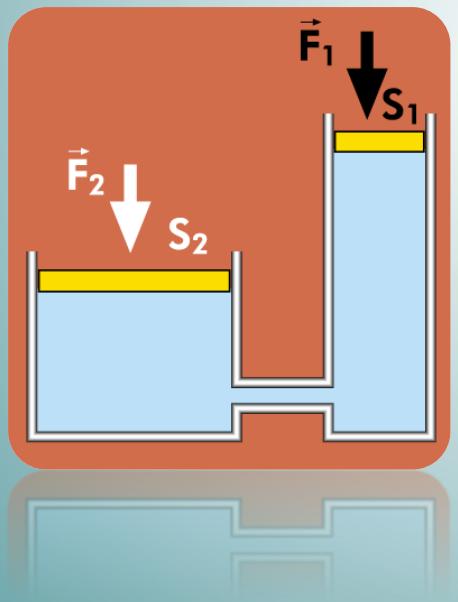
Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas

Tema 07. Golpe de Ariete y Cavitación



Severiano F. Pérez Remesal

Carlos Renedo Estébanez

DPTO. DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

Este tema se publica bajo Licencia:

Creative Commons BY-NC-SA 3.0

MF. T7.- Golpe de Ariete y Cavitación

Objetivos:

Se exponen en este tema los fenómenos transitorios que por sobrepresión o depresión pueden llegar a destruir las instalaciones de fluidos; el golpe de ariete y la cavitación. Se comentarán los efectos y las posibles medidas de protección

1.- Introducción
2.- Golpe de Ariete
3.- Sobrepresión en un Golpe de Ariete
4.- Cavitación

1.- Introducción

• Detención del flujo del fluido ⇒ sobrepresión y depresión (golpe de ariete)

• Bajas presiones locales ⇒ vaporización del fluido (cavitación)

Pueden llegar a destruir la instalación

Hay que controlarlos en el diseño de toda instalación

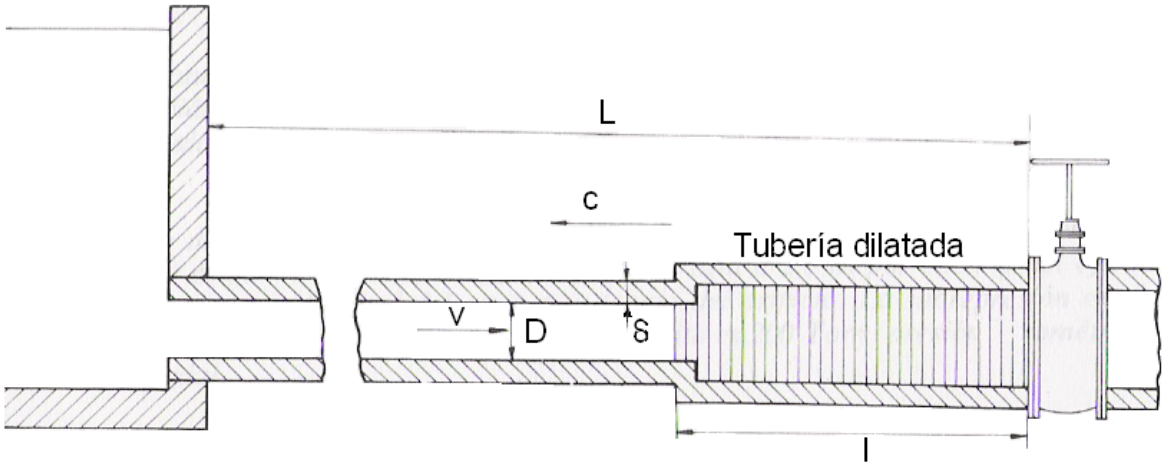
2.- Golpe de Ariete (I)

Fenómeno ***transitorio*** en el que se considera que:
- la tubería no es rígida
- el líquido es compresible

Se produce ante un paro brusco del flujo del fluido (típico el cierre de una válvula)

La energía cinética se transforma en energía de presión

La sobrepresión pueden llegar a romper la tubería



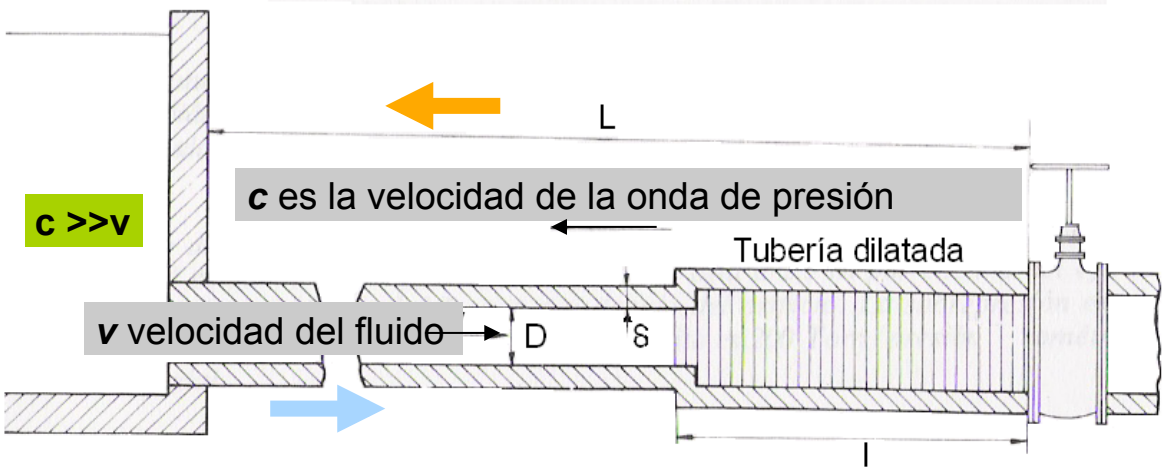
2.- Golpe de Ariete (I)

Fenómeno ***transitorio*** en el que se considera que:
- la tubería no es rígida
- el líquido es compresible

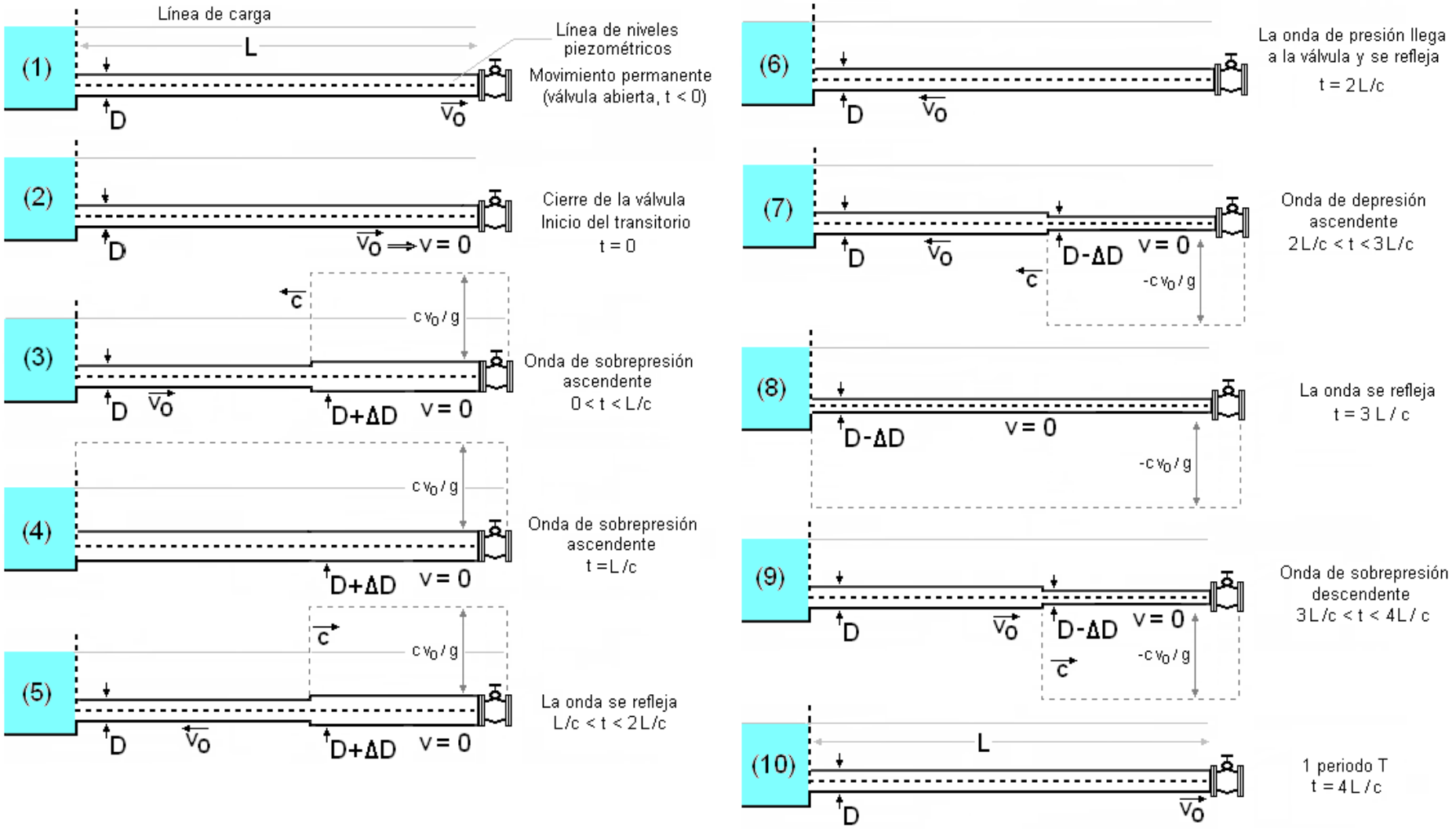
Se produce ante un paro brusco del flujo del fluido (típico el cierre de una válvula)

La energía cinética se transforma en energía de presión

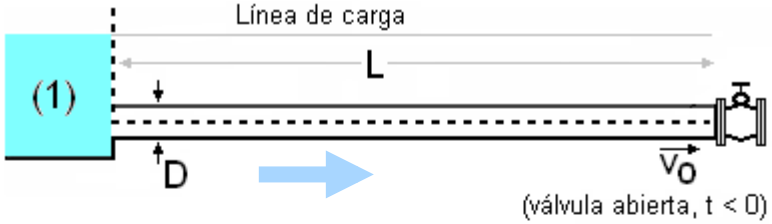
La sobrepresión pueden llegar a romper la tubería



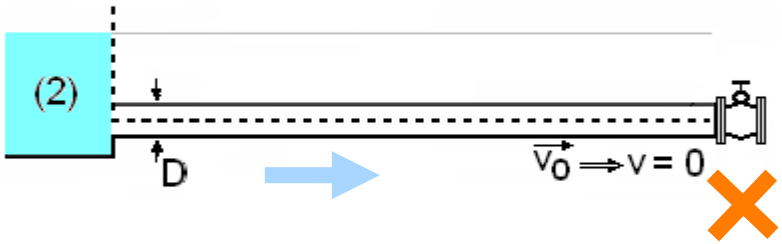
2.- Golpe de Ariete (II)



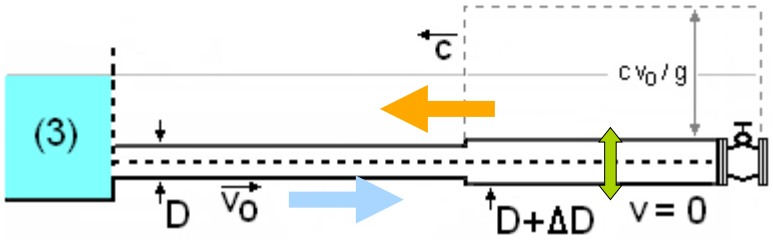
2.- Golpe de Ariete (III)



(1) Flujo a velocidad ***v***

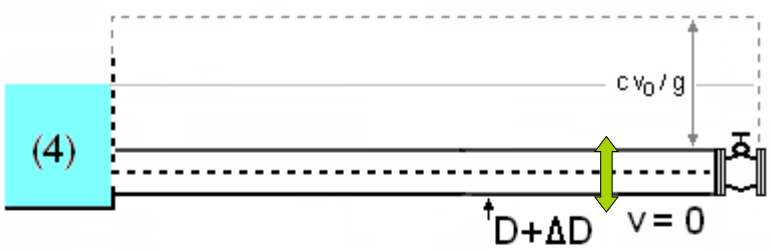


(2) Cierre brusco de la válvula
E. cinética ⇒ E. presión

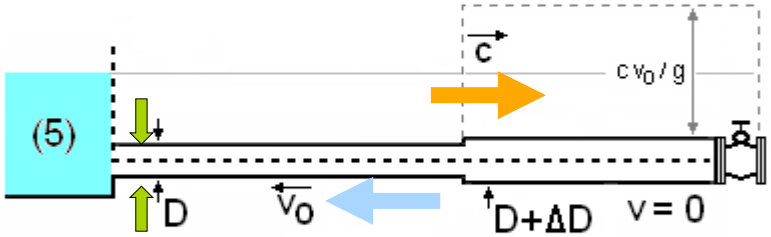


(3) Se propaga la onda de presión, *c*
desde la válvula, la tub. se dilata

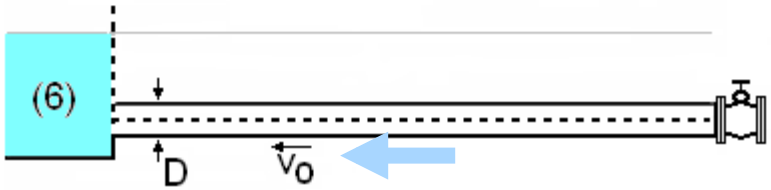
2.- Golpe de Ariete (IV)



(4) La onda de presión llega al embalse
(***t = L / c***)

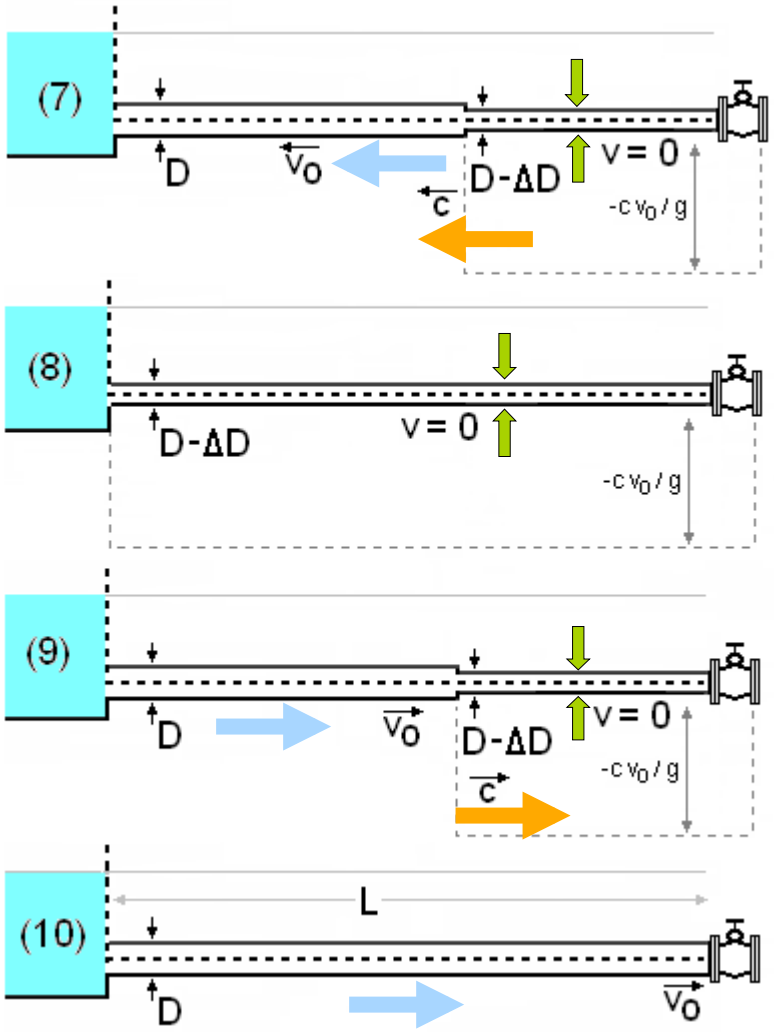


(5) La sobrepresión de la tub. hace que el agua contenida retorne el embalse a ***v***
La tub. vuelve a su sección nominal (de izda a dcha)



(6) La onda llega a la válvula
El agua sigue saliendo de la tub.
(***t = 2 L / c***)

2.- Golpe de Ariete (V)



(7) La tub. entra en depresión y se contrae
La onda va hacia el embalse, ***c***
El agua sigue saliendo de la tub.

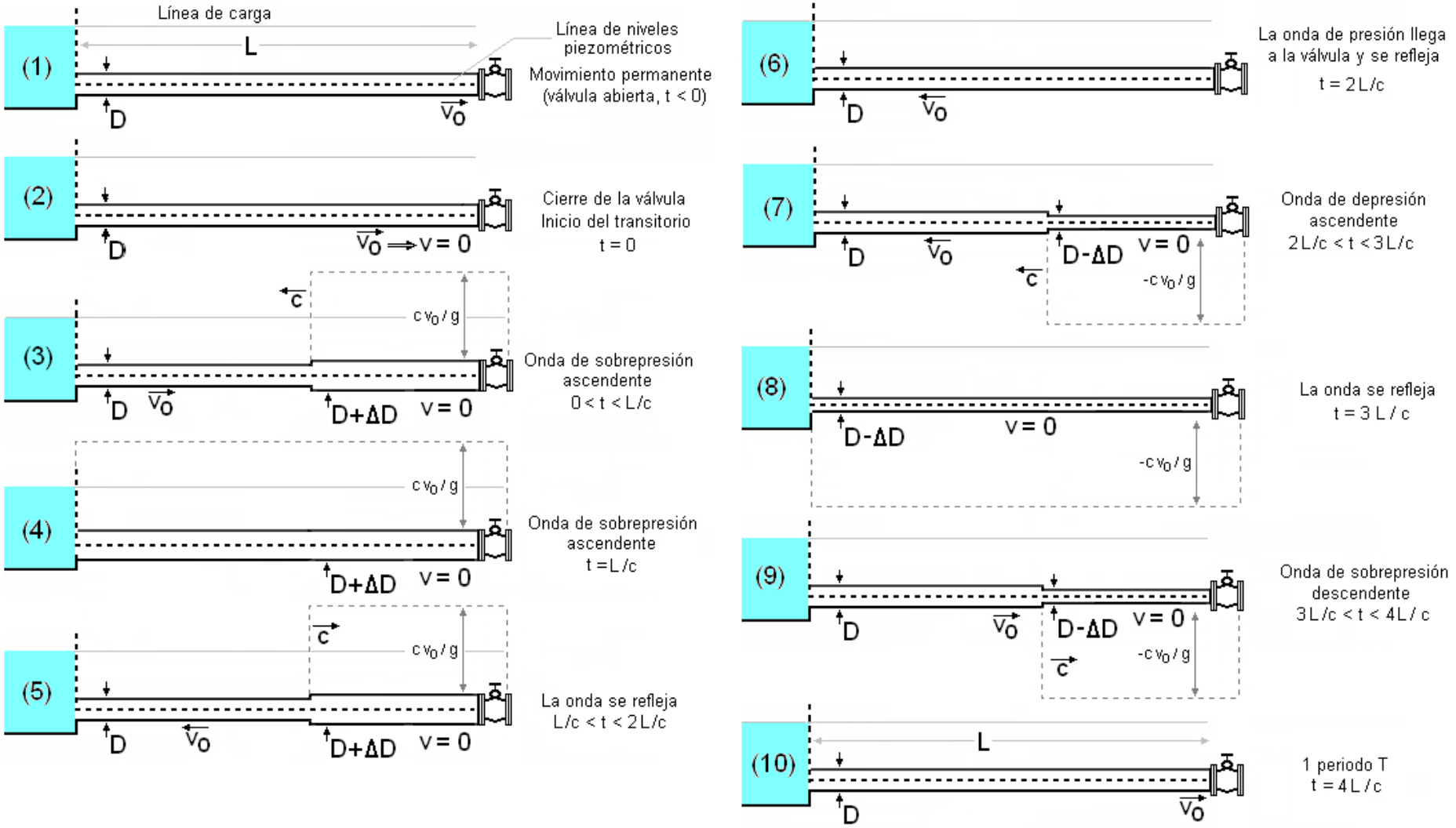
(8) Toda la tubería en depresión
(***t = 3 L / c***)

(9) Entra agua en la tubería, ***v***
La tub. va retornando a la situación inicial

(10 = 1) … (2) (***t*** = 4 ***L*** / ***c***)

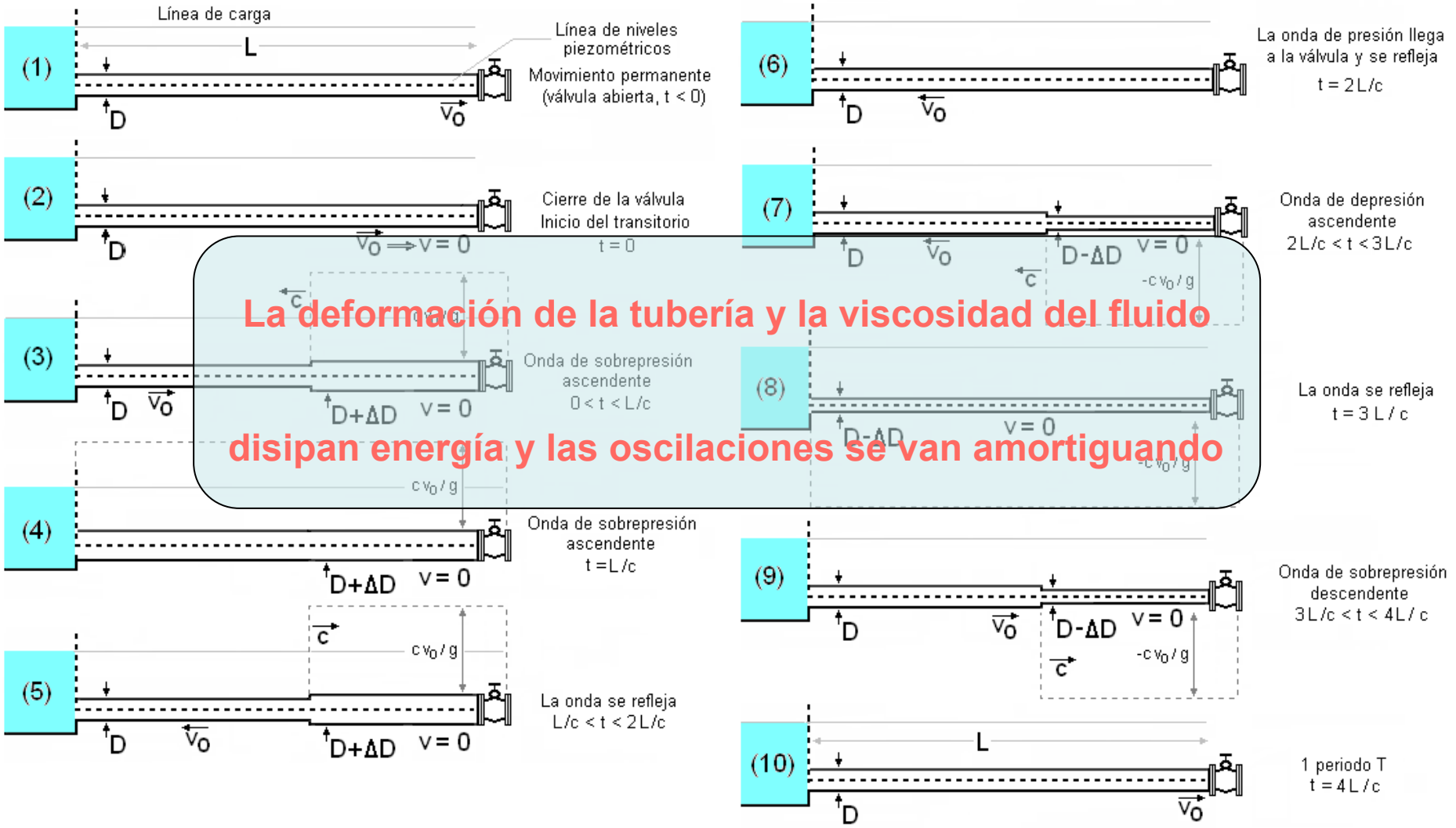
2.- Golpe de Ariete (VI)

($t = 4\,L\,/\,c$)



2.- Golpe de Ariete (VI)

($t = 4\,L\,/\,c$)



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

3.- Sobrepresión en un Golpe de Ariete (I)

La **sobrepresión** depende del tiempo de cierre de la válvula, t_c

1.- ***Cierre instantáneo***, ($t_c = 0$), es un caso teórico (el anterior)

2.- ***Cierre rápido*** ($0 < t_c < 2L / c$)

El cierre se produce antes de que la onda de presión se refleje en el estanque y vuelva a la válvula; la sobrepresión idéntica al caso de cierre instantáneo

3.- ***Cierre lento***, ($t_c > 2L / c$)

La depresión generada al reflejarse la onda en el embalse disminuye la presión máxima respecto al instantáneo

3.- Sobrepresión en un Golpe de Ariete (II)

1 (2).- Cierre instantáneo o rápido ($0 < \boldsymbol{t}_c < 2\boldsymbol{L} / \boldsymbol{c}$) (I)

$$F_i = -m\,a = -(\rho\ Vol)\left(\frac{\Delta v}{\Delta t}\right)$$

$\Delta \boldsymbol{t}$ no es el tiempo de cierre, sino el que transcurre hasta que la masa de fluido considerado se detiene
(en el caso de cierre total $\Rightarrow \Delta \boldsymbol{v} = -\boldsymbol{v}$),
(en un cierre parcial $\Rightarrow \Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_{final} - \boldsymbol{v}$)

$$F_i = \rho\,[A\,l]\frac{v}{\Delta t}\,[\text{cierre total}]\ ;\ F_i = \rho\,[A\,l]\frac{v - v_f}{\Delta t}\,[\text{cierre parcial}]$$

l la long. recorrida por la onda en $\Delta \boldsymbol{t}$

$$\Delta P = \frac{F_i}{A} \Rightarrow \quad \Delta P = \frac{F_i}{A} = \rho\ l\,\frac{v}{\Delta t_i}\,[\text{cierre total}]\ ;\ \Delta P = \frac{F_i}{A} = \rho\,l\,\frac{v - v_f}{\Delta t}\,[\text{cierre parcial}]$$

$$\Delta P = \rho\ c\ v\,[\text{cierre total}]\ ;\ \Delta P = \rho\ c\ (v - v_f)\,[\text{cierre parcial}]$$

$$\Delta H = \frac{\Delta P_i}{\gamma} = \frac{\Delta P_i}{\rho\ g} \Rightarrow \quad \Delta H = \frac{c\ v}{g}\,[\text{cierre total}]\ ;\ \Delta H = \frac{c\ (v - v_f)}{g}\,[\text{cierre parcial}]$$

3.- Sobrepresión en un Golpe de Ariete (III)

1 (2).- Cierre instantáneo o rápido ($0 < t_c < 2L / c$) (II)

$$\Delta H = \frac{c\ v}{g}\ [\text{cierre total}]\ ;\quad \Delta H = \frac{c\ (v - v_f)}{g}\ [\text{cierre parcial}]$$

$$\text{Allievi} \Rightarrow \frac{1}{c^2} = \rho \left(K_F + \frac{D}{E_T\ \delta} \right) \Rightarrow \qquad c = \frac{\sqrt{\frac{E_F}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_F\ D}{E_T\ \delta}}}$$

Siendo K_F la compresibilidad del fluido, m^2/N
E_F el módulo de elasticidad del fluido, N/m^2
E_T el módulo de elasticidad de la tubería, N/m^2

[T1] celeridad de la onda en el fluido, $c_F = \sqrt{\frac{E_F}{\rho}}$

3.- Sobrepresión en un Golpe de Ariete (IV)

3.- Cierre lento ($t_c > 2L / c$)

$$F_i = -m\,a = -(\rho\ Vol)\left(\frac{\Delta v}{\Delta t}\right) = -\rho\ (A\ l)\left(\frac{\Delta v}{\Delta t}\right)$$

$$\Delta P = \frac{F_i}{A} = \frac{\rho\ A\ l\left(\frac{\Delta v}{\Delta t}\right)}{A} = \rho\ \ L\ \frac{\Delta v}{\Delta t_c}$$

$$\Delta P = K\frac{\rho\ L\ v}{t_c}$$

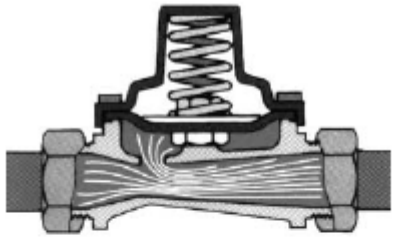
K (entre 1 y 2; *K* < 1,5),
por la elasticidad de la tubería

$$\Delta H = \frac{\Delta P_i}{\gamma} = \frac{\Delta P_i}{\rho\ g} \Rightarrow \qquad \Delta H = K\frac{\rho\ L\ v}{t_c\ \gamma} = K\frac{L\ v}{t_c\ g}$$

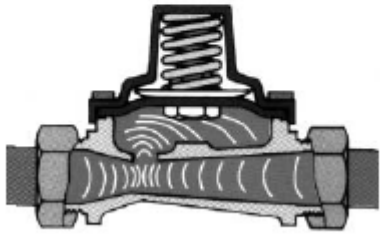
3.- Sobrepresión en un Golpe de Ariete (V)

Para minimizar los riesgos de un golpe de ariete (I):

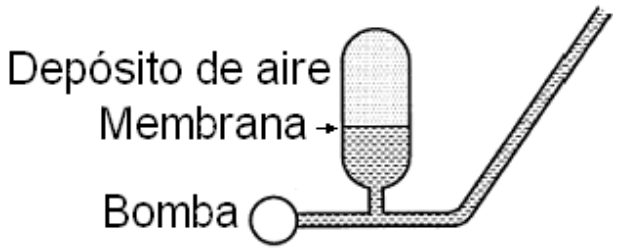
- Reforzar la tubería (caro si L ↑↑)
- Colocar válvulas antiariete
  (un resorte amortigua los cambios de presión)
- Instalar depósitos cerrados de aire
  (cuya presión amortigua las oscilaciones)
- Evitar cierres rápidos



Posición de la membrana con circulación de agua



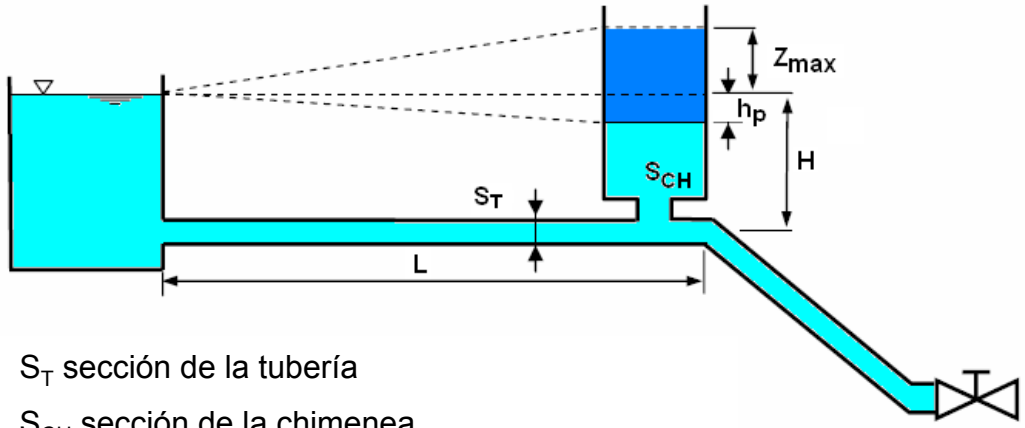
Posición de la membrana cuando se produce una sobrepresión



3.- Sobrepresión en un Golpe de Ariete (VI)

Para minimizar los riesgos de un golpe de ariete (II):

- Construir una chimenea de equilibrio
  (cámara en la que el líquido puede oscilar libremente)



$$Z_{max} = v\sqrt{\frac{L\,S_T}{g\,S_{CH}}}$$

$$t = 2\,\pi\sqrt{\frac{L\,S_{CH}}{g\,S_T}}$$

$$S_{CH\,min} = \frac{L\,S_T}{h_p(H-h_p)}\,\frac{v^2}{2\,g}$$

S_T sección de la tubería

S_{CH} sección de la chimenea

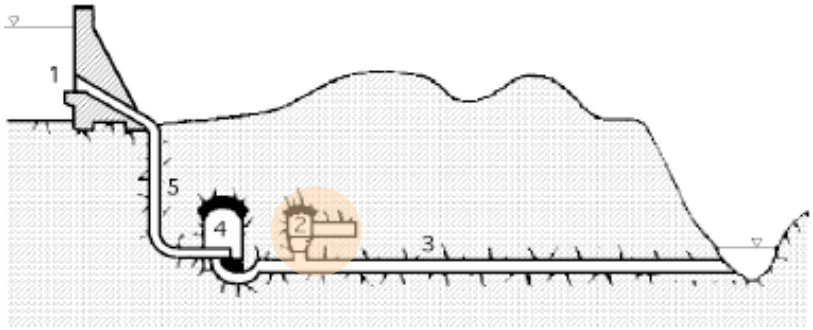
h_p la pérdida de carga hasta la chimenea en condiciones normales

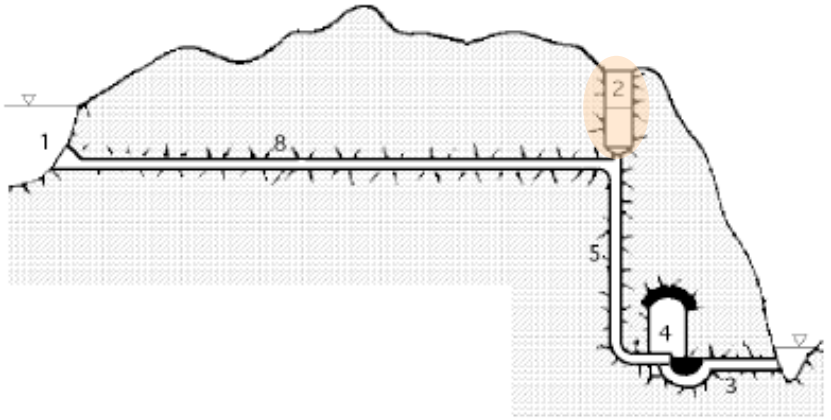
La reducción de S_{CH} amortigua las oscilaciones

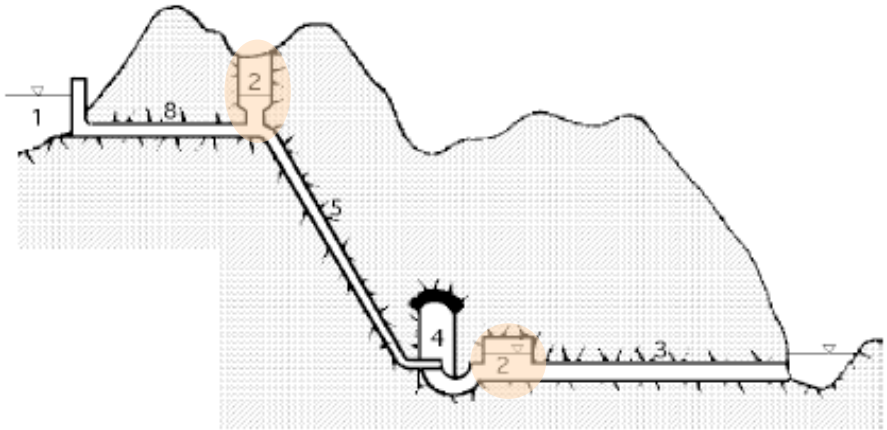
Es posible permitir el rebosamiento por la parte superior de la chimenea

3.- Sobrepresión en un Golpe de Ariete (VII)

a) Sistemas de presión (chimeneas de equilibrio)



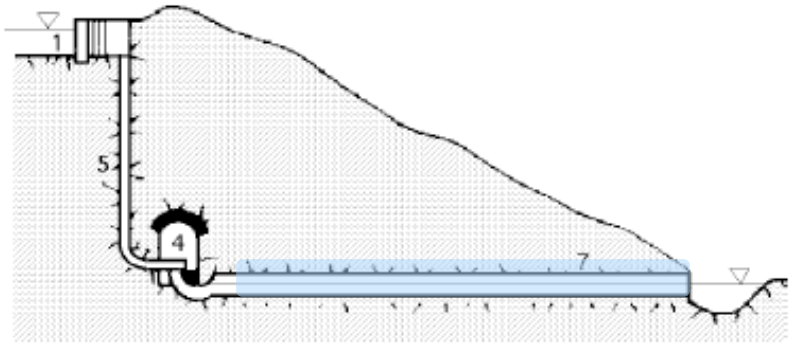


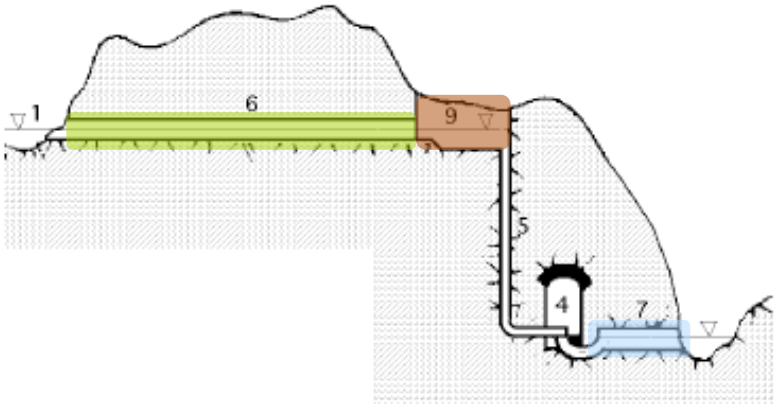


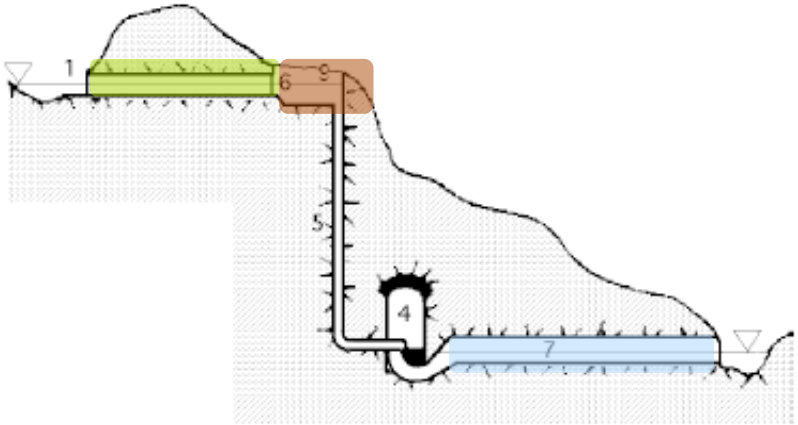
1) Estructura de admisión;
2) Tanques de equilibrio (depósito de aire y chimenea de equilibrio);
3) Túnel de presión aguas abajo;
4) Sala de turbinas (central);
5) Conducción forzada;
6) Túnel de flujo abierto de admisión;
7) Túnel de flujo abierto de escape;
8) Túnel de presión de admisión;
9) Embalse de carga

3.- Sobrepresión en un Golpe de Ariete (VIII)

b) Sistemas de admisión en flujo abierto







1) Estructura de admisión;
2) Tanques de equilibrio (depósito de aire y chimenea de equilibrio);
3) Túnel de presión aguas abajo;
4) Sala de turbinas (central);
5) Conducción forzada;
6) Túnel de flujo abierto de admisión;
7) Túnel de flujo abierto de escape;
8) Túnel de presión de admisión;
9) Embalse de carga

3.- Sobrepresión en un Golpe de Ariete (IX)

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

3.- Sobrep

© Reuters

3.- Sobrepresión en un Golpe de Ariete (X)

La principal hipótesis sobre la secuencia de la catástrofe:

- Cierre repentino de las compuertas de la 2 Unidad
- Fuerte golpe de ariete en la espiral y la tubería de carga, causando su colapso
- Fuerte empuje hacia adelante como consecuencia del golpe de ariete, destruyendo la estructura civil sobre la cámara espiral y la tubería de carga
- Rápida inundación de la central eléctrica

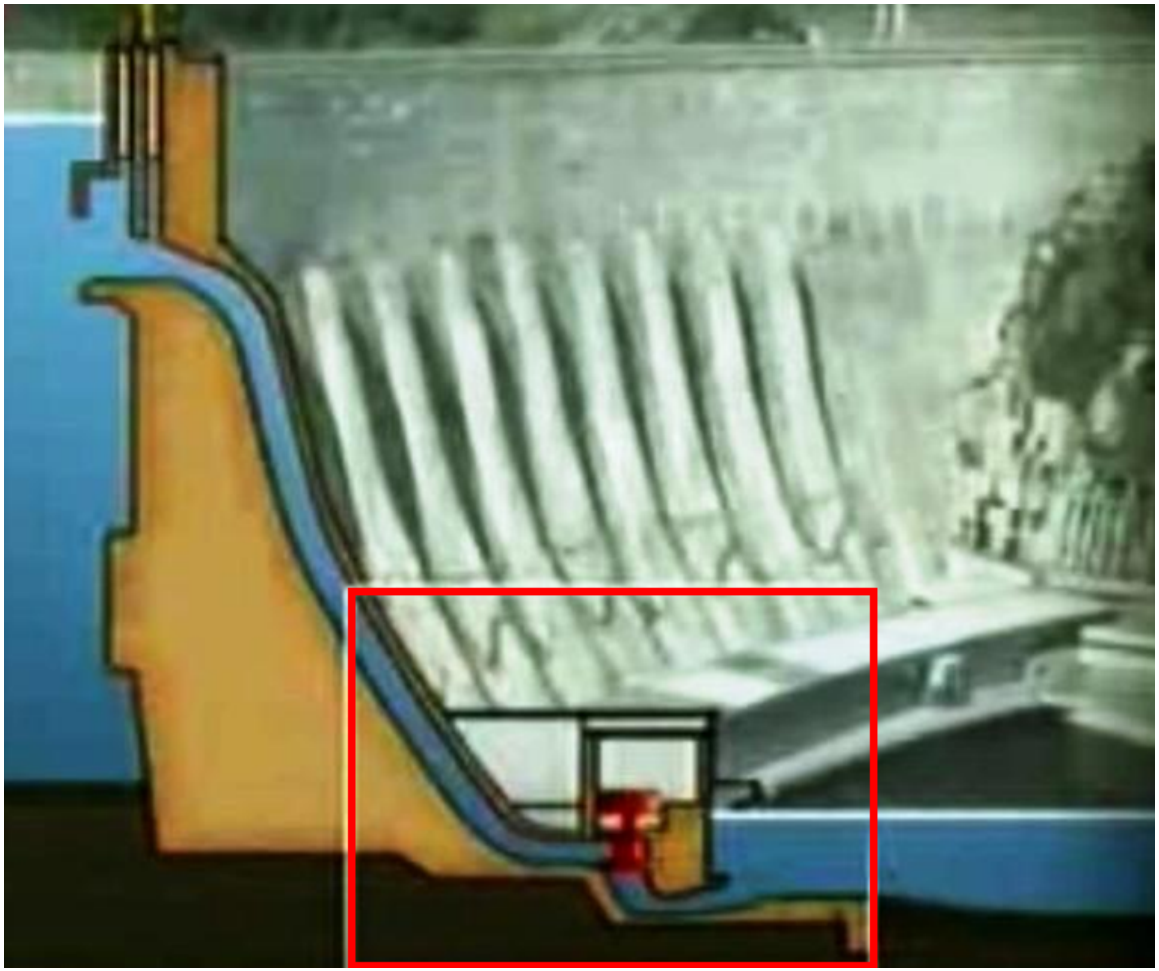
Hipótesis sobre la causa del cierre repentino:

- Una pieza grande entró en el rodete de la turbina, y las palas o la dejaron salir
- Esta pieza giró en la espiral golpeando todas las compuertas del distribuidor de regulación de la turbina, provocando en una fracción de segundo su cierre repentino

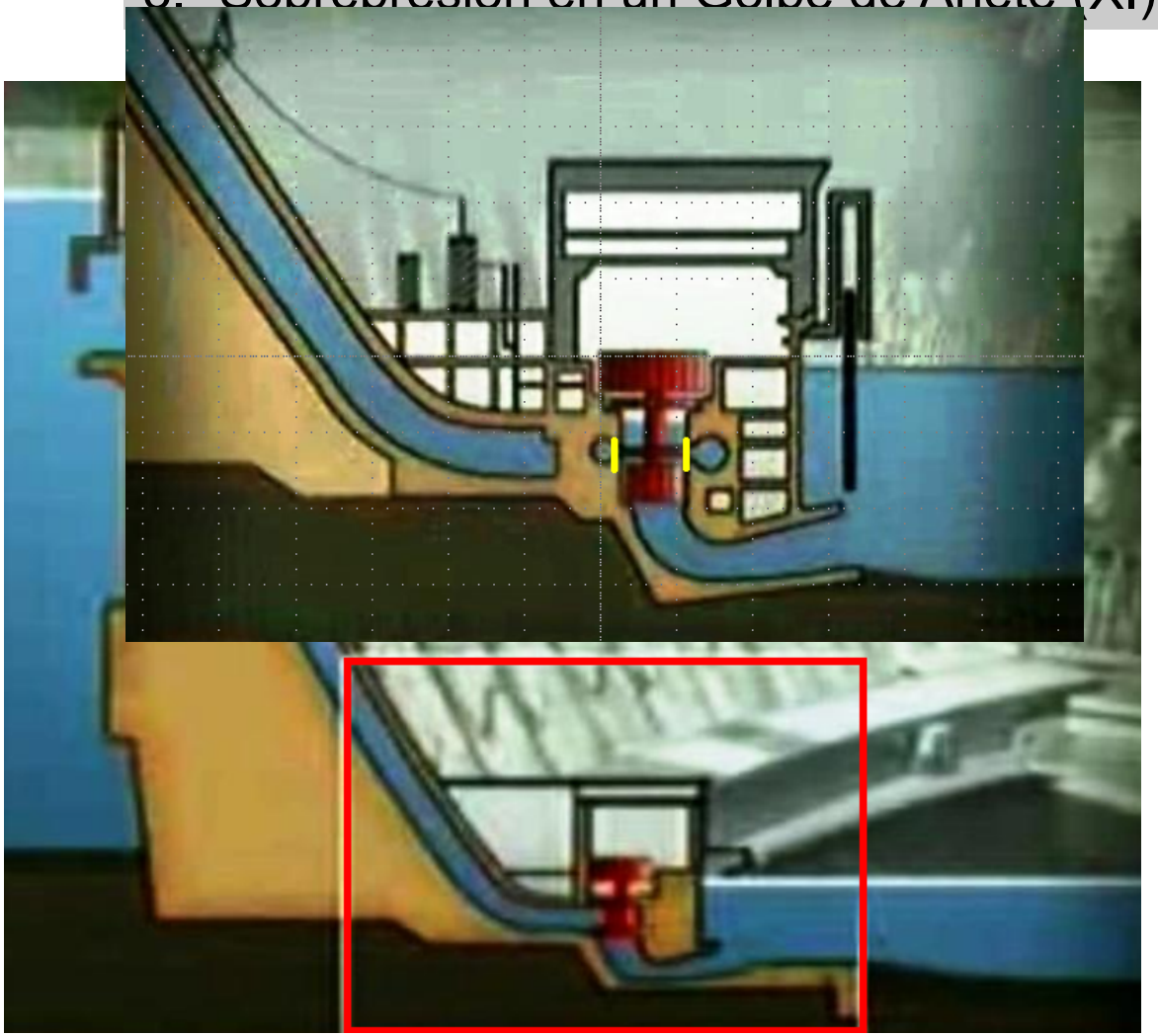
O (menos probable):

- La rotura de la tubería de aceite de gobernador de los servomotores del distribuidor
- La ruptura provocó el cierre hidráulico del distribuidor

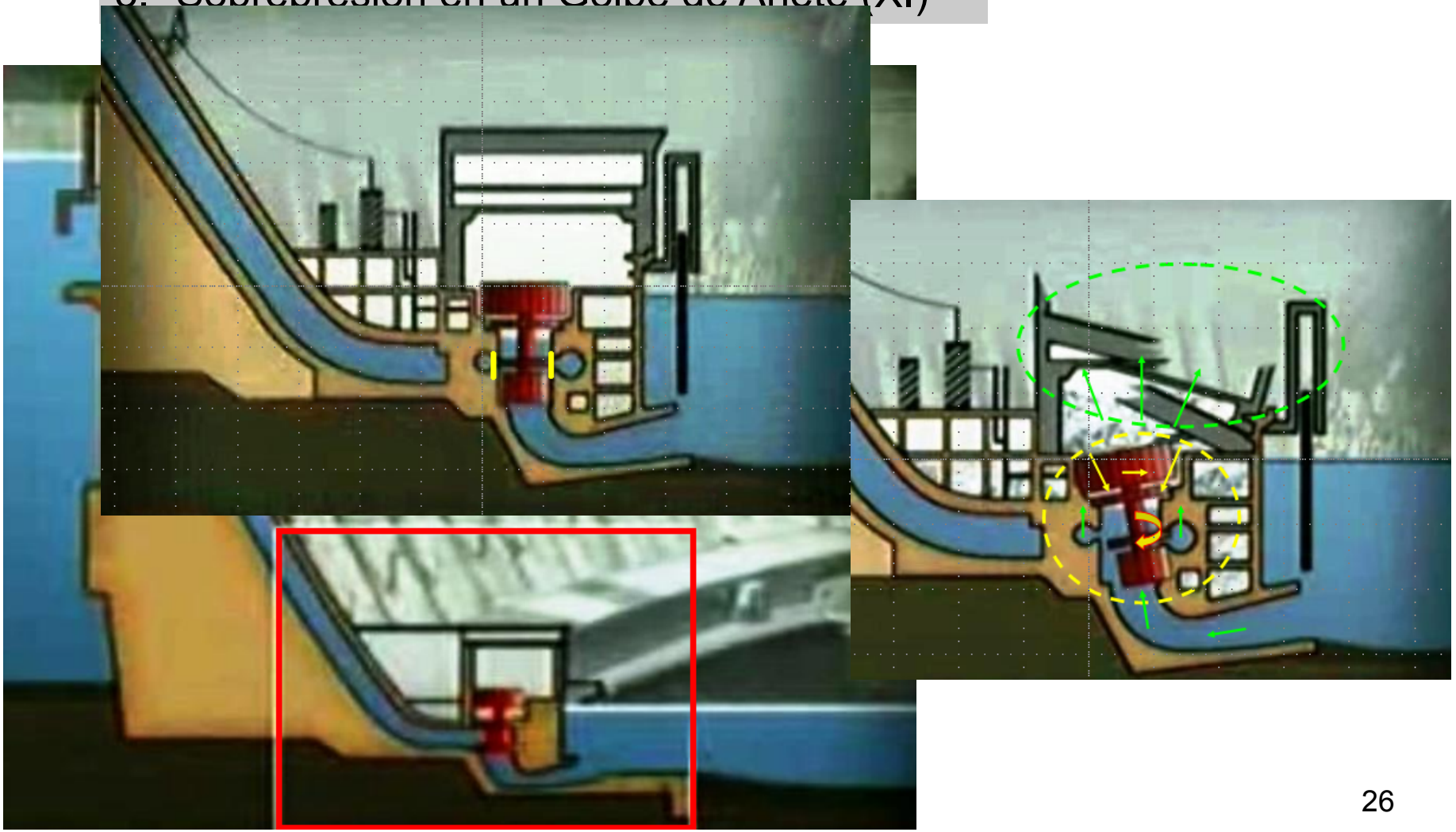
3.- Sobrepresión en un Golpe de Ariete (XI)



3.- Sobrepresión en un Golpe de Ariete (XI)



3.- Sobrepresión en un Golpe de Ariete (XI)



3.- Sobrepresión en un Golpe de Ariete (XII)

Al final de una tubería de acero (E_T = 2 10^7 N/cm^2) de diámetro interior 600 mm y espesor 10 mm por la que circula agua (E_F = 2 10^5 N/cm^2) a 2,5 m/s se instala una válvula. Si ésta se cierra instantáneamente calcular:

- La velocidad de propagación de la onda de presión
- La sobrepresión producida por el golpe de ariete

4.- Cavitación (I)

Vaporización del líquido cuando $p < p_{sat}$ ($p_{sat}\uparrow$ con T; peligro con calor)

Temperatura (ºC)	5	10	20	40	60	80	100
p_{sat} (bar) [p_{abs}]	0,00872	0,01227	0,02337	0,07375	0,1992	0,4736	1,0133

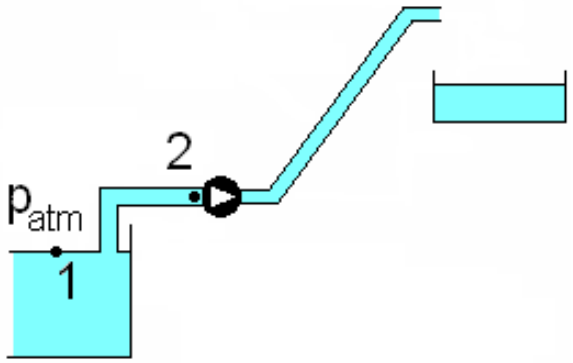
Se produce en estructuras estáticas (venturis, tuberías) y en máquinas hidráulicas (bombas, turbinas, hélices)

Ec de Bernoulli entre ptos 1 y 2

$$\left(z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma}\right) - H_{per} = \left(z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma}\right)$$

$$\frac{p_{atm}}{\gamma} - H_{per} = \left(z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma}\right)$$

$$\frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_{atm}}{\gamma} - \left[\frac{V_2^2}{2g} + z_2 + H_{per}\right] \Rightarrow p_2 < p_{atm};\ \text{y cavitación si } p_2 < p_{sat}$$



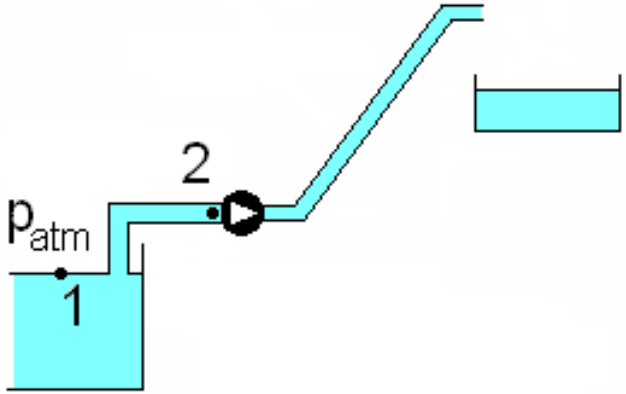
4.- Cavitación (II)

Cavitación si $p_2 < p_{sat}$

$$\frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_{atm}}{\gamma} - \left[\frac{V_2^2}{2g} + z_2 + H_{per}\right]$$

La cavitación es tanto más peligrosa si:

- ↑ T del fluido (p_{sat}↑)
- ↑ altitud del lugar (p_{atm}↓)
- ↓ϕ tubería asp. (↑velocidad del fluido (v_2))
- ↑ altura geométrica que asciende el fluido (z_2)
- ↑ H_{per} (longitud y accesorios tub. asp.)



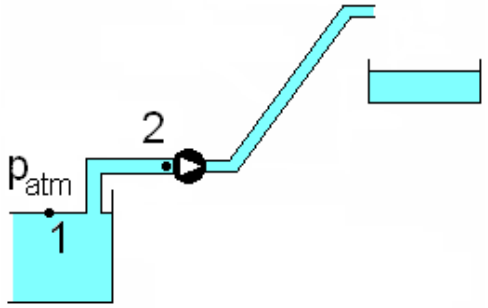
La cavitación a la entrada de una bomba ↓η_B, (Vol_{vapor} >> Vol_{liq})

Al aumentar la bomba la presión del fluido, el vapor condensa bruscamente y produce golpeteo (vibraciones, ruido, … desgaste)

4.- Cavitación (III)

La ***altura total*** a la entrada de la bomba, referida a su cota, es:

$$H_2 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2\,g}$$



La altura máxima de aspiración disponible en la entrada de la bomba para que no cavite, $H_{B\ disp}$, es tal que $\Rightarrow p_2 > p_{sat}$

$$H_{B\ disp} = \frac{p_2 - p_{sat}}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2\,g}$$

Aplicando Bernoulli entre 1 y 2:

$$\frac{p_{atm}}{\gamma} - H_{per} = \left(z_2 + \frac{V_2^2}{2\,g} + \frac{p_2}{\gamma} \right) \quad \Rightarrow \quad \frac{V_2^2}{2\,g} = \frac{p_{atm} - p_2}{\gamma} - H_{per} - z_2$$

$$\Rightarrow \quad H_{B\ disp} - \frac{p_2 - p_{sat}}{\gamma} = \left(\frac{p_{atm} - p_2}{\gamma} - H_{per} - z_2 \right)$$

$$H_{B\ disp} = \frac{p_{atm} - p_{sat}}{\gamma} - z_2 - H_{per}$$

$$H_{per} = f \frac{L_{eq}}{D_H} \frac{v^2}{2\,g}$$

Terminología británica ***NPSH disponible***.

$$NPSH_d > 0{,}5 + NPSH_r$$

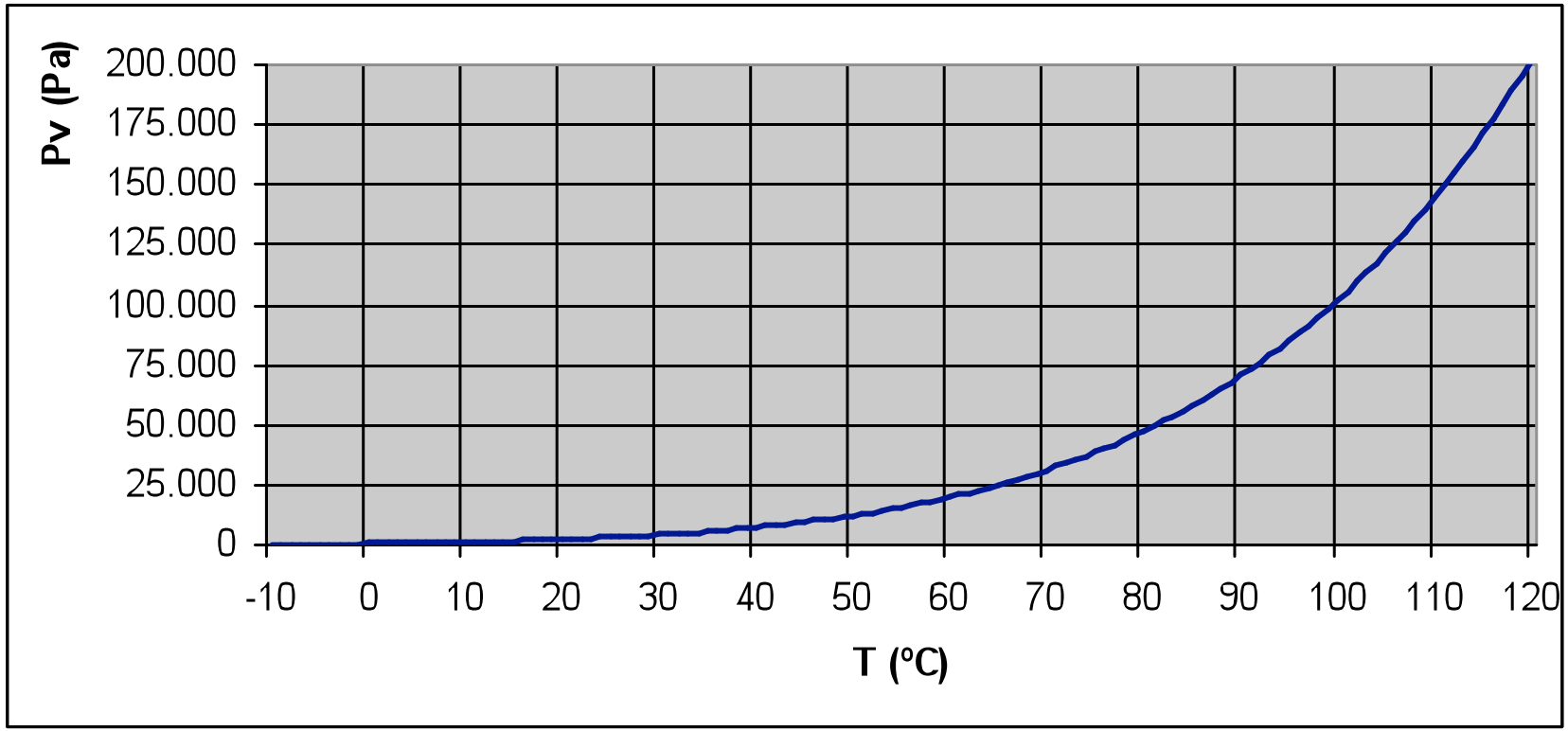
Fabricante de la bomba

4.- Cavitación (IV)

Presión de Vapor del Agua

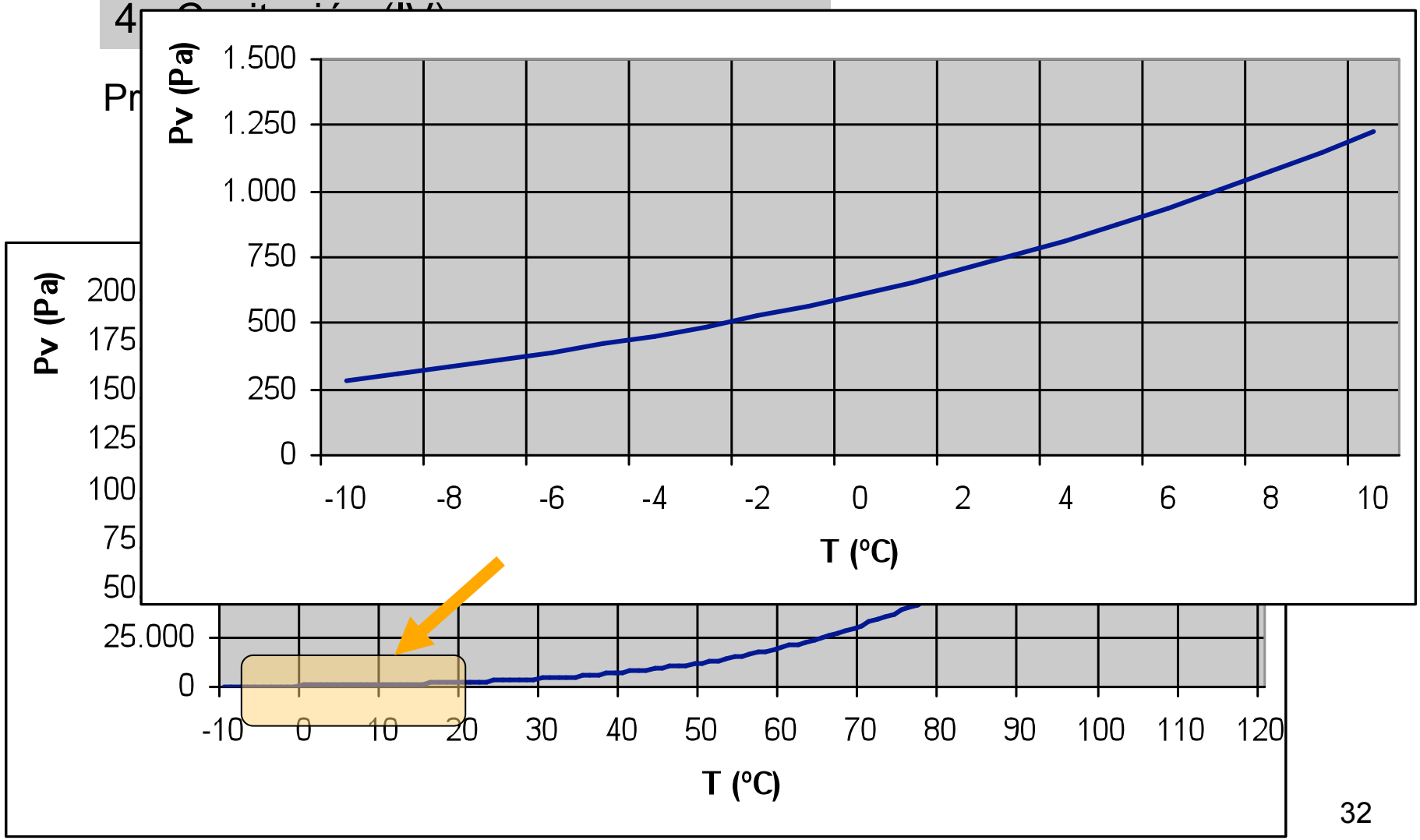
$$\log\left(p_V\right) = 7{,}5\,\frac{T}{\left(T+273\right)-35{,}85} + 2{,}7858$$

p_v en Pa y T en ºC



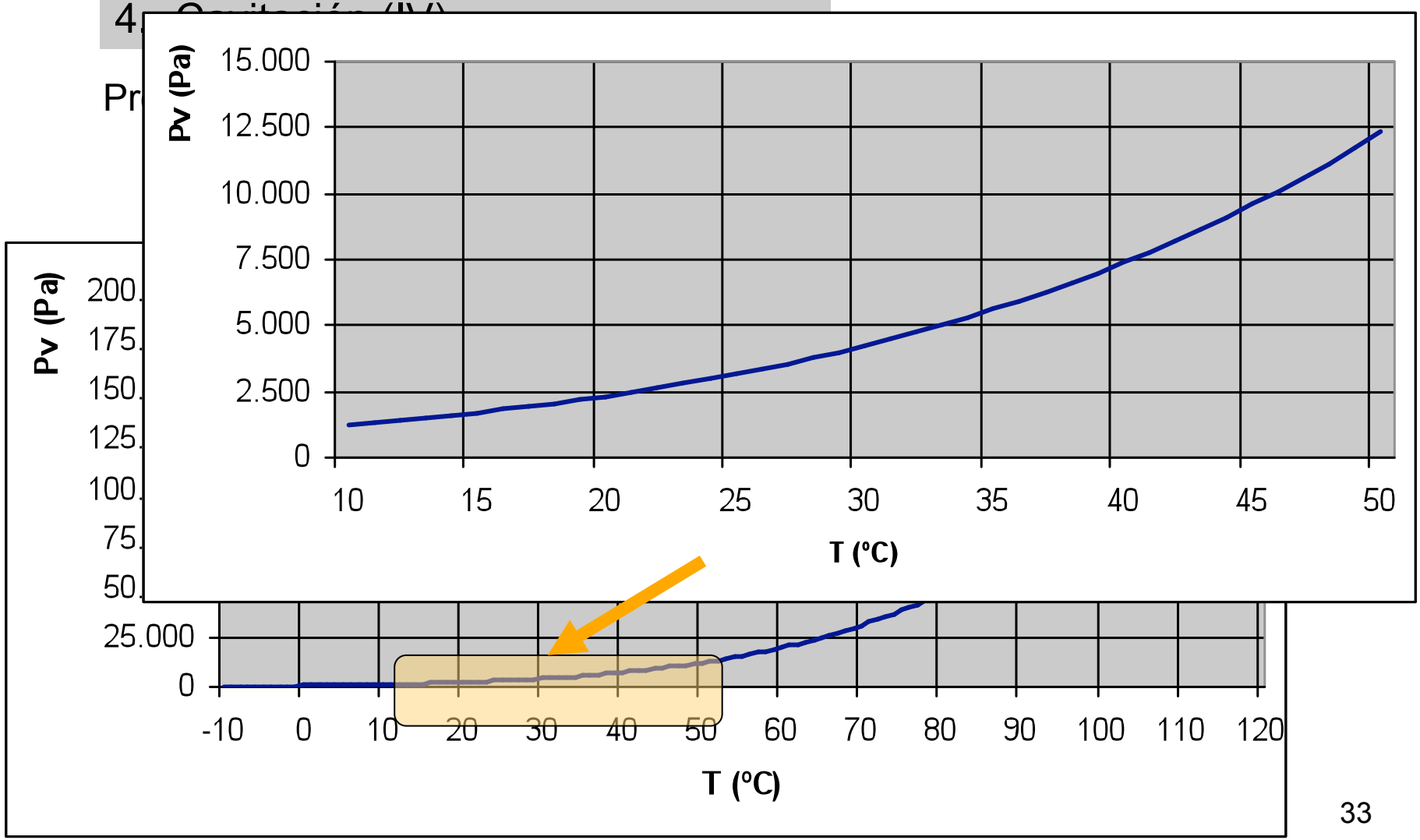
4. Cavitación (IV)

Pr



4. Cavitación (IV)

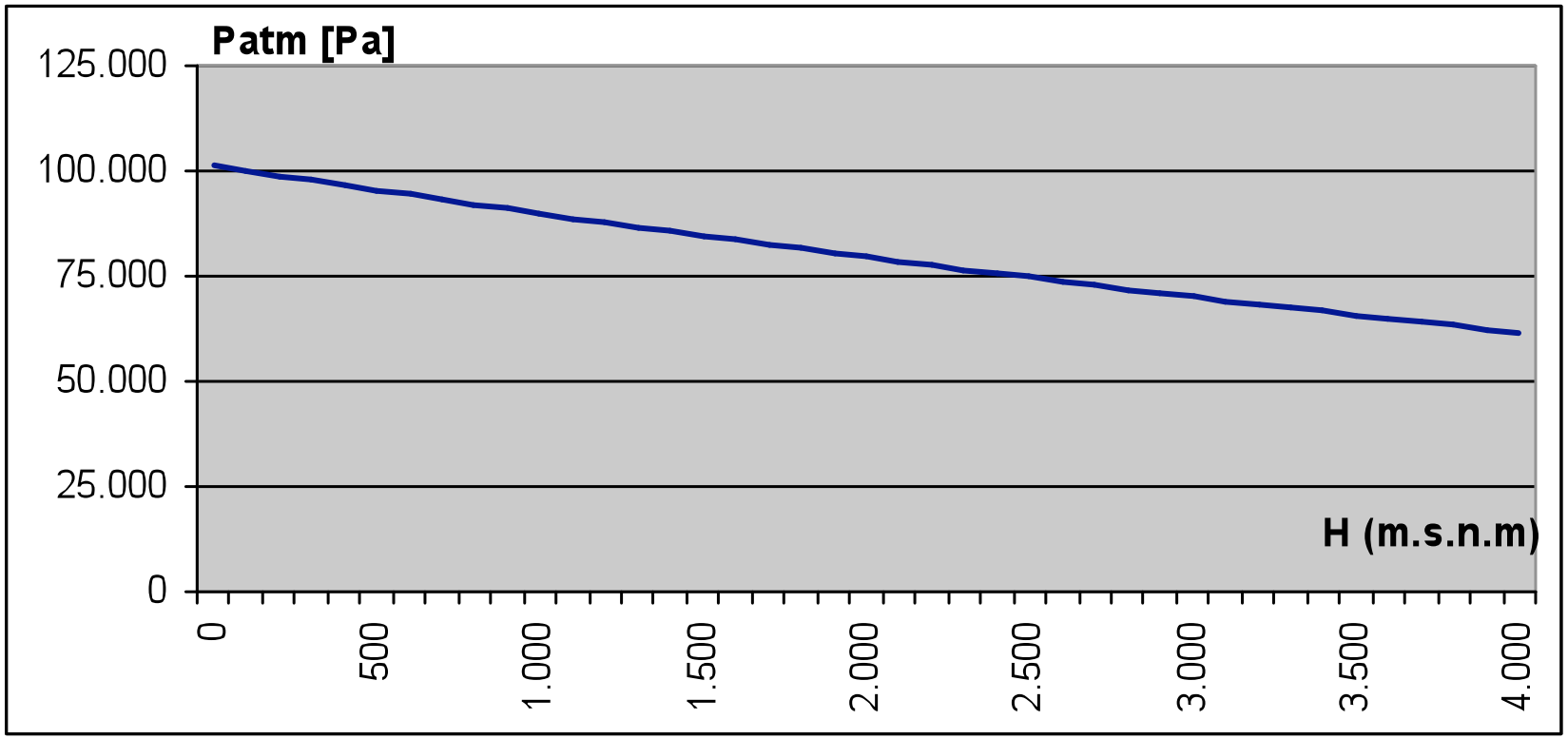
Pr



4.- Cavitación (V)

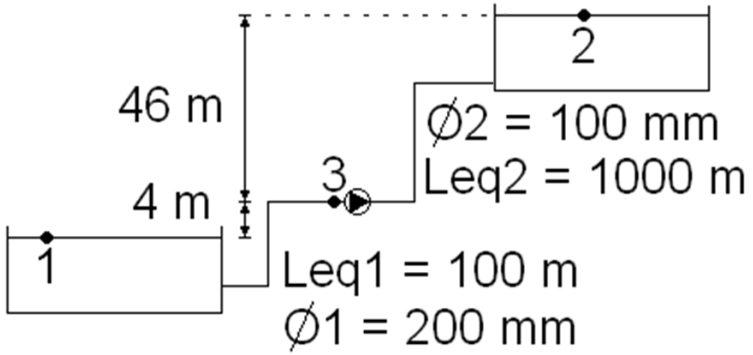
Presión atmosférica en función de la altitud

$$P\,[Pa] = 101.325\left(1 - 2{,}2610^{-5} H\,[m]\right)^{5{,}26}$$



4.- Cavitación (VI)

Una bomba centrífuga aspira agua a 10ºC de un depósito abierto por una tubería de 100 m de longitud y 200 mm 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 está 50 m por encima del nivel del depósito de aspiración.

Considerando el coeficiente λ de pérdidas de carga de 0,025 y que las longitudes de tubería son las equivalentes (incluyen las de los accesorios de las tuberías) calcular:

- La potencia que debe comunicar la bomba para que el caudal sea de 8 l/s
- Máximo caudal que se puede bombear (para que no se produzca cavitación, T = 15ºC, p_s = 0,01227 bar)
- Máximo caudal que se podría bombear si la sección de la tubería de aspiración fuera de 100 mm