

Transitorios Hidráulicos en Tuberías a Presión

Curso posgrado y educación permanente
2023

Docentes: Dr. Ing. Rodolfo Pienika rpienika@fing.edu.uy
MSc. Ing. Laura Rovira lrovira@ose.com.uy

MODELO NO ESTACIONARIO EN TUBERÍA ELÁSTICA Y FLUIDO COMPRESIBLE

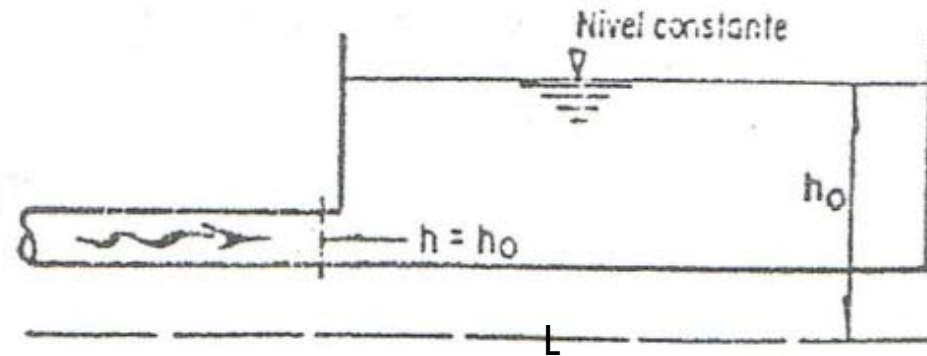
Transitorios Hidráulicos en Tuberías a Presión

Algunas Condiciones de Borde

1. Tanque de nivel constante (área grande)

Para todo t: $h(L, t) = h_0$

$$h(L, t) - h_0 = \frac{a}{gA} (F(L, t) - G(L, t))$$



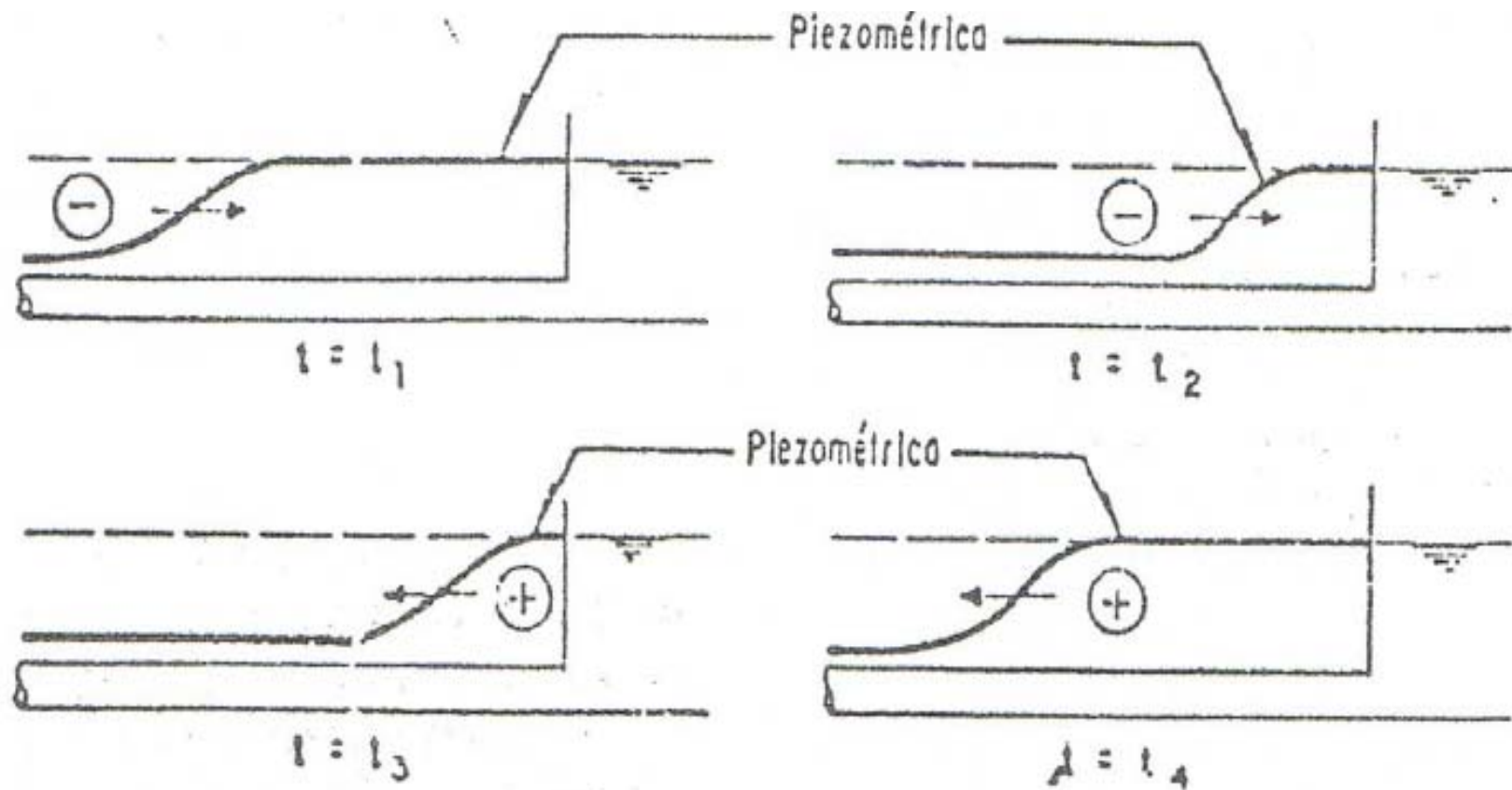
Imponiendo condición de borde:

$$0 = F(L, t) - G(L, t) \rightarrow F(L - at) = G(L + at)$$

El tanque oficia como un espejo, cambiando solo el sentido de la onda.

Algunas Condiciones de Borde

⇒ Reflexión de onda en tanque



Algunas Condiciones de Borde

2. Extremo cerrado

Para todo t : $Q(L, t) = 0$

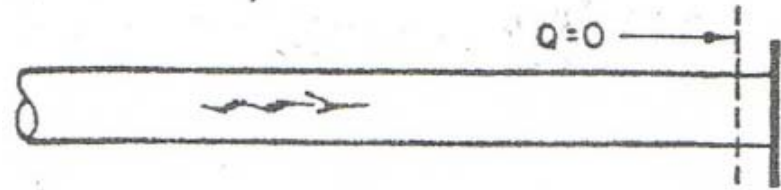
$$Q(L, t) - Q_0 = F(L, t) + G(L, t)$$

Imponiendo condición de borde:

$$0 = F(L, t) + G(L, t) \rightarrow \boxed{F(L - at) = -G(L + at)}$$

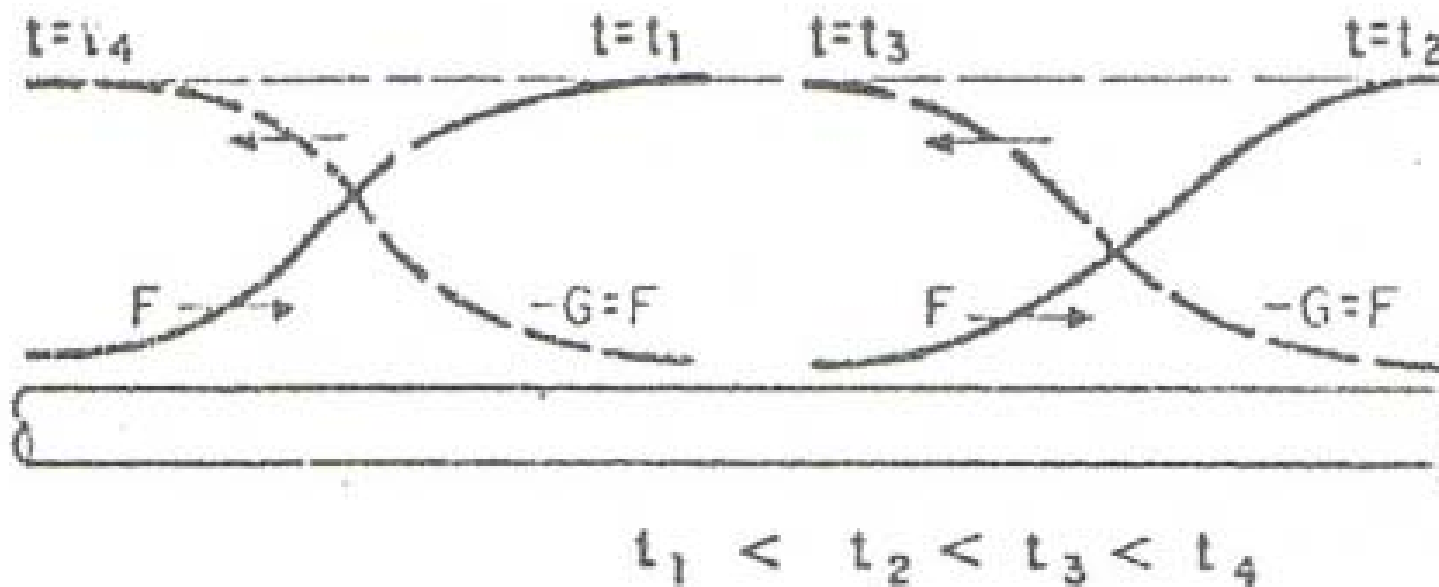
$$h(L, t) - h_0 = \frac{a}{gA} (F(L, t) - G(L, t)) \rightarrow h(L, t) - h_0 = \frac{a}{gA} (2F(L, t))$$

Se duplica el valor de la onda incidente.



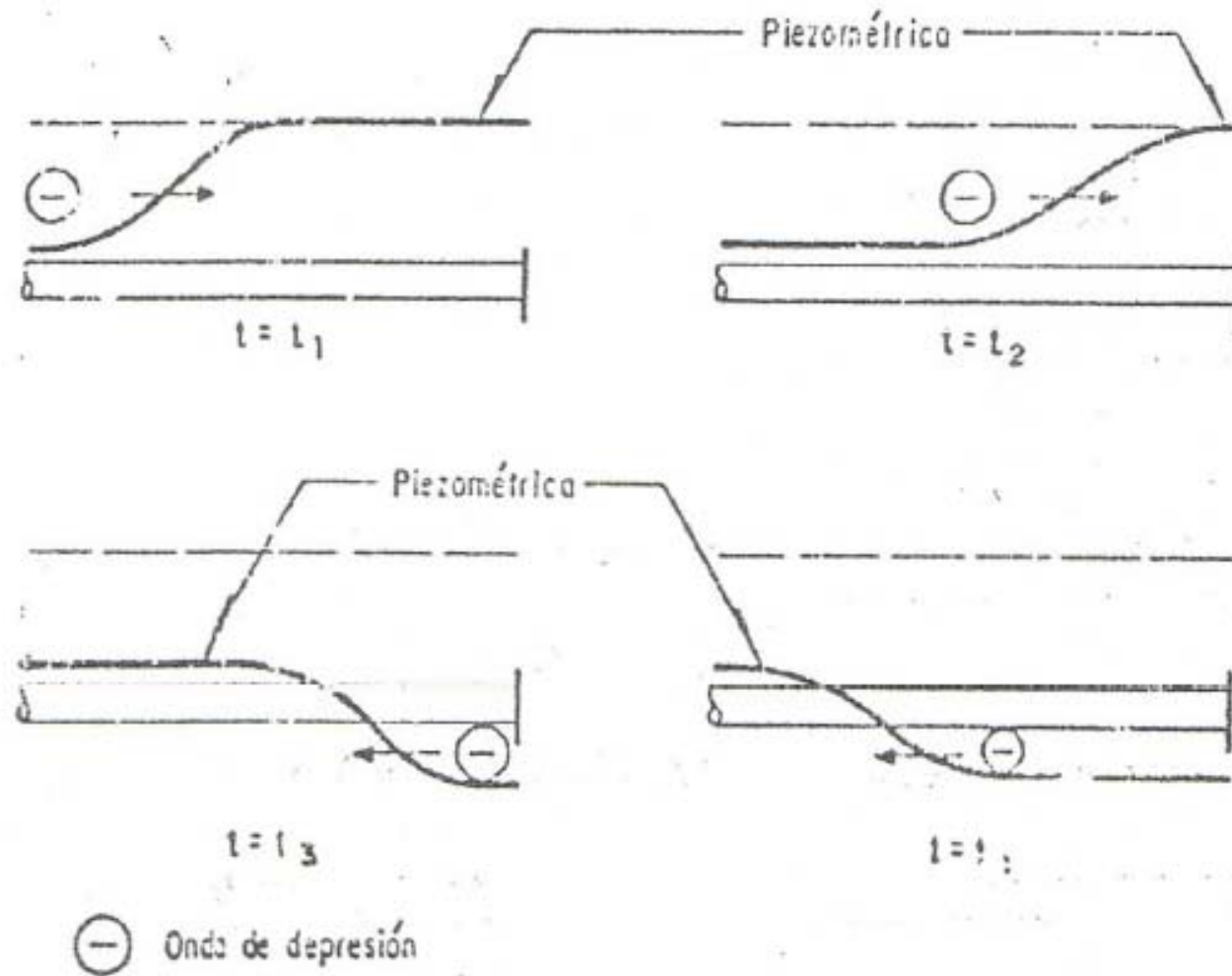
Algunas Condiciones de Borde

⇒ Reflexión de onda en extremo cerrado:



Algunas Condiciones de Borde

⇒ Reflexión de onda en extremo cerrado:



ANÁLISIS DE CASO:

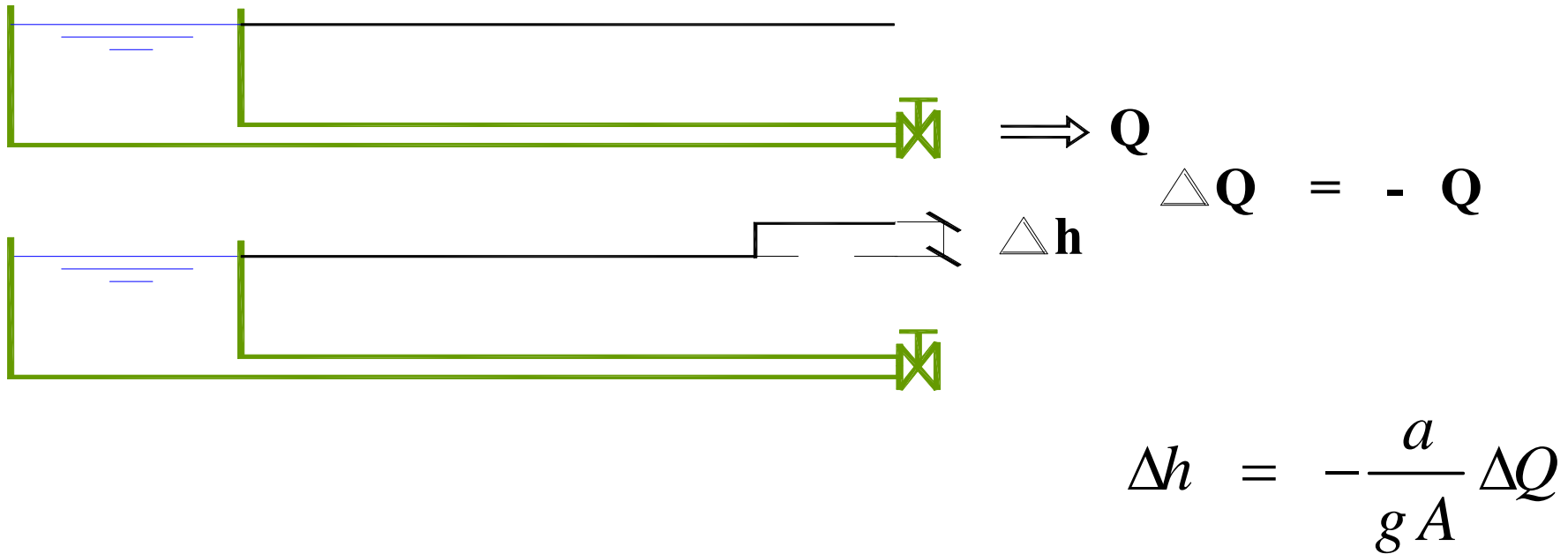
Cierre de una válvula

Modelo no estacionario, tubería elástica y fluido compresible . SIN Fricción

1- Cierre instantáneo

t_0 : instante inicial (válvula abierta)

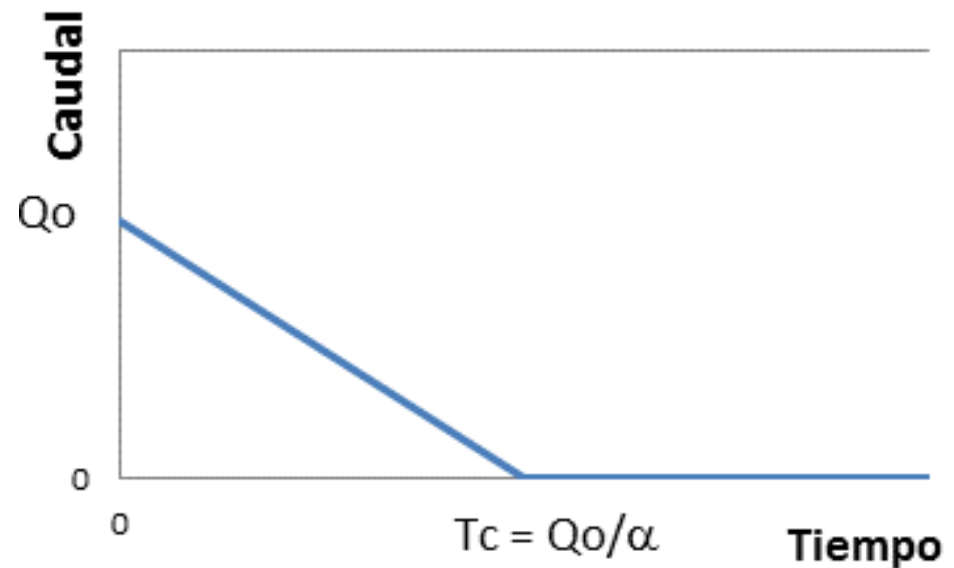
$t_0 + \Delta t$: siguiente instante válvula cerrada



2- Cierre gradual (lineal)

$$\left\{ \begin{array}{ll} Q_z = Q_0 - \alpha t & \text{para } 0 \leq t < \frac{Q_0}{\alpha} \\ Q = 0 & \text{para } \frac{Q_0}{\alpha} \leq t \end{array} \right.$$

Tiempo de cierre: $T_c = \frac{Q_0}{\alpha}$



2- Cierre gradual (lineal)

t=Δt

- Onda G a velocidad **a**: **SOBREPRESION**
- $\Delta Q = -\alpha \Delta t$ $\Delta h = -\frac{a}{gA} \Delta Q = \frac{a}{gA} \alpha \Delta t$

t= L/a

- Onda G llega a tanque, reflejándose onda F: **DEPRESIÓN**

t=2 L/a

- Onda F regresa a extremo cerrado.

Período de la tubería:

$$T = \frac{2L}{a}$$

$T_c \leq T$ - fenómeno rápido

$T_c > T$ - fenómeno lento

2- Cierre gradual (lineal)

□ 2-a: Cierre rápido

$$T_c < T \Rightarrow \frac{Q_0}{\alpha} < \frac{2L}{a} \Rightarrow \alpha > \frac{Q_0 a}{2L}$$

$$\Delta Q = Q_{final} - Q_{inicial} = -Q_0$$

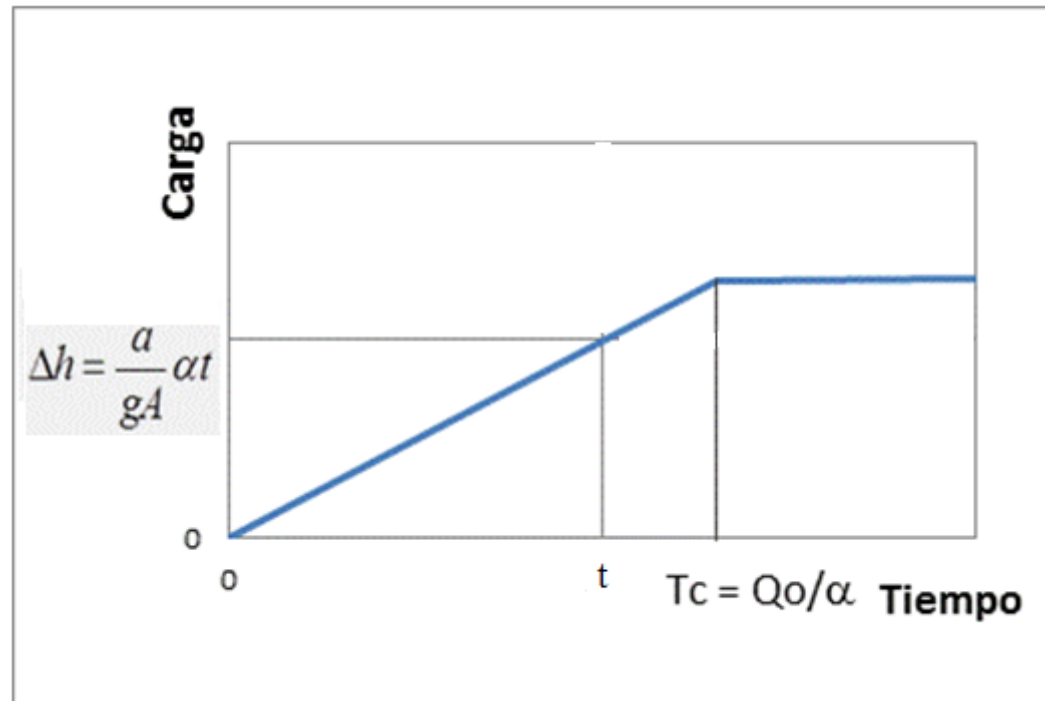
$$\Delta h = \frac{Q_0 a}{gA}$$

En $t < T_c$:

$$Q_2(t) = Q_0 - \alpha t$$

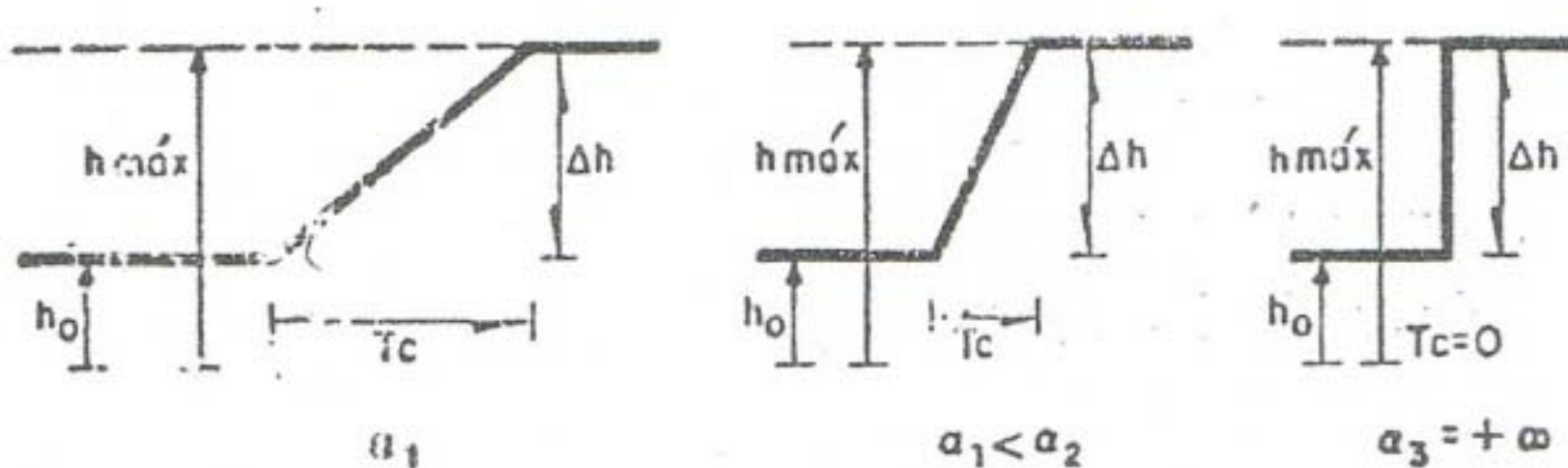
$$\Delta Q = -\alpha t$$

$$\Delta h = -\frac{a}{gA} \Delta Q = \frac{a}{gA} \alpha t$$



2- Cierre gradual (lineal)

□ 2-a: Cierre rápido: FORMA DE LA ONDA

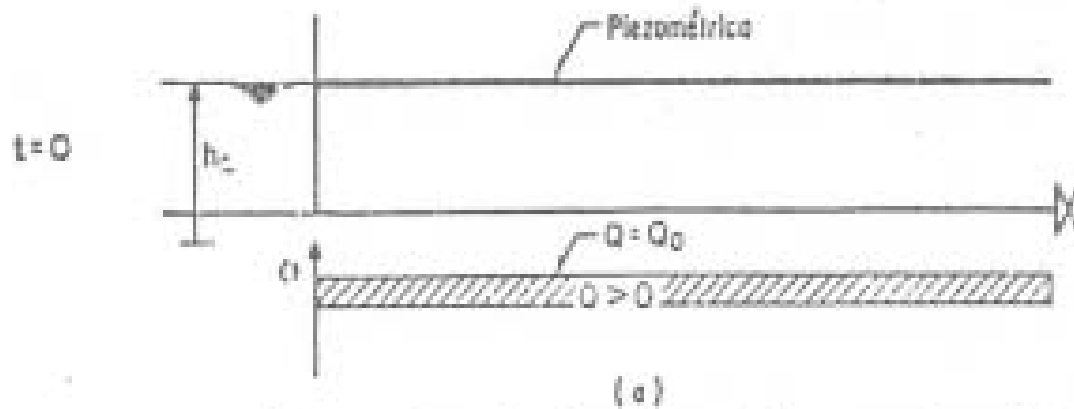


Sí $\alpha \rightarrow \infty$, forma de la onda tiende a función escalón.

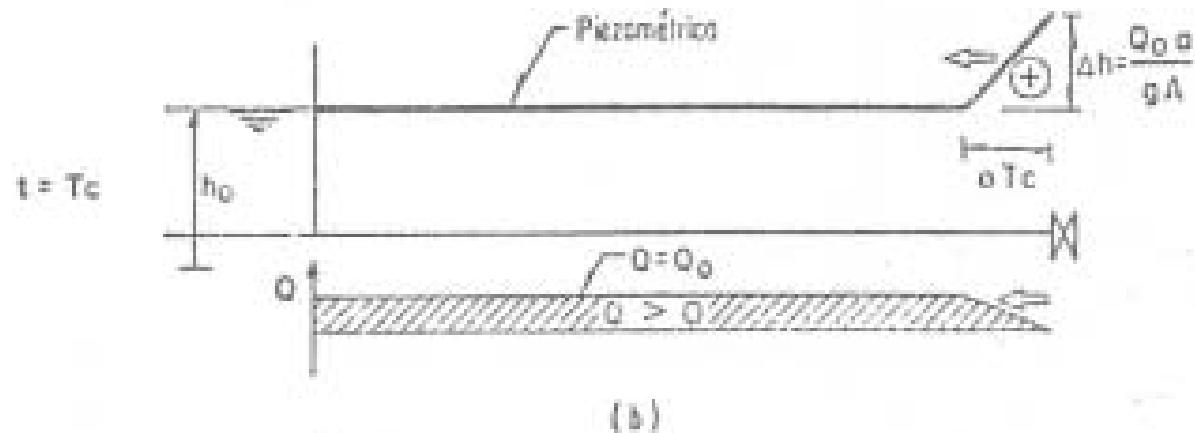
α y la función $Q(t)$ influye en la forma de la onda, pero no en su amplitud.

2- Cierre gradual (lineal)

2-a: Cierre rápido: PROPAGACIÓN DE LA ONDA



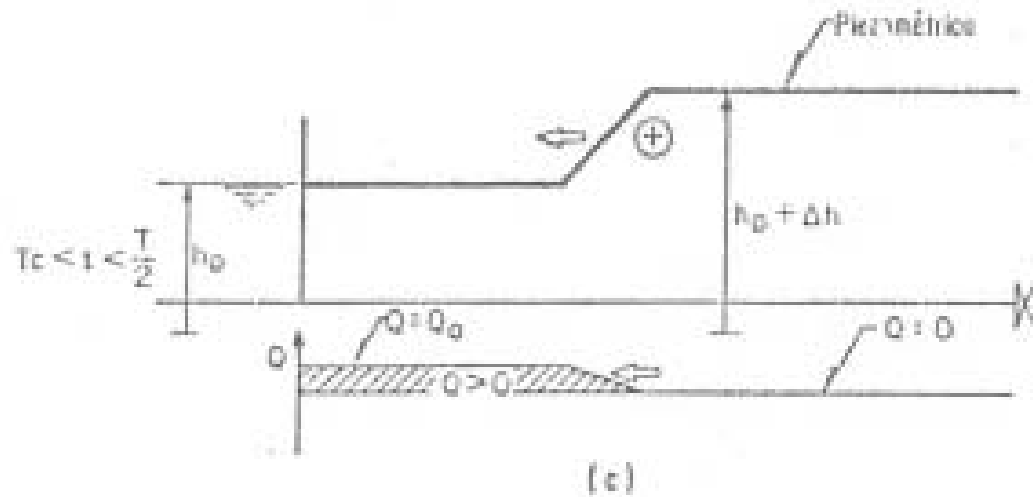
Flujo estacionario. Comienza a formarse la onda de sobrepresión.



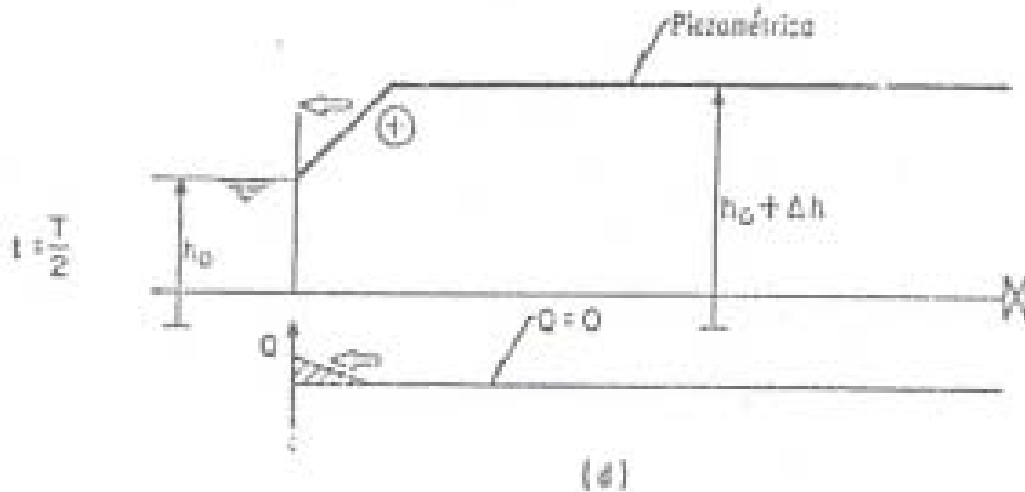
Se forma la onda de sobrepresión.

2- Cierre gradual (lineal)

2-a: Cierre rápido: PROPAGACIÓN DE LA ONDA

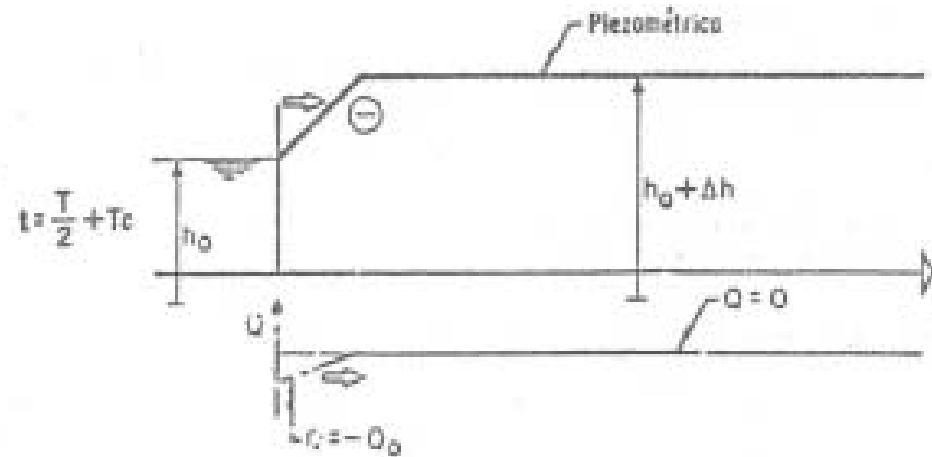


La onda viaja hacia el tanque de carga constante.



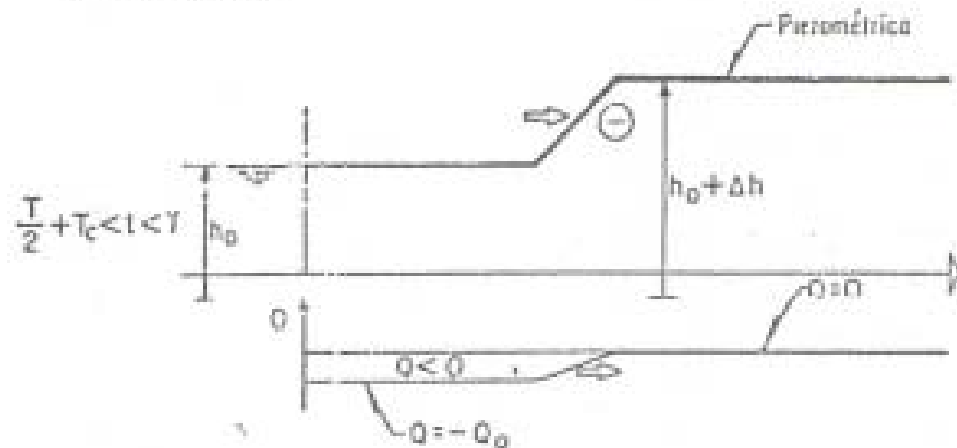
2- Cierre gradual (lineal)

2-a: Cierre rápido: PROPAGACIÓN DE LA ONDA



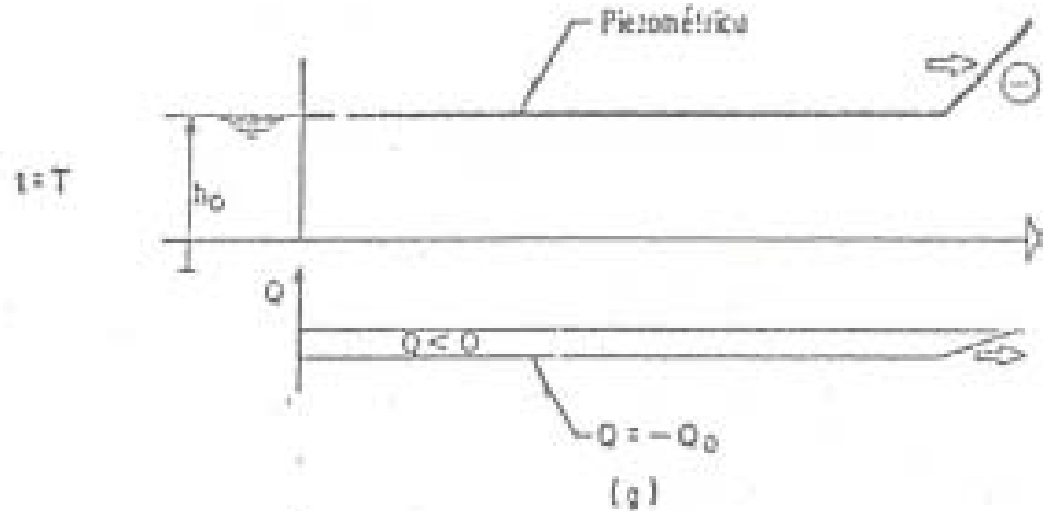
(a)

Finaliza la reflexión en el tanque. La onda de depresión parte hacia la válvula

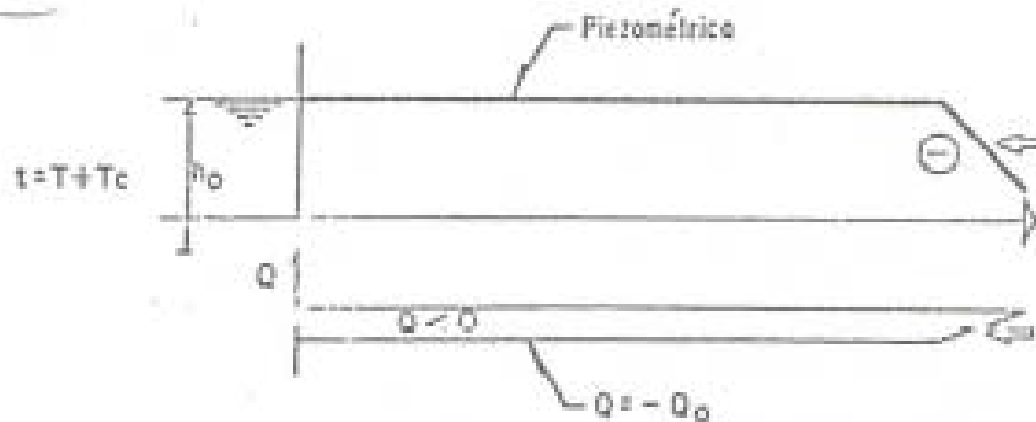


2- Cierre gradual (lineal)

2-a: Cierre rápido: PROPAGACIÓN DE LA ONDA

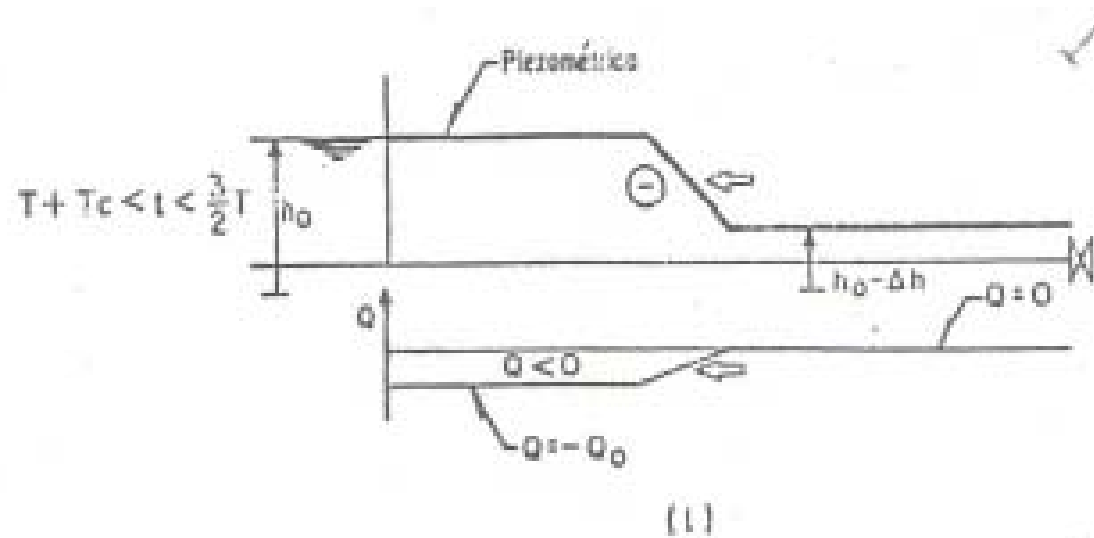


La onda de depresión llega a la válvula T segundos después del comienzo del fenómeno. Comienza la reflexión de la misma onda ($\ominus \rightarrow \oplus$) en la válvula cerrada.

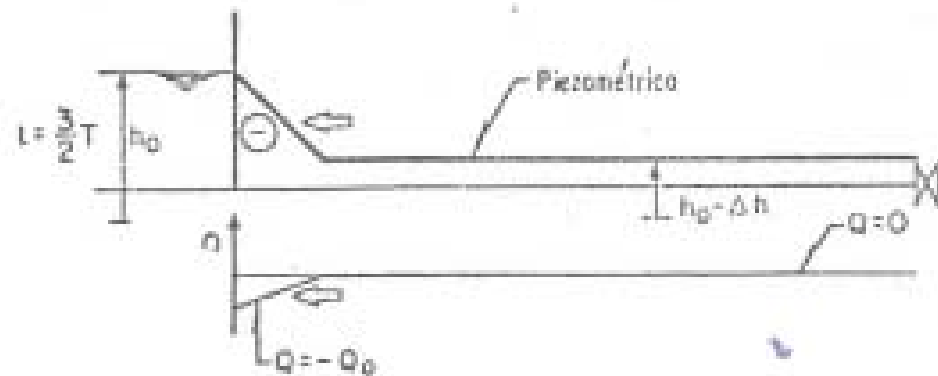


2- Cierre gradual (lineal)

2-a: Cierre rápido: PROPAGACIÓN DE LA ONDA

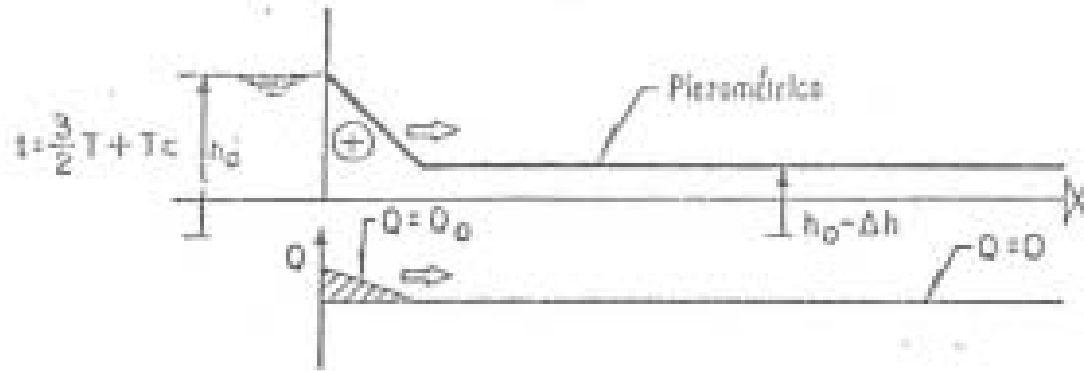


La onda de depresión viaja hacia el tanque.



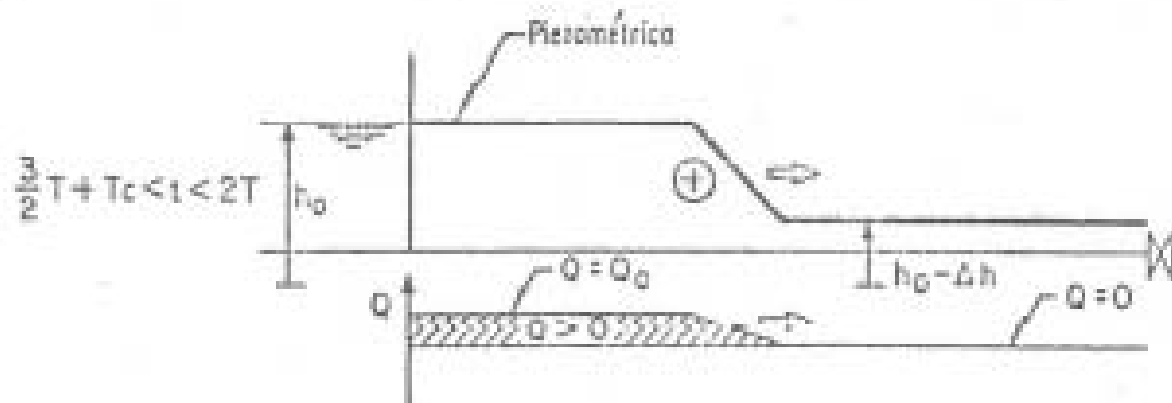
2- Cierre gradual (lineal)

2-a: Cierre rápido: PROPAGACIÓN DE LA ONDA



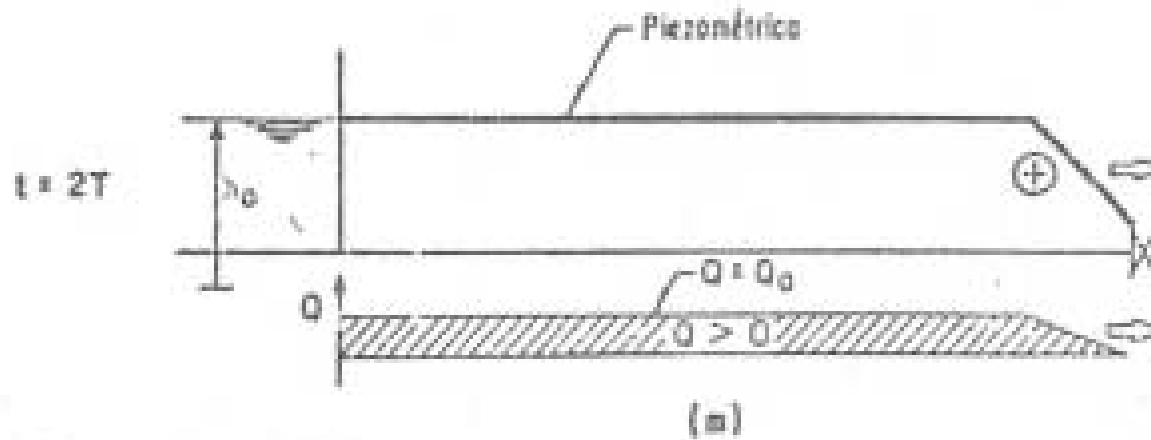
(b)

Finaliza la reflexión en el tanque. La onda de sobrepresión parte hacia la válvula.

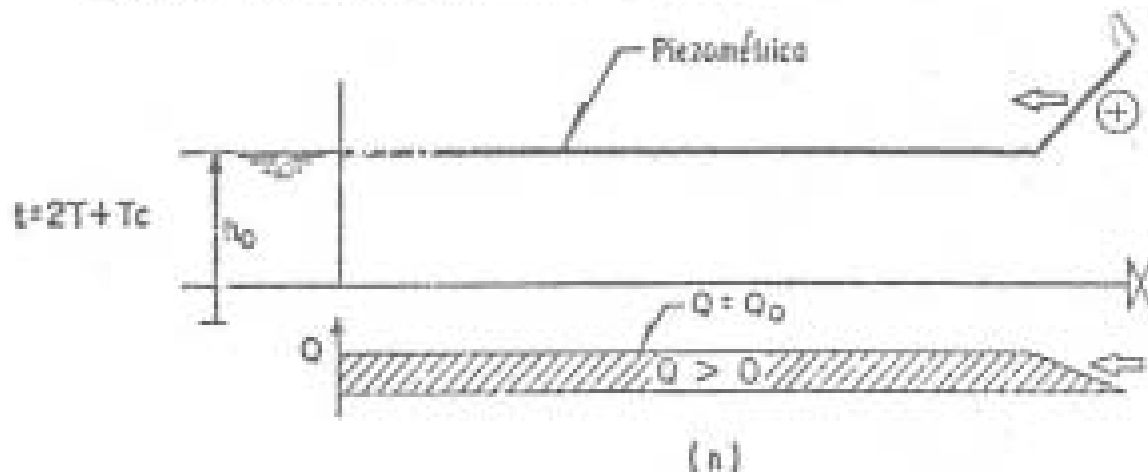


2- Cierre gradual (lineal)

□ 2-a: Cierre rápido: PROPAGACIÓN DE LA ONDA



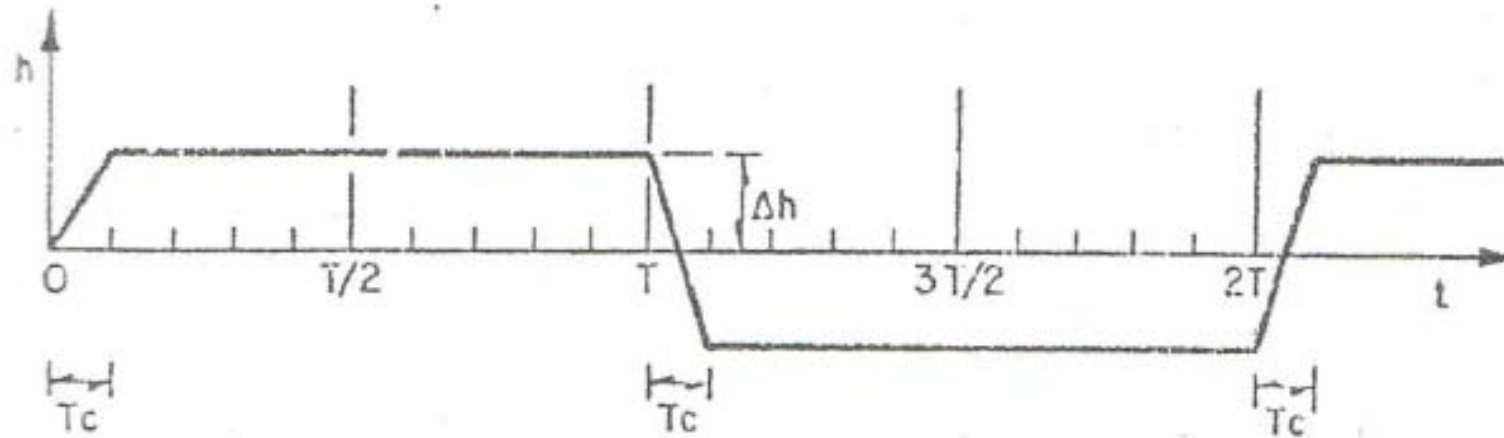
La onda de sobrepresión llega a la válvula $2T$ segundos después del comienzo del fenómeno.



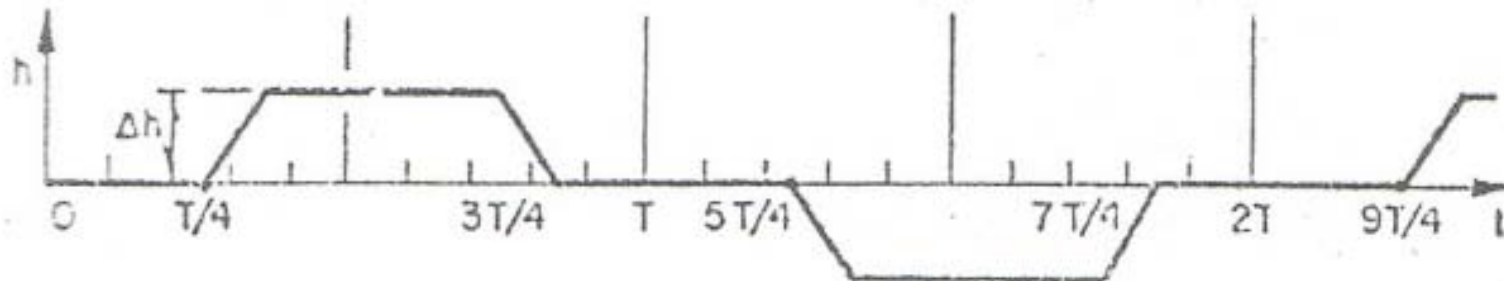
2- Cierre gradual (lineal)

□ 2-a: Cierre rápido:

Carga piezométrica en diferentes puntos de la tubería:



a) Registro correspondiente al transductor E colocado en el extremo de aguas abajo (válvula)



b) Registro del transductor M colocado en el punto medio de la tubería

2- Cierre gradual (lineal)

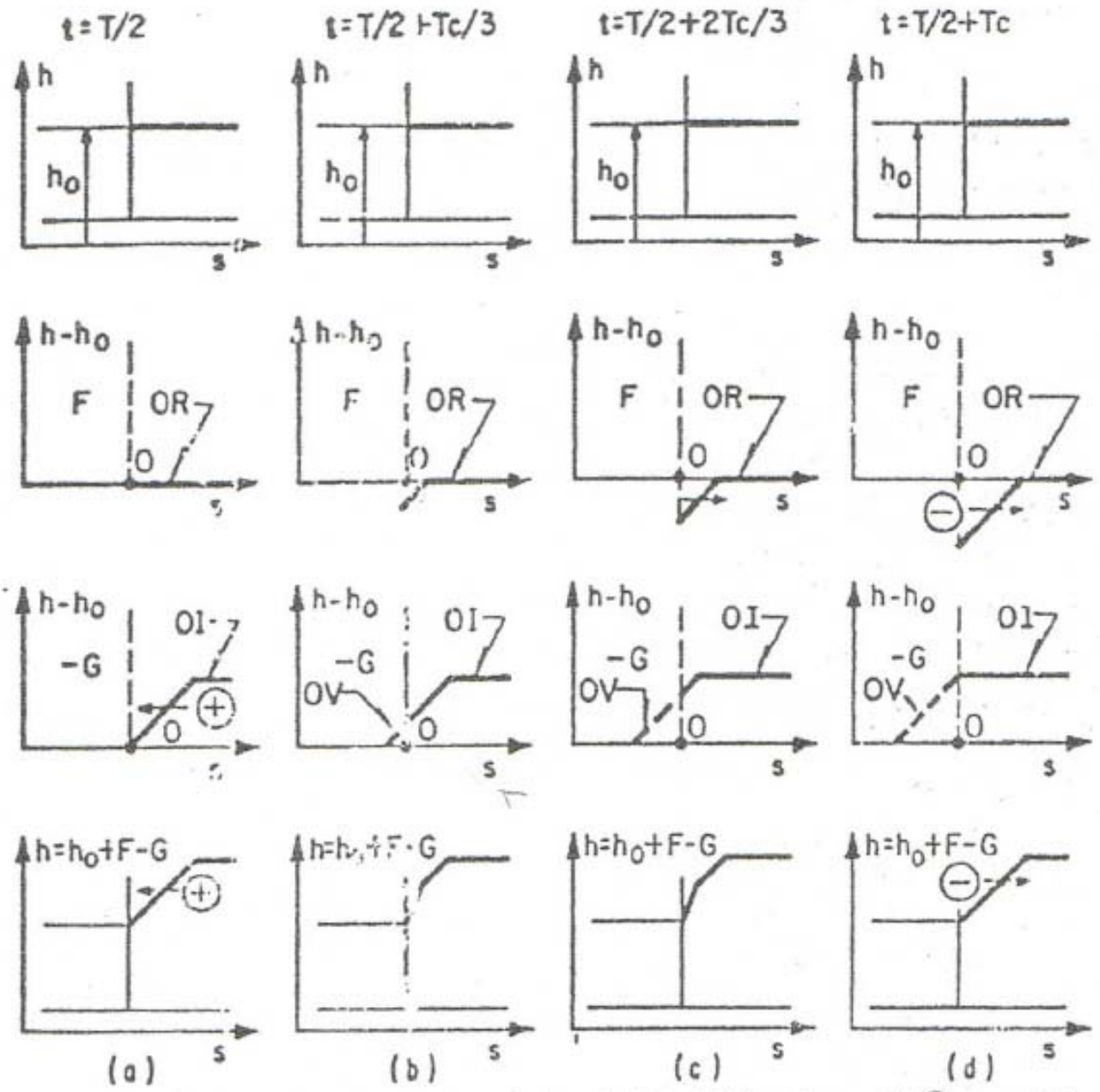
□ 2-a: Cierre rápido:

Proceso de reflexión de onda de carga piezométrica en un tanque de carga constante.

$$h = h_0 + \frac{a}{gA} [F(s - at) - G(s + at)]$$

Tanque:

$$F(L - at) = G(L + at)$$



OI- onda incidente, OR- onda reflejada, OV- onda virtual, \oplus -sobrepresión, \ominus -depresión
 La OR se obtiene girando a 180° la OV respecto al punto O

2- Cierre gradual (lineal)

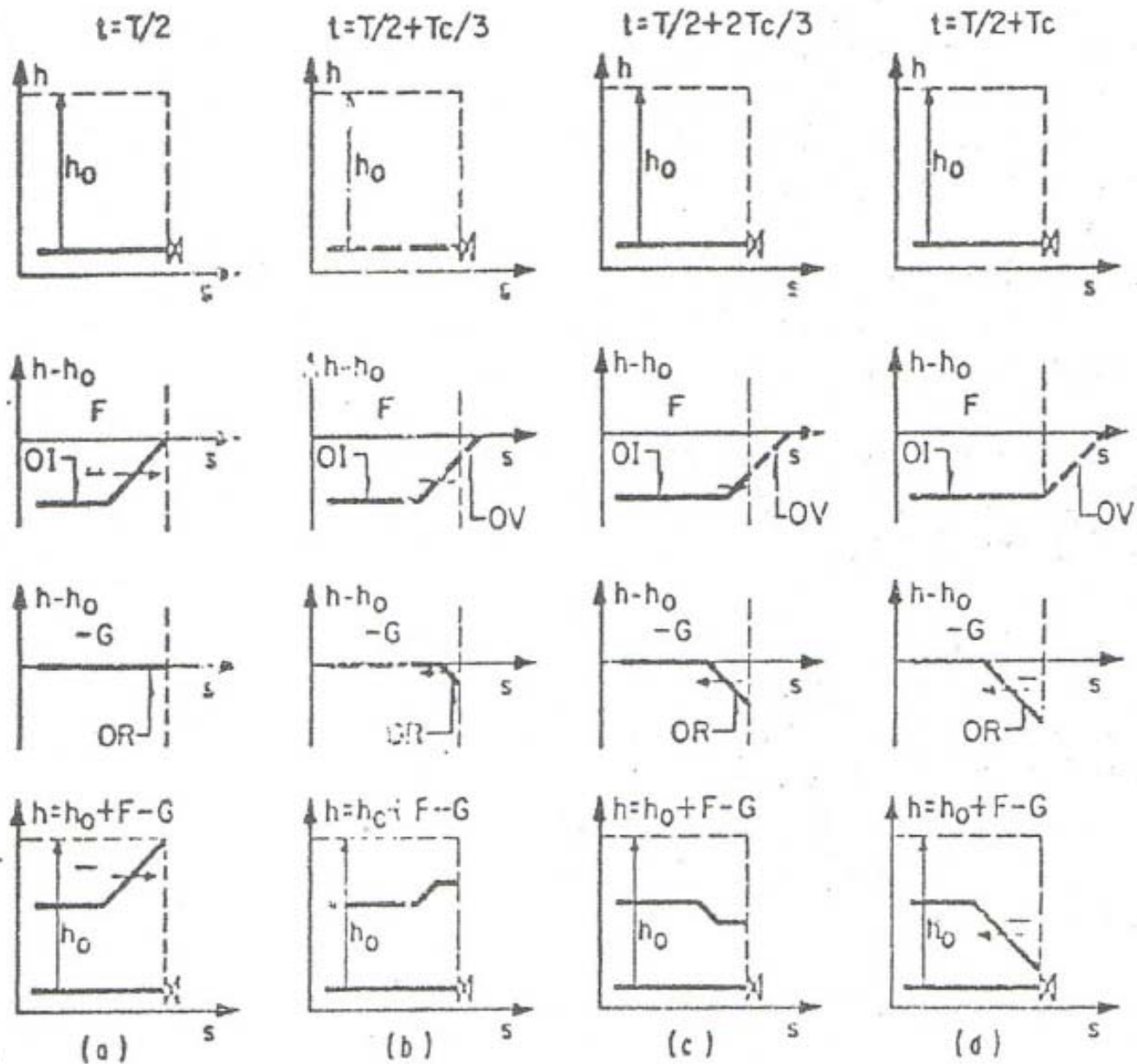
□ 2-a: Cierre rápido:

Proceso de reflexión de onda de carga piezométrica en un extremo cerrado.

$$h = h_0 + \frac{a}{gA} [F(s - at) - G(s + at)]$$

Extremo cerrado:

$$F(L - at) = -G(L + at)$$



OI—onda incidente, OR—onda reflejada, OV—onda virtual, \oplus —sobrepresión, \ominus —depresión
 La OR se obtiene por simetría axial de la OV respecto al eje que indica la presencia del extremo cerrado.

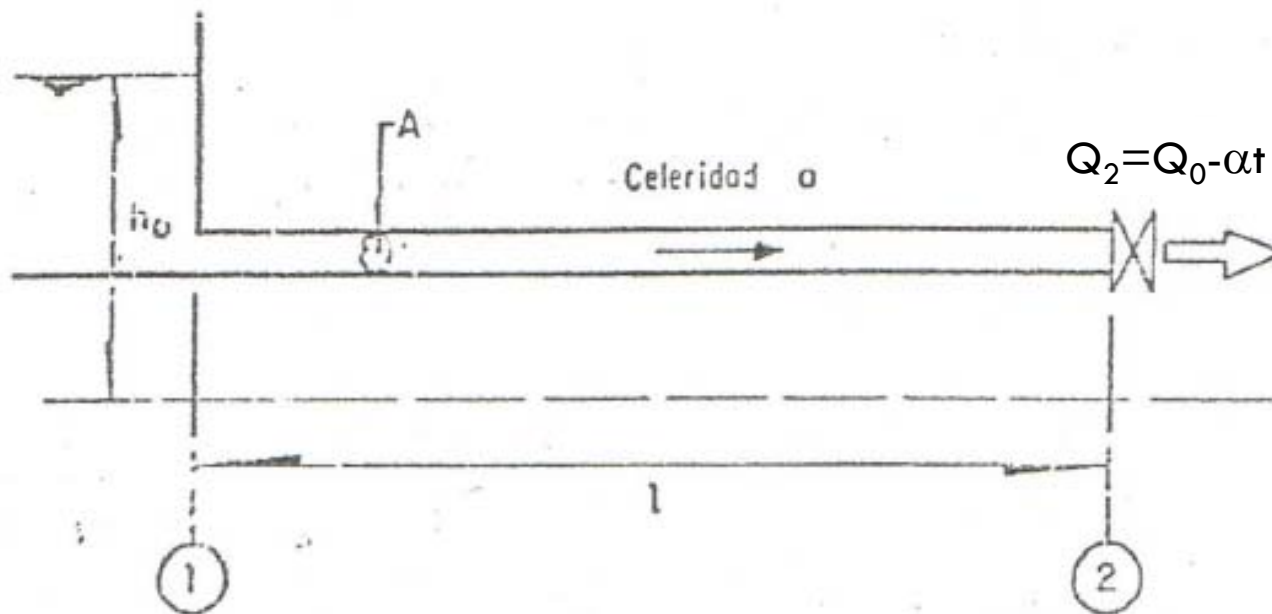
F.

2- Cierre gradual (lineal)

□ 2-b Cierre lento

$$T_c = \frac{Q_0}{\alpha} > T = \frac{2L}{a}$$

Onda reflejada en el extremo opuesto interfiere con la propia perturbación.



2- Cierre gradual (lineal)

□ 2-b Cierre lento

SE ASUME (a modo de ejemplo):

- Sucesión de 6 cierres rápidos

$$T_c = 6 \Delta T_c$$

- Período de la tubería:

$$T = 4 \Delta T_c$$

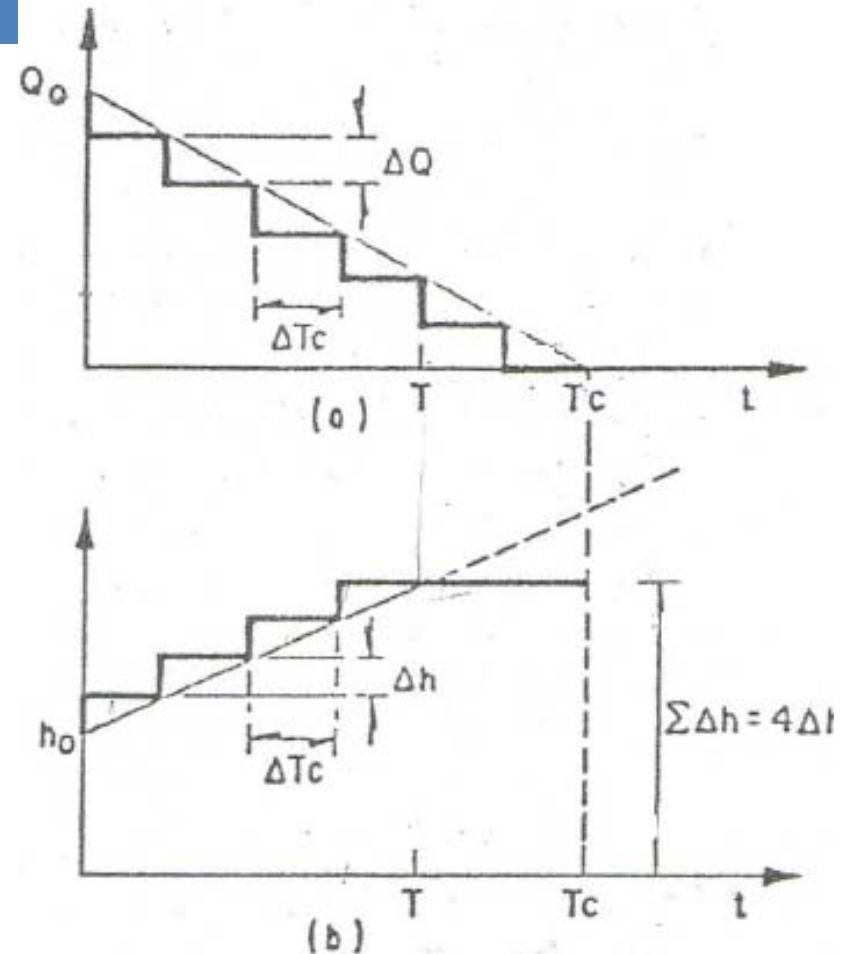
- En cada ΔT_c : $\Delta Q = \alpha \Delta T_c$, $\Delta h = \frac{a}{gA} \Delta Q$

- En $t = T \rightarrow 4\Delta h$

$$\sum \Delta h = 4 \cdot \frac{a}{gA} \Delta Q = 4 \cdot \frac{a}{gA} \cdot \alpha \cdot \Delta T_c = \alpha \cdot T \cdot \frac{a}{gA}$$

- Para $T < t < T_c$

Cada nuevo incremento Δh se superpone con la onda de carga reflejada en el tanque que vale $-\Delta h$.

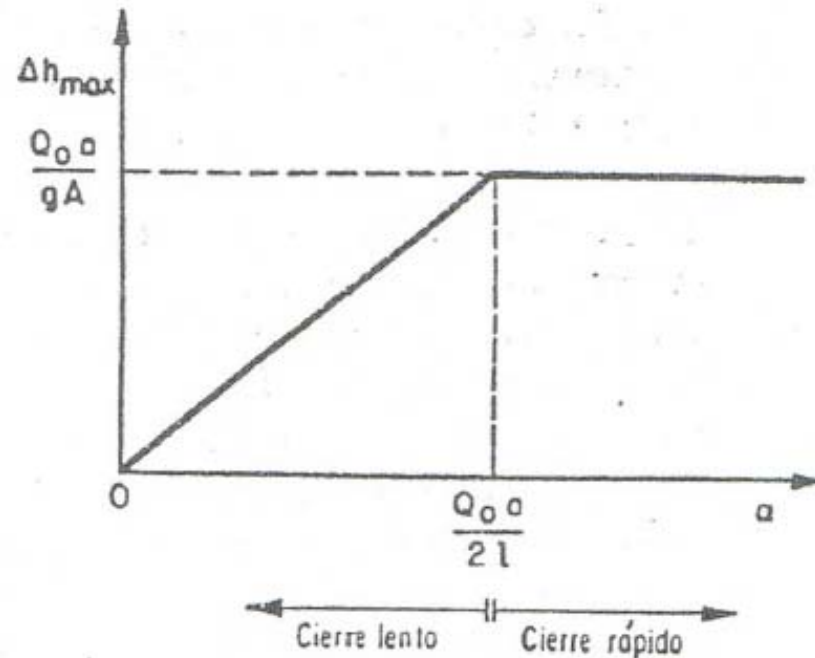


2- Cierre gradual (lineal)

□ 2-b Cierre lento

- Máximo incremento de carga en un cierre lento (sustituyendo $T=2L/a$):

$$\Delta h_{\text{máx}} = \sum \Delta h = \alpha \cdot \frac{2L}{gA}$$



- Sí α tiende a 0 (cierres muy lentos), $\Delta h_{\text{máx}}$ tiende a 0.
- Sí $T_c = T$, $\alpha = \frac{Q_0}{T} = \frac{Q_0 a}{2L}$, $\Delta h_{\text{máx}} = \frac{Q_0 a}{gA}$

Modelo no estacionario, tubería
elástica y fluido compresible .
SIN Fricción

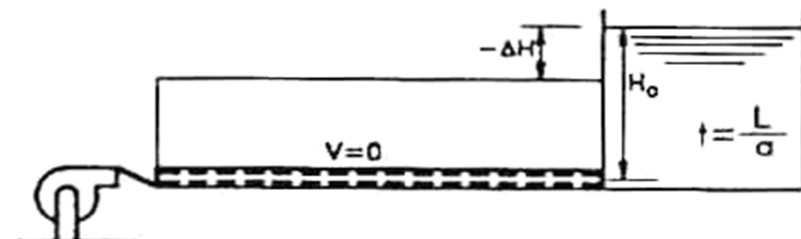
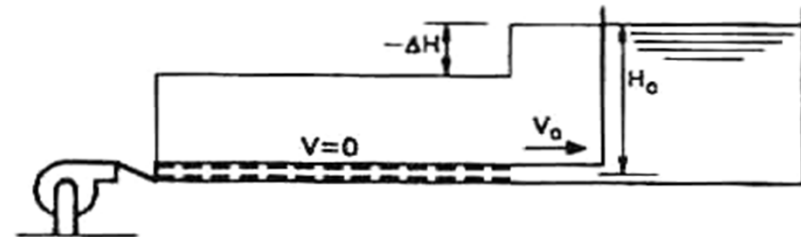
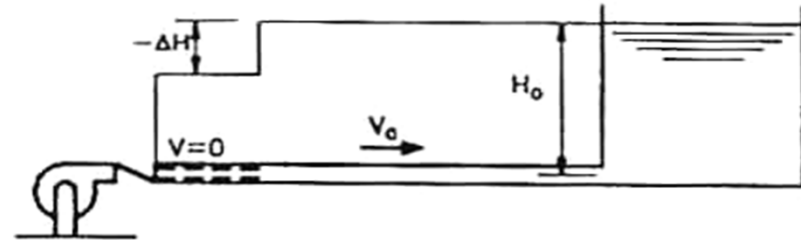
ANÁLISIS DE CASO:

Detención brusca de una
bomba

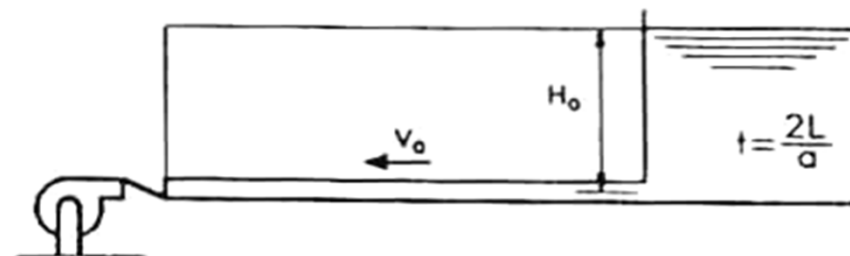
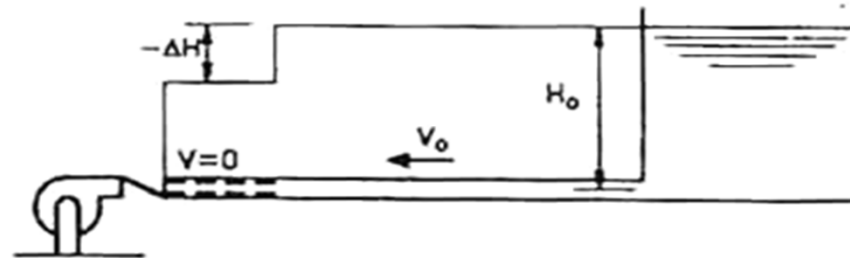
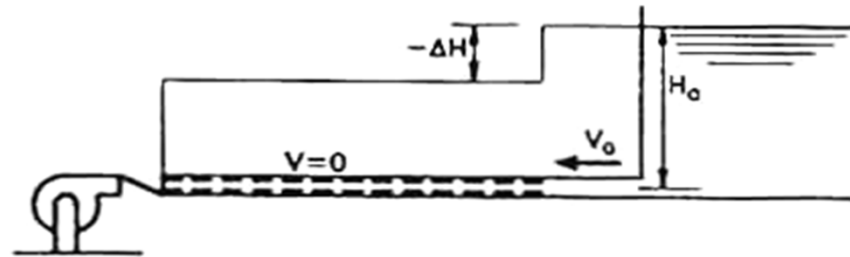
Detención brusca de una bomba

$$\begin{aligned} Q_i &= Q_0 \\ Q_f &= 0 \\ \Delta Q &= -Q_0 \end{aligned}$$

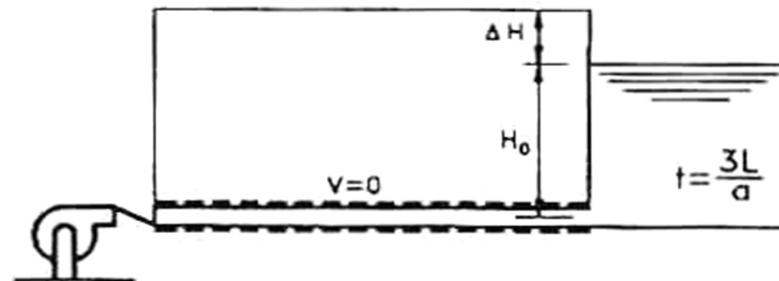
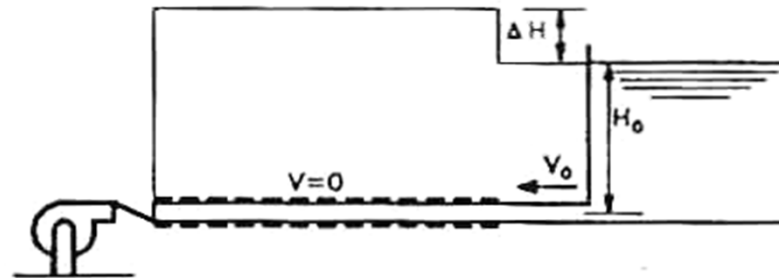
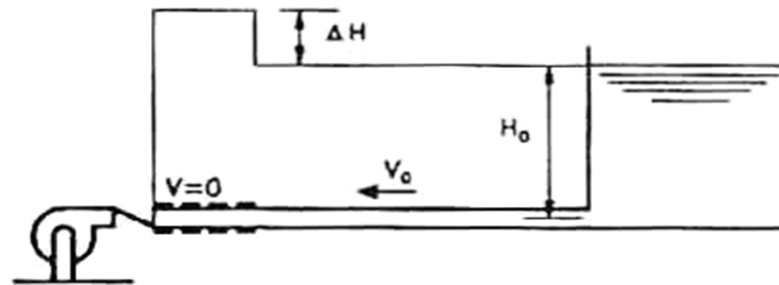
$$\rightarrow \Delta h = + \frac{a}{gA} \Delta Q = - \frac{a}{gA} Q_0$$



Detención brusca de una bomba



Detención brusca de una bomba



Detención brusca de una bomba

