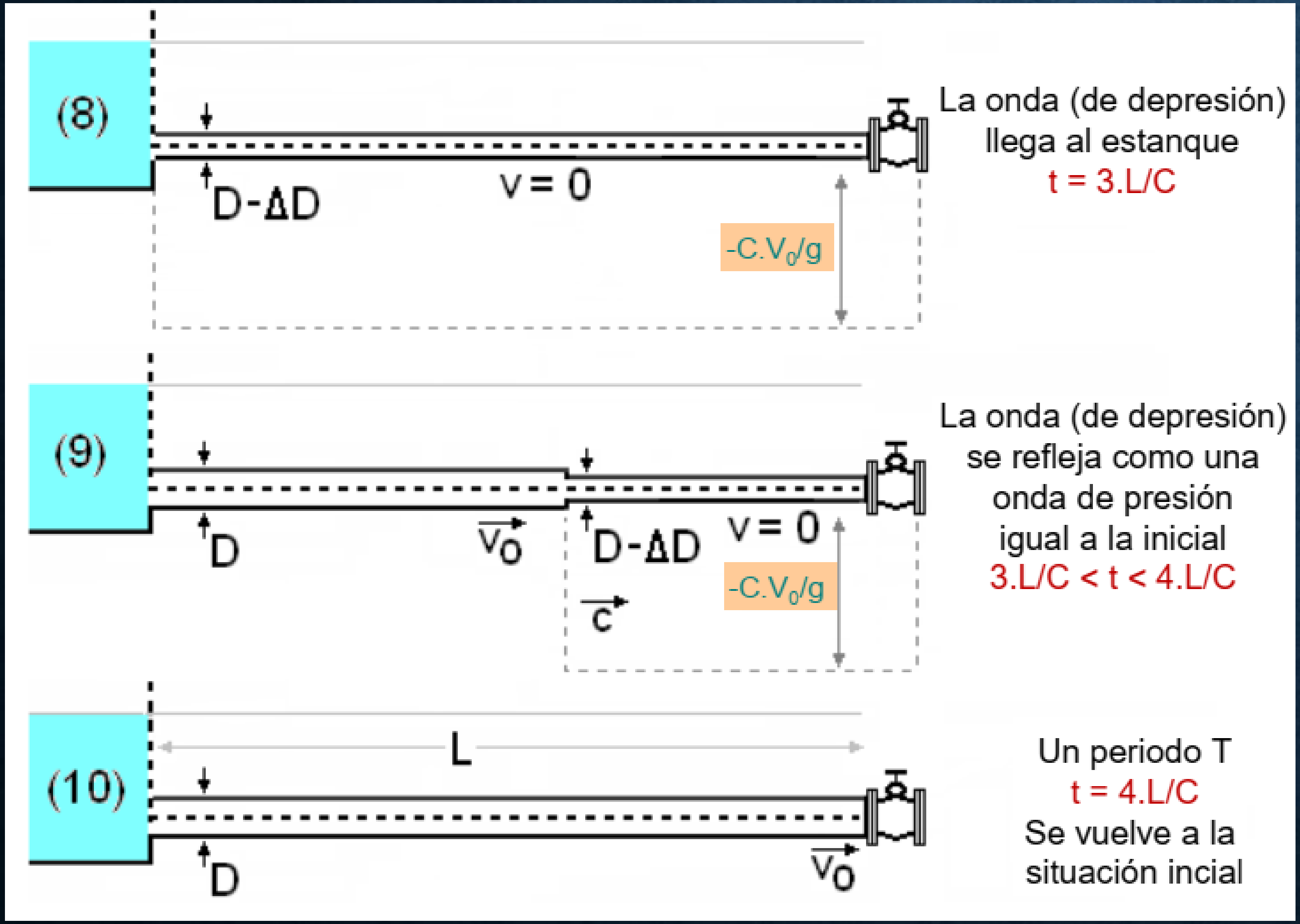
GOLPE DE ARIETE: FENÓMENO



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

$\boldsymbol{Instantáneo}$: $\boldsymbol{t_c = 0} \rightarrow$ *Caso teórico*

$$\boldsymbol{Rápido}: \boldsymbol{0 < t_c < 2t_0 = \frac{L}{C} = \frac{T}{2}} \rightarrow \textit{La presión máxima es la misma que en el cierre}$$

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.

$$\boldsymbol{Lento}: \boldsymbol{t_c > 2t_0 = \frac{L}{C} = \frac{T}{2}} \rightarrow \textit{La presión máxima es menor que en los dos casos}$$

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

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

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

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

FUERZAS DE PRESIÓN MÁXIMA O SOBREPRESIÓN

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

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

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

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

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

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

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

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

FUERZAS DE PRESIÓN MÁXIMA O SOBREPRESIÓN

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

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

$c \rightarrow Celeridad\ de\ la\ onda\ elástica\ del\ fluido\ en\ la\ tubería, {}^{m}/{}_{s}.$

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

$\rho \rightarrow Densidad\ del\ fluido, {}^{kg}/{}_{m^3}.$

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

$E_0 \rightarrow Módulo\ de\ elasticidad\ del\ material\ de\ la\ tubería, {}^{N}/{}_{m^2}.$

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

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

Presión máxima en el cierre lento uniforme total de una válvula en una tubería rígida

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

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

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

FUERZAS DE PRESIÓN MÁXIMA O SOBREPRESIÓN

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.

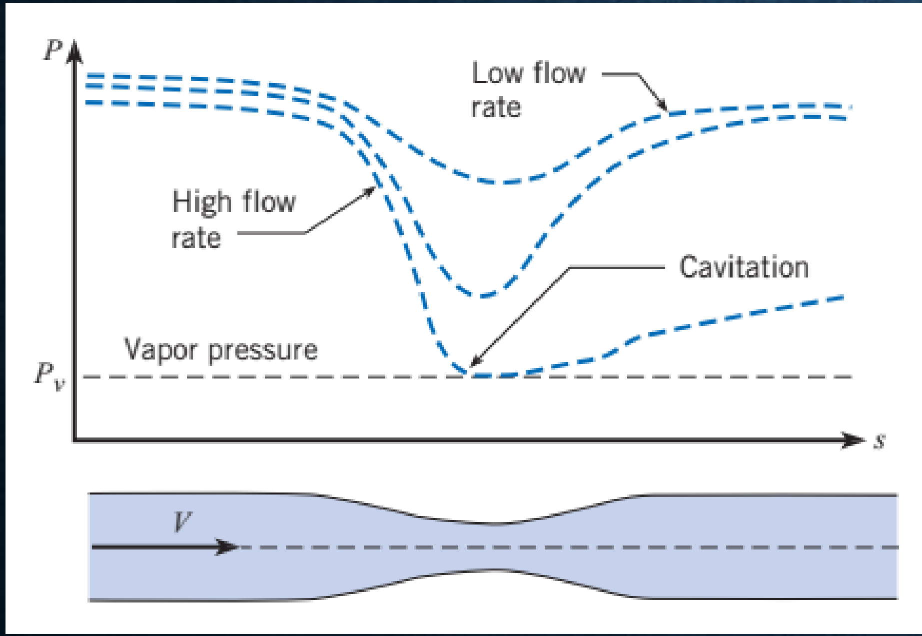
Presión de saturación (o de vapor) del agua a varias temperaturas

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

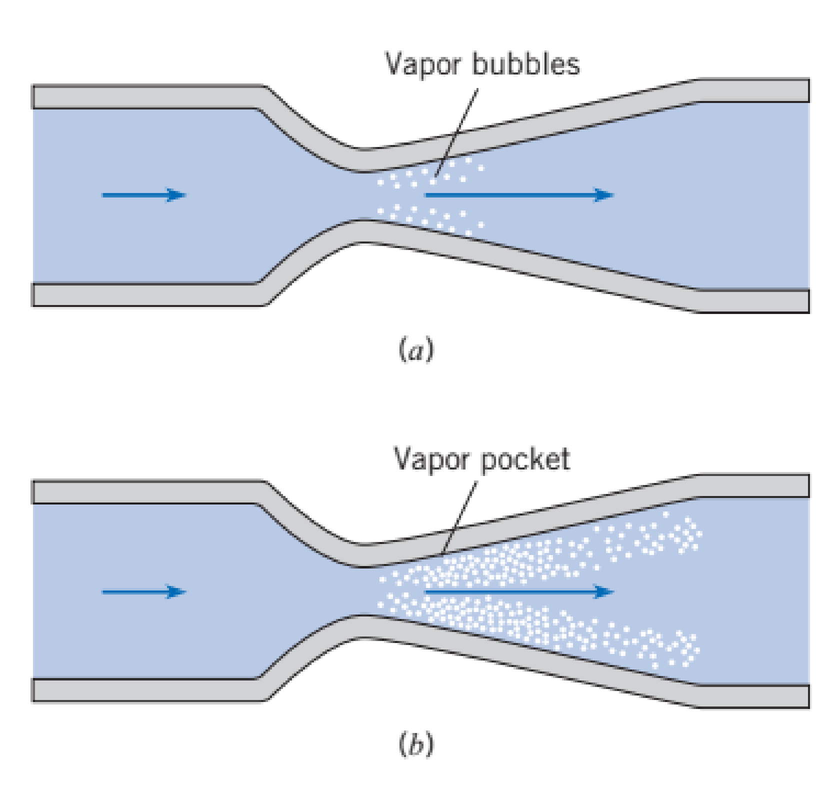
CAVITACIÓN

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

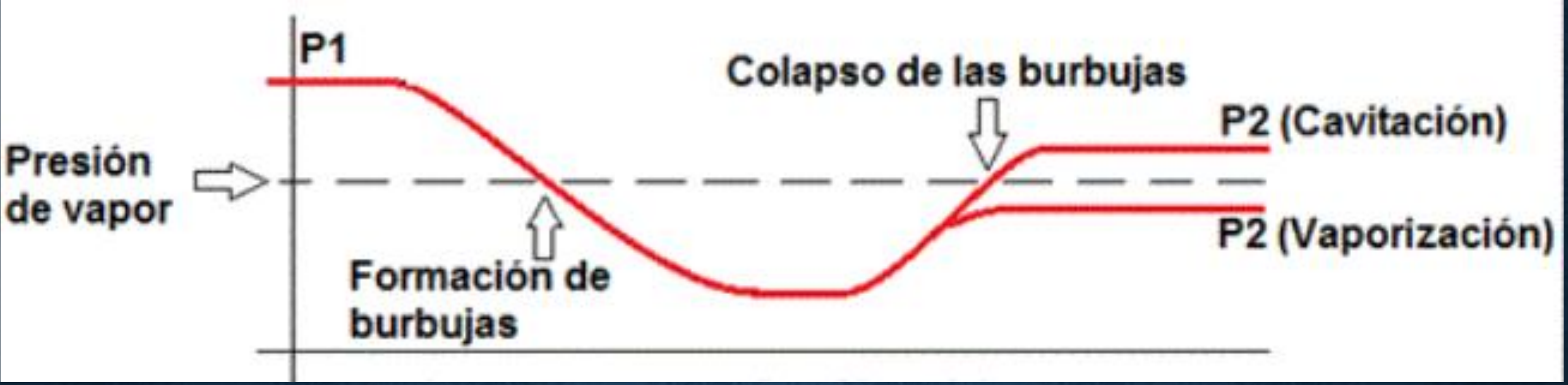


P
Low flow
rate
High flow
rate
Cavitation
Vapor pressure
P_v
s
V

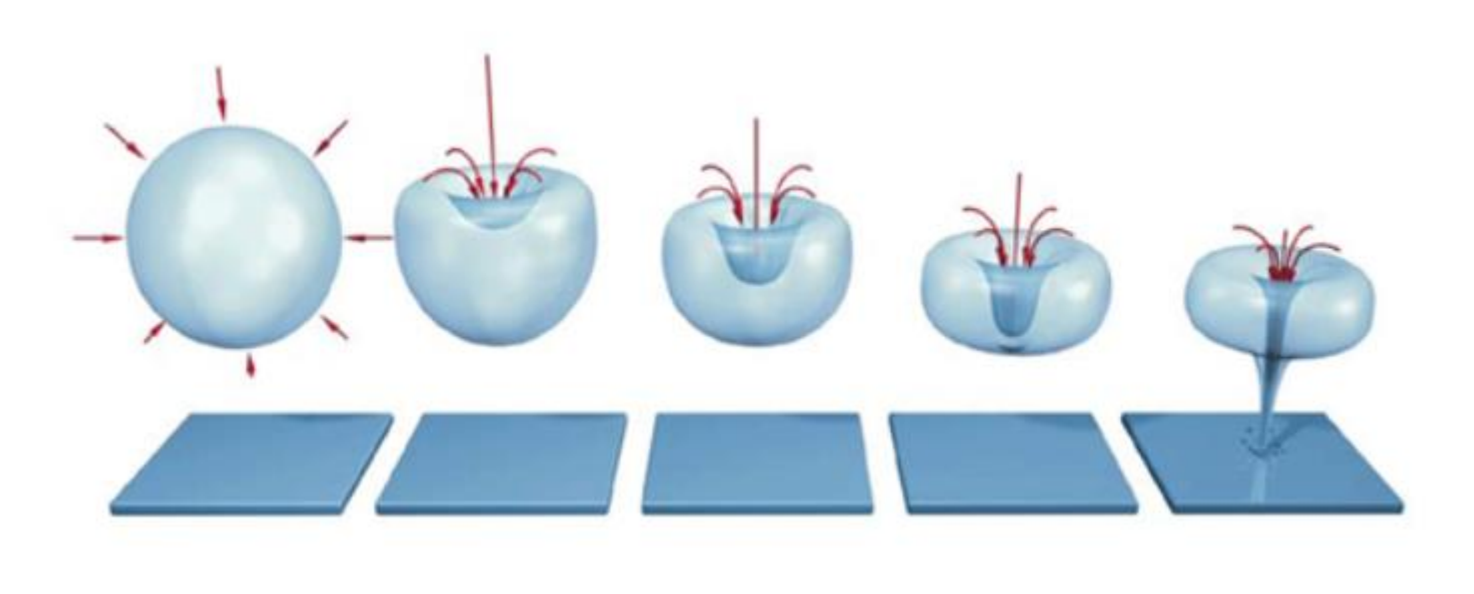


Vapor bubbles
(a)
Vapor pocket
(b)

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.

CAVITACIÓN

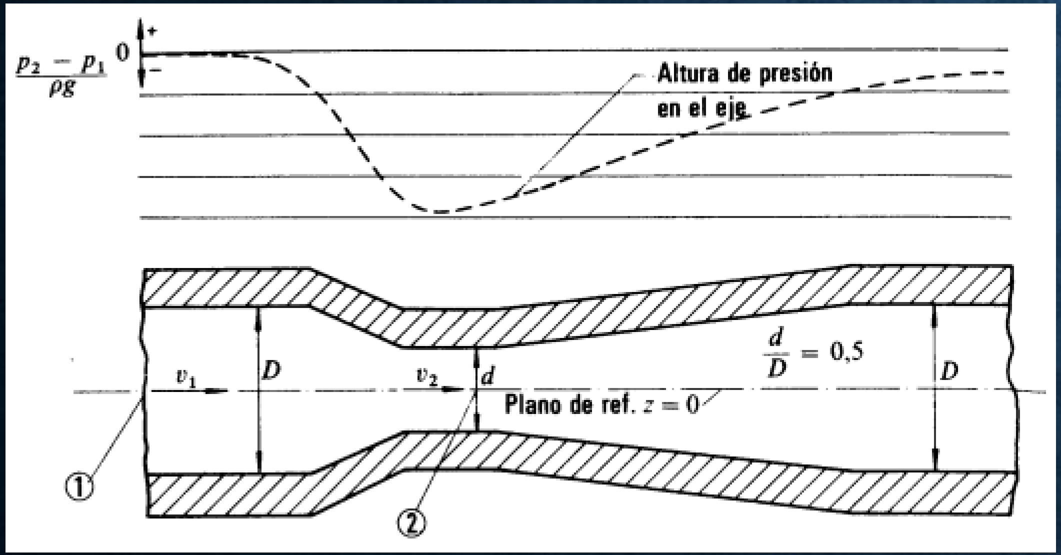
Tener en cuenta:

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



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

$$Considerando$$

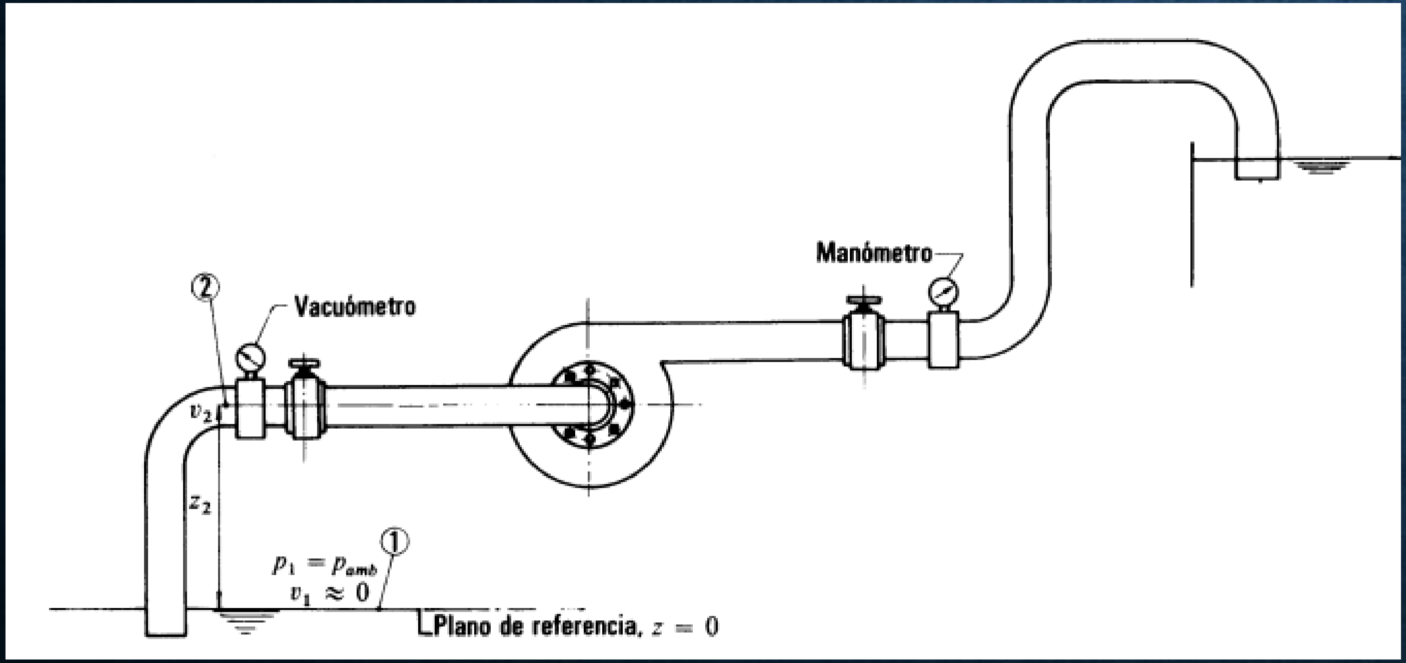
$$z_1 = z_2$$

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

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

$$p_1 = p_{atm}$$

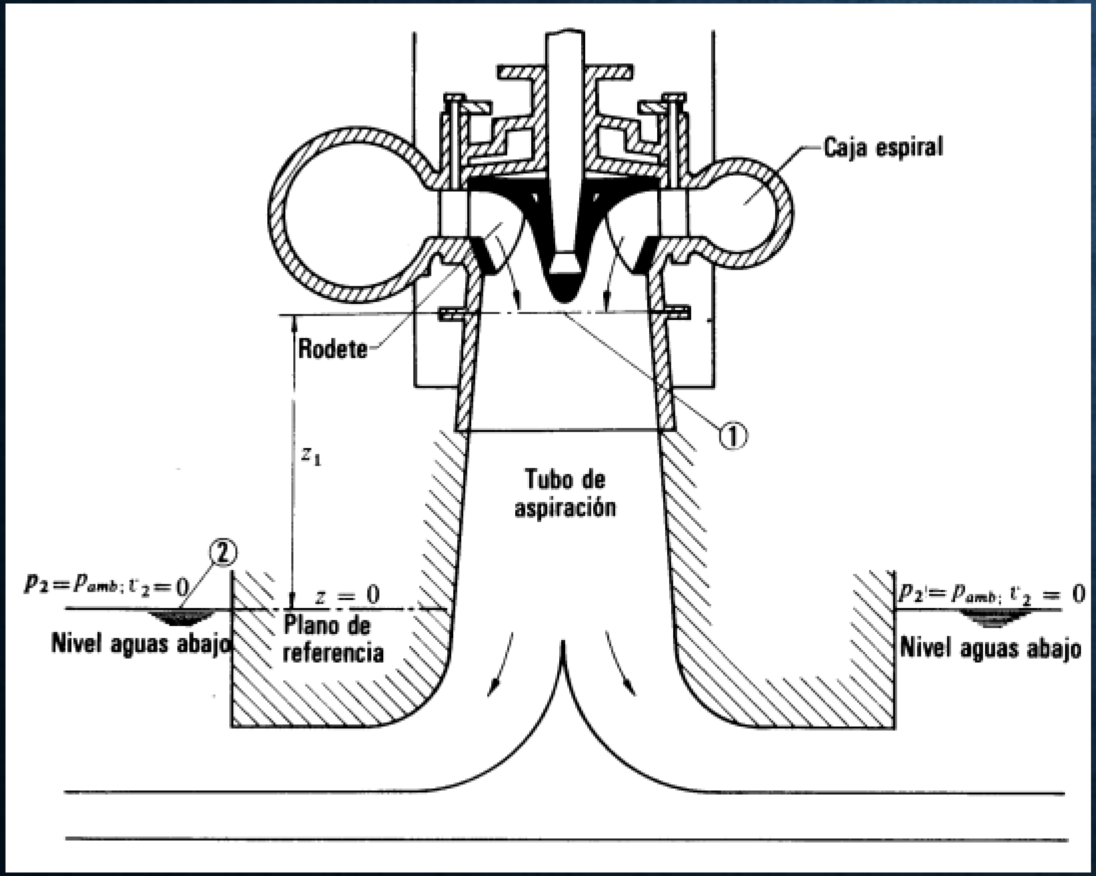
$$z_1 = 0$$

$$v_1 \approx 0$$

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

CAVITACIÓN

Turbina de reacción



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

$$Considerando$$

$$p_2 = p_{atm}$$

$$z_2 = 0$$

$$v_2 \approx 0$$

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

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.

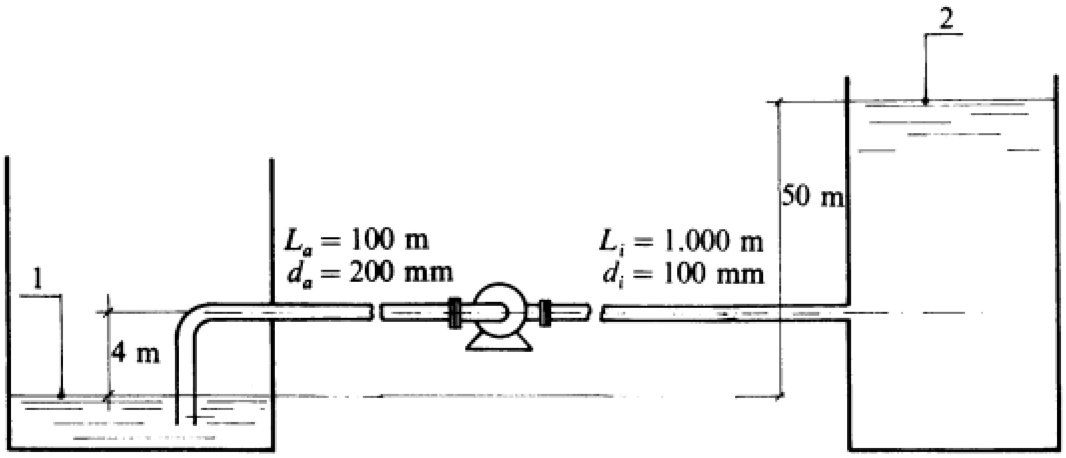
CAVITACIÓN

15-2. *Una bomba centrífuga aspira agua de un depósito por una tubería de 100 m de longitud y 200 m de diámetro. El eje de la bomba se encuentra 4 m por encima del nivel del agua en el depósito. La bomba impulsa por una tubería de 100 mm de diámetro y 1.000 m de longitud a otro depósito, cuyo nivel se encuentra 50 m por encima del nivel del 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 la longitud de la tubería, que ha de interpretarse como longitud equivalente (véase Sec. 11-5). 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 esta instalación;*
c) *máximo caudal que puede bombearse con la instalación anterior, pero sustituyendo la tubería de aspiración por otra de 100 mm.*

CAVITACIÓN



PROB. 15-2

a)

Escribamos la ecuación de Bernoulli entre 1 y 2:

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{c_1^2}{2g} - H_{r_{1-2}} + H_B = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{c_2^2}{2g}$$

Haciendo

$$\frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_2}{\rho g} = 0 \qquad \frac{c_1^2}{2g} \simeq 0 \qquad \frac{c_2^2}{2g} \simeq 0$$

CAVITACIÓN

se tiene

$$H_B = z_2 - z_1 + H_{r_{1-2}}$$

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

$$v_a = v_i \left(\frac{D_i}{D_a} \right)^2 \cdot \frac{v_a^2}{2g} = \frac{v_i^2}{2g} \left(\frac{D_i}{D_a} \right)^4 = \frac{1}{16} \cdot \frac{v_i^2}{2g}$$

$$H_{r_{1-2}} = \lambda \frac{v_i^2}{2g} \left(\frac{L_a}{D_a} \cdot \frac{1}{16} + \frac{L_i}{D_i} \right) = 0{,}025 \left(\frac{100}{0{,}200} \cdot \frac{1}{16} + \frac{1.000}{0{,}100} \right) \frac{v_i^2}{2g} =$$

$$= 250{,}781 \frac{v_i^2}{2g}$$

$$v_i = \frac{4\,Q}{\pi\,D_i^2} \cdot \frac{v_i^2}{2g} = \frac{16\,Q^2}{2g\,\pi^2 \cdot D_i^4} = \frac{16 \cdot 0{,}008^2}{2 \cdot 9{,}81 \cdot \pi^2 \cdot 0{,}1^4} = 0{,}0529 \text{ m}$$

$$H_{r_{1-2}} = 250{,}78 \cdot 0{,}0529 = 13{,}262 \text{ m}$$

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

$$P = Q\,\rho g\,H_B \cdot 10^{-3} = 0{,}008 \cdot 1.000 \cdot 9{,}81 \cdot 63{,}26 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 4{,}965 \text{ kW}$$

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

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

$$\frac{p_1}{\rho g} = \frac{10^5}{1.000 \cdot 9{,}81} = 10{,}194 \text{ m} \qquad \frac{c_1^2}{2g} = 0$$

$$z_E - z_1 = 4 \text{ m}$$

$$H_{r1-E} = \lambda \frac{L_a}{d_a} \frac{c_E^2}{2g}$$

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

$$H_{r1-E} = \frac{0{,}025 \cdot 100 \cdot 51{,}64}{0{,}200} Q^2 = 645{,}522\,Q^2$$

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

$$= 6{,}194 - 697{,}164\,Q^2$$

CAVITACIÓN

Para $t = 10°$ C, según tabla 15-1, $p_s = 0,012270$ bar

El caudal máximo es el que hará $\left(\frac{p_E}{\rho g}\right)_{\text{mín}} = \frac{p_s}{\rho g}$

$$\frac{p_s}{\rho g} = \frac{0,012270 \cdot 10^5}{1.000 \cdot 9,81} = 0,1251 \text{ m}$$

Se tiene, pues:

$$Q_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{6,194 - 0,1251}{697,164}} = 0,0933 \ \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

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

$$\frac{c_E^2}{2g} = \frac{16}{2g\ \pi^2\ 0,1^4} Q^2 = 826,269\ Q^2$$

$$H_{r1-E} = \frac{0,025 \cdot 100 \cdot 826,269}{0,1} Q^2 = 20.656,7\ Q^2$$

$$0,1251 = 6,19 - 21.483\ Q_{\text{máx}}^2$$

$$Q_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{6,19 - 0,1251}{21.483}} = 0,0168 \ \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$