PROBLEMAS RELATIVOS A CONDUCCIONES DE AGUA

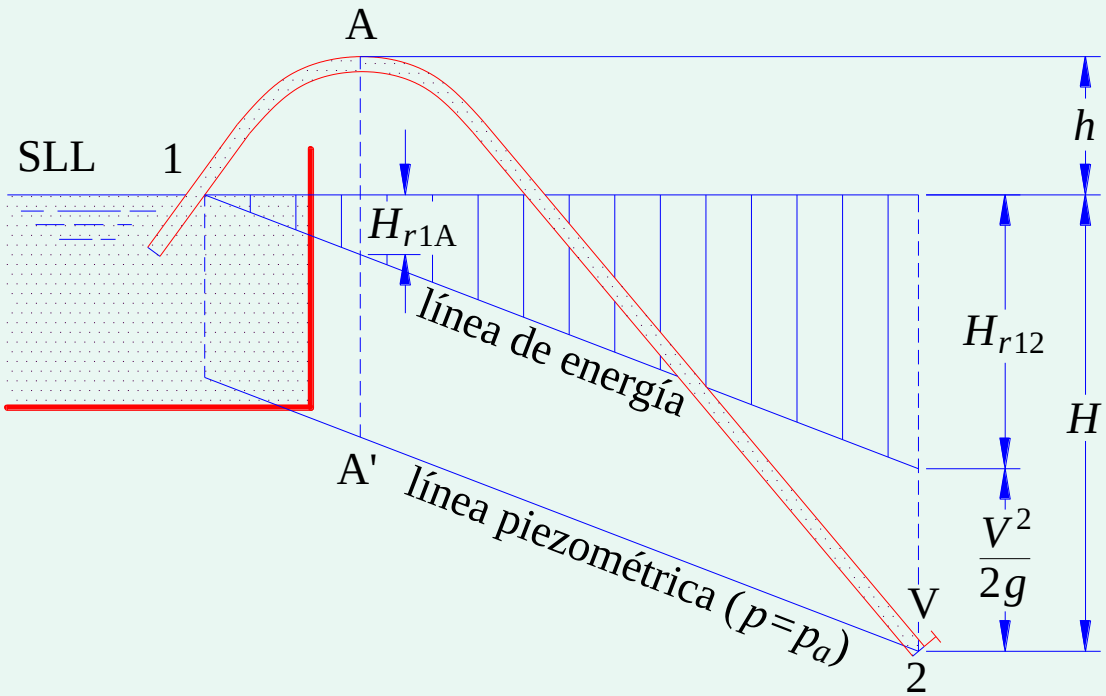
PROBLEMAS RELATIVOS A CONDUCCIONES DE AGUA

- **SIFÓN**
- **VELOCIDADES LÍMITE ACONSEJADAS**
- **TUBERÍAS CON SERVICIO EN RUTA**
  1. Tubería con servicio alimentada por un extremo
  2. Tubería con servicio alimentada por los dos extremos
- **TUBERÍAS EN SERIE**
- **TUBERÍAS EN PARALELO**
- **ALIMENTACIÓN CON DOS O MÁS DEPÓSITOS**
  1. Depósitos de regulación y de compensación
  2. Depósitos de cola

SIFÓN

Limitación de h

h está condicionado a que la presión en A no sea inferior a la de saturación para que no haya ***cavitación*** ($p_A > p_s$):

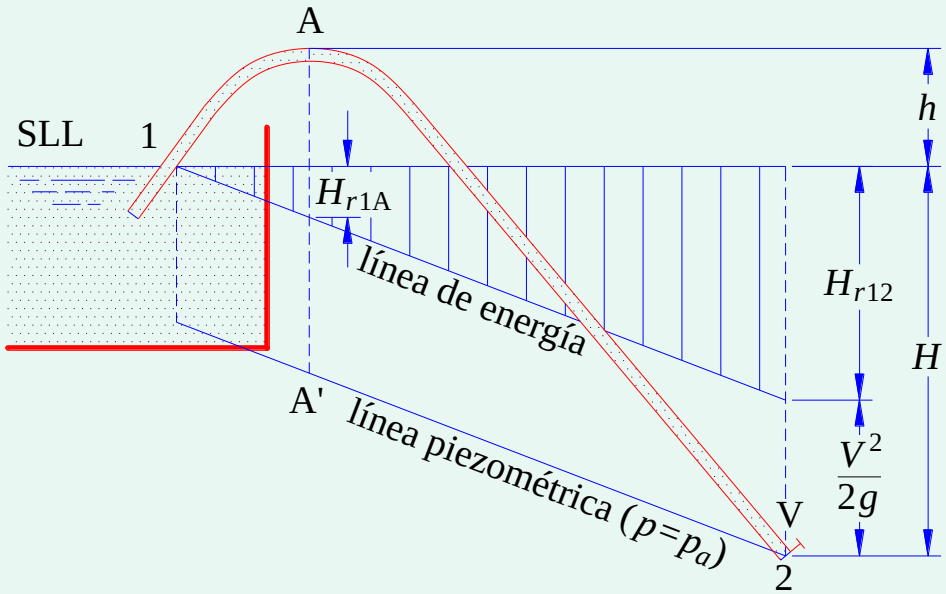


$$\frac{p_{A'}}{\gamma} = \frac{p_a}{\gamma} = \frac{p_A}{\gamma} + h + H_{r1A} + \frac{V^2}{2g} \qquad h < \frac{p_a}{\gamma} - \frac{p_s}{\gamma} - H_{r1A} - \frac{V^2}{2g}$$

Caudal de régimen

$$H = \frac{V^2}{2g} + H_{r1A} = \frac{V^2}{2g} + f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} + \frac{V^2}{2g} \cdot \Sigma K$$

$$H = \frac{V^2}{2g} \cdot \left(1 + f \cdot \frac{L}{D} + \Sigma K\right)$$



con la que se calcula ***H*** para un caudal ***Q*** o viceversa. En cualquier caso, procede un cálculo iterativo que se inicia fijando un valor aproximado de f (por ejemplo, $f = 0{,}015$).

VELOCIDADES LÍMITE ACONSEJADAS

Velocidad mínima = 0,6 m/s

Velocidades máximas (L. Bonnet)

Para $D \geq 150$ mm, estos valores satisfacen a la expresión,

$$V_{\text{máx}} = 2 \cdot \sqrt{D} \ \text{m/s}$$

D en metros.

D m	50	70	100	150	200	250	300	350	400	450
V m/s	0,60	0,70	0,75	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,25	1,30

D m	500	600	700	800	900	1000	1200	1600	2000	2600
V m/ s	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0

Mínimo diámetro para un determinado caudal:

$$Q = V \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 2 \cdot \sqrt{D} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi}{2} \cdot D^{5/2}$$

$$D_{\text{mín}} = 0{,}835 \cdot Q^{2/5} \text{ m}$$

el caudal Q en m^3/s.

EJERCICIO

Para un caudal de 275 l/s, calcúlese según el criterio de Bonnet el mínimo diámetro que ha de tener la tubería.

Solución

$$D = 0{,}835 \cdot Q^{2/5} = 0{,}835 \cdot 0{,}275^{0{,}4} = 0{,}498 \text{ m}$$

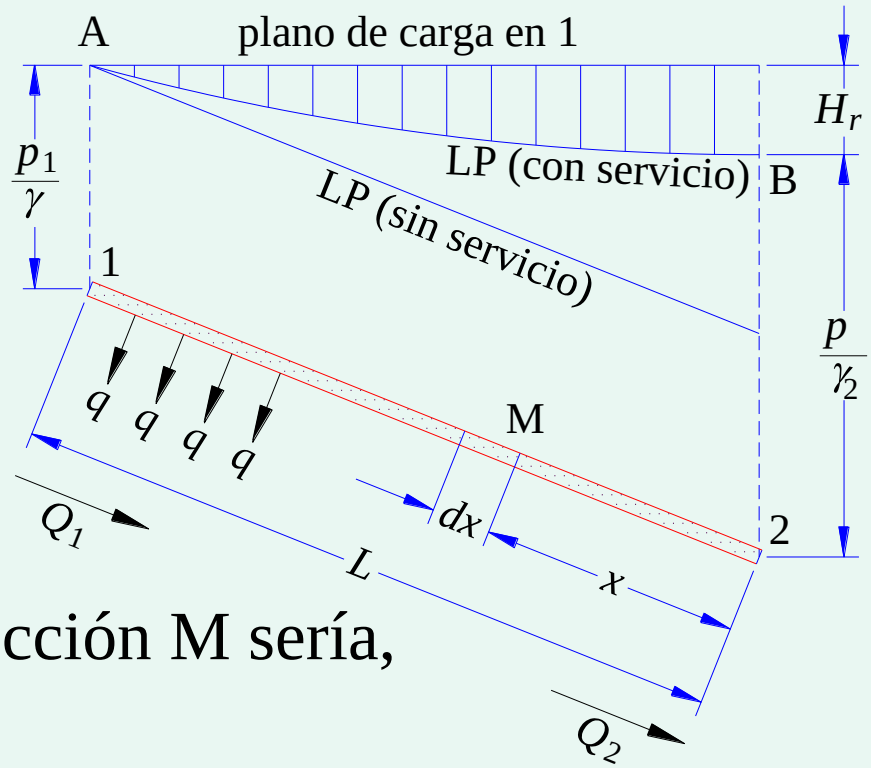
Tubería con servicio alimentada por un extremo

Caudal repartido en ruta

$$Q = Q_1 - Q_2$$

Caudal repartido por metro

$$q = \frac{Q}{L} = \frac{Q_1 - Q_2}{L}$$



El caudal que pasa por una sección M sería,

$$Q_M = Q_2 + q \cdot x$$

Pérdida de carga en el recorrido dx

$$dH_r = \beta \cdot dx \cdot \frac{(Q_2 + q \cdot x)^2}{D^5}$$

Pérdida de carga total

$$H_r = \frac{\beta}{D^5} \cdot \int_0^L (Q_2 + q \cdot x)^2 \cdot dx =$$

$$= \frac{\beta}{D^5} \cdot \left(L \cdot Q_2^2 + \frac{L^3 \cdot q^2}{3} + L^2 \cdot q \cdot Q_2 \right)$$

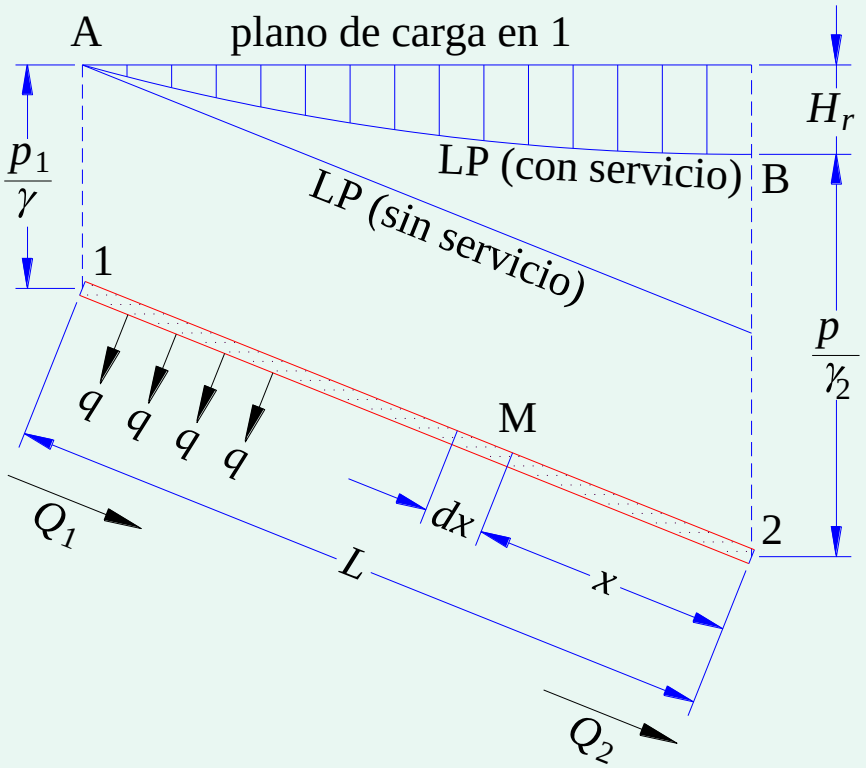
$$H_r = \frac{\beta \cdot L}{D^5} \cdot \left(Q_2^2 + \frac{L^2 \cdot q^2}{3} + L \cdot q \cdot Q_2 \right) = \beta \cdot L \cdot \frac{Q'^2}{D^5}$$

Caudal equivalente Q'

$$Q' = \sqrt{Q_2^2 + \frac{L^2 \cdot q^2}{3} + L \cdot q \cdot Q_2}$$

Si $Q_2 = 0$,

$$\left.\begin{aligned} H_r &= \frac{1}{3}\cdot\beta\cdot L\cdot\frac{Q^2}{D^5} = \beta\cdot L\cdot\frac{Q'^2}{D^5} \\ Q' &= \frac{Q}{\sqrt{3}} \end{aligned}\right\}$$



La pérdida de carga es la tercera parte de la que originaría dicho caudal si llegara hasta el final.

La LP sería horizontal al final, pues $J_2 = 0$.

Fórmula simplificada

$$Q' = Q_2 + 0{,}55 \cdot q \cdot L$$

que da valores bastante próximos; en efecto,

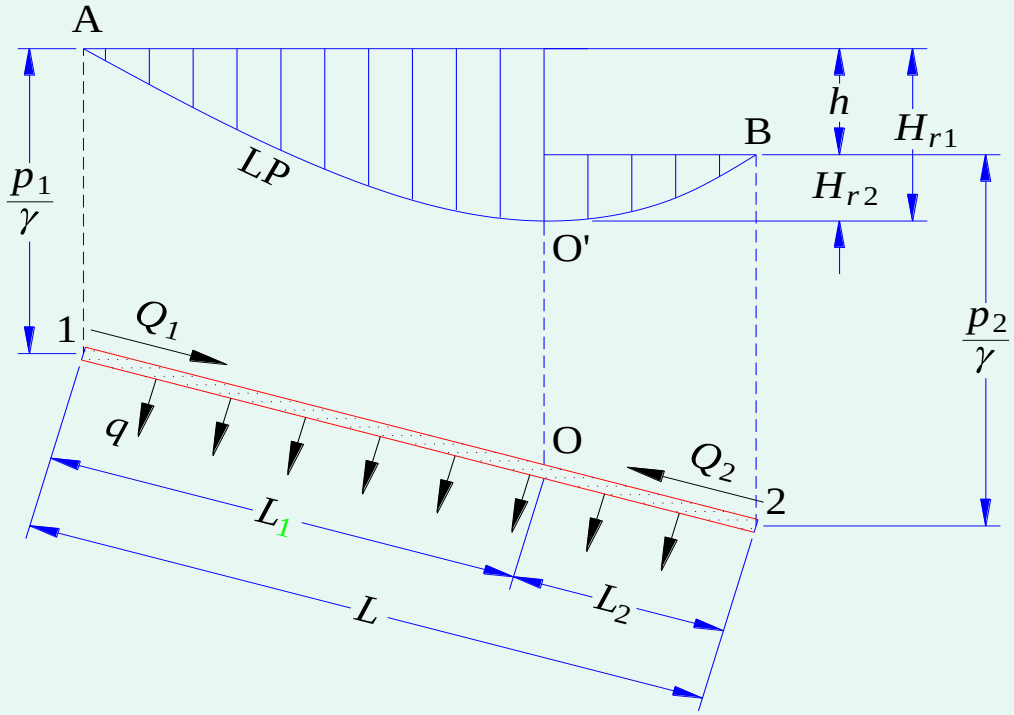
$$\left.\begin{aligned}
\left(Q_2 + \frac{q \cdot L}{2}\right)^2 &= Q_2^2 + \frac{q^2 \cdot L^2}{4} + q \cdot L \cdot Q_2 < Q_2^2 + \frac{q^2 \cdot L^2}{3} + q \cdot L \cdot Q_2 = Q'^2 \\
\left(Q_2 + \frac{q \cdot L}{\sqrt{3}}\right)^2 &= Q_2^2 + \frac{q^2 \cdot L^2}{3} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot q \cdot L \cdot Q_2 > Q_2^2 + \frac{q^2 \cdot L^2}{3} + q \cdot L \cdot Q_2 = Q'^2
\end{aligned}\right\}$$

$$Q_2 + \frac{q \cdot L}{2} < Q' < Q_2 + \frac{q \cdot L}{\sqrt{3}}$$

$$Q_2 + 0{,}5 \cdot q \cdot L < Q' < Q_2 + 0{,}57 \cdot q \cdot L$$

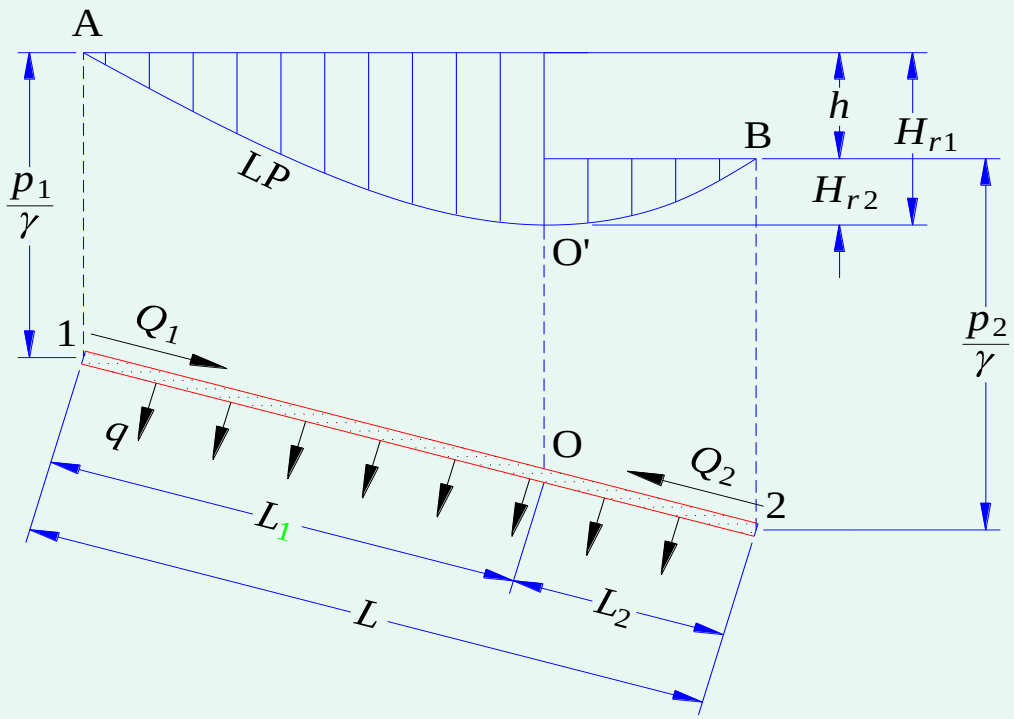
$$Q' \approx Q_2 + 0{,}55 \cdot q \cdot L$$

Tubería con servicio alimentada por los dos extremos



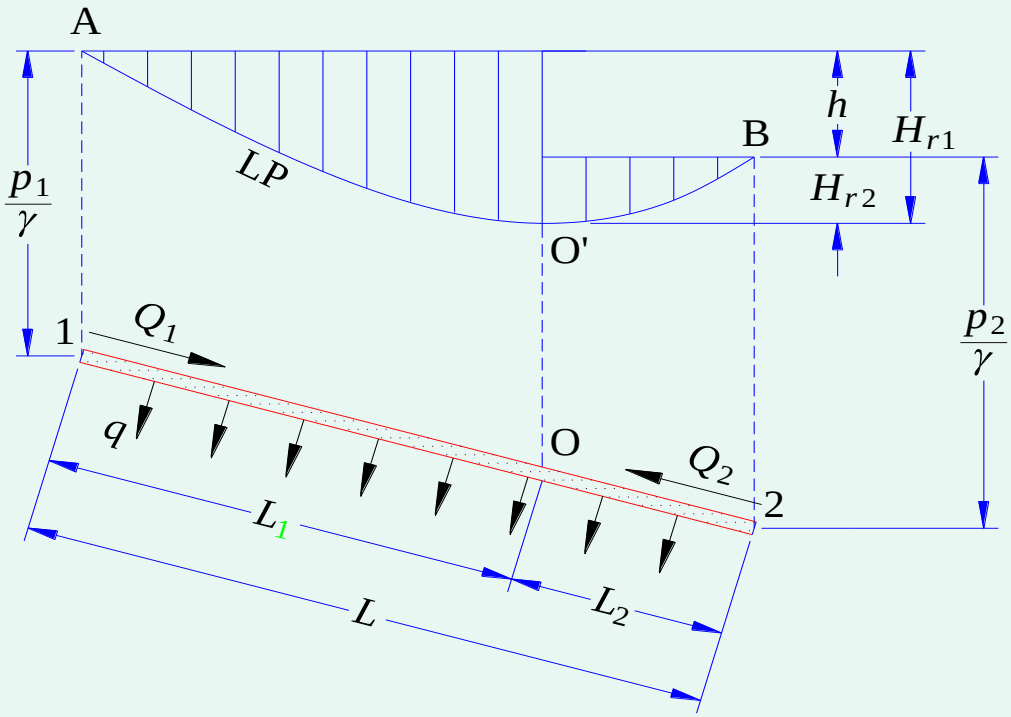
$$q = \frac{Q}{L} = \frac{Q_1}{L_1} = \frac{Q_2}{L_2}$$

Las líneas piezométricas AO' y BO' son tangentes en O' puesto que el caudal en la sección O es nulo por definición ($J = 0$).



$$Q' = \frac{Q}{\sqrt{3}}; \quad H_r = \frac{1}{3} \cdot \beta \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5} = \beta \cdot L \cdot \frac{Q'^2}{D^5}$$

Si q es el mismo en ambos tramos, AO' y BO' resultan simétricas respecto de OO'.



$$h = H_{r1} - H_{r2} = \beta'_1 \cdot L_1 \cdot \frac{Q'^2_1}{D^5} - \beta'_2 \cdot L_2 \cdot \frac{Q'^2_2}{D^5}$$

$$h = \beta'_1 \cdot \frac{Q_1}{q} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{Q_1^2}{D^5} - \beta'_2 \cdot \frac{Q_2}{q} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{Q_2^2}{D^5}$$

$$h = \frac{1}{3 \cdot q \cdot D^5} \cdot \left(\beta'_1 \cdot Q_1^3 - \beta'_2 \cdot Q_2^3\right)$$

1. Conocidos, D, Q_1, Q_2, L, k, ν, calcular h.

$$h = H_{r1} - H_{r2} = \beta'_1 \cdot L_1 \cdot \frac{Q'^2_1}{D^5} - \beta'_2 \cdot L_2 \cdot \frac{Q'^2_2}{D^5}$$

hay que determinar los caudales equivalentes Q'_1 y Q'_2 para calcular Re'_1 y Re'_2, necesarios para la valoración de β'_1 y β'_2:

$$\beta = 0{,}0827 \cdot f$$

2. Conocidos, h, Q_1, Q_2, L, k, ν, calcular D.

$$q = \frac{Q_1 + Q_2}{L}; \quad L_1 = \frac{Q_1}{q}; \quad L_2 = L - L_1$$

Se calcula D_o aproximado, con $f = 0{,}015$:

$$h = 0{,}0827 \cdot 0{,}015 \cdot L_1 \cdot \frac{Q'^2_1}{D_o^5} - 0{,}0827 \cdot 0{,}015 \cdot L_2 \cdot \frac{Q'^2_2}{D_o^5}$$

Con D_o, se calculan β'_1 y β'_2 para obtener el diámetro D definitivo.

3. Conocidos, D, Q, h, L, k, ν, calcular Q_1 y Q_2, y sus correspondientes L_1 y L_2.

Caudales

$$h = \frac{1}{3 \cdot q \cdot D^5} \cdot \left(\beta'_1 \cdot Q_1^3 - \beta'_2 \cdot Q_2^3 \right)$$

$$\beta'_1 \cdot Q_1^3 = 3 \cdot h \cdot q \cdot D^5 + \beta'_2 \cdot (Q - Q_1)^3$$

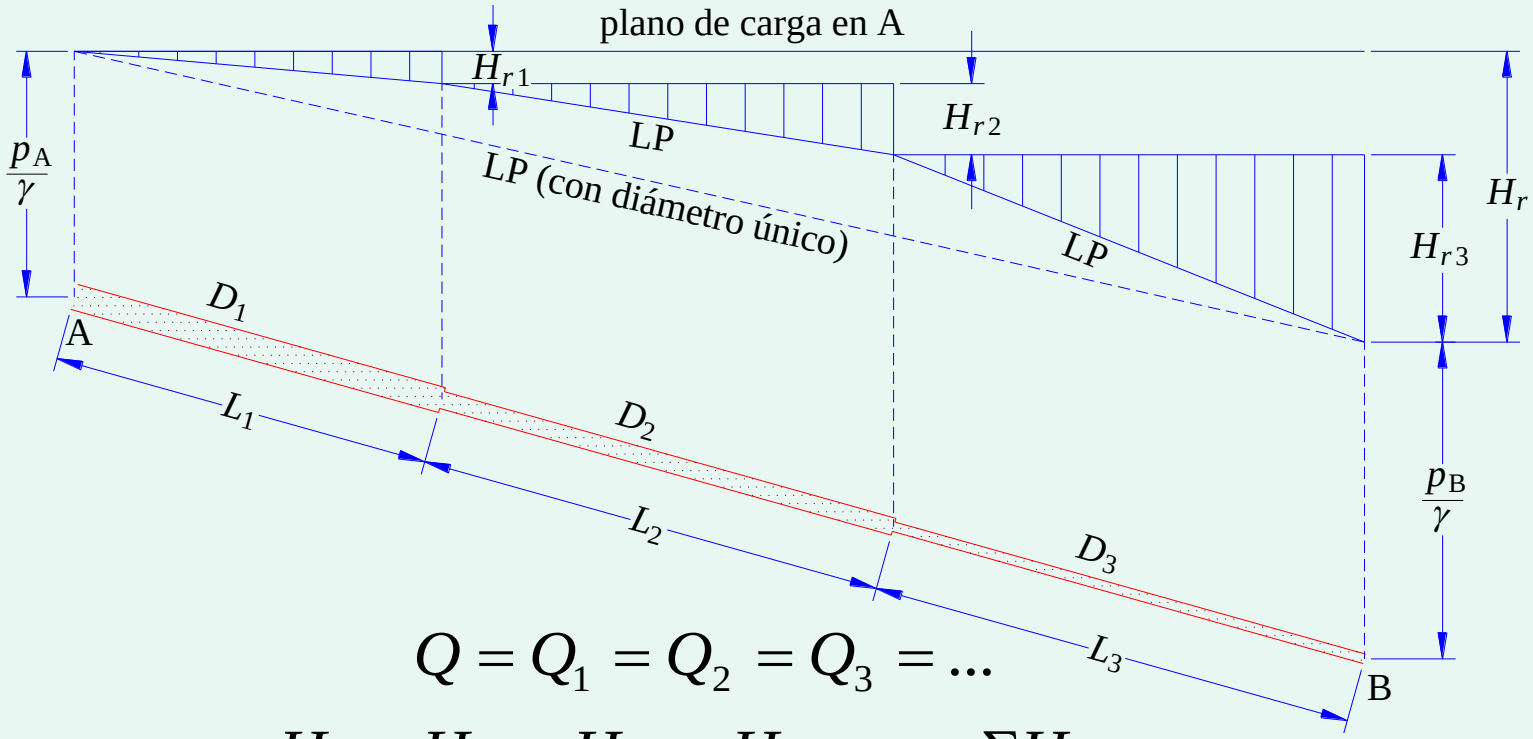
$$0{,}0827 \cdot 0{,}015 \cdot Q_1^3 = 3 \cdot h \cdot q \cdot D^5 + 0{,}0827 \cdot 0{,}015 \cdot (Q - Q_1)^3$$

damos al Q_1 del segundo miembro un valor aproximado ($Q_1 < Q$); obtendremos un valor del Q_1 del primer miembro que volvemos a sustituir en el segundo, y así sucesivamente.

Longitudes

$$q = \frac{Q}{L}; \quad L_1 = \frac{Q_1}{q}; \quad L_2 = L - L_1$$

TUBERÍAS EN SERIE



$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \ldots$$

$$H_r = H_{r1} + H_{r2} + H_{r3} + \ldots + \Sigma H_{ra}$$

1. Conocidos Q, L_i, D_i, ν, k_i, determinar H_r.

$$H_r = H_{r1} + H_{r2} + H_{r3} + \ldots + \Sigma H_{ra}$$

Se calcula H_r en cada tramo.

2. Dada una conducción en serie, determinar el diámetro ***equivalente D*** de la misma.

$$\frac{L}{D^5} = \sum \frac{L_i}{D_i^5}$$

El diámetro ***D*** que cumple los requisitos exigidos en una instalación no será en general comercial. Podría colocarse un trozo con el comercial $\boldsymbol{D_1}$ por exceso y el resto con el $\boldsymbol{D_2}$ por defecto:

3. Conocidos L_i, D_i, k_i, ν, H_r, determinar Q.

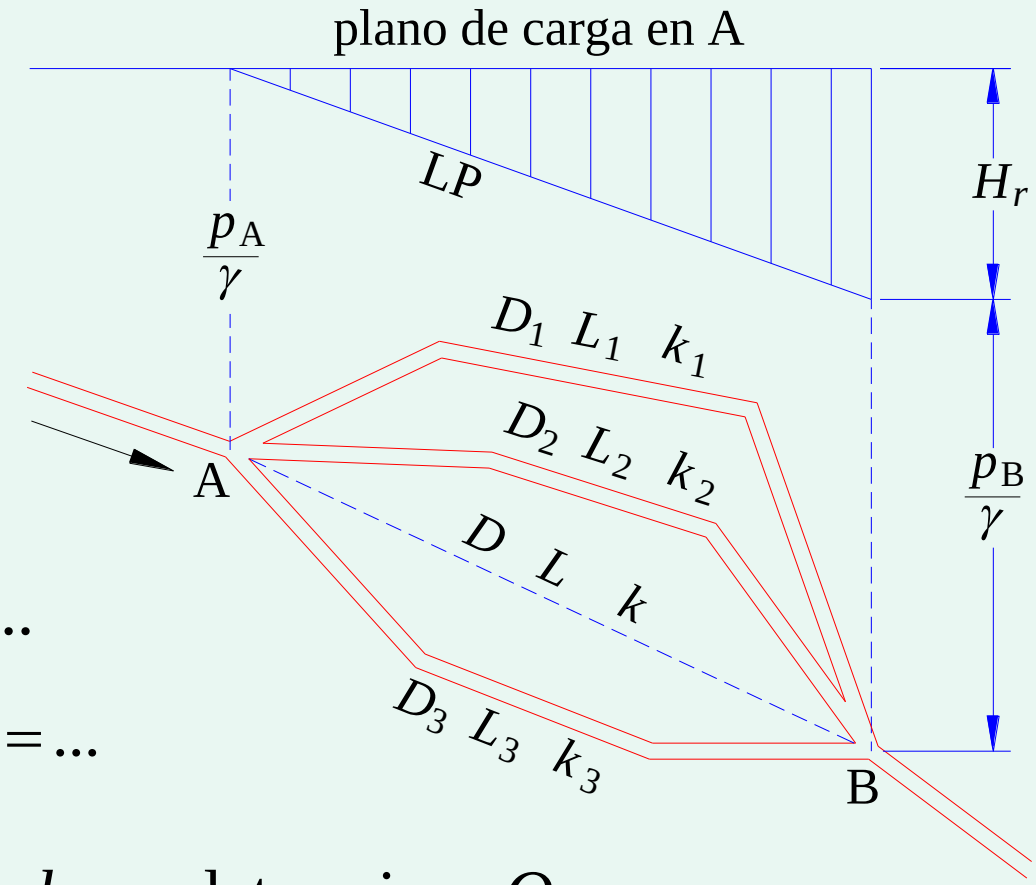
Calculado el ***D equivalente***, obtenemos la velocidad ***V***:

$$V = -2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot D \cdot J} \cdot \log\left(\frac{k/D}{3{,}7} + \frac{2{,}51 \cdot \nu}{D \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot D \cdot J}} \right)$$

Caudal

$$Q = V \cdot S = V \cdot \pi \cdot D^2 / 4$$

TUBERÍAS EN PARALELO



$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots$$

$$H_r = H_{r1} = H_{r2} = H_{r3} = \ldots$$

1. Conocidos H_r, L_i, D_i, k_i, ν, determinar Q.

Es un problema simple de cálculo de tuberías: se determina el caudal en cada tramo y luego se suman.

2. Dada una conducción en paralelo, calcular el diámetro D equivalente a una longitud L.

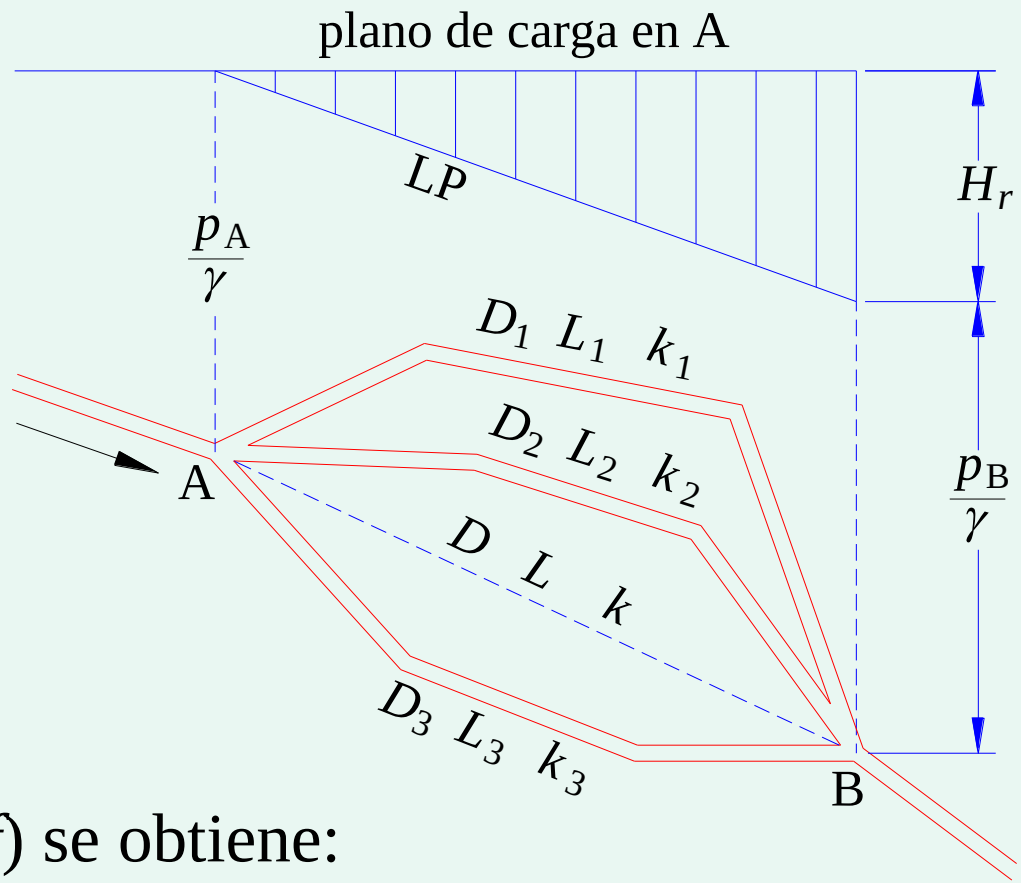
$$H_r = \beta_1 \cdot L_1 \cdot \frac{Q_1^2}{D_1^5}$$

$$H_r = \beta_2 \cdot L_2 \cdot \frac{Q_2^2}{D_2^5}$$

$$H_r = \beta_3 \cdot L_3 \cdot \frac{Q_3^2}{D_3^5}$$

.....

$$H_r = \beta \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5}$$



Igualando ($\beta = 0{,}0827 \cdot f$) se obtiene:

$$f_1 \cdot L_1 \cdot \frac{Q_1^2}{D_1^5} = f_2 \cdot L_2 \cdot \frac{Q_2^2}{D_2^5} = f_3 \cdot L_3 \cdot \frac{Q_3^2}{D_3^5} = \cdots = f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5}$$

$$\frac{Q_1}{\sqrt{\frac{D_1^5}{f_1 \cdot L_1}}} = \frac{Q_2}{\sqrt{\frac{D_2^5}{f_2 \cdot L_2}}} = \frac{Q_3}{\sqrt{\frac{D_3^5}{f_3 \cdot L_3}}} = \cdots = \frac{Q}{\sqrt{\frac{D^5}{f \cdot L}}}$$

$$\frac{\sum Q_{\mathrm{i}}}{\sum \sqrt{\frac{D_{\mathrm{i}}^5}{f_{\mathrm{i}} \cdot L_{\mathrm{i}}}}} = \frac{Q}{\sqrt{\frac{D^5}{f \cdot L}}}$$

$$\frac{D^5}{f \cdot L} = \left(\sum \left(\frac{D_{\mathrm{i}}^5}{f_{\mathrm{i}} \cdot L_{\mathrm{i}}} \right)^{1/2} \right)^2$$

Si, en principio, tomamos el mismo *f*:

$$\frac{D^5}{L} = \left(\sum \left(\frac{D_{\mathrm{i}}^5}{L_{\mathrm{i}}} \right)^{1/2} \right)^2$$

3. Conocidos L_i, D_i, k_i, ν, Q, calcular Q_i y H_r.

Se fija un D algo superior al D_i mayor, para el se calcula la longitud L. Con estos D y L calculamos H_r aproximada (f_o = 0,015):

$$H_r = 0{,}0827 \cdot f_o \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5}$$

Con la H_r hallada, se determinan V_i y Q_i:

$$V = -2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot D \cdot J} \cdot \log\left(\frac{k/D}{3{,}7} + \frac{2{,}51 \cdot \nu}{D \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot D \cdot J}}\right)$$

$$Q = V \cdot S = V \cdot \pi \cdot D^2 / 4$$

que serán próximos a los reales. Proporcional a estos Q_i repartimos el caudal total Q dado, con lo que se obtienen los Q_i definitivos.

ALIMENTACIÓN CON DOS O MÁS DEPÓSITOS

Depósitos de regulación y de compensación

Podemos establecer dos grandes grupos:

I. Abastecimiento por gravedad

II. Abastecimiento por bombeo.

La solución por gravedad es la ideal

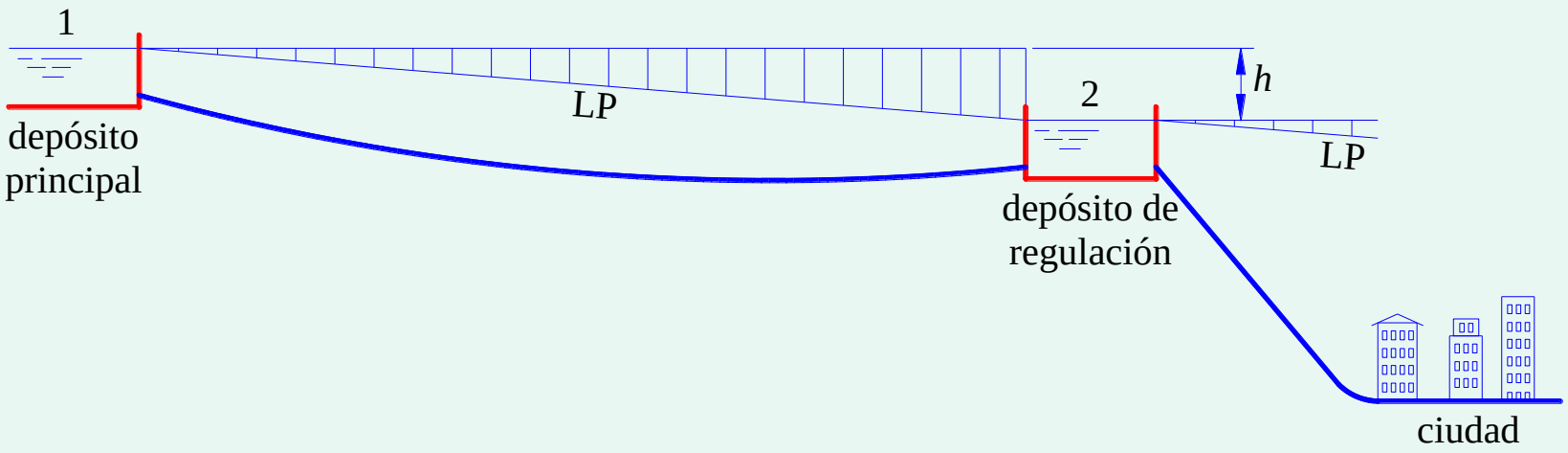
I.1. El depósito de agua está próximo a la ciudad. La regulación de las presiones y del consumo en la red se haría desde el mismo: ***depósito de regulación***, o ***depósito principal*** cuando existen otros depósitos.

2. El depósito está lejos de la ciudad. Conviene instalar otro próximo a ella:

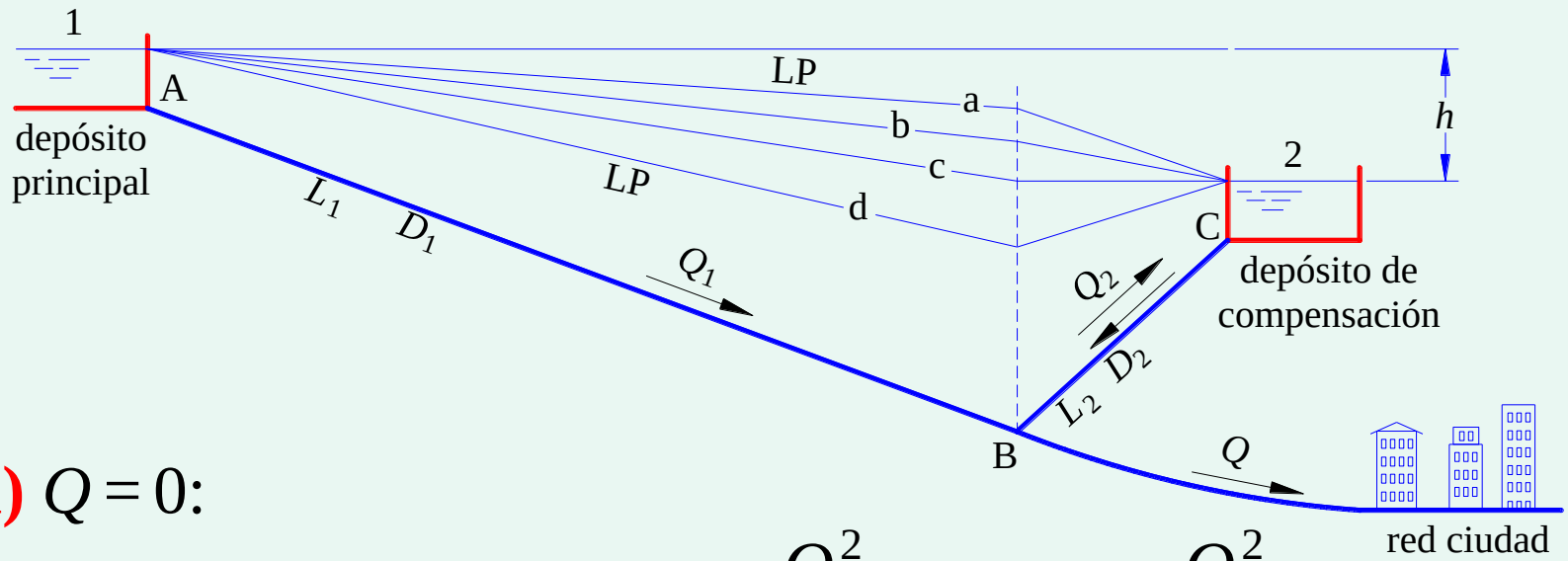
- En serie con el depósito principal: ***depósito de regulación.*** Regula bien las presiones en la red con cualquier consumo.

- Conectado a la conducción que une el depósito principal con la red: ***depósito de compensación.*** Regula aún mejor las presiones.

- En serie con el depósito principal: ***depósito de regulación.*** Regula bien las presiones en la red con cualquier consumo.



- Conectado a la conducción que une el depósito principal con la red: ***depósito de compensación.*** Regula aún mejor las presiones.

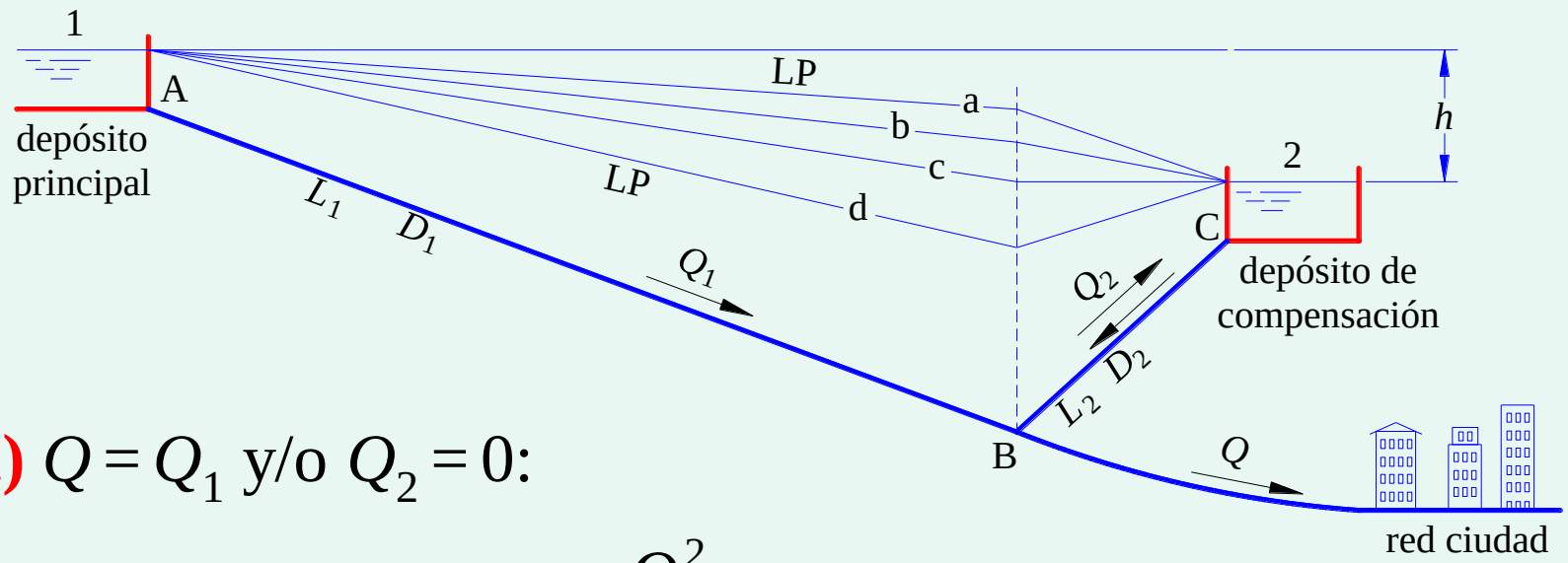


a) $Q = 0$:

$$h = H_{rAB} + H_{rBC} = \beta_1 \cdot L_1 \cdot \frac{Q_1^2}{D_1^5} + \beta_2 \cdot L_2 \cdot \frac{Q_1^2}{D_2^5}$$

b) $Q > 0$, aunque $Q_1 = Q + Q_2$:

$$h = H_{rAB} + H_{rBC} = \beta_1 \cdot L_1 \cdot \frac{Q_1^2}{D_1^5} + \beta_2 \cdot L_2 \cdot \frac{Q_2^2}{D_2^5}$$



c) $Q = Q_1$ y/o $Q_2 = 0$:

$$h = H_{r\mathrm{AB}} = \beta_1 \cdot L_1 \cdot \frac{Q_1^2}{D_1^5}$$

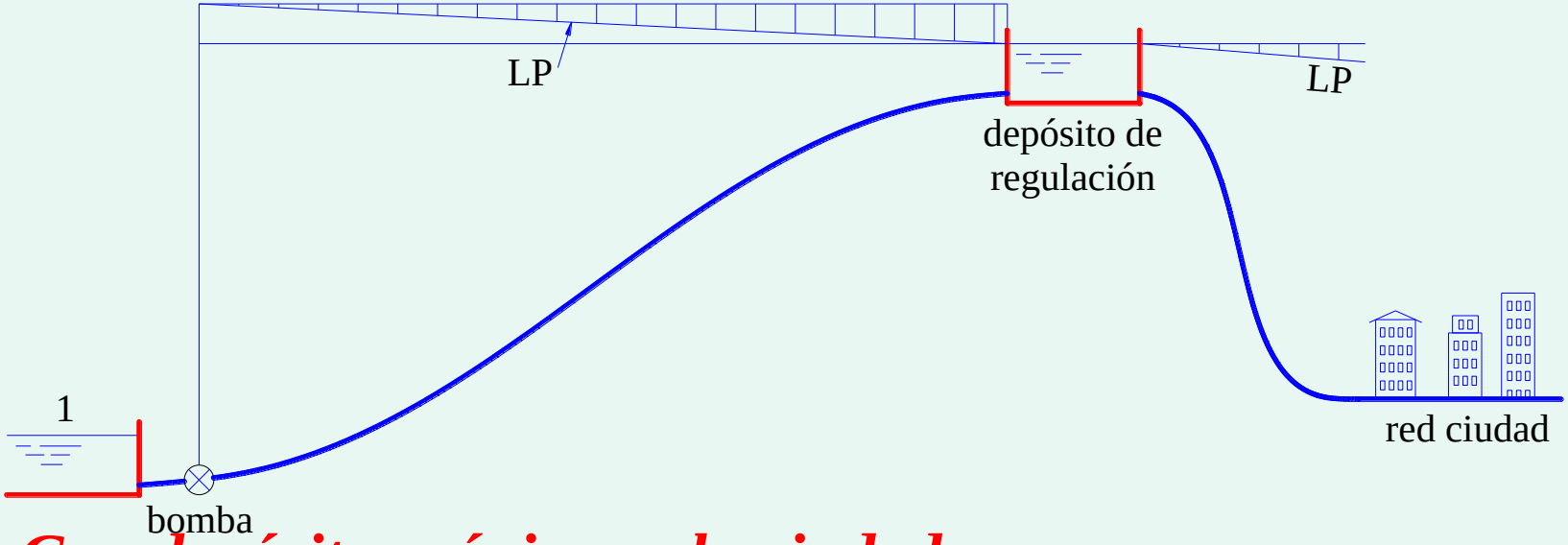
d) $Q = Q_1 + Q_2$:

$$h = H_{r\mathrm{AB}} - H_{r\mathrm{CB}} = \beta_1 \cdot L_1 \cdot \frac{Q_1^2}{D_1^5} - \beta_2 \cdot L_2 \cdot \frac{Q_2^2}{D_2^5}$$

II. Abastecimiento mediante bombeo

Bombeo directo a la red

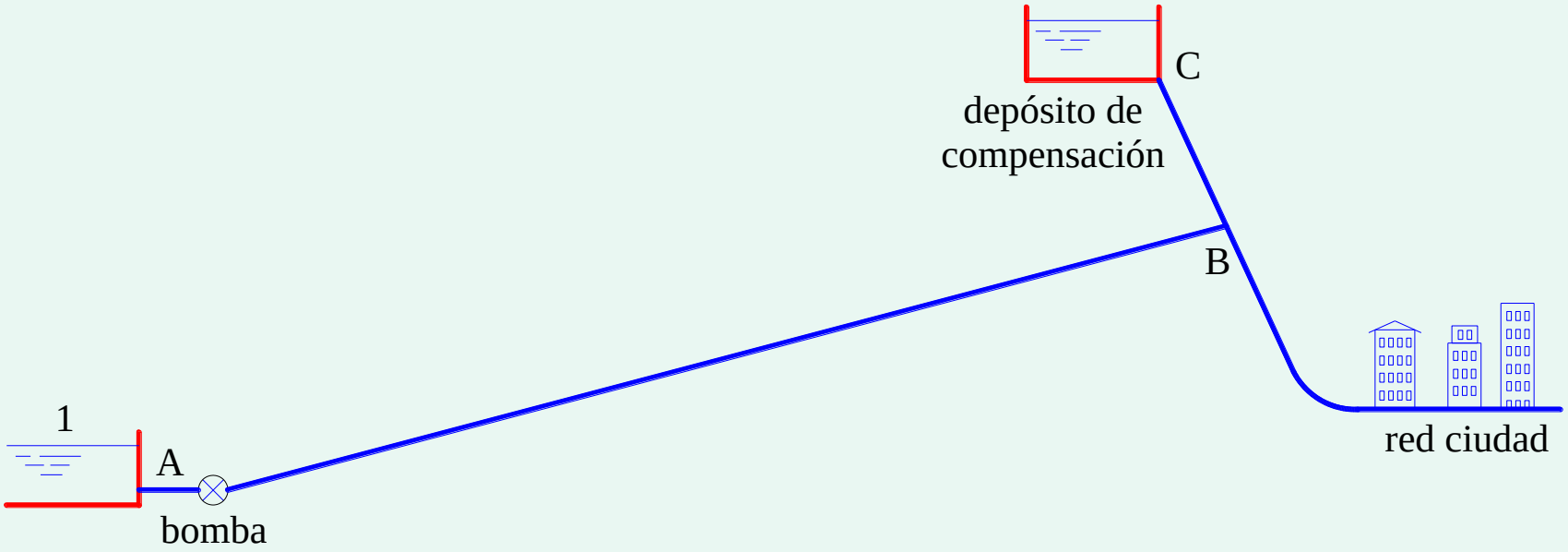
- las bombas tendrían que cubrir el caudal punta: bombas y diámetros mayores;
- tendrían que suministrar un caudal variable: condiciones fuera de diseño;
- tendrían que funcionar en las horas punta: mayor demanda y energía eléctrica más cara,
- se regulan peor las presiones en la red.

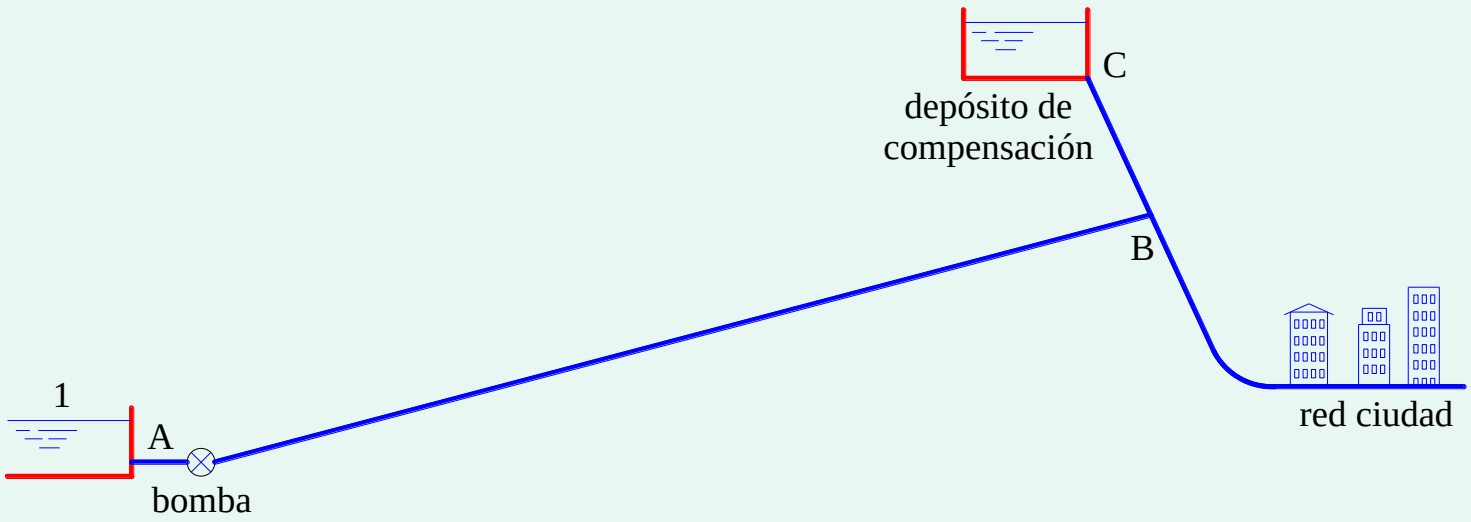


Con depósito próximo a la ciudad

- las bombas tendrían que cubrir sólo el caudal medio;
- suministran un caudal constante, o por lo menos más regular: funcionarían en mejores condiciones de rendimiento;
- para llenar el depósito podemos utilizar las horas en las que la energía eléctrica es más barata.
- se regulan mejor las presiones en la red.

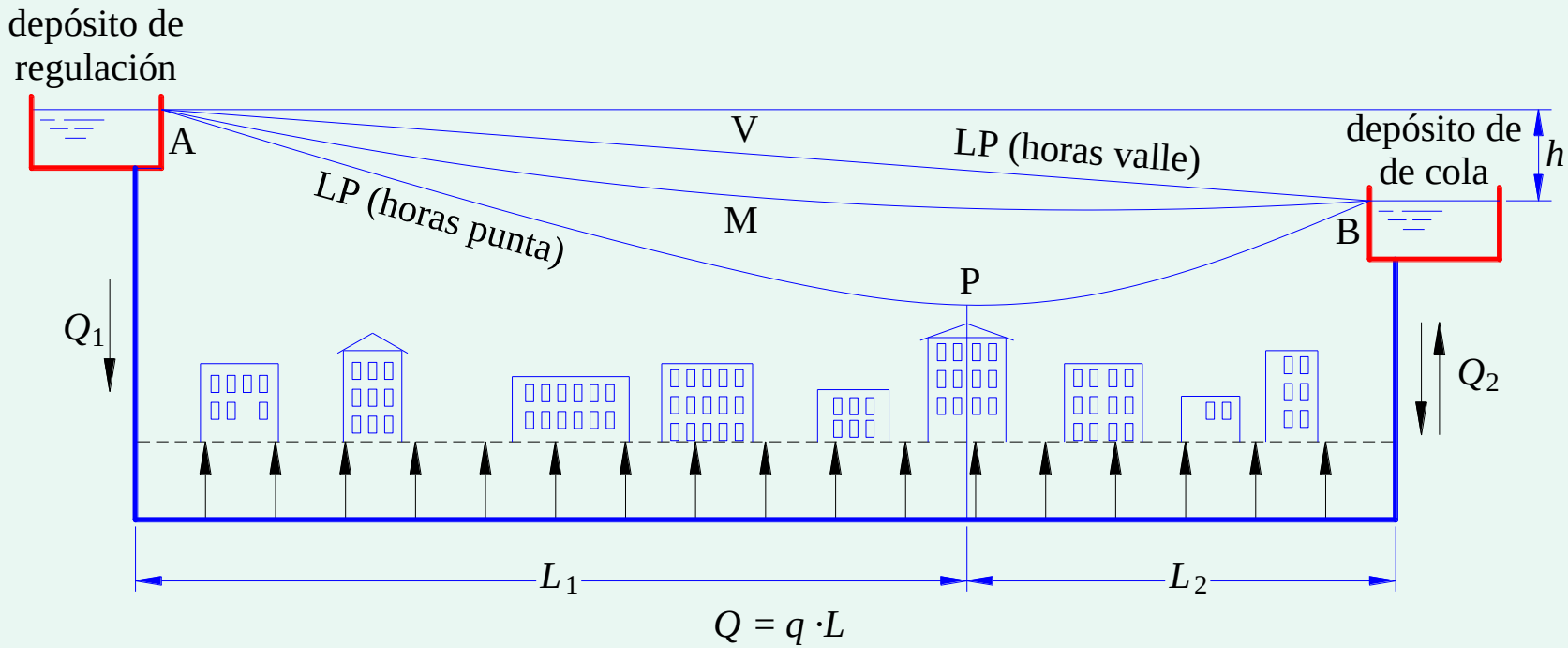
El ***depósito de compensación*** presenta ventajas respecto del ***depósito de regulación*:**





- resulta menos voluminoso, pues parte del suministro va directo a red;
- este suministro directo no tiene que subir al depósito, por lo que se ahorra energía;
- en las horas valle las bombas alimentan a la vez la red y el depósito, y en las horas punta el depósito apoyaría a las bombas, que incluso podrían pararse;
- la tubería BC sirve para ambos sentidos, lo que en ocasiones representa un importante ahorro en la instalación.

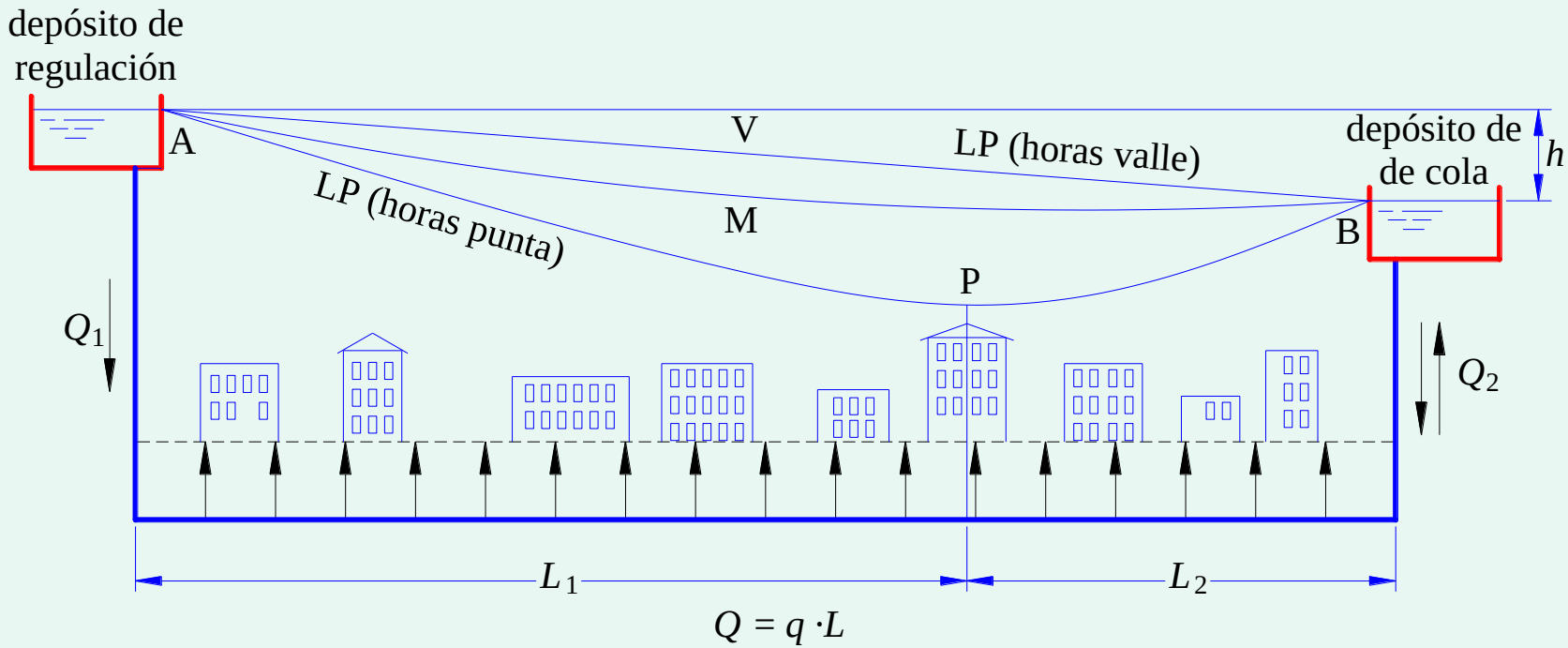
Depósitos de cola



La tubería que une los depósitos se estudia como una tubería con servicio en ruta.

Conocidos h y Q_2 de llenado y el consumo Q ($Q = q \cdot L$) en horas valle, el equivalente Q' sería,

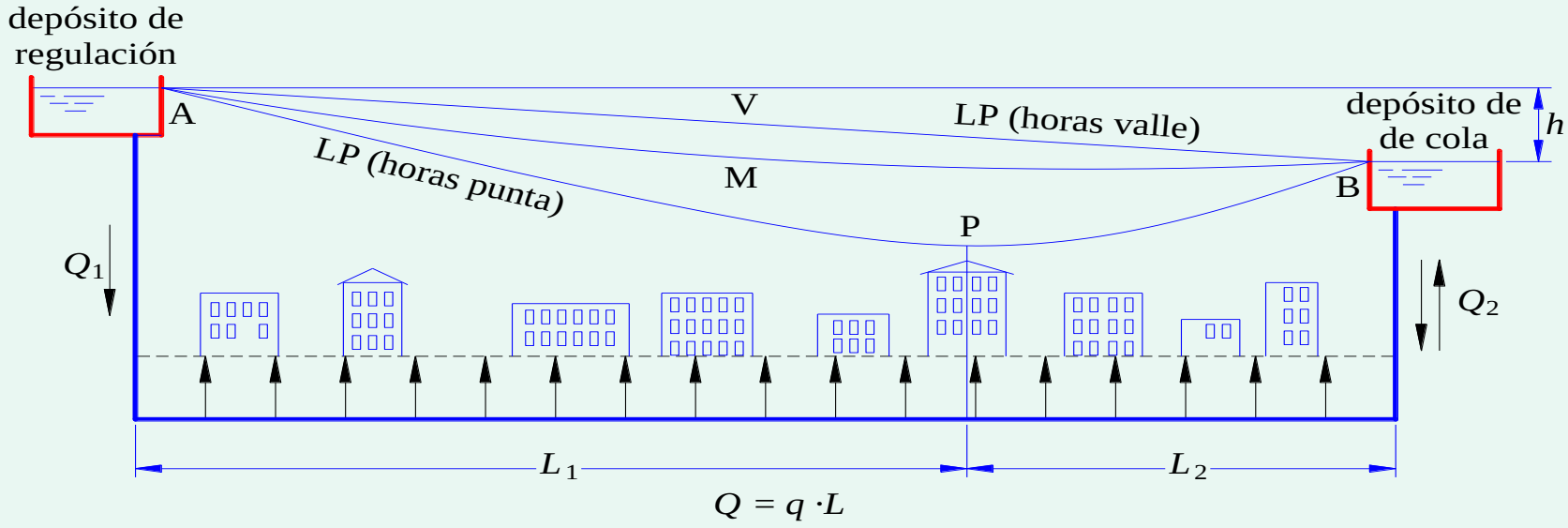
$$Q' = Q_2 + 0{,}55 \cdot q \cdot L$$



Diámetro de la tubería

$$H_r = h = \beta' \cdot L \cdot \frac{Q'^2}{D^5}$$

Comportamiento de la red

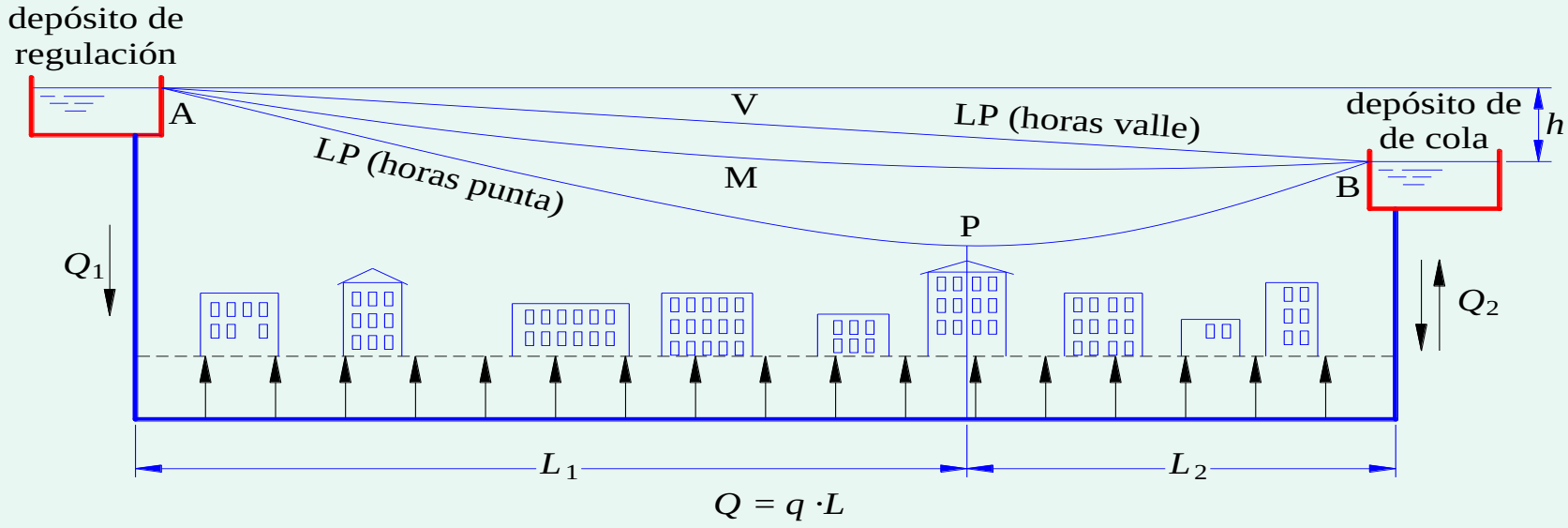


a) En horas valle, entra agua en el depósito de cola y la situación se calcula mediante las dos expresiones anteriores (LP: AVB).

b) $Q_2 = 0$ (LP: AMB); en tal caso, $Q' = 0{,}577 \cdot Q_1$ ($Q_1 = 1{,}73 \cdot Q'$)

La relación entre Q' y h sería,

$$H_r = h = \beta' \cdot L \cdot \frac{Q'^2}{D^5}$$



Quiere decir que para cualquier situación (entre AMB y AVB) en la que,

$$Q_1 \leq 1{,}73 \cdot Q' \quad (Q_2 \geq 0),$$

el equivalente Q' es el mismo.

c) Por último, si $Q_1 > 1{,}73 \cdot Q'$, estaríamos en el caso de una tubería con servicio alimentada por los dos extremos.