GOLPE DE ARIETE

GOLPE DE ARIETE

CIERRE INSTANTÁNEO

- Fundamento
- Propagación de la onda
- Valor del golpe de ariete. Fórmula de Allievi
- Velocidad del sonido
- Celeridad de la onda en tuberías
- Oscilaciones de presión en la tubería

CIERRE GRADUAL

- Clasificación
- Techo, o envolvente, de presiones en conducciones largas
- Cálculo de la longitud crítica
- Golpe de ariete en conducciones cortas
- Tubería de característica variable

CONDUCCIONES EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

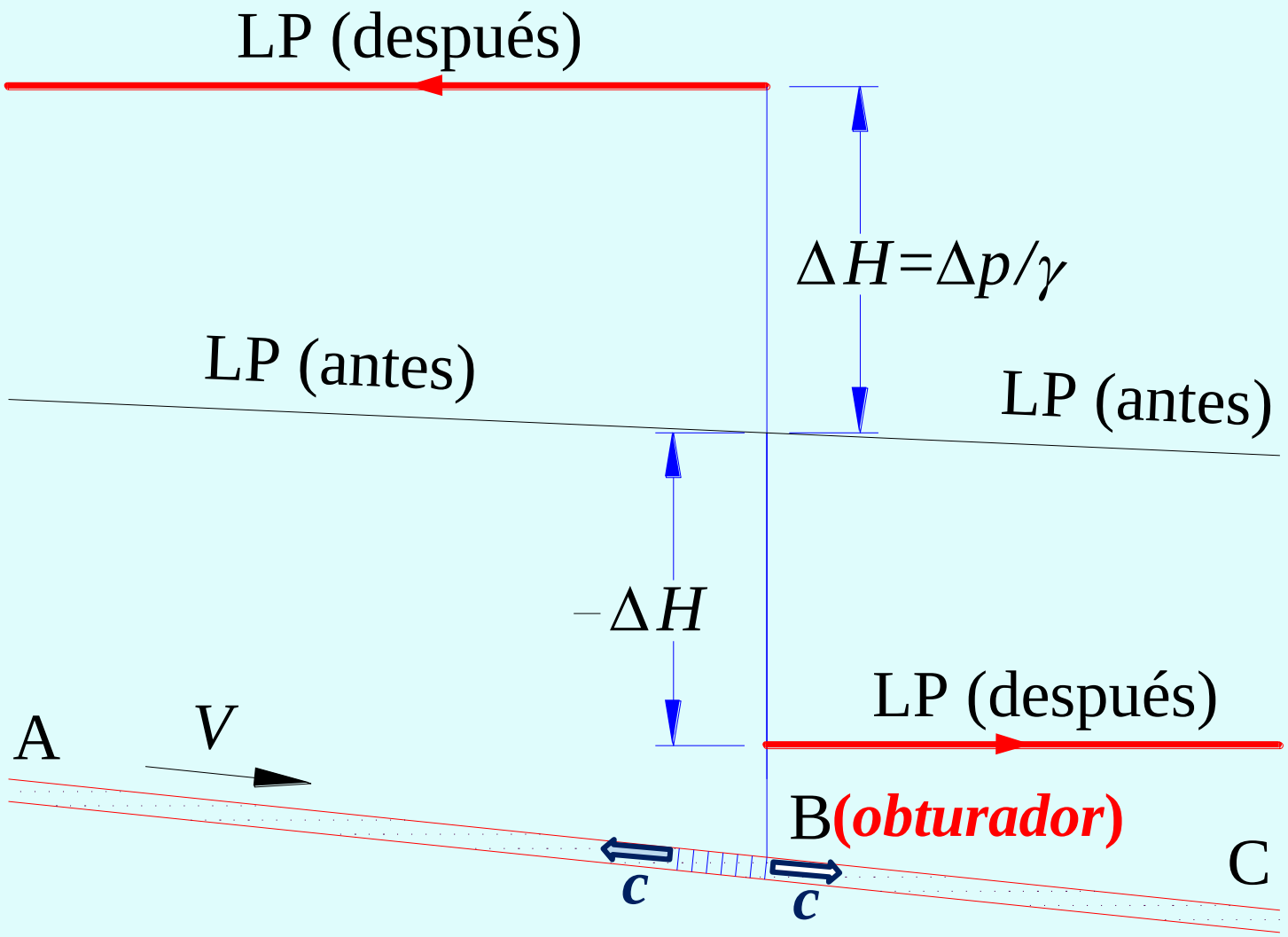
CIERRE INSTANTÁNEO

Cuando se anula el caudal en una conducción, el flujo que circula aguas arriba choca bruscamente con el obturador **(B)** provocando un apiñamiento que se traduce en un aumento de presión, que se propaga por la tubería a una velocidad ***c***.

Aguas abajo, por el contrario, aparece un estiramiento que se traduce en una disminución de presión.

Aunque la anulación nunca será instantánea, así lo vamos a considerar de momento a efectos de conceptos.

CIERRE INSTANTÁNEO



Propagación de la onda

1. a) fluido incompresible (no existe)
   b) tubería inelástica (difícil de conseguir)

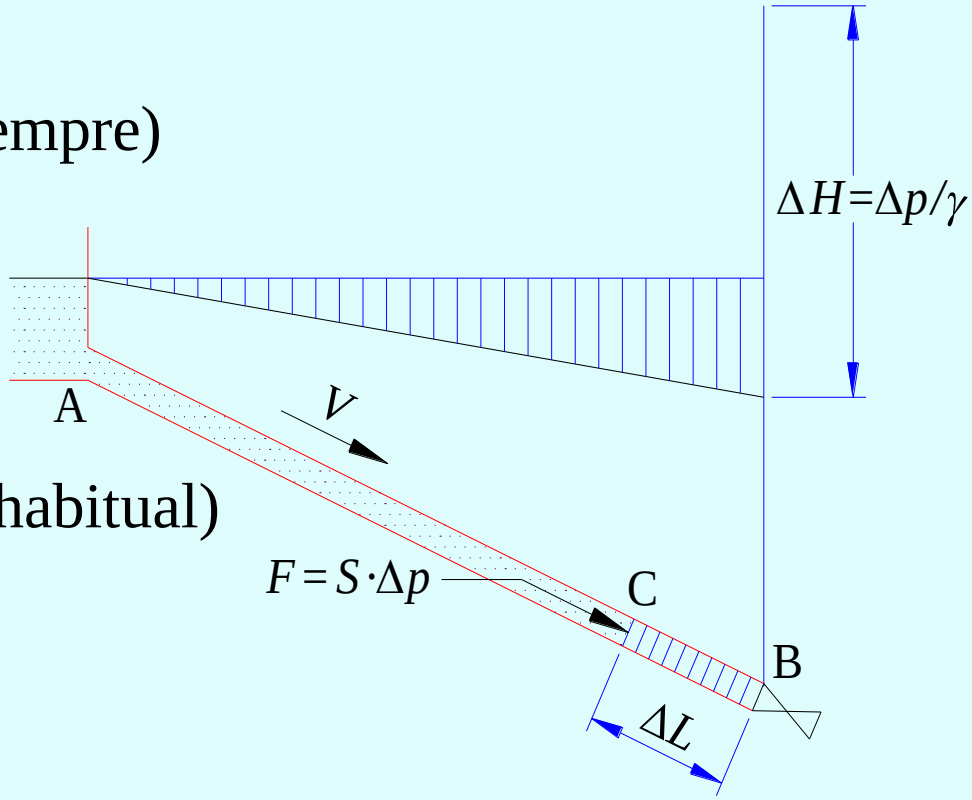
$$c = \infty$$

2. a) fluido compresible (siempre)
   b) tubería inelástica

$$c = a$$

3. a) fluido compresible
   b) tubería elástica (es lo habitual)

$$c < a$$



Fórmula de Allievi y/o de Joukowski

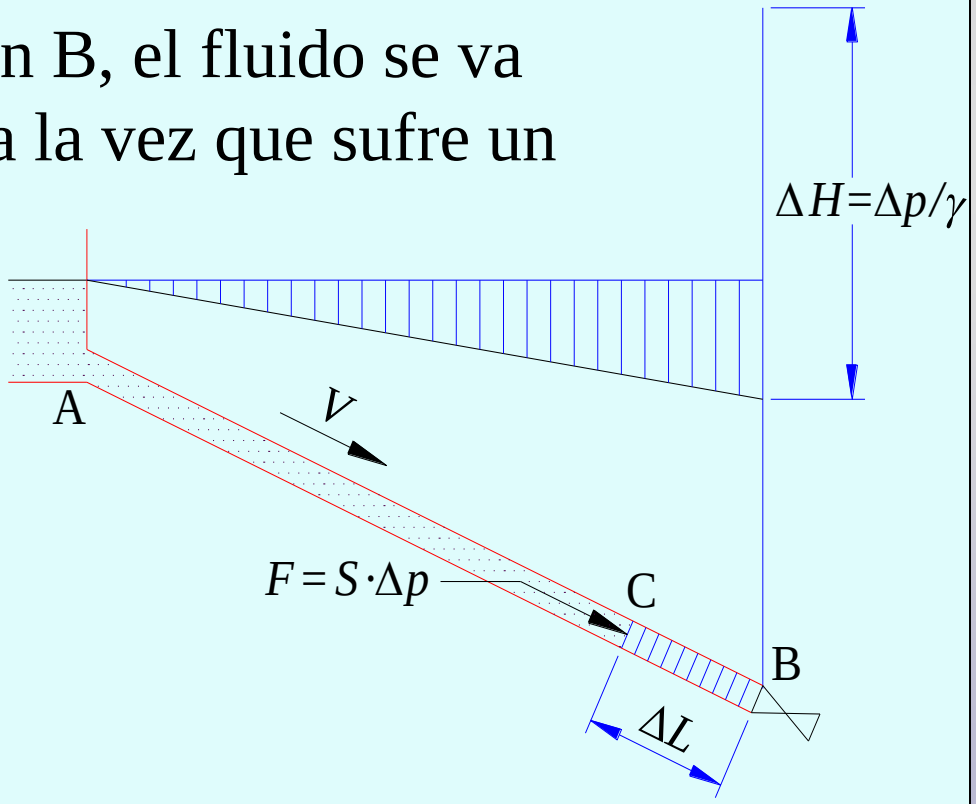
Aparece en 1904 como máximo golpe de ariete posible, poniendo límite a la fórmula anteriormente usada de Micheaud (finales del siglo XIX).

Cuando se anula el flujo en B, el fluido se va parando a la velocidad ***c***, a la vez que sufre un aumento de presión, ***Δp*** (***ΔL*** en un tiempo ***t***):

$$F = S \cdot \Delta p$$

$$t = \Delta L / c$$

$$m = \rho \cdot S \cdot \Delta L$$



CIERRE INSTANTÁNEO

Al pasar de V a V' menor ($V' < V$):

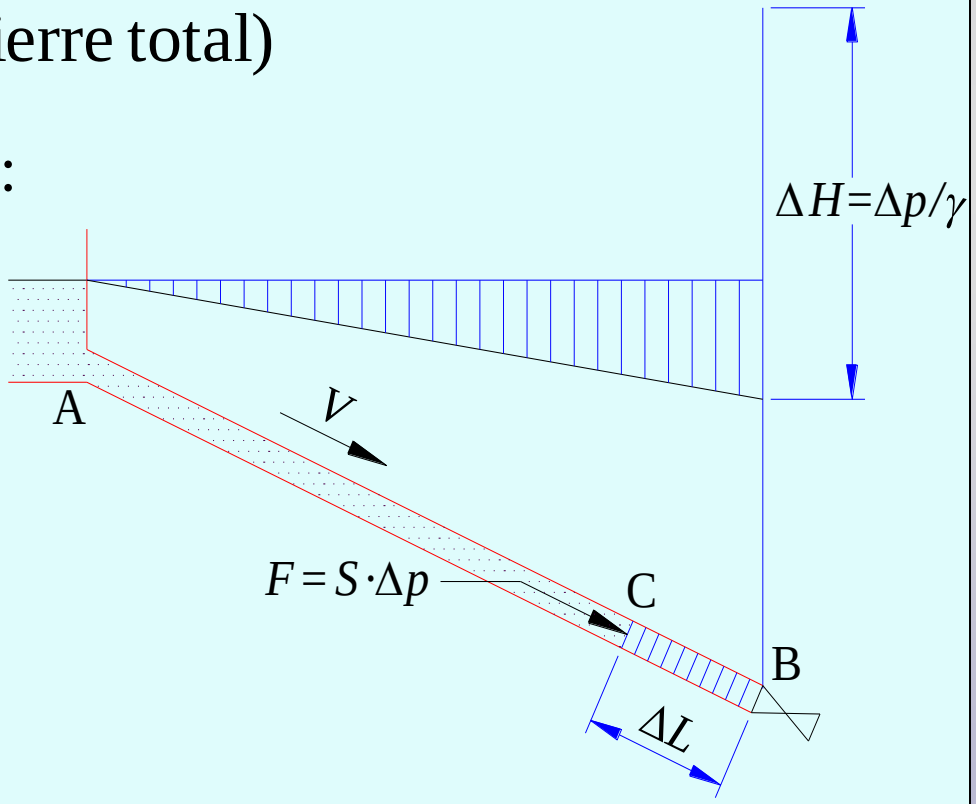
$$F \cdot t = m \cdot \Delta V; \quad S \cdot \Delta p \cdot \frac{\Delta L}{c} = \rho \cdot S \cdot \Delta L \cdot \Delta V$$

$$\begin{cases} \Delta V = V - V' & \text{(cierre parcial)} \\ \Delta V = V & \text{(cierre total)} \end{cases}$$

Para $\Delta V = V$ más peligroso:

$$\boxed{\Delta p = \rho \cdot c \cdot V}$$

$$\boxed{\Delta H = \frac{c \cdot V}{g}}$$

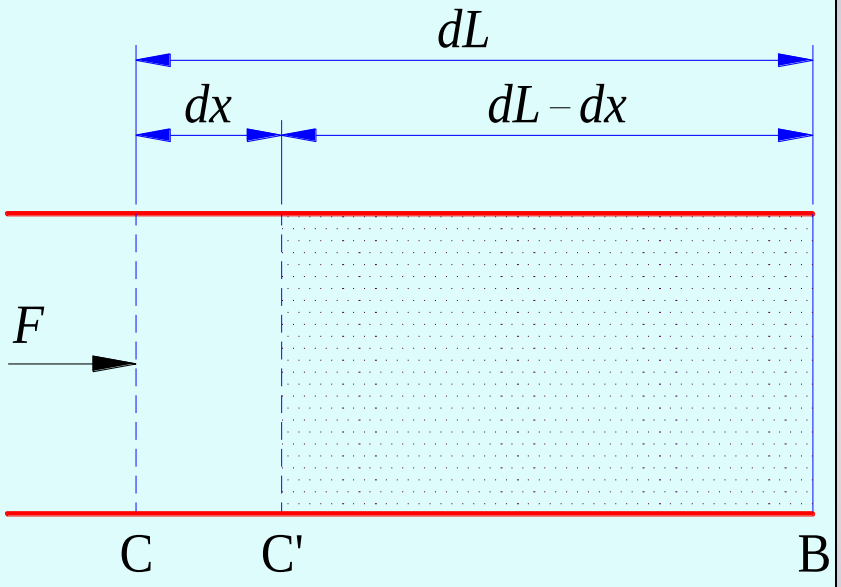


Velocidad de sonido

Sería la velocidad de la onda en una tubería inelástica: ***a* = *c***.

Trabajo de la fuerza F

$$dW = \overline{F} \cdot dx = \frac{S \cdot \Delta p}{2} \cdot dx$$



La fuerza F que comprime la rodaja pasa de $F = 0$ en C, a $F = S \cdot \Delta p$ en C':

$$dW = \frac{S \cdot \rho \cdot a \cdot V}{2} \cdot dx$$

Energía cinética que desaparece

$$\frac{1}{2} \cdot dm \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot dL \cdot V^2$$

Igualando ambas expresiones se obtiene:

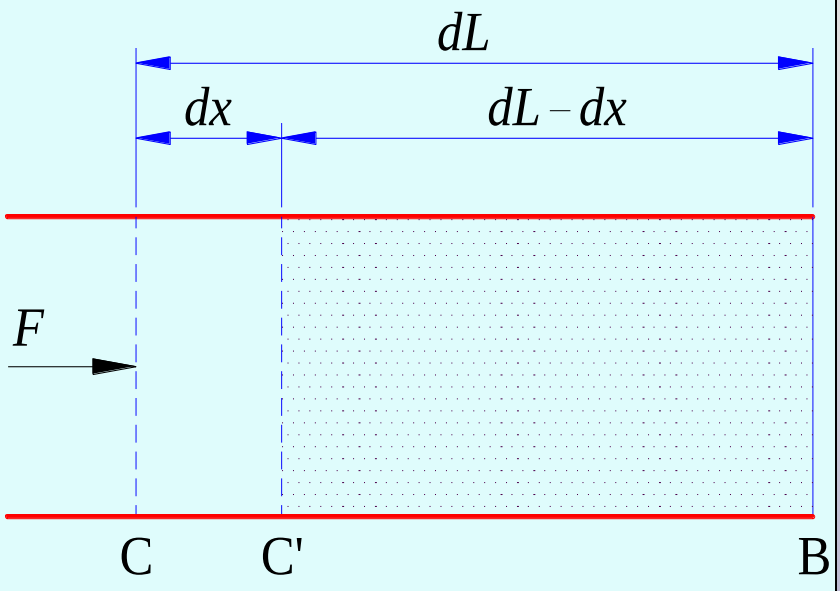
$$\frac{1}{2}\cdot S\cdot\rho\cdot a\cdot V\cdot dx=\frac{1}{2}\cdot\rho\cdot S\cdot dL\cdot V^2$$

$$\frac{V}{a}=\frac{S\cdot dx}{S\cdot dL}=\frac{\text{variación de volumen}}{\text{volumen inicial}}=\frac{\text{módulo elasticdad}}{\text{aumento de presión}}=\frac{K}{\Delta p}$$

Sustituyendo de nuevo Δp:

$$\frac{V}{a}=\frac{\rho\cdot a\cdot V}{K};\quad a^2=\frac{K}{\rho}$$

$$\boxed{a=\sqrt{\frac{K}{\rho}}}$$



Velocidad del sonido en el agua

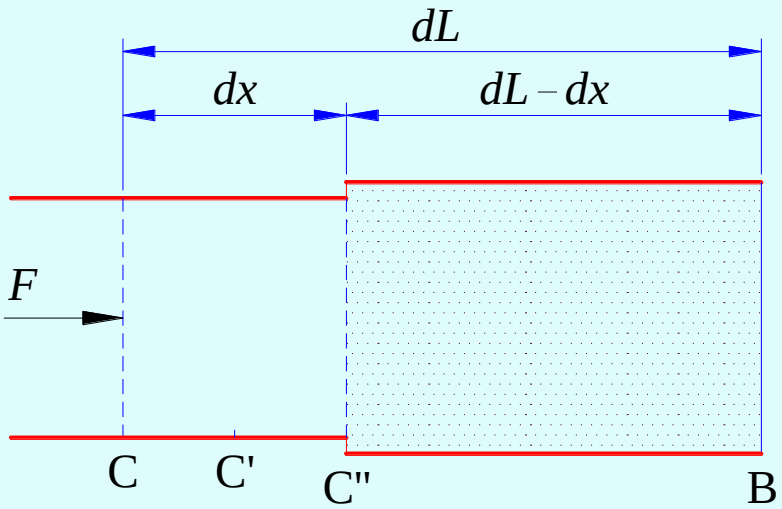
$K = 2{,}03 \cdot 10^9$ N/m^2 (tabla 4):

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{2{,}03 \cdot 10^9}{1000}} = 1425 \text{ m/s}$$

Celeridad de la onda en tuberías

Al dilatarse la tubería, el fluido tarda más en pararse (la velocidad de la onda resulta menor). Haciendo intervenir la elasticidad *K*' del material, llegaríamos a la fórmula de Joukowski:

$$c = \frac{\sqrt{\dfrac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \dfrac{K}{K'} \cdot \dfrac{D}{e}}}$$



K = módulo elasticidad fluido

K' = módulo elasticidad material

e = espesor tubería

Cuanto más elástico sea el material, menor será la celeridad.

Para el agua $(K = 2{,}07 \cdot 10^8 \text{ kgf/m}^2)$ Allievi propuso:

$$c = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{2{,}07 \cdot 10^8}{K'} \cdot \frac{D}{e}}} = \frac{1425 \cdot \sqrt{48{,}3}}{\sqrt{48{,}3 + \frac{10^{10}}{K'} \cdot \frac{D}{e}}}$$

Llamando **k** al adimensional $10^{10}/K'$(para distinguirlo de ***k*** cursiva de altura de rugosidad):

$$\boxed{c = \frac{9900}{\sqrt{48{,}3 + \mathrm{k} \cdot \frac{D}{e}}}}$$

Cuando hay dos materiales,

$$e = e_1 + e_2 \cdot \frac{K'_2}{K'_1}$$

TABLA 13. Valores orientativos de k

Hierro y acero	k = 0,5
Hormigón	k = 5
Hormigón armado	k ≈ 5
Fundición	k = 1
Fibrocemento	k ≈ 5,4 (5 ÷ 6)
Poliester	k = 6,6
Plomo	k = 5
PVC	k ≈ 33 (20 ÷ 50)

EJERCICIO

Calcúlese la velocidad de la onda en una tubería de 600 mm de diámetro, que tiene una capa de acero (K' = 2·1010 kgf/m2) de 1 mm de espesor y otra de hormigón (K' = 2·109 kgf/m2) de 60 mm.

Solución

Espesor equivalente

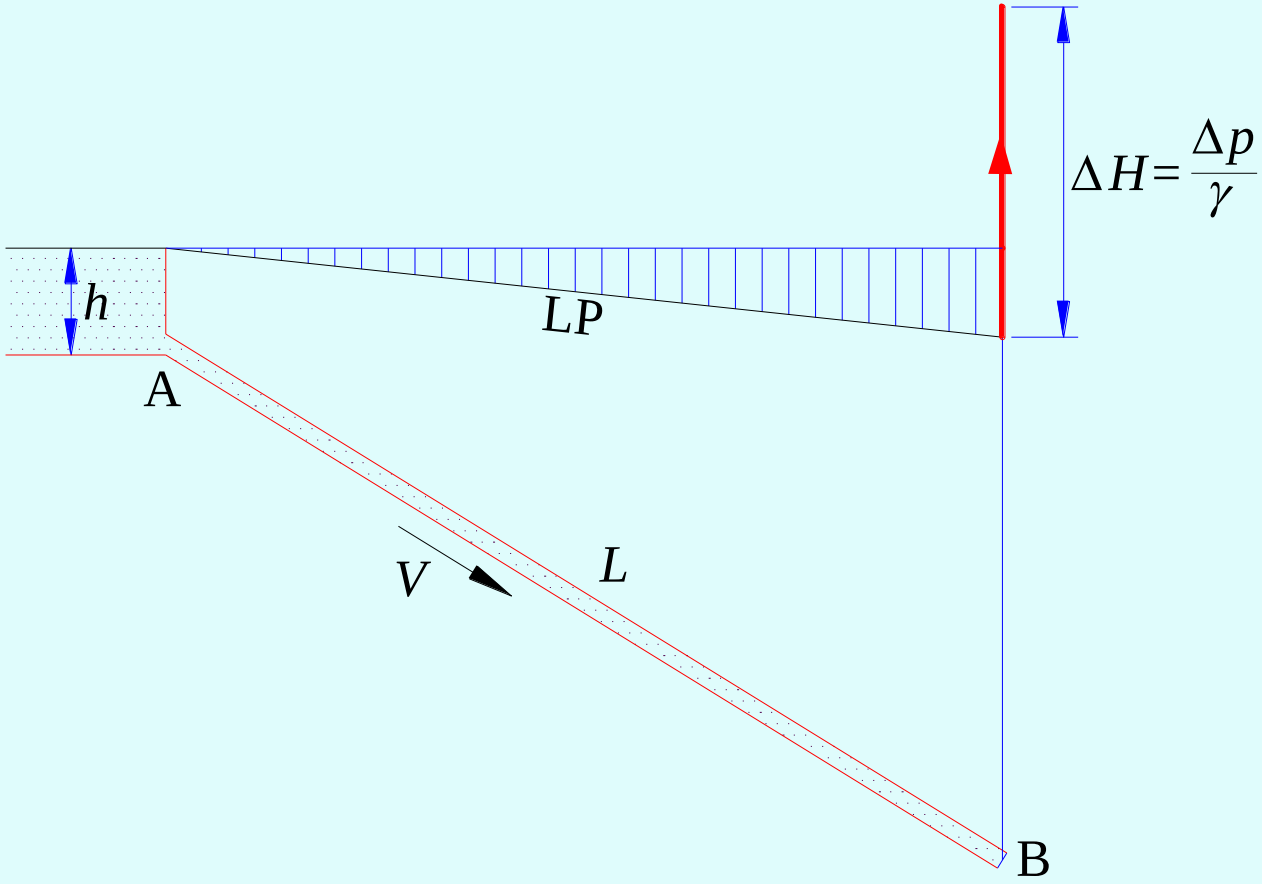
$$e = e_1 + e_2 \cdot \frac{K'_2}{K'_1} = 1 + 60 \cdot \frac{2 \cdot 10^9}{2 \cdot 10^{10}} = 7 \text{ mm}$$

Velocidad de propagación

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48{,}3 + \mathrm{k} \cdot \frac{D}{e}}} = \frac{9900}{\sqrt{48{,}3 + 0{,}5 \cdot \frac{600}{7}}} = 1037 \text{ m/s}$$

Oscilaciones de presión en la tubería

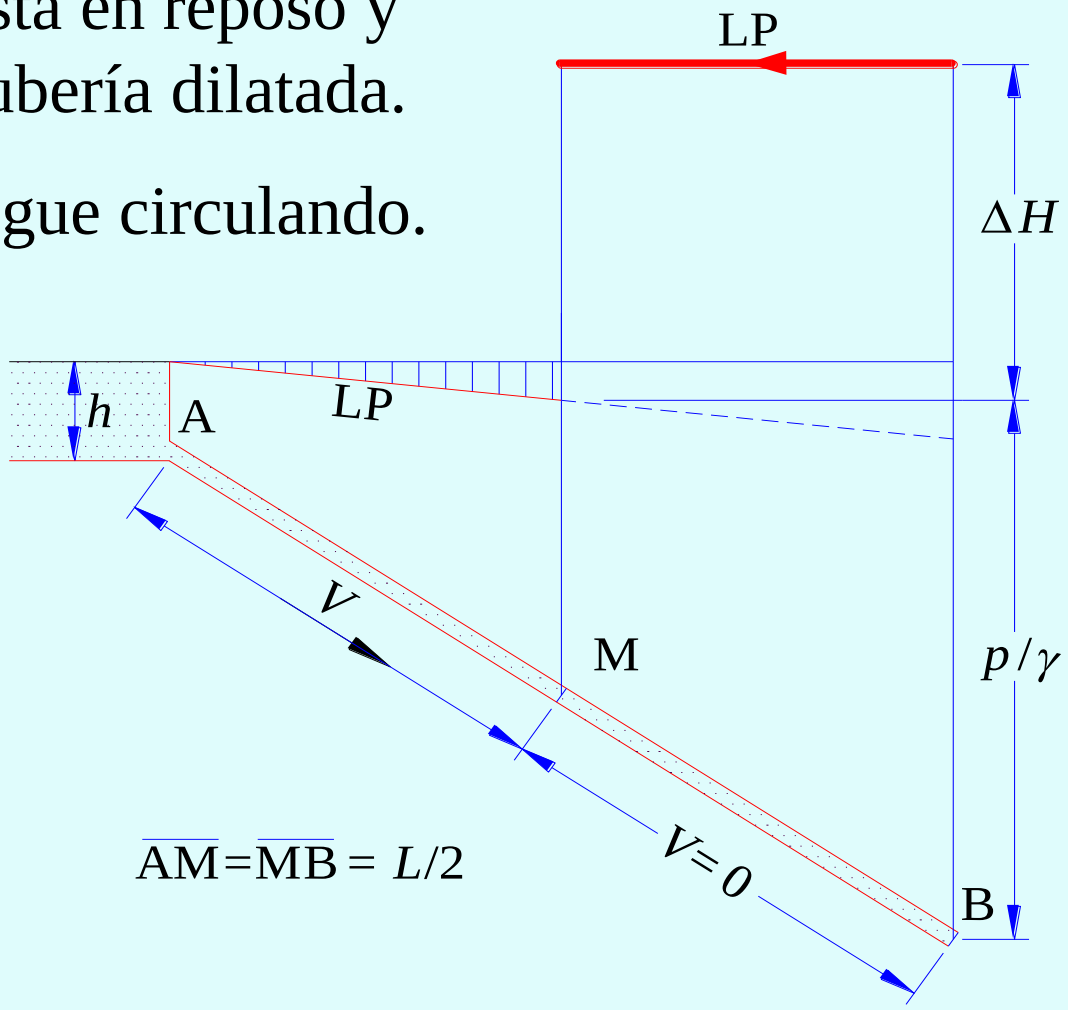
Instante, $t = 0$



Instante, $t = (L/2)/c$

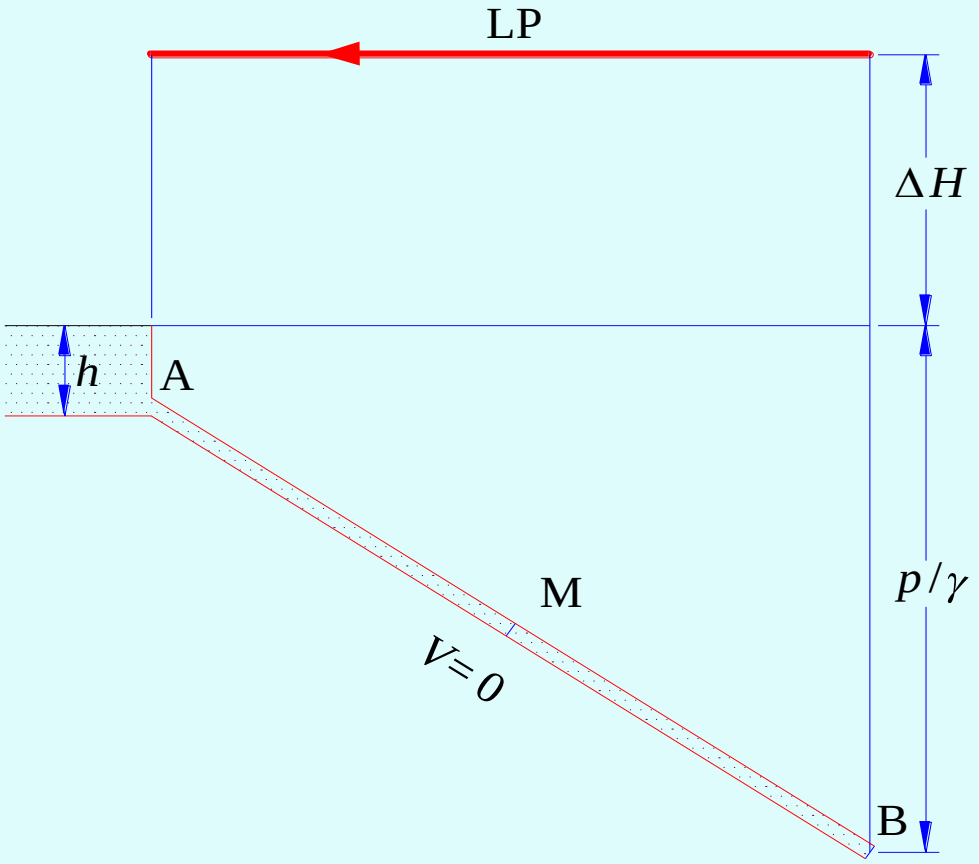
En MB, el fluido está en reposo y comprimido, y la tubería dilatada.

En AM, el fluido sigue circulando.



Instante, $t = L/c$

El fluido está en reposo y comprimido, y toda la tubería dilatada.

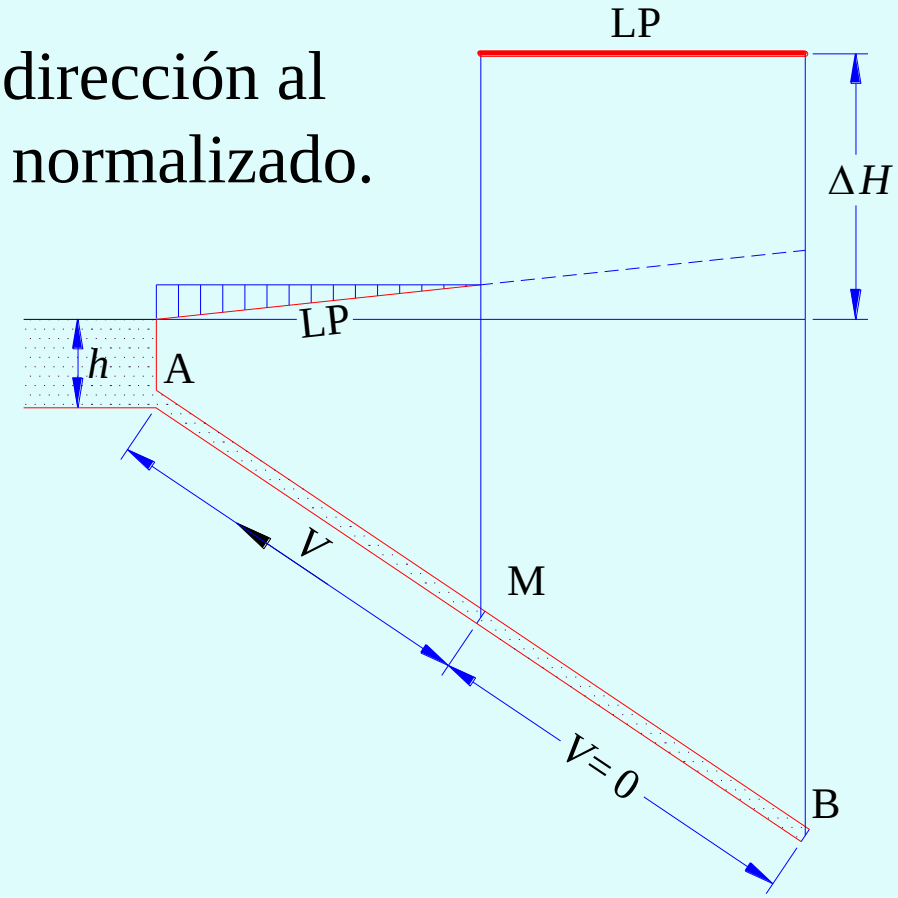


Instante, $t = (3L/2)/c$

Como si fuera un resorte, el fluido se descomprime y empieza a circular hacia el depósito.

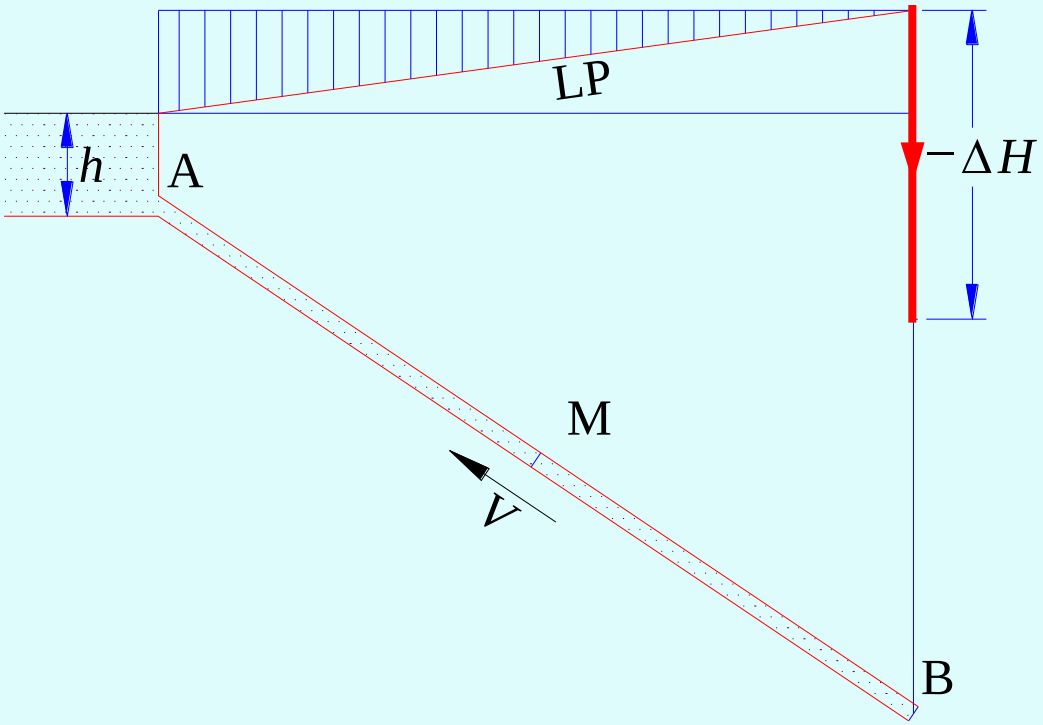
En AM el fluido circula en dirección al depósito, y la presión se ha normalizado.

En MB el fluido sigue en reposo y comprimido, y la tubería dilatada.



Instante. $t = 2L/c$

Todo el fluido circula hacia el depósito, y, como si fuera un émbolo, actuaría sobre la rodaja que pega a B de donde no puede separarse, provocando sobre ella un estiramiento o depresión **($-\Delta H$).**

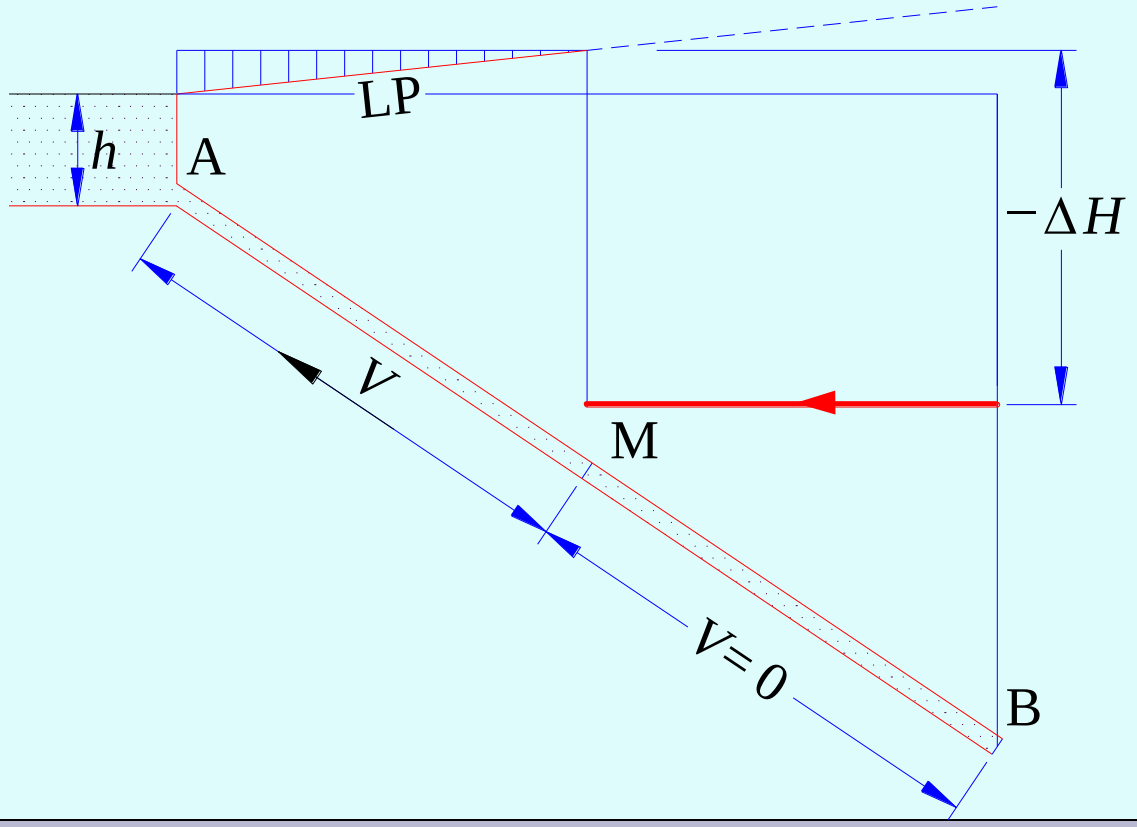


Instante, $t = (5L/2)/c$

CIERRE INSTANTÁNEO

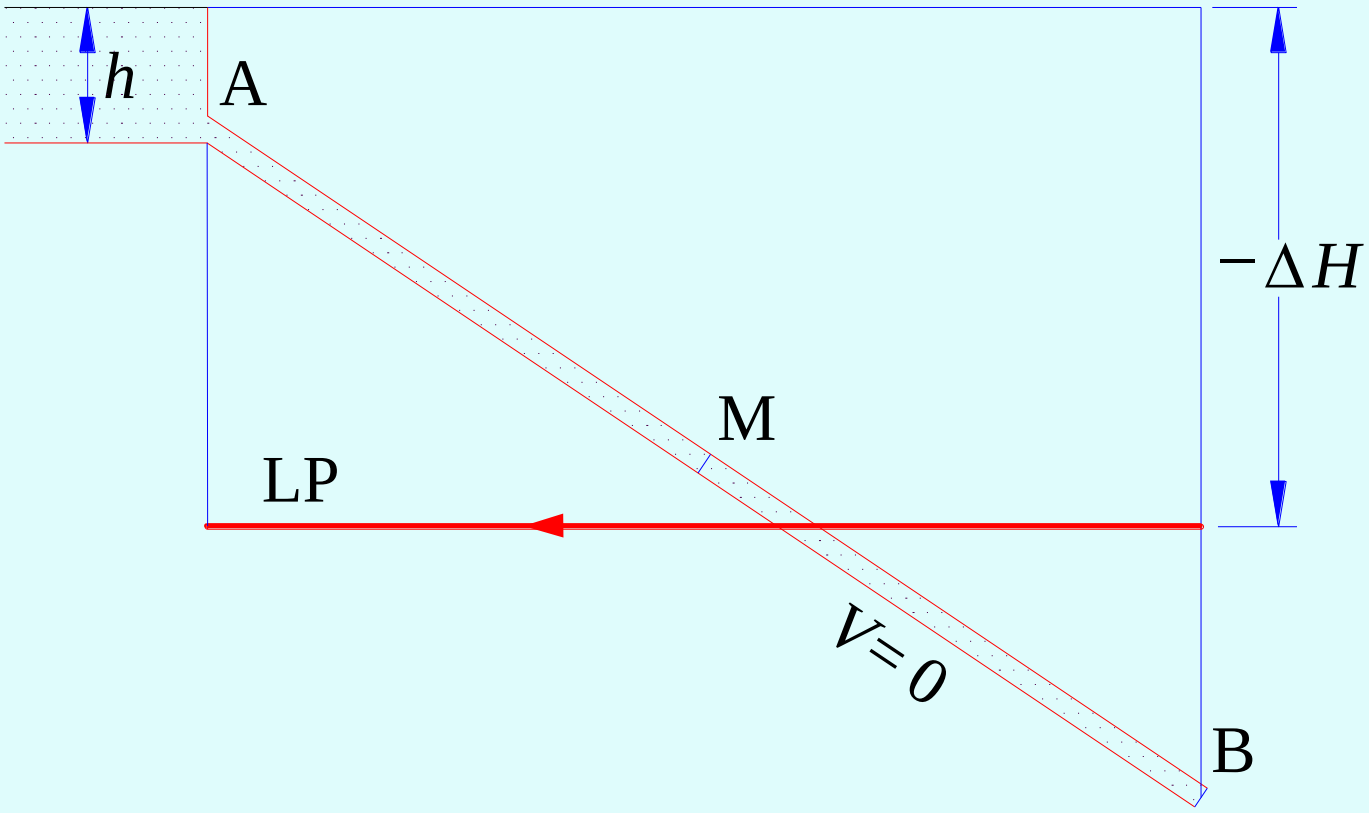
En MB el fluido está en reposo y contraído, y la tubería encogida.

En AM el fluido circula hacia el depósito.



Instante, $t = 3L/c$

El fluido está en reposo y deprimido, y toda la tubería contraída.

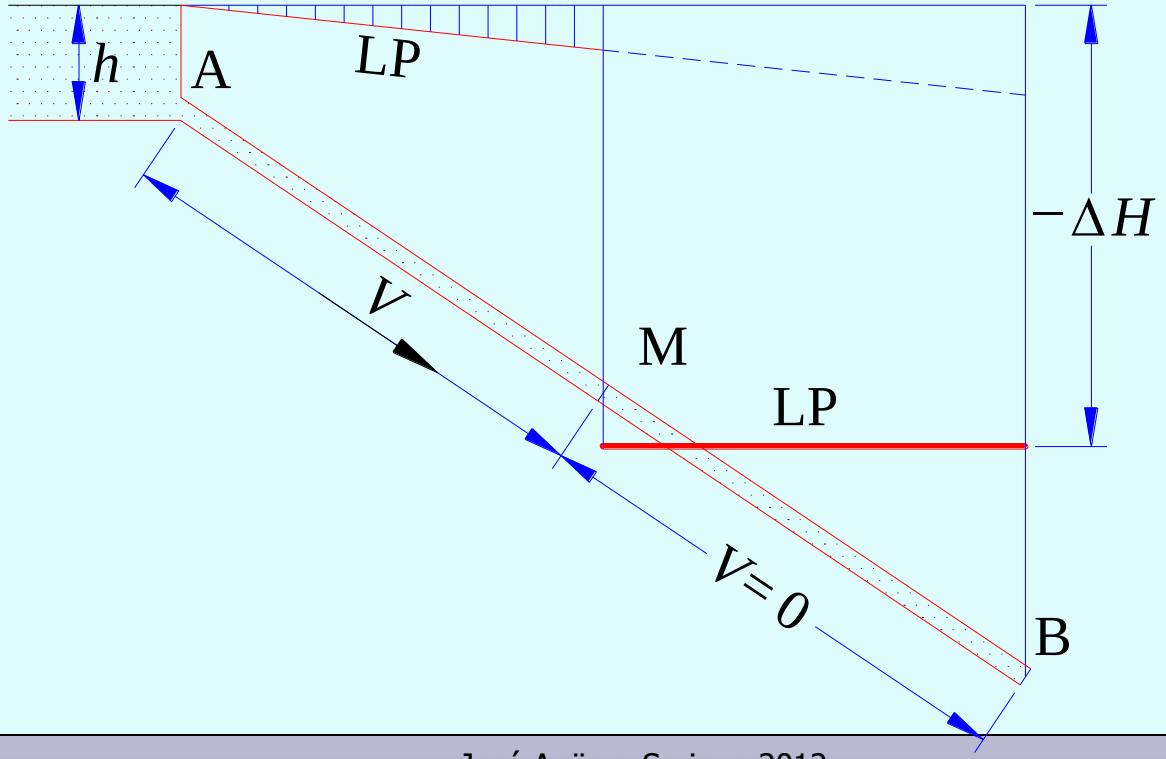


Instante, $t = (7L/2)/c$

CIERRE INSTANTÁNEO

En AM el fluido circula en dirección al obturador, y la presión se ha ido normalizando.

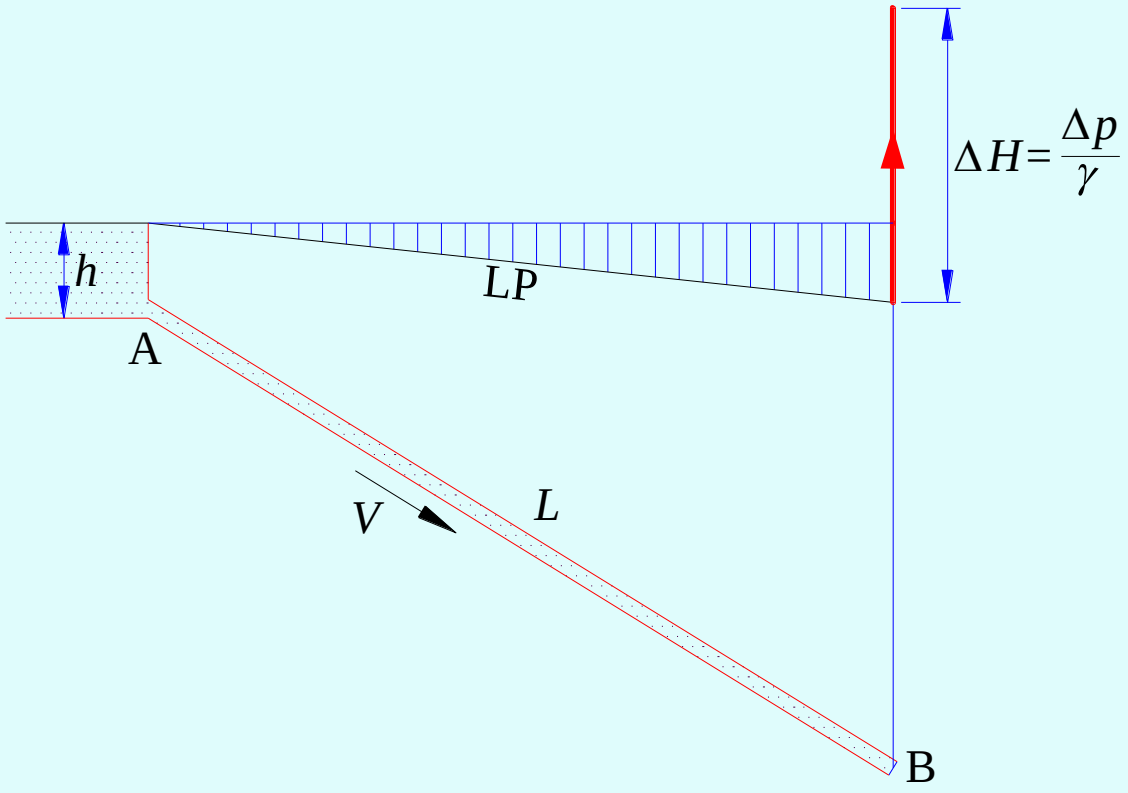
En MB el fluido sigue en reposo y deprimido.



Instante, $t = 4L/c$

CIERRE INSTANTÁNEO

La misma situación del instante cero. Quiere decir que el fenómeno se repite cada **$4L/c$**; aunque cada vez con menor intensidad a causa del rozamiento del flujo en su ir y venir.

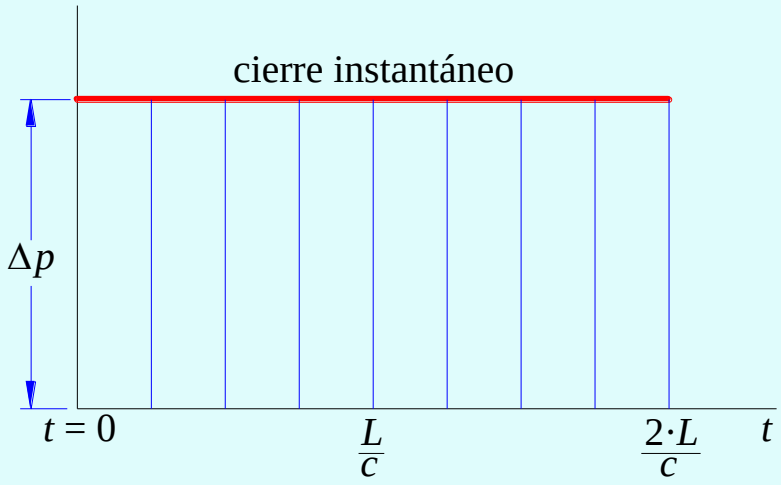


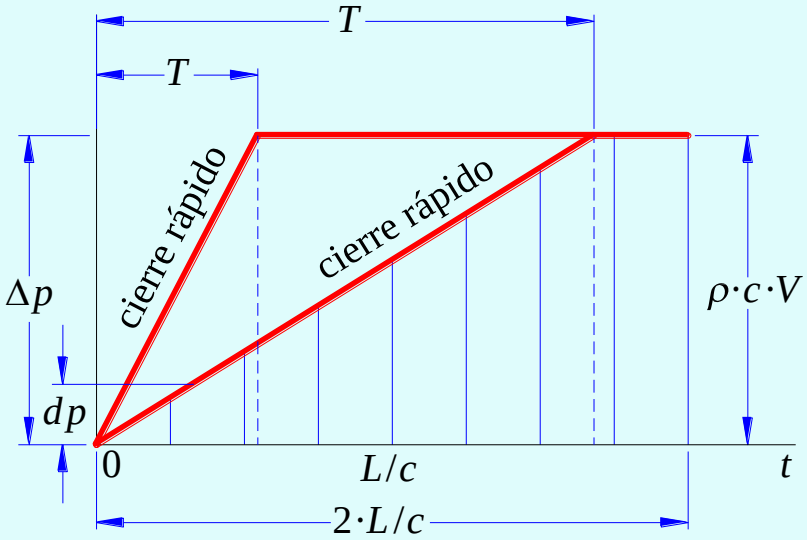
CIERRE GRADUAL (*T* = tiempo de anulación de caudal)

El cierre podrá ser rápido o rapidísimo, pero nunca instantáneo. Distinguiremos entre anulaciones de caudal rápidas y lentas, aunque me gusta más hablar de conducciones largas y cortas:

$$T < \frac{2L}{c} \text{ cierre rápido}: \quad L > \frac{c \cdot T}{2} \text{ conducción larga}$$

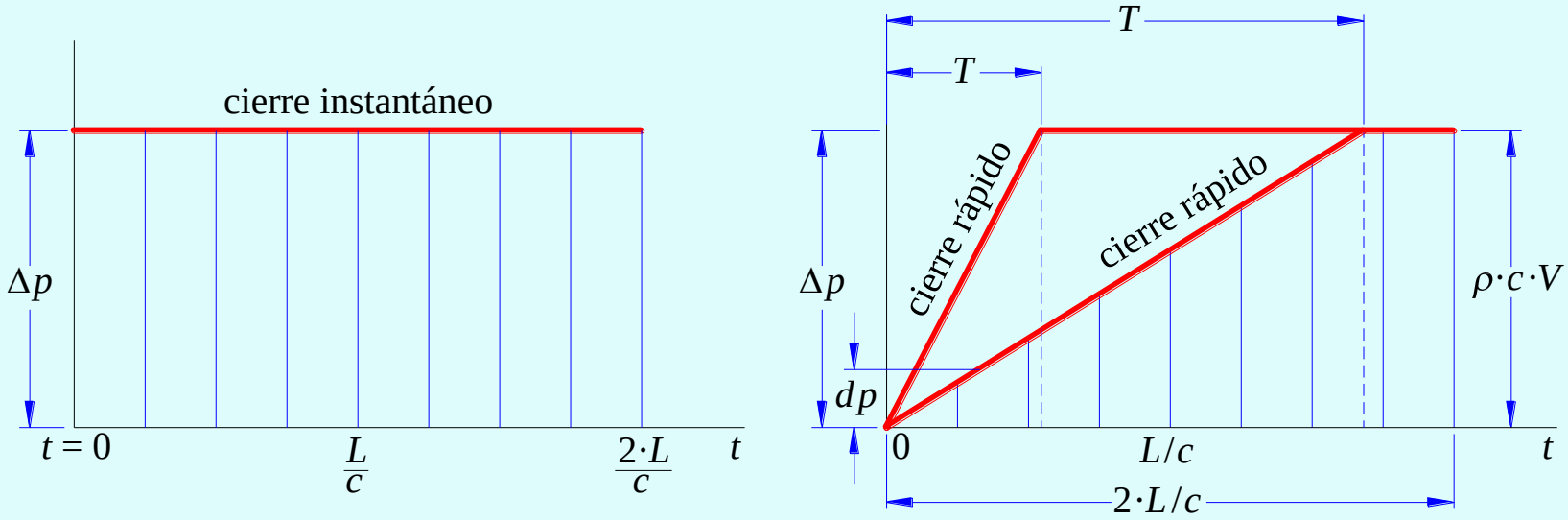
$$T > \frac{2L}{c} \text{ cierre lento}: \quad L < \frac{c \cdot T}{2} \text{ conducción corta}$$





En el cierre instantáneo, **Δp** aparece de golpe y se mantiene el tiempo **$2L/c$**, que es lo que tarda la onda en ir y volver al obturador.

En el cierre rápido, **Δp** aparece gradualmente hasta llegar al valor de Allievi **($\rho \cdot c \cdot V$)**, y se mantiene hasta completar el tiempo **$2L/c$.**



Variación de la presión en el obturador durante el tiempo 2L/T .

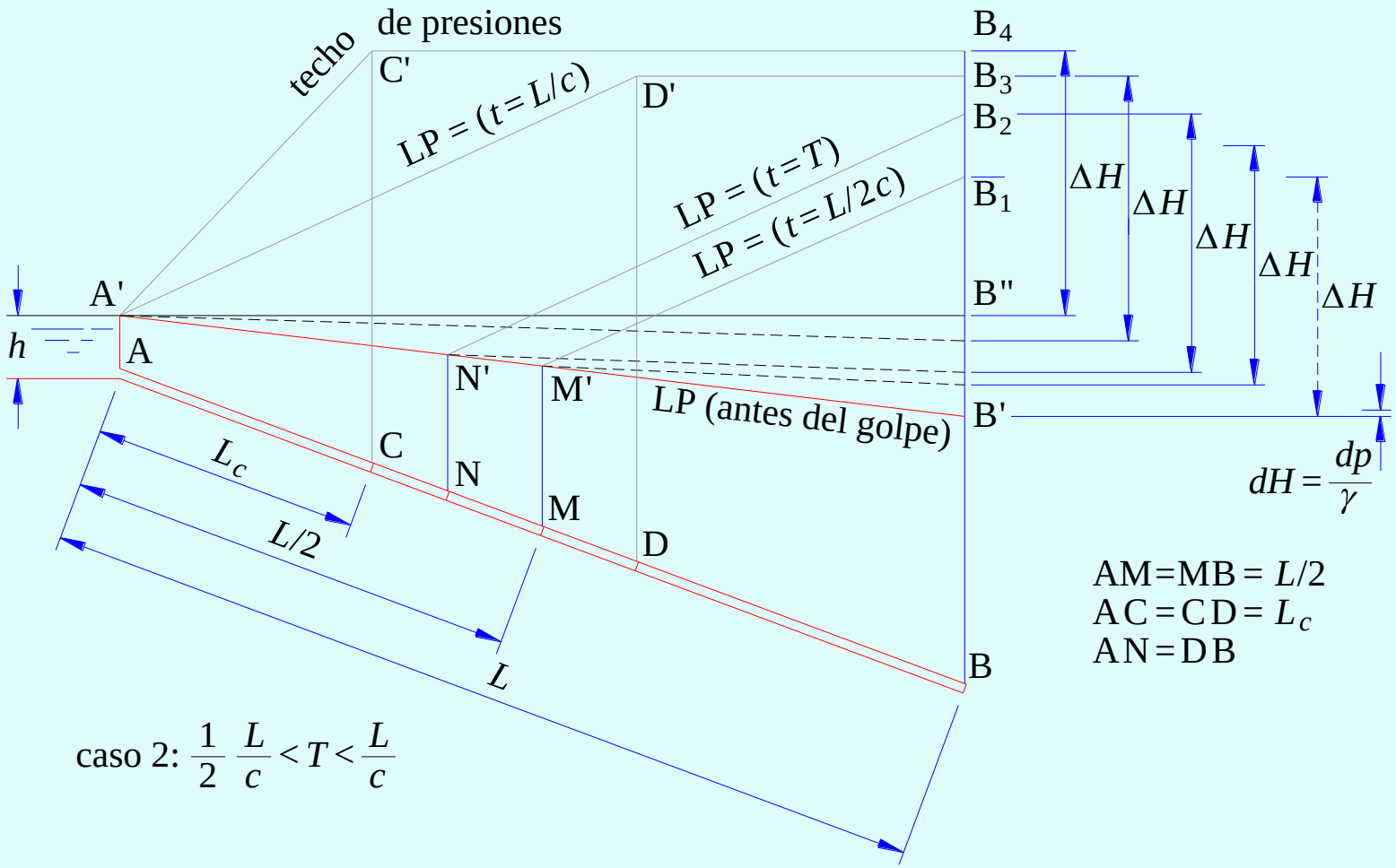
Conducciones largas

Puede ocurrir que en el tiempo ***T*** de anulación del caudal, la primera pequeña onda que se forma en el obturador:

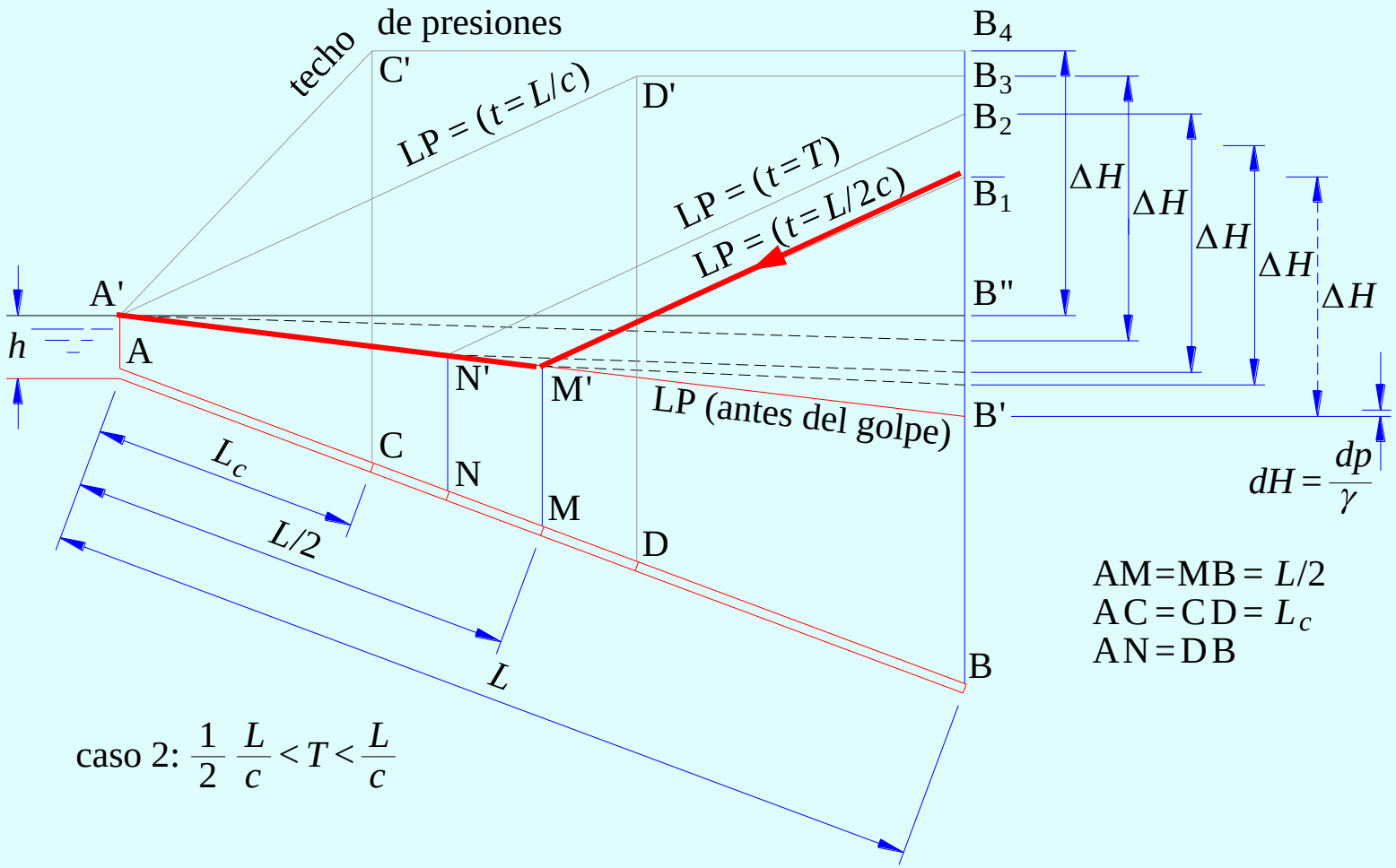
1. No ha recorrido la primera mitad : $\mathbf{0 < T < (L/2)/c}$
2. Se encuentra en la segunda mitad: $\mathbf{(L/2)/c < T < L/c}$
3. En la primera mitad, ya de vuelta: $\mathbf{L/c < T < (3L/2)/c}$
4. En la segunda mitad, ya de vuelta: $\mathbf{(3L/2)/c < T < 2L/c}$

Expliquemos el caso 2, y los otros tres se pondrán luego a modo de ejercicio.

***Caso* 2**: el tiempo se acaba cuando la primera onda va por la segunda mitad (sección N).

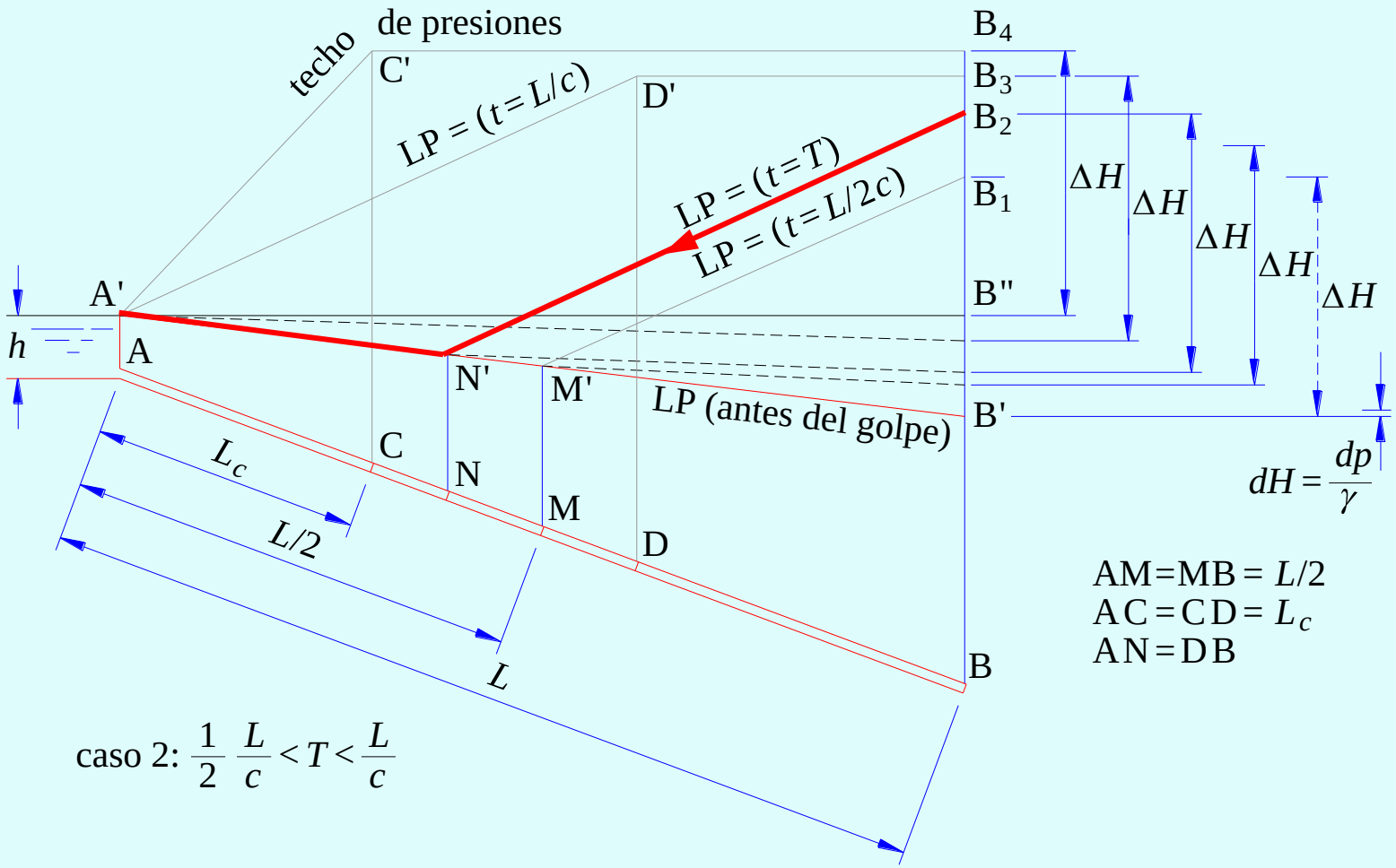


Cuando la primera onda llega a M, mitad de tubería, la LP sería $B_1M'A'$.



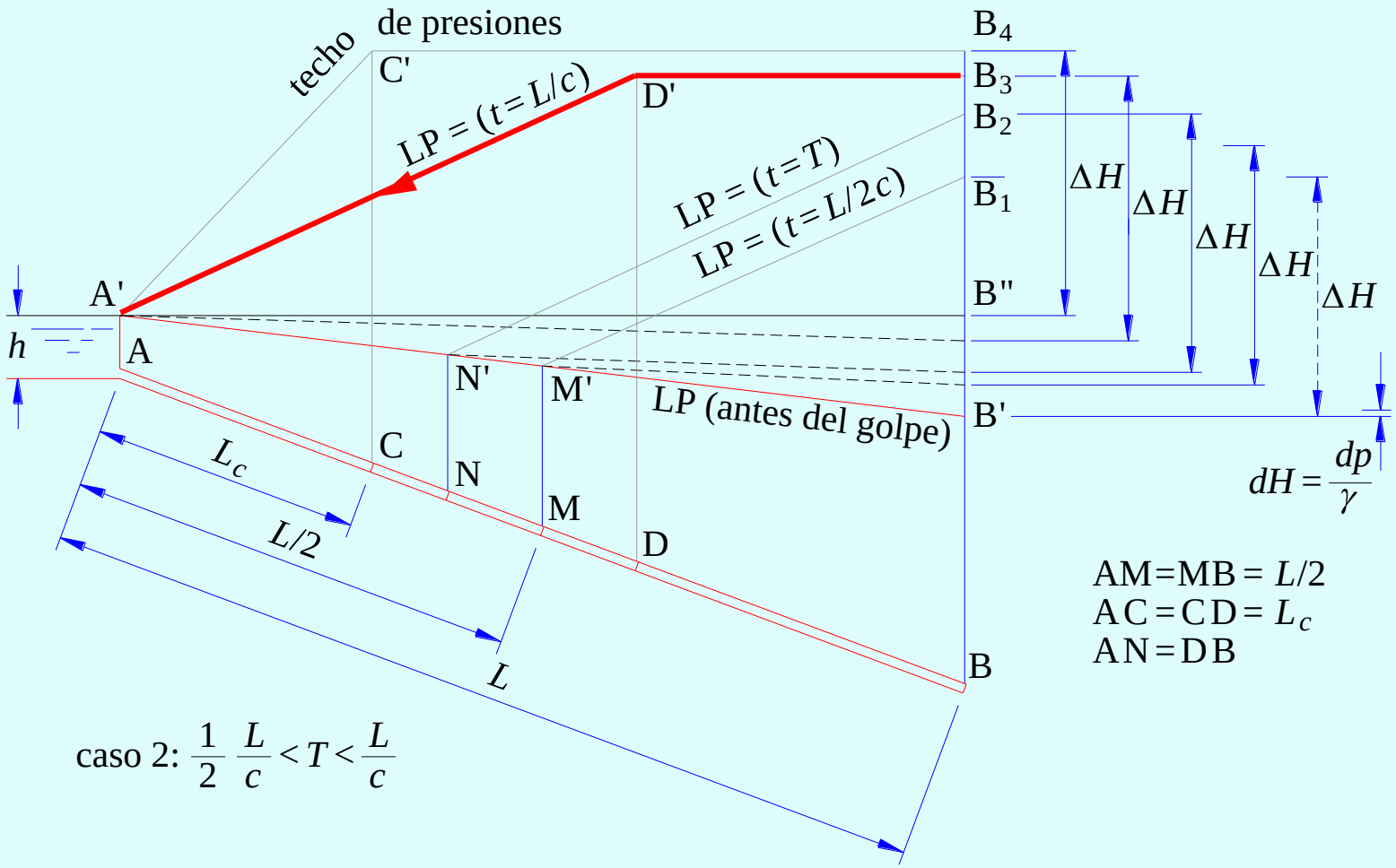
caso 2: $\frac{1}{2}\frac{L}{c} < T < \frac{L}{c}$

Cuando la primera onda llega a N, la última formada (se acabó el tiempo) sale de B: la LP sería $B_2N'A'$.



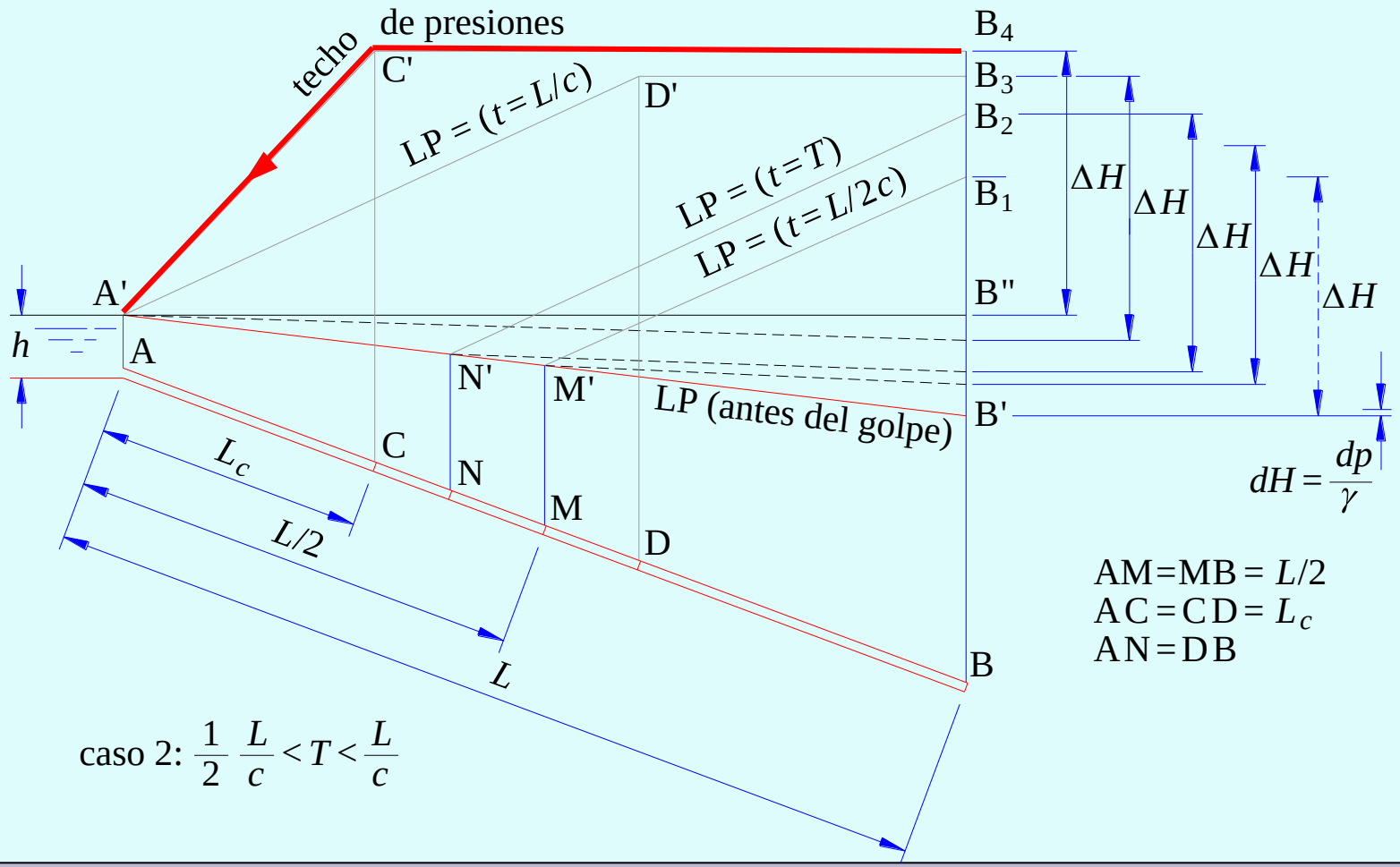
caso 2: $\frac{1}{2}\frac{L}{c} < T < \frac{L}{c}$

Cuando la primera onda llega a A, la última va por D: la LP sería $B_3D'A'$.

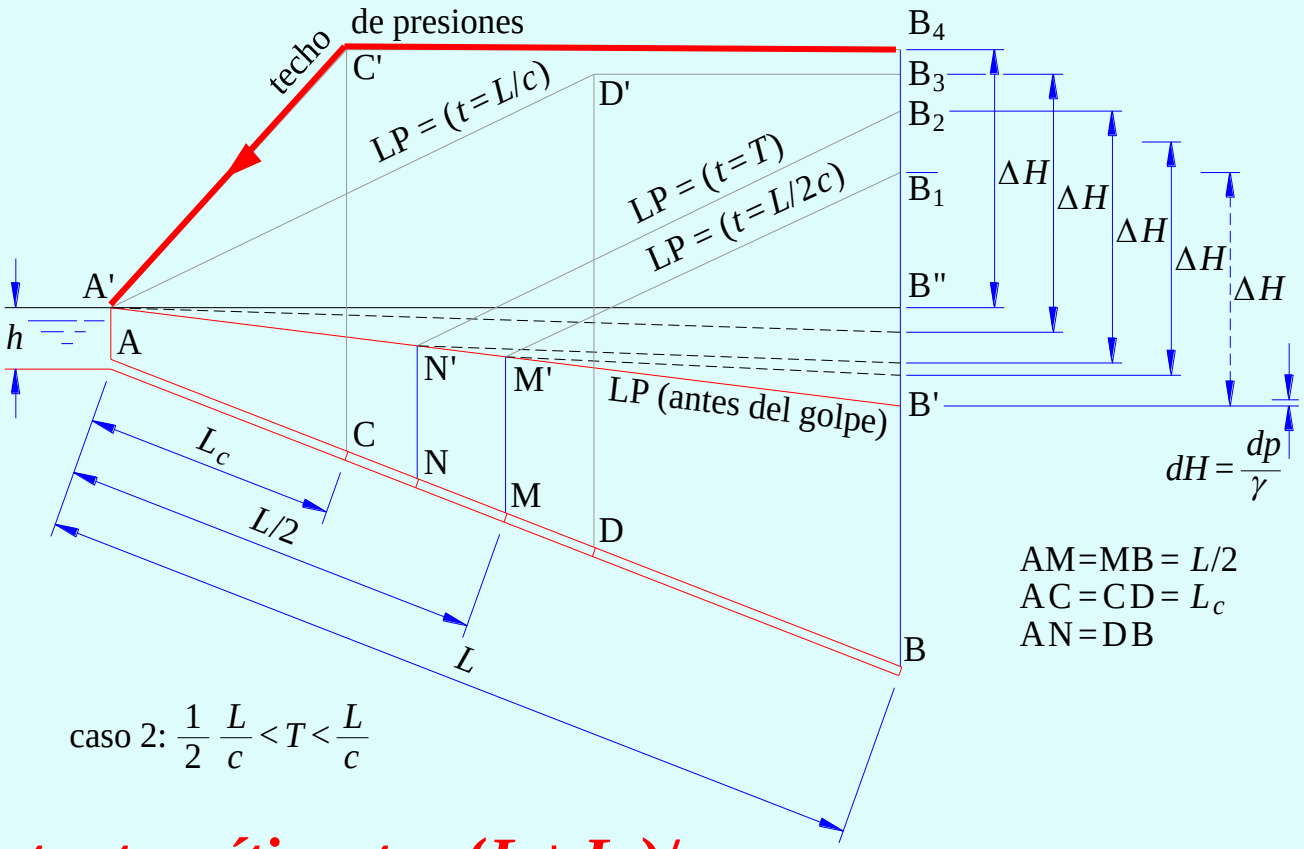


caso 2: $\frac{1}{2}\frac{L}{c} < T < \frac{L}{c}$

Cuando la primera onda regresa, se encuentra con la última en la sección C (***L_c=longitud crítica***): la LP sería $B_4C'A'$ (***techo de presiones***).



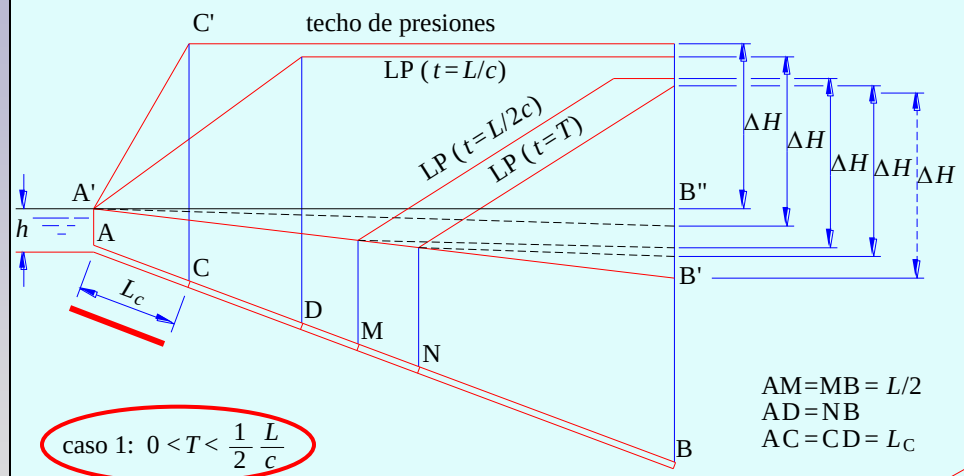
caso 2: $\frac{1}{2}\frac{L}{c} < T < \frac{L}{c}$



Es el ***instante crítico, $t_c = (L + L_c)/c$:***

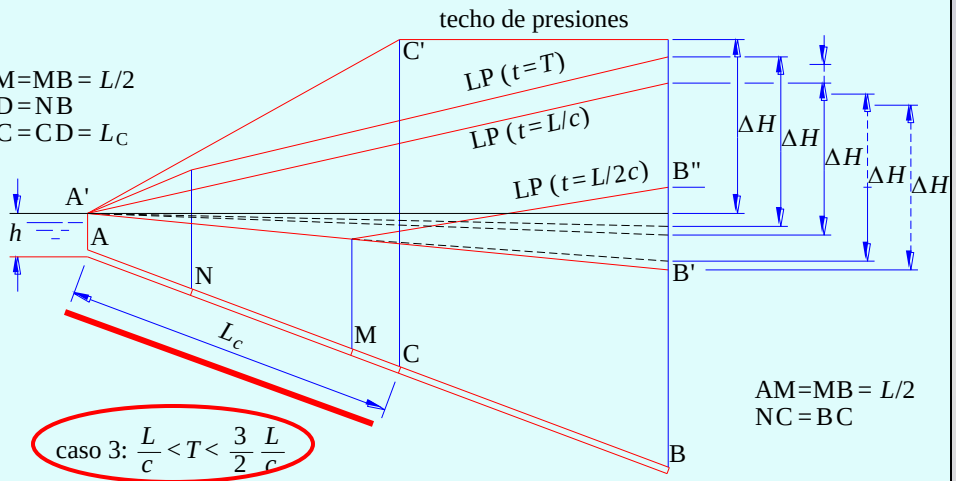
- el fluido esta en reposo y comprimido;
- no hay pérdida de carga y el punto B_3 alcanza el límite B_4;
- la situación es la más peligrosa;
- la línea $B_4C'A'$ es el ***techo de presiones*** en la tubería.

EJERCICIO



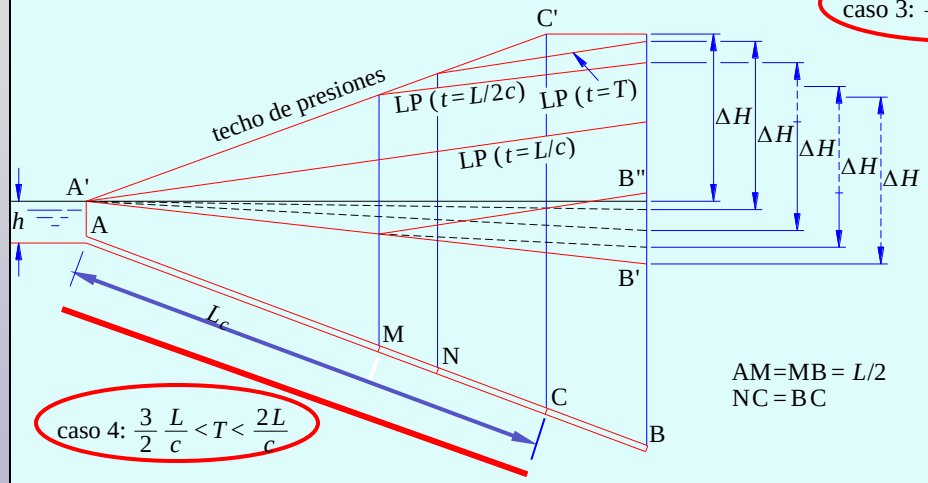
caso 1: $0 < T < \frac{1}{2}\frac{L}{c}$

AM=MB = $L/2$
AD=NB
AC=CD= L_C



caso 3: $\frac{L}{c} < T < \frac{3}{2}\frac{L}{c}$

AM=MB = $L/2$
NC = BC



caso 4: $\frac{3}{2}\frac{L}{c} < T < \frac{2L}{c}$

AM=MB = $L/2$
NC = BC

Cuanto más rápido, menor resulta L_c y más elevado el techo de presiones.

Cálculo de la longitud crítica

Tiempo primera onda hasta el instante crítico:

$$t_c = \frac{L + L_c}{c}$$

Tiempo última onda hasta el instante crítico:

$$t_c - T = \frac{L - L_c}{c}$$

Restamos y despejamos L_c:

$$\boxed{L_c = \frac{T \cdot c}{2}}$$

si $L > L_c$: conducción ***larga***
si $L < L_c$: conducción ***corta***
si $L = L_c$: conducción ***crítica***

Golpe de ariete en conducciones cortas

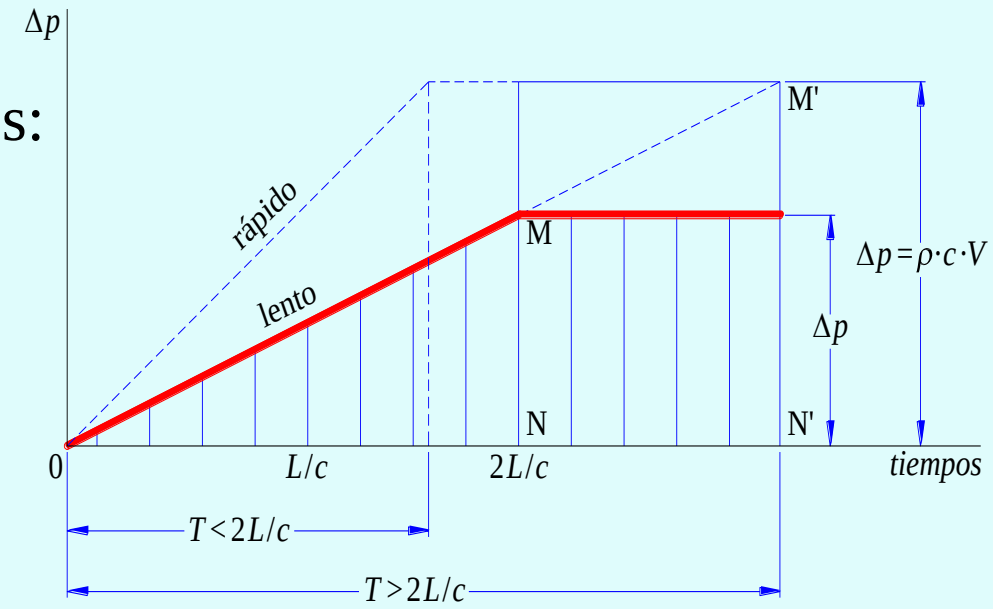
Fórmula de Micheaud

En un cierre lento, cuando la primera onda formada vuelve al obturador aún no se ha anulado del todo el caudal. Los previsibles aumentos de presión hasta alcanzar el valor de Allievi se van compensando con las ondas que están de regreso; en consecuencia, la presión **Δp** en el obturador ya no aumenta más.

Por semejanza de triángulos:

$$\frac{MN}{M'N'} = \frac{ON}{ON'}$$

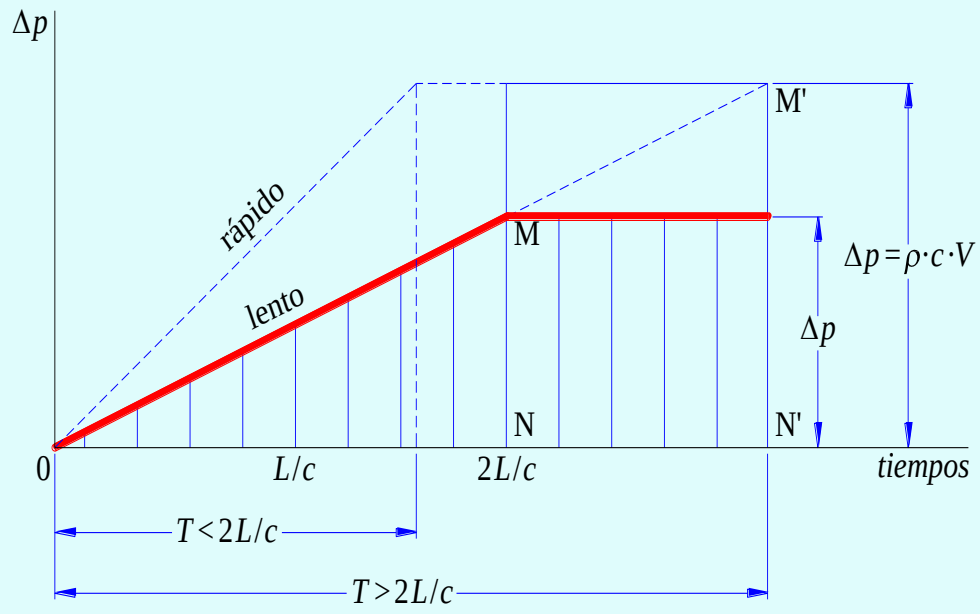
$$\frac{\Delta p}{\rho \cdot c \cdot V} = \frac{2L/c}{T}$$



$$\frac{\Delta p}{\rho \cdot c \cdot V} = \frac{2L/c}{T}$$

$$\Delta p = 2 \cdot \frac{L \cdot V \cdot \rho}{T}$$

$$\Delta H = 2 \cdot \frac{L \cdot V}{g \cdot T}$$



En una conducción corta ($L < L_c$), Δp aumenta con L y con V y disminuye con T.

Es obvio que Micheaud llegó a su fórmula de otra manera, pues aún no existía la fórmula de Allievi.

Fórmula de Jouguet

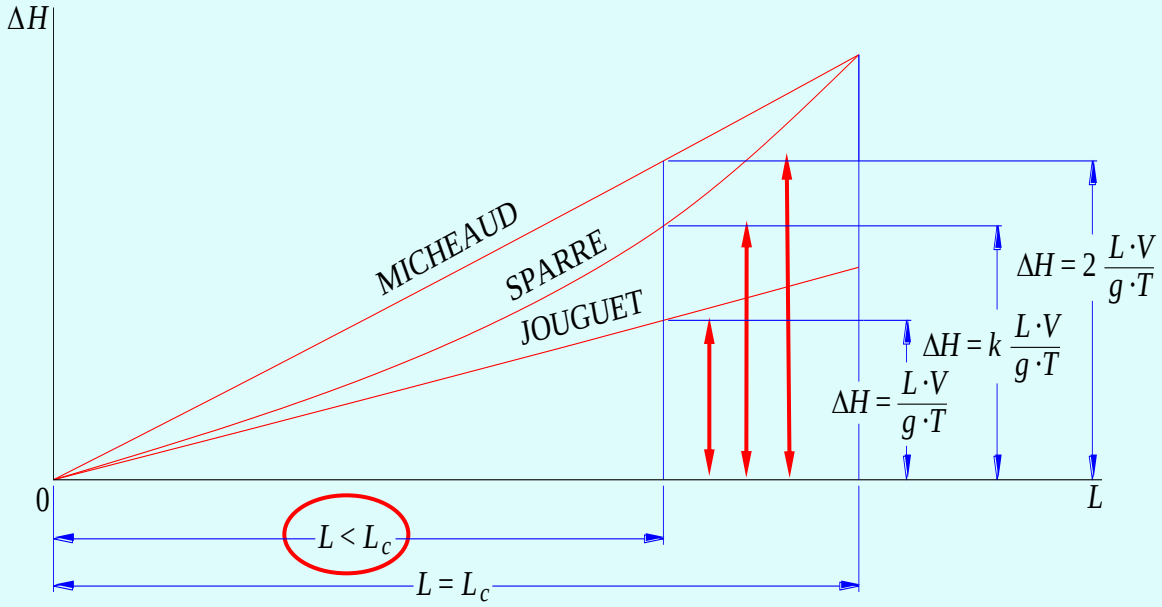
Partiendo de otras hipótesis Jouguet llegó a la expresión:

$$\boxed{\Delta H = \frac{L \cdot V}{g \cdot T}}$$ mitad que la de Micheaud

En la realidad

$$\boxed{\Delta H = k \cdot \frac{L \cdot V}{g \cdot T}}$$

en la que $1 < k < 2$.



Los investigadores franceses Camichel, Eydoux y Gariel, después de más de 3000 experiencias, concluyen que en todo cierre lento siempre existe una maniobra que origina el golpe de ariete que da la fórmula de Micheaud, por lo que será ésta la que hay que aplicar en un cierre lento.

El español ***Enrique Mendiluce*** (del que más adelante haremos una mención más señalada), en su afán de poner en manos de los técnicos métodos sencillos de cálculo, también sostiene este criterio aún entendiendo que puede resultar conservador.

EJERCICIO

Calcúlese el golpe de ariete en una conducción de acero de 4000 m de longitud, 1 m de diámetro y 9 mm de espesor (Q = 1,5 m^3/s y T = 3 s).

Solución

Celeridad de la onda

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48{,}3 + \mathrm{k} \cdot \frac{D}{e}}} = \frac{9900}{\sqrt{48{,}3 + 0{,}5 \cdot \frac{1000}{9}}} = 970\ \mathrm{m/s}$$

Longitud crítica

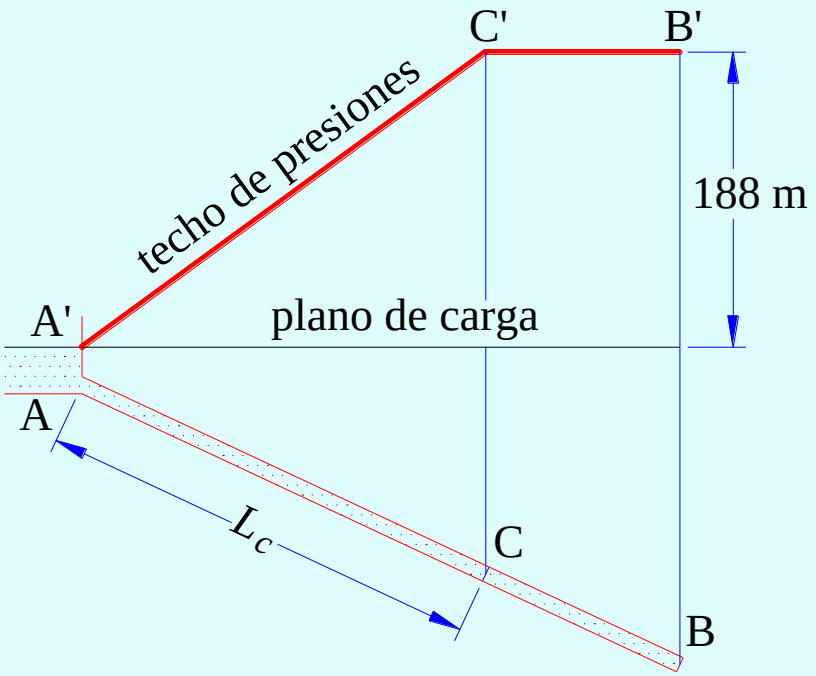
$$L_c = \frac{T \cdot c}{2} = \frac{3 \cdot 970}{2} = 1455\ \mathrm{m} < 4000\ \mathrm{m} = L \text{ (conducción larga)}$$

Velocidad media

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{1{,}5}{\pi \cdot 0{,}5^2} = 1{,}9 \text{ m/s}$$

Golpe de ariete

$$\Delta H = \frac{c \cdot V}{g} = \frac{970 \cdot 1{,}9}{9{,}81} = 188 \text{ m}$$



Por la fórmula de Micheaud, antes de aparecer la de Allievi, se hubiera considerado:

$$\Delta H = 2 \cdot \frac{L \cdot V}{g \cdot T} = 2 \cdot \frac{4000 \cdot 1{,}9}{9{,}81 \cdot 3} = 516{,}5 \text{ m}$$

muy supervalorado

EJERCICIO

Calcúlese el golpe de ariete en una conducción de hormigón armado, de 400 m de longitud, 2,8 m de diámetro y 0,4 m de espesor ($Q = 40$ m^3/s y $T = 6$ s).

Solución

Celeridad de la onda

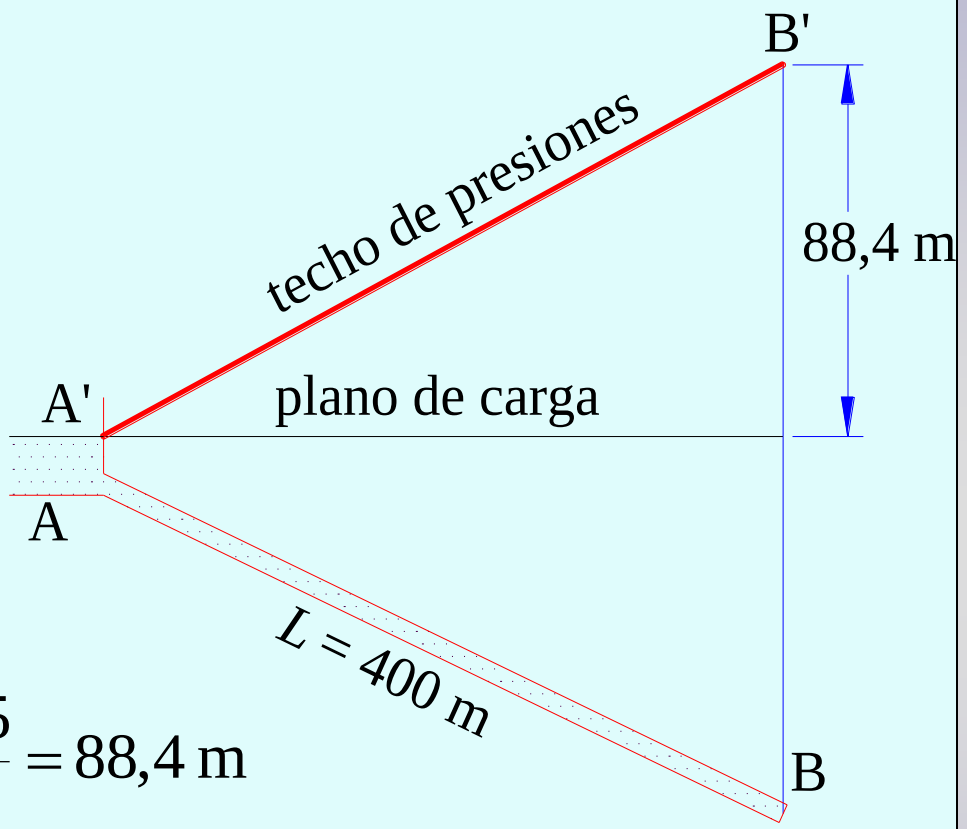
$$c = \frac{9900}{\sqrt{48{,}3 + \mathrm{k} \cdot \frac{D}{e}}} = \frac{9900}{\sqrt{48{,}3 + 5 \cdot \frac{2{,}8}{0{,}4}}} = 1084 \ \mathrm{m/s}$$

Longitud crítica

$$L_c = \frac{T \cdot c}{2} = \frac{6 \cdot 1084}{2} = 3252 \ \mathrm{m} > 400 \ \mathrm{m} = L$$ (conducción corta)

Velocidad media

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{40}{\pi \cdot 1{,}4^2} = 6{,}5\ \mathrm{m/s}$$



Golpe de ariete

$$\Delta H = 2 \cdot \frac{L \cdot V}{g \cdot T} = 2 \cdot \frac{400 \cdot 6{,}5}{9{,}8 \cdot 6} = 88{,}4\ \mathrm{m}$$

Tubería de característica variable

Poniéndonos al lado de la seguridad, tomaríamos el menor valor de ***c*** para calcular la longitud crítica ***Lc*** , con lo que tendríamos el ***techo de presiones*** más desfavorable:

$$\boxed{L_c = \frac{T \cdot c}{2}}$$

Y tomaríamos el mayor valor de ***c*** para calcular el ***golpe de ariete***:

$$\boxed{\Delta p = \rho \cdot c \cdot V}$$

Como velocidad media ***V*** tomaríamos el valor mayor.

Un procedimiento habitual es considerar valores medios:

Velocidad media de la onda

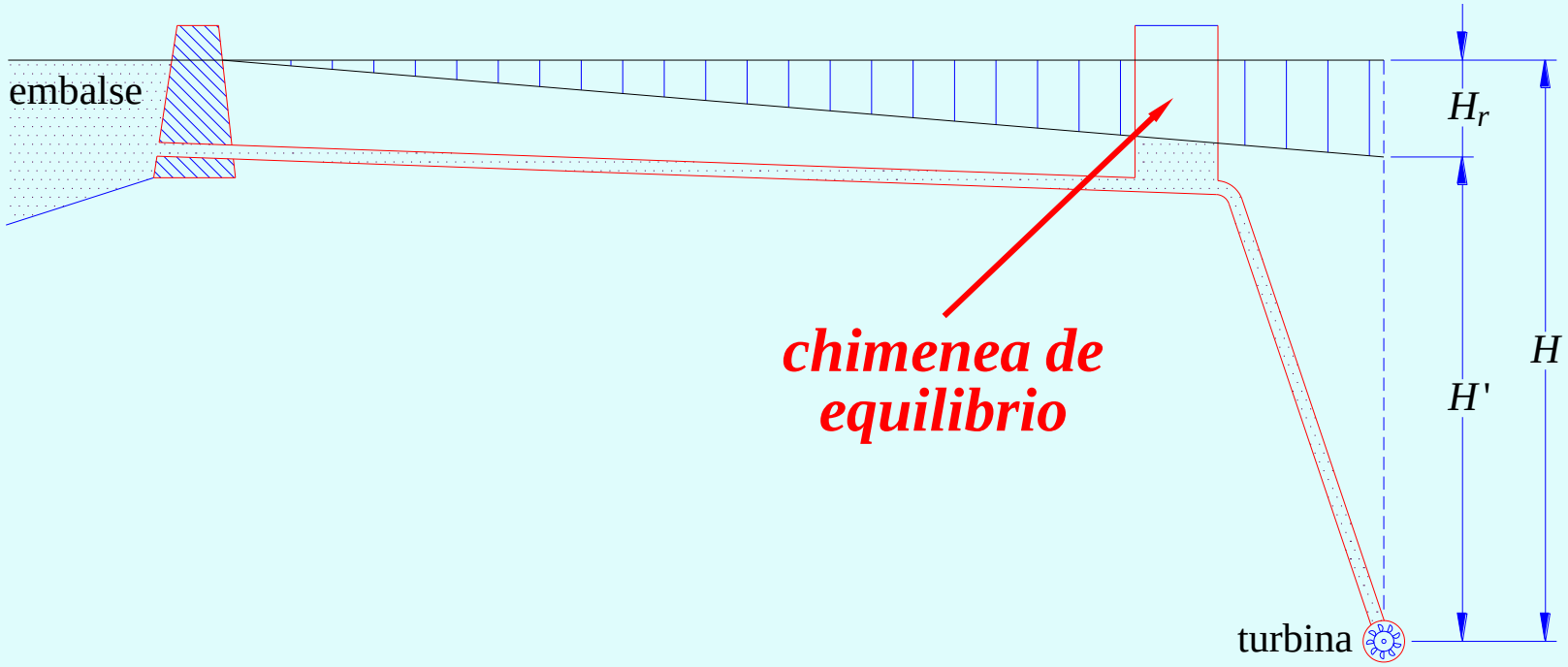
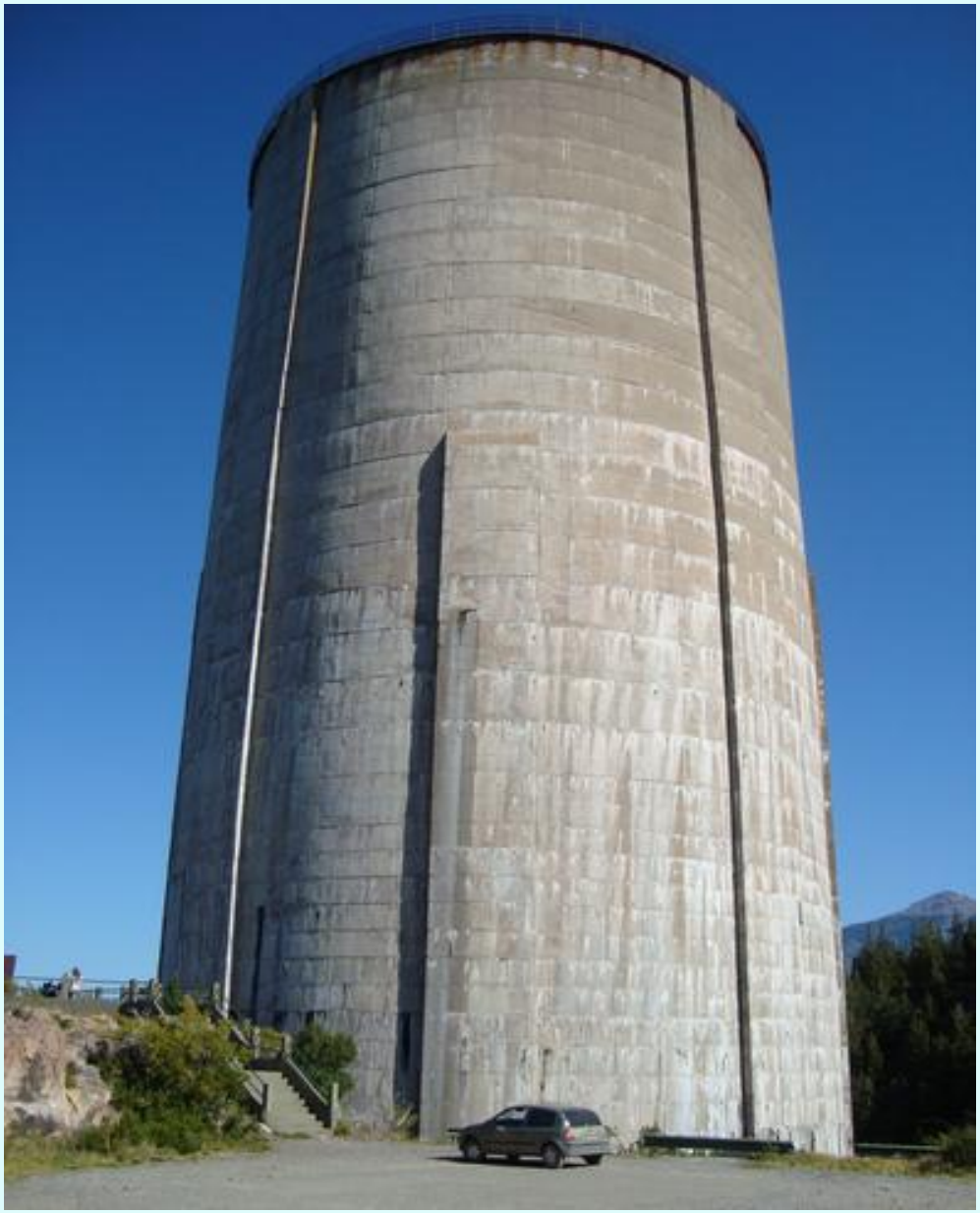
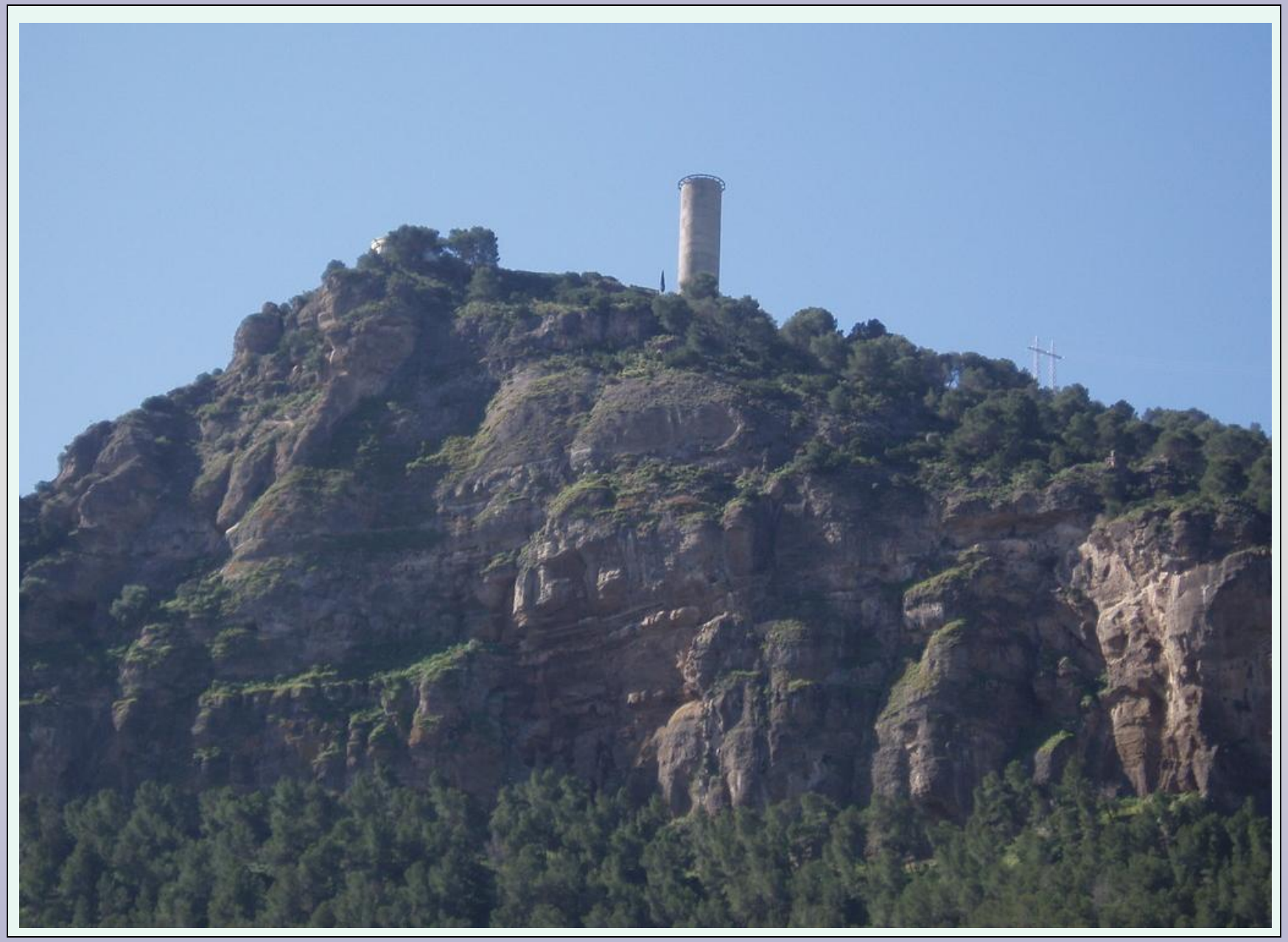
$$\frac{L}{c} = \frac{L_1}{c_1} + \frac{L_2}{c_2} + \frac{L_3}{c_3} + \ldots$$

$$\boxed{c = \frac{L}{\Sigma(L_i / c_i)}}$$

Valor medio de la velocidad del flujo

$$L \cdot V = \Sigma(L_i \cdot V_i)$$

$$\boxed{V = \frac{\Sigma(L_i \cdot V_i)}{L}}$$

GOLPE DE ARIETE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Una ***chimenea de equilibrio***, con el mínimo desnivel respecto el embalse para que no resulte muy alta, y lo más cerca de la turbina (máxima pendiente), origina que el golpe de ariete en la tubería que va a la turbina resulte menor, y que la conducción que va al embalse quede prácticamente protegida.