



TEMA 9.

GOLPE DE ARIETE EN TUBERÍAS

ANÁLISIS PRÁCTICO Y SIMPLIFICADO

GOLPE DE ARIETE:

PERTURBACIÓN HIDRÁULICA TRANSITORIA, DE CARACTER CÍCLICO Y CORTA DURACIÓN, QUE SE PRODUCE CUANDO SE MODIFICA EL MOVIMIENTO DE UN LÍQUIDO QUE CIRCULA POR UNA TUBERÍA DE UN REGIMEN PERMANENTE A OTRO VARIABLE, DANDO LUGAR A QUE SE GENEREN ONDAS ALTERNATIVAS DE DEPRESIÓN Y SOBREPRESIÓN, QUE SE PROPAGAN A LO LARGO DEL CONDUCTO.

EFFECTOS:

- **SOBREPRESIONES:** ROTURA DE TUBERÍAS, DAÑO A ELEMENTOS FIJOS Y MOVILES EN INSTALACIONES DE BOMBEO.
- **DEPRESIONES:** ROTURA DE TUBERÍAS POR APLASTAMIENTO, ACUMULACIÓN DE AIRE Y CAVITACIÓN.

CASOS DE MAYOR INTERÉS:

- **CIERRE RÁPIDO DE VÁLVULAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**
- **PARADA DE BOMBAS EN INSTALACIONES DE IMPULSIÓN**



EVALUACIÓN DEL GOLPE DE ARIETE

$$P_g = \frac{L \cdot V}{g \cdot T} \quad \text{JOUGET}$$

P_g: GOLPE DE ARIETE EN m.c.a.

L: LONGITUD DE LA TUBERÍA (m)

V: DIFERENCIA DE VELOCIDADES ANTES Y DESPUES DEL ACCIONAMIENTO DE LA VÁLVULA O PARADA DE LA BOMBA (m/s)

g: ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD (m/s²)

LA FORMULA DE JOUGET SE OBTIENE SUPONIENDO UNA PRESIÓN P_g CONSTANTE DURANTE LA MANIOBRA. EN LA PRÁCTICA NO OCURRE ASÍ, AUMENTANDO LA PRESIÓN DEL GOLPE DE ARIETE DURANTE LA MANIOBRA DE CIERRE DE LA VÁLVULA O PARADA DE LA BOMBA. MICHAUD EVALUA EL GOLPE DE ARIETE MÁXIMO DURANTE LA MANIOBRA COMO:

$$P_g = \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot T} \quad \text{MICHAUD}$$

$$P_g \text{ (MICHAUD)} = 2 \cdot P_g \text{ (JOUQUET)}$$



DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL FENÓMENO

CIERRE DE UNA VÁLVULA

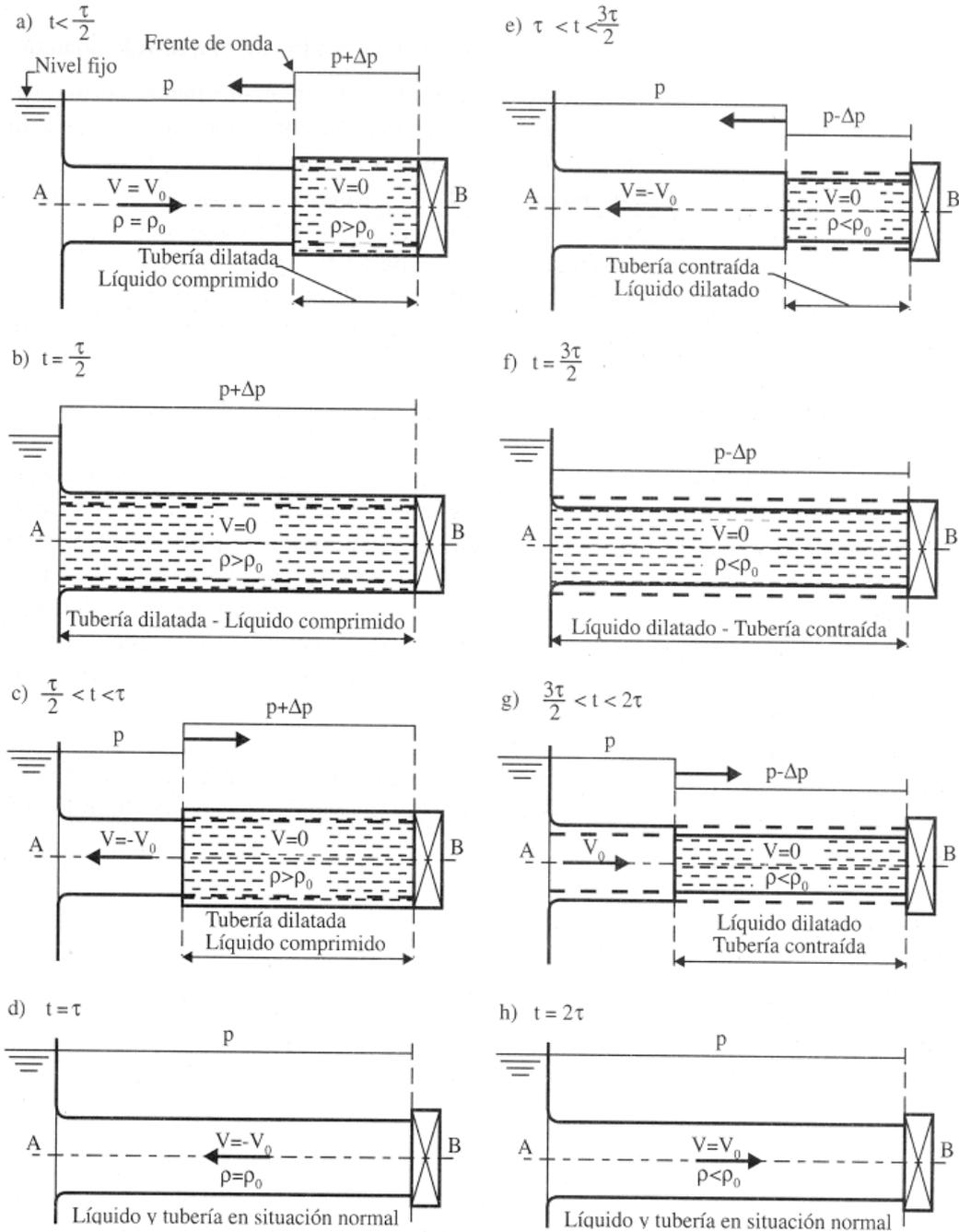


FIGURA 17.5: Fases del golpe de ariete

$$\tau = 2L/a \quad \Rightarrow \quad a: \text{celeridad de la onda}$$



DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL FENÓMENO

PARADA DE UNA BOMBA

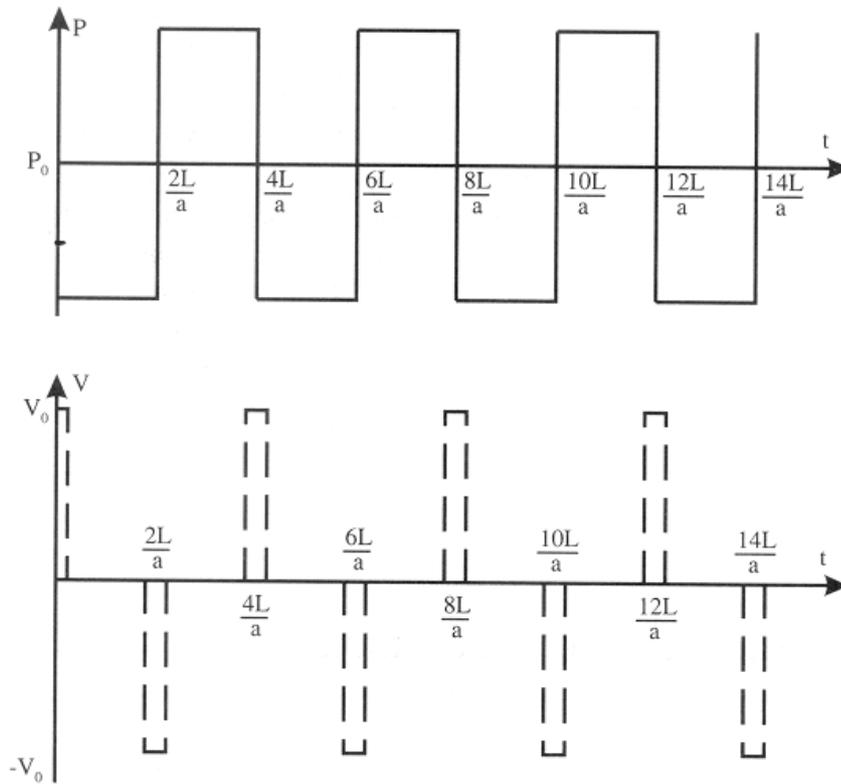


FIGURA 17.7: Variación de la presión y de la velocidad aguas abajo de la válvula de retención

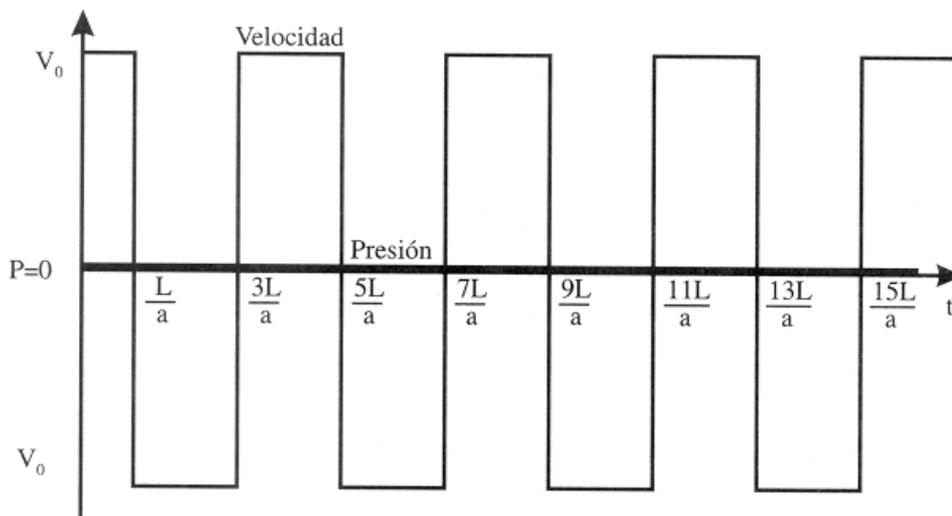


FIGURA 17.8: Variación de la velocidad y la presión a la entrada del depósito



DETERMINACIÓN DE LA CELERIDAD (a)

LA CELERIDAD DE LA ONDA, QUE DEPENDE DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS DE LA TUBERÍA, ASÍ COMO DE LA COMPRESIBILIDAD Y DENSIDAD ESPECÍFICA DEL FLUIDO. PARA EL AGUA SE EXPRESA POR LA FÓRMULA:

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

a: CELERIDAD DE LA ONDA (m/s)

D: DIÁMETRO INTERIOR DE TUBO (mm)

e: ESPESOR DEL TUBO (mm)

k: $10^{10}/E$, SIENDO E EL MODULO DE ELASTICIDAD DEL MATERIAL EN Kg/m^2

MATERIAL

E (kg/m²)

T. hierro, acero y hormigón armado	$2 \cdot 10^{10}$
T. fundición dúctil	$1,7 \cdot 10^{10}$
T. fundición laminar	10^{10}
T. aluminio	$7 \cdot 10^9$
T. hormigón pretensado	$4 \cdot 10^9$
T. amianto-cemento	$1,85 \cdot 10^9$
T. PVC	$3 \cdot 10^8$
T. polipropileno	$12 \cdot 10^7$
T. polietileno alta densidad	$9 \cdot 10^7$
T. polietileno baja densidad	$12 \cdot 10^6$



CÁLCULO DEL GOLPE DE ARIETE EN TUBERÍAS DE CIRCULACIÓN POR GRAVEDAD (CIERRE VÁLVULA)

TIEMPO DE CIERRE DE LA VÁLVULA: T

$$\text{TIEMPO CRÍTICO: } T_C = 2L/a$$

ES EL TIEMPO EMPLEADO POR LA ONDA DE SOBREPRESIÓN EN IR AL EXTREMO OPUESTO DE LA VÁLVULA Y RETORNAR DE NUEVO A ELLA.

$$\text{CIERRE RÁPIDO: } 0 < T < T_C$$

LA ONDA DE SOBREPRESIÓN MÁXIMA SE PRODUCE CUANDO SE CIERRA COMPLETAMENTE LA VÁLVULA.

VALOR DE LA SOBREPRESIÓN MÁXIMA (ALLIEVI):

$$P_g (m.c.a) = \frac{a \cdot V}{g}$$

LONGITUD CRÍTICA: $L_C = a \cdot T/2$. ESTA DISTANCIA, CONSIDERADA A PARTIR DEL DEPÓSITO, NOS DEFINE EL PUNTO CRÍTICO.

PRESIÓN MÁXIMA EN LA VÁLVULA:

$$P_{B_{MAX}} = P_e + P_g = P_e + \frac{a \cdot V}{g}$$

PRESIÓN MÍNIMA EN LA VÁLVULA:

$$P_{B_{MIN}} = P_e - P_g = P_e - \frac{a \cdot V}{g}$$



CIERRE RÁPIDO $T < \frac{2L}{a}$

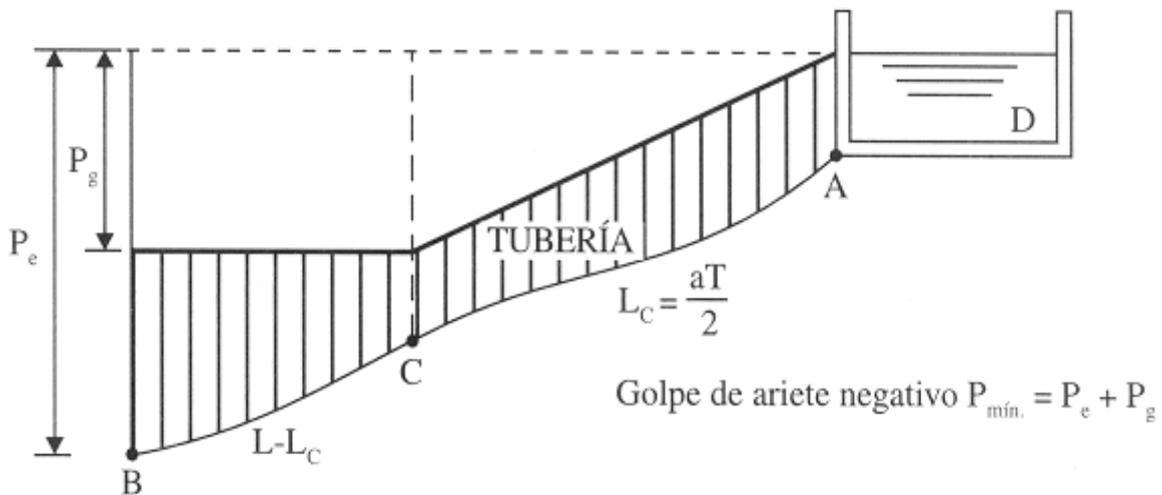
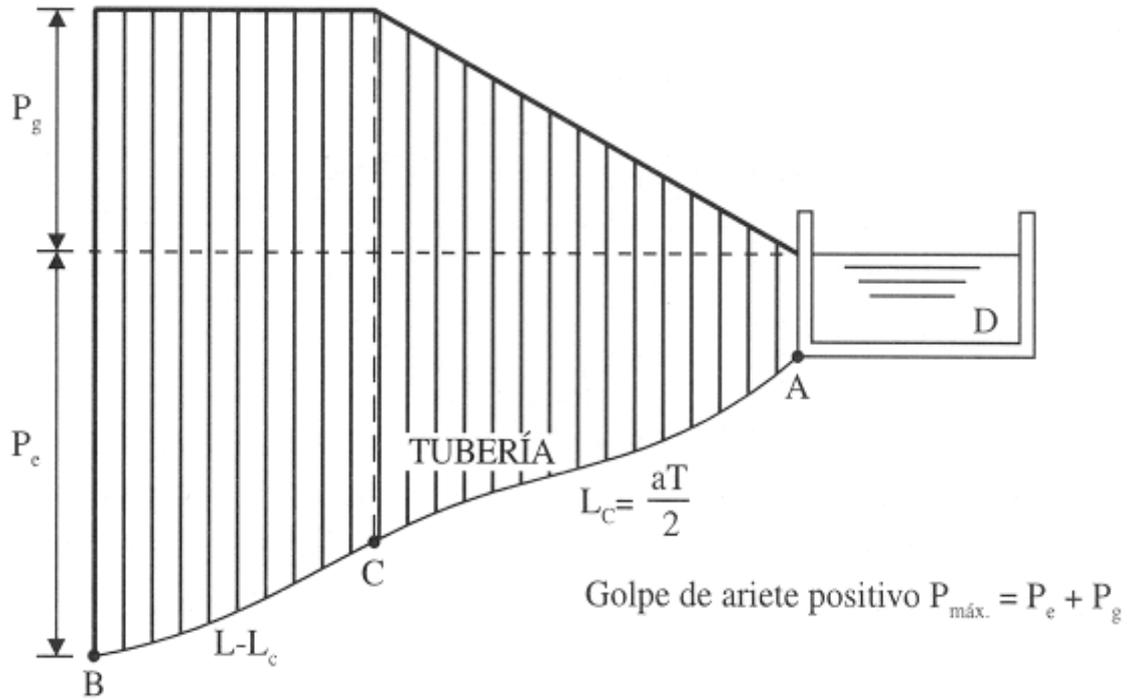


FIGURA 17.9



CIERRE LENTO: $T > T_C$

LA ONDA DE SOBREPRESIÓN MÁXIMA SE PRODUCE AL CABO DEL TIEMPO CRÍTICO JUNTO A LA VÁLVULA.

LA SOBREPRESIÓN SERÁ MENOR QUE EN CIERRE RÁPIDO PUESTO QUE LA ONDA DE DEPRESIÓN REFLEJADA LLEGA A LA VÁLVULA ANTES DE QUE SE COMPLETE SU CIERRE.

VALOR DE LA SOBREPRESIÓN MÁXIMA (MICHAUD):

$$P_g (m.c.a) = \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot T}$$

LA SOBREPRESIÓN DECRECE LINEALMENTE HASTA ANULARSE EN EL DEPÓSITO

PRESIÓN MÁXIMA EN LA VÁLVULA:

$$P_{B_{MAX}} = P_e + P_g = P_e + \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot T}$$

PRESIÓN MÍNIMA EN LA VÁLVULA:

$$P_{B_{MIN}} = P_e - P_g = P_e - \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot T}$$

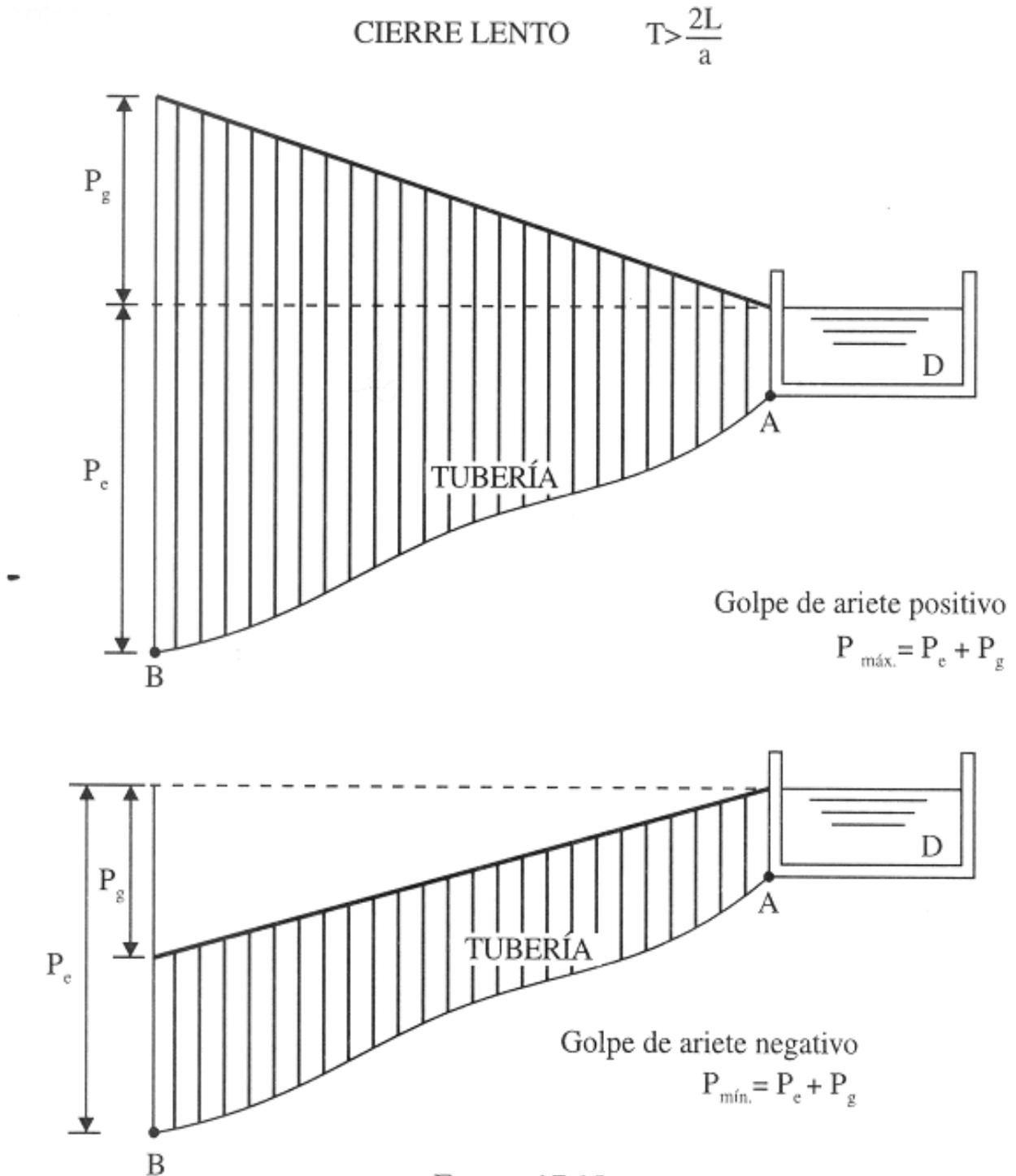


FIGURA 17.10



CÁLCULO DEL GOLPE DE ARIETE EN TUBERÍAS DE IMPULSIÓN (PARADA DE BOMBA)

TIEMPO DE CESE DE CIRCULACIÓN DEL LÍQUIDO: T

NO COINCIDE CON EL TIEMPO DE PARADA DE LA BOMBA. LA CIRCULACIÓN DEL AGUA CESA APROXIMADAMENTE UNA VEZ SE HA PRODUCIDO UNA DISMINUCIÓN DEL 15% EN EL NÚMERO DE REVOLUCIONES DE LA BOMBA (CIERRE DE LA VÁLVULA DE RETENCIÓN)

SE EVALÚA CON LA FÓRMULA EMPÍRICA DE MENDILUCE:

$$T = C + \frac{K \cdot L \cdot V}{g \cdot H_m}$$

T = TIEMPO DE CESE DE LA CIRCULACIÓN (segundos)

L = LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA DE IMPULSIÓN (m)

V = VELOCIDAD MEDIA DEL AGUA EN LA IMPULSIÓN (m/s)

g = ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD (m/s²)

H_m = ALTURA MANOMÉTRICA; H_m = H_g + h_{impulsión}

C = COEFICIENTE ADIMENSIONAL EMPÍRICO FUNCIÓN DE LA PENDIENTE DE LA IMPULSIÓN (p)

$$p < 0,20 \Rightarrow C = 1$$

$$p \approx 0,35 \Rightarrow C = 0,40$$

$$p \approx 0,25 \Rightarrow C = 0,8$$

$$p > 0,4 \Rightarrow C = 0,40$$

$$p \approx 0,3 \Rightarrow C = 0,60$$

K = COEFICIENTE ADIMENSIONAL EMPÍRICO FUNCIÓN DE LA LONGITUD DE LA IMPULSIÓN (L)



$$L < 500 \text{ m} \Rightarrow K = 2$$

$$L \approx 1500 \text{ m} \Rightarrow K = 1,25 \quad L \approx 500$$

$$\text{m} \Rightarrow K = 1,75$$

$$L > 1500 \text{ M} \Rightarrow K = 1$$

$$L \approx 1000 \text{ m} \Rightarrow K = 1,5$$

LONGITUD CRÍTICA: $L_C = a \cdot T/2$

IMPULSIÓN CORTA: $L < L_C$

LA SOBREPRESIÓN ES CRECIENTE DESDE EL FINAL DE LA IMPULSIÓN HASTA EL ORIGEN JUNTO A LA BOMBA, DONDE ALCANZA LOS VALORES MÁXIMOS.

VALOR DE LA SOBREPRESIÓN MÁXIMA (MICHAUD):

$$P_g (m.c.a) = \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot T}$$

PRESIÓN MÁXIMA EN LA BOMBA:

$$P_{B_{MAX}} = H_g + P_g = H_g + \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot T}$$

PRESIÓN MÍNIMA EN LA BOMBA:

$$P_{B_{MIN}} = H_g - P_g = H_g - \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot T}$$

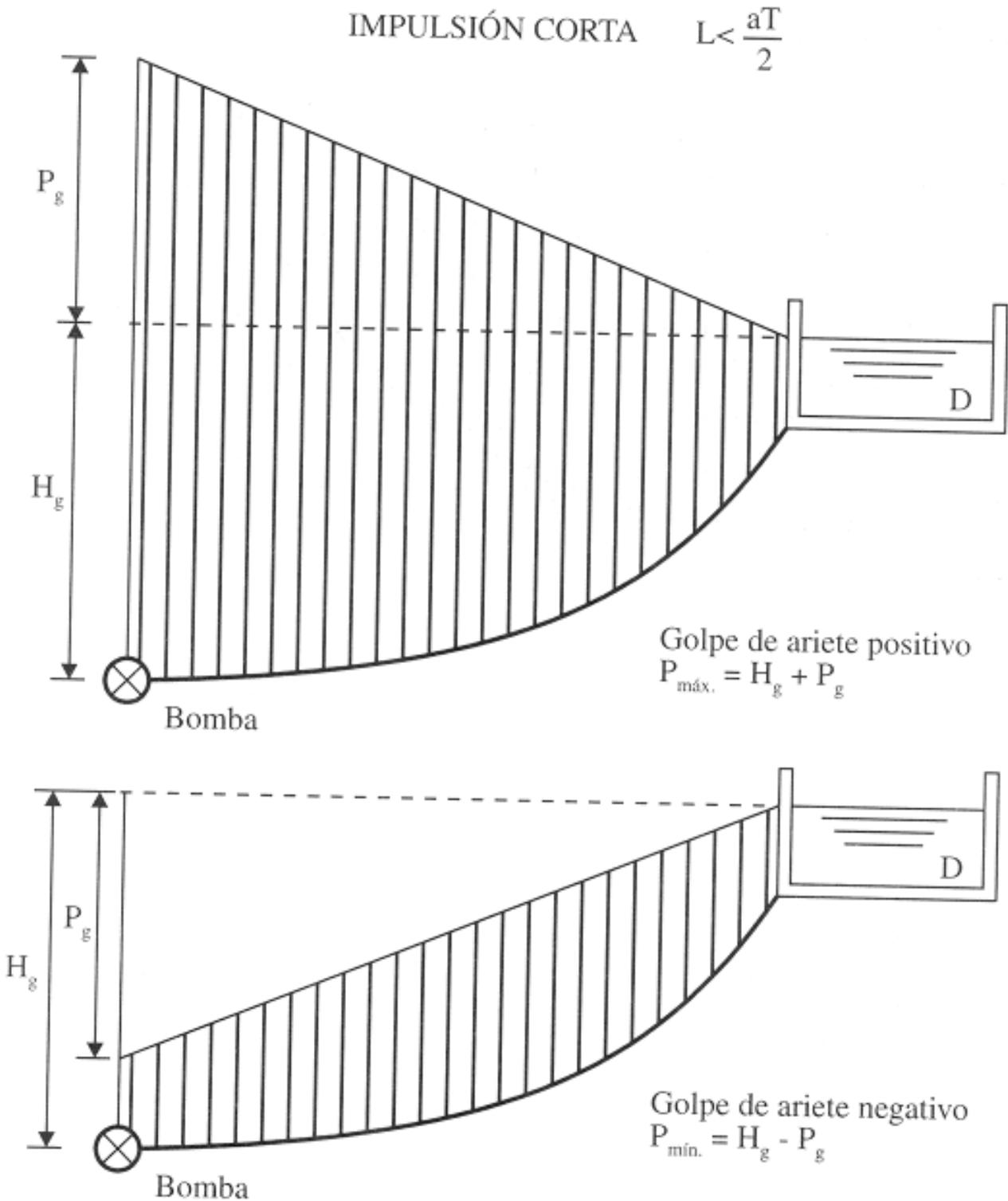


FIGURA 17.14



IMPULSIÓN LARGA: $L > L_C$

LA SOBREPRESIÓN ES CRECIENTE DESDE EL FINAL DE LA IMPULSIÓN HASTA UNA LONGITUD $a \cdot T/2$ DE DICHO FINAL. A PARTIR DE ESE PUNTO SE MANTIENE CONSTANTE CON EL VALOR DE LA FÓMULA DE ALLIEVI HASTA EL ORIGEN.

VALOR DE LA SOBREPRESIÓN MÁXIMA (ALLIEVI):

$$P_g (m.c.a) = \frac{a \cdot V}{g}$$

PRESIÓN MÁXIMA EN LA BOMBA:

$$P_{B_{MAX}} = H_g + P_g = H_g + \frac{a \cdot V}{g}$$

PRESIÓN MÍNIMA EN LA BOMBA:

$$P_{B_{MIN}} = H_g - P_g = H_g - \frac{a \cdot V}{g}$$

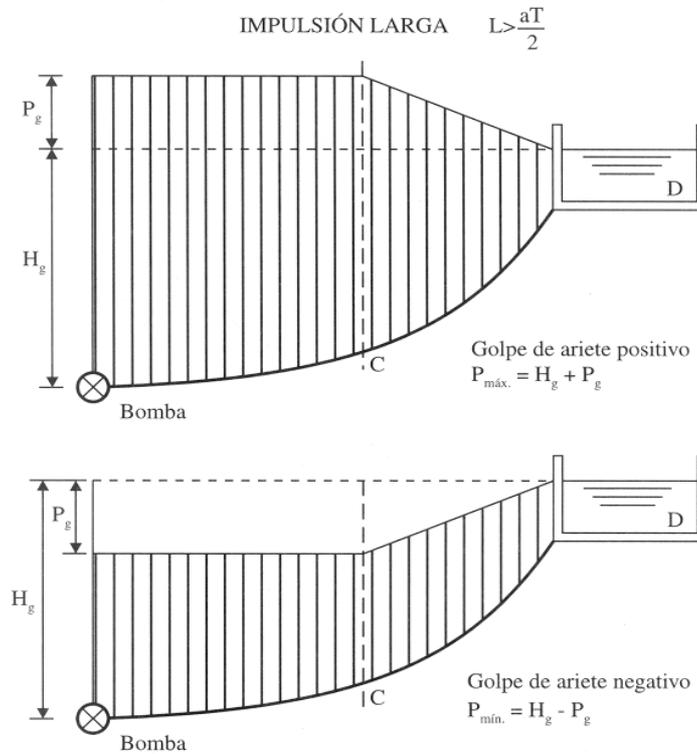


FIGURA 17.15



CAVITACIÓN DURANTE EL GOLPE DE ARIETE

GOLPE DE ARIETE NEGATIVO Y PRESIONES NEGATIVAS

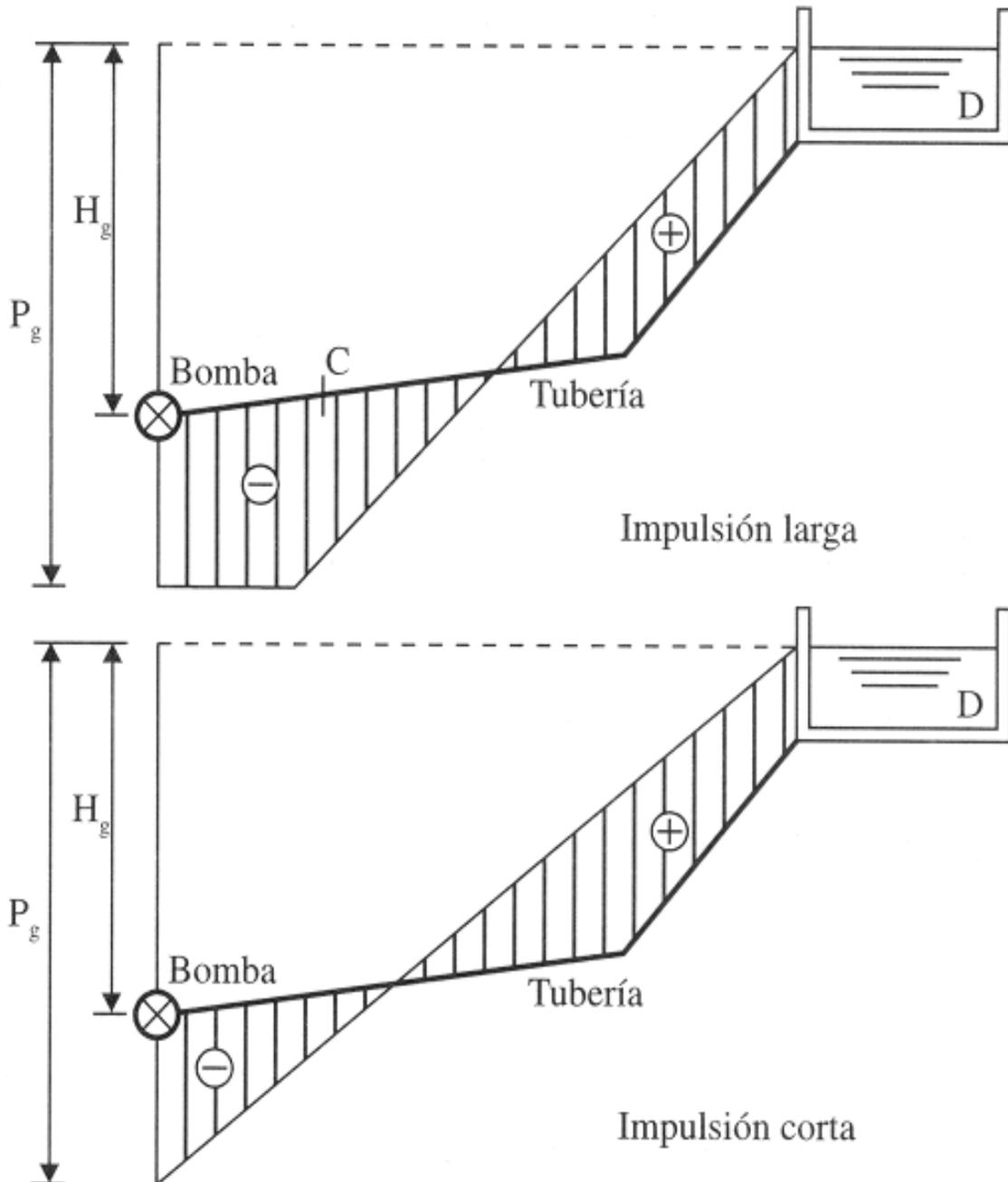
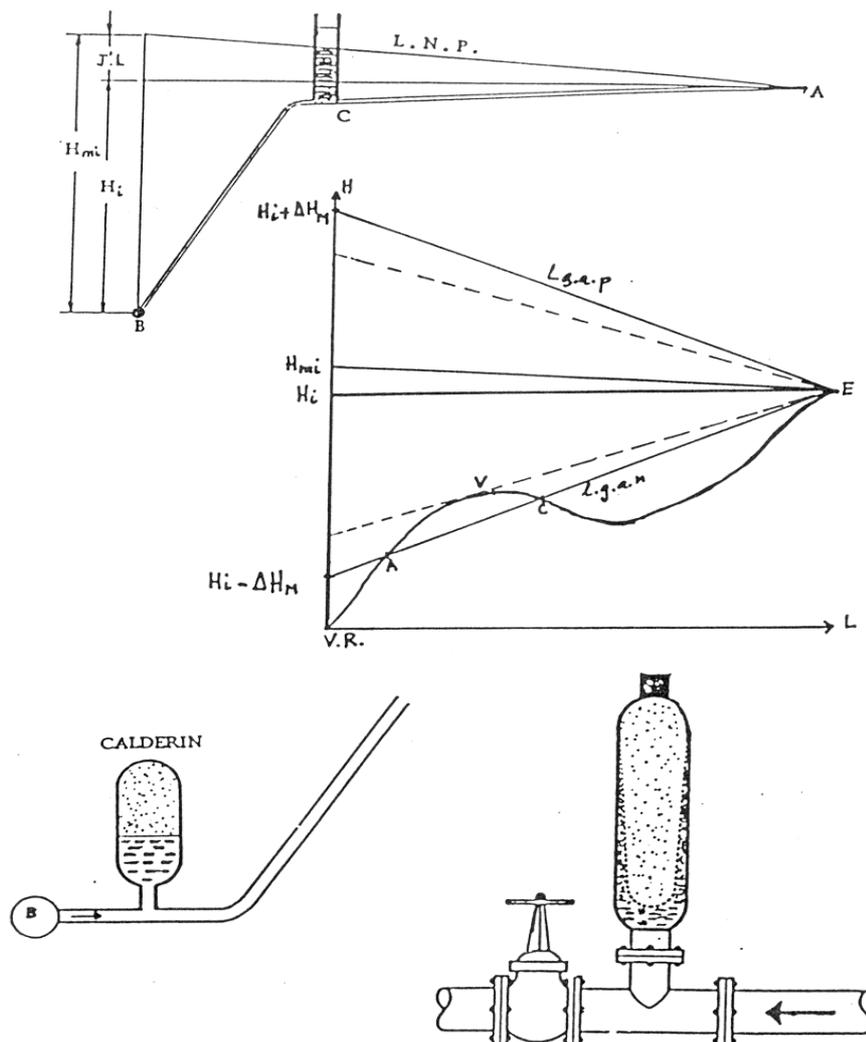


Figura 17.16



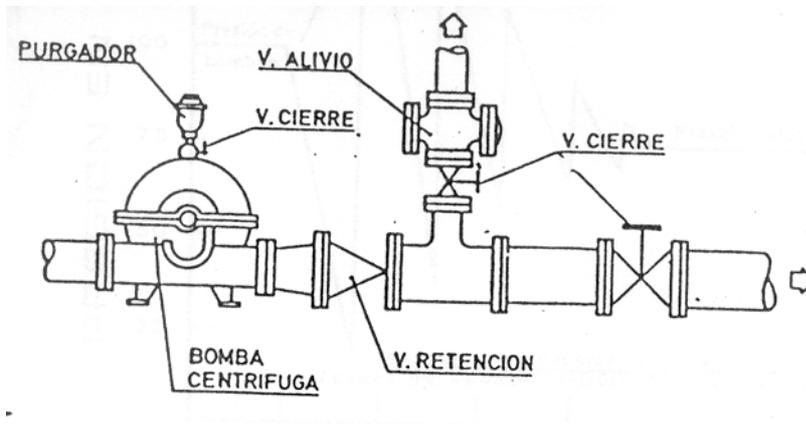
PROTECCIONES CONTRA EL GOLPE DE ARIETE

- VALVULAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN: MECANISMOS DE ACCIONAMIENTO QUE IMPIDAN VARIACIONES BRUSCAS DEL CAUDAL. VÁLVULAS DE COMPUERTA O MARIPOSA. (DISEÑO CON VELOCIDADES MODERADAS)
- INSTALACIONES DE BOMBEO EN IMPULSIONES:
 1. DISEÑO CON VELOCIDADES MODERADAS
 2. CHIMENEAS DE EQUILIBRIO Y CALDERINES DE AIRE

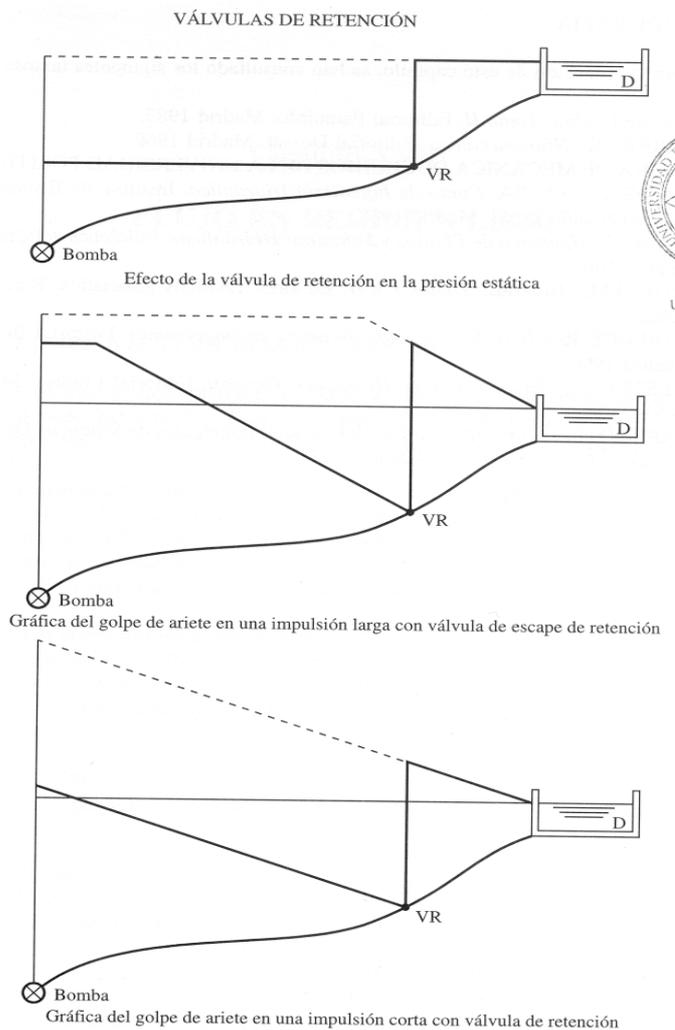




3. VÁLVULAS DE SEGURIDAD, DE ALIVIO RÁPIDO O DE SOBREPRESIONES



4. VALVULAS DE RETENCIÓN



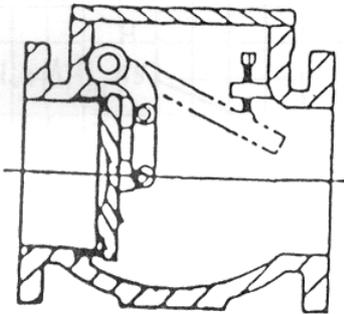
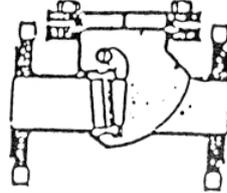
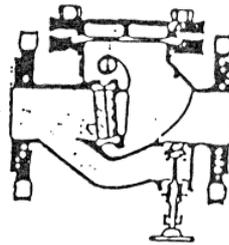
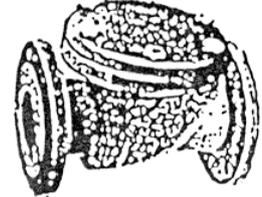


Figura 1. Válvula de clapeta simple.



SIN
BY-PASS



CON
BY-PASS

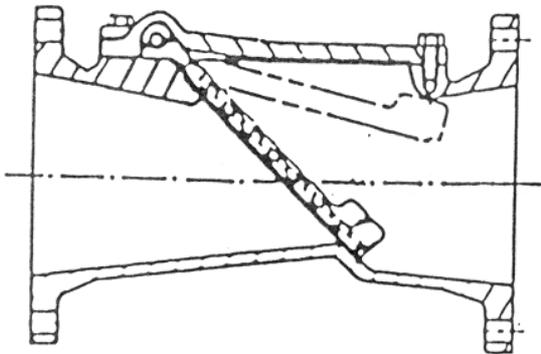
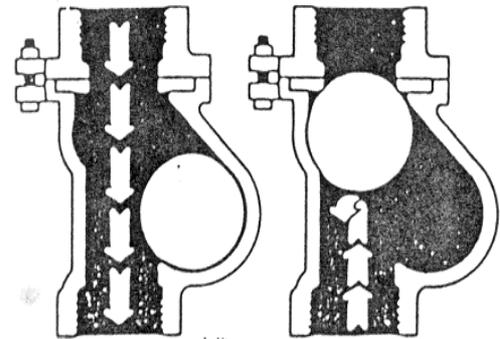
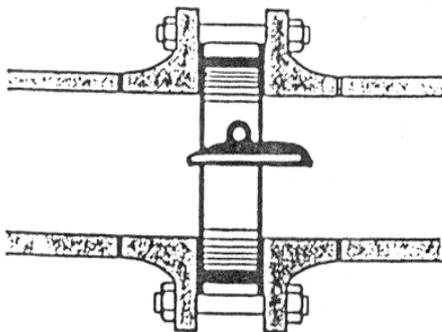


Figura 2. Válvula de retención con corto recorrido de la clapeta. (Asiento inclinado).

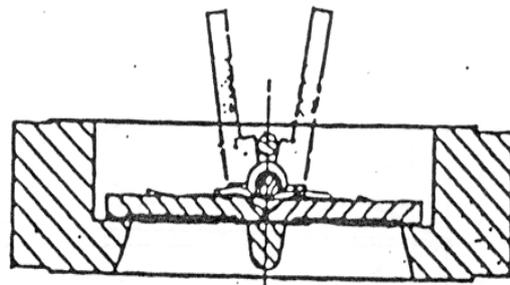


VALVULA DE RETENCIÓN DE BOLA

-14-



VALVULA DE RETENCIÓN DE CLAPETA
DESCENTRADA (BASCULANTE)



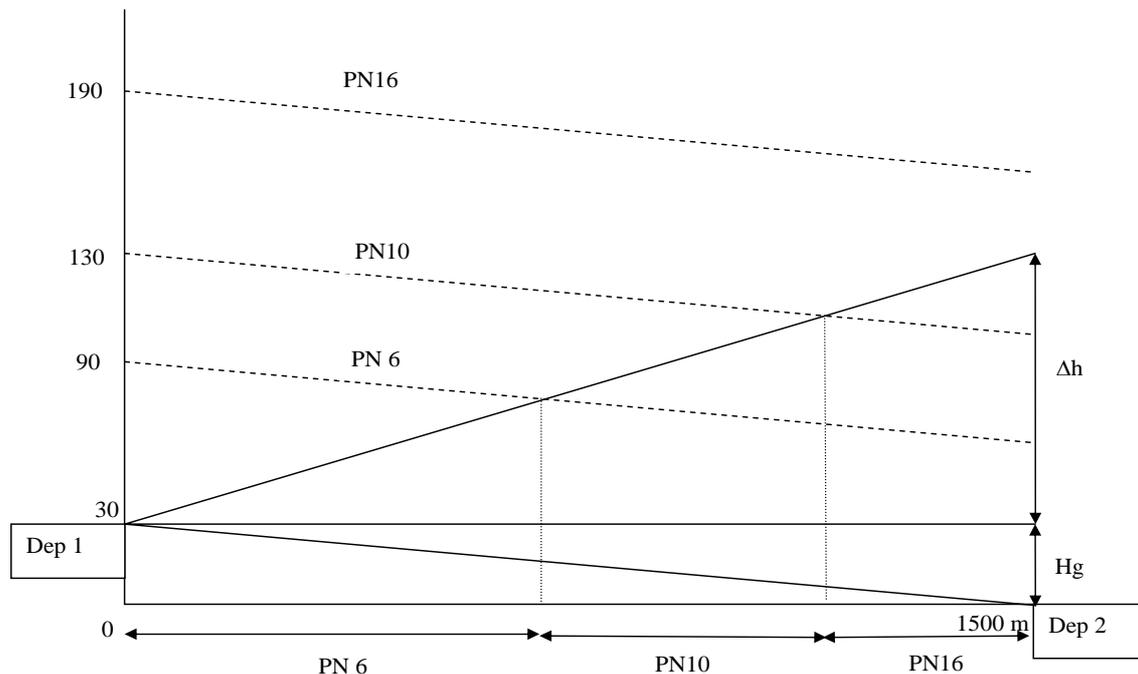
VALVULA DE RETENCIÓN DE DISCO PARTIDO
(CLAPETA PARTIDA)



DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN FRENTE A TRANSITORIOS HIDRÁULICOS.

- **VALVULAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN:**

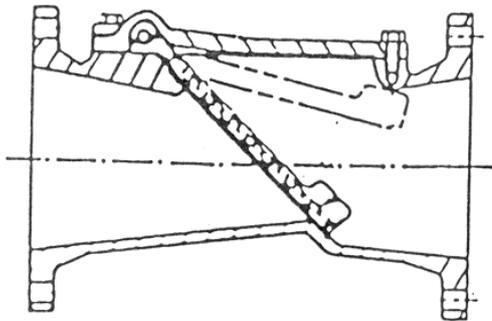
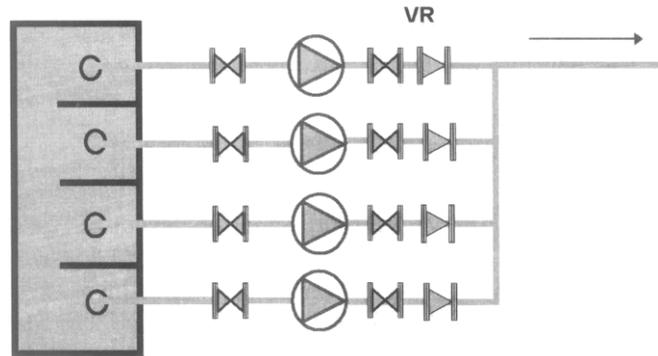
1. MECANISMOS DE ACCIONAMIENTO QUE IMPIDAN VARIACIONES BRUSCAS DEL CAUDAL. VÁLVULAS DE COMPUERTA O MARIPOSA.
2. DISEÑO CON VELOCIDADES MODERADAS.
3. TIMBRAJE ADECUADO DE TUBERÍAS (GOLPE DE ARIETE POSITIVO)



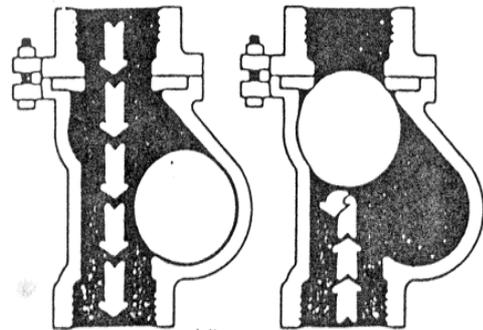
- **INSTALACIONES DE BOMBEO EN IMPULSIONES:**



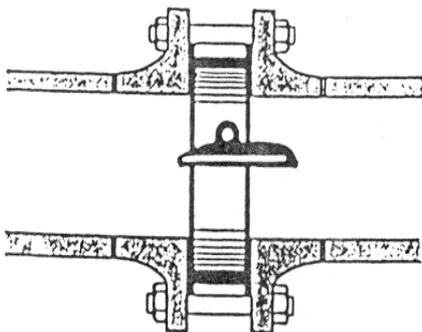
1. DISEÑO CON VELOCIDADES MODERADAS
 2. TIMBRAJE ADECUADO DE TUBERÍAS (GOLPE DE ARIETE POSITIVO)
 3. DISPOSITIVOS DE ACCIÓN DIRECTA:
 - Volante de inercia
 - Válvulas de retención
 - Válvulas de control de bombeo
 - Válvulas de cierre controlado
 4. **DISPOSITIVOS DE ACCIÓN INDIRECTA:**
 - Chimeneas de equilibrio
 - Tanques unidireccionales
 - By-pass
 - Válvulas de alivio rápido
 - Válvulas anticipadora de onda, o anti ariete
 - Válvulas reguladoras de presión
- VOLANTE DE INERCIA.
 - VÁLVULAS DE RETENCIÓN.



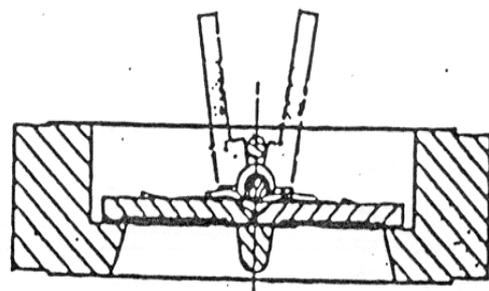
Válvula de retención de clapeta



Válvula de retención de bola



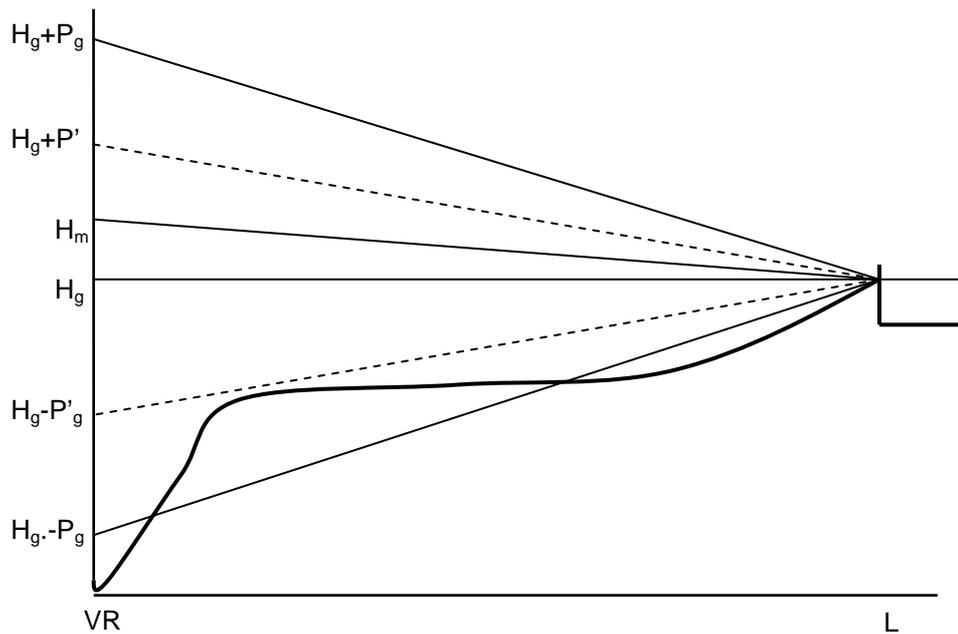
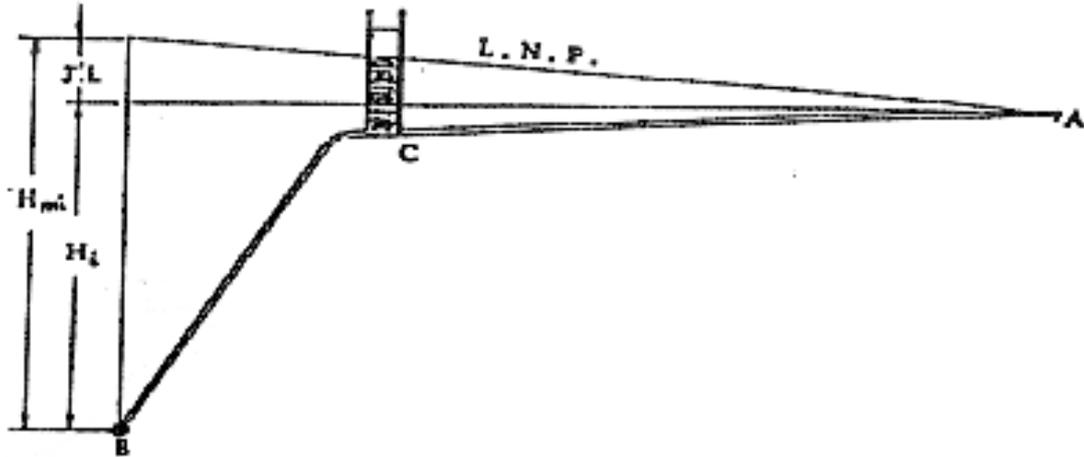
Válvula de retención de clapeta
basculante



Válvula de retención de disco
partido

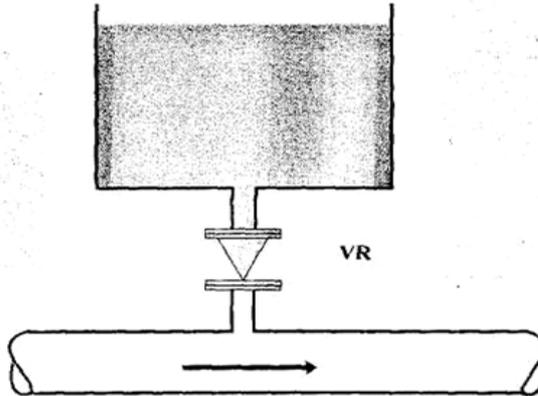


- VÁLVULAS DE CONTROL DE BOMBEO
- CHIMENEAS DE EQUILIBRIO





▪ TANQUES UNIDIRECCIONALES



▪ CALDERINES

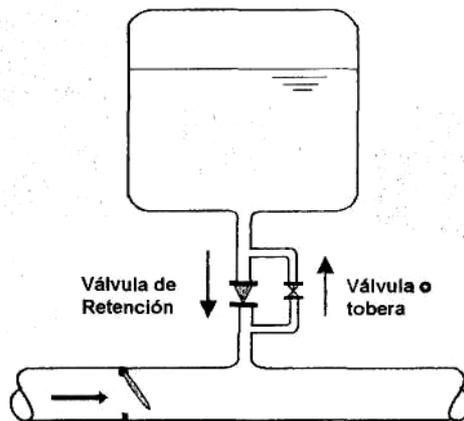
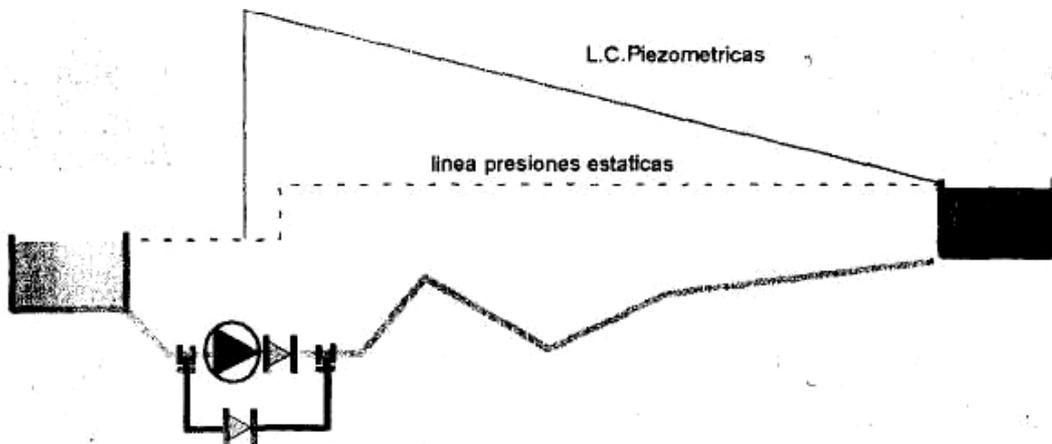
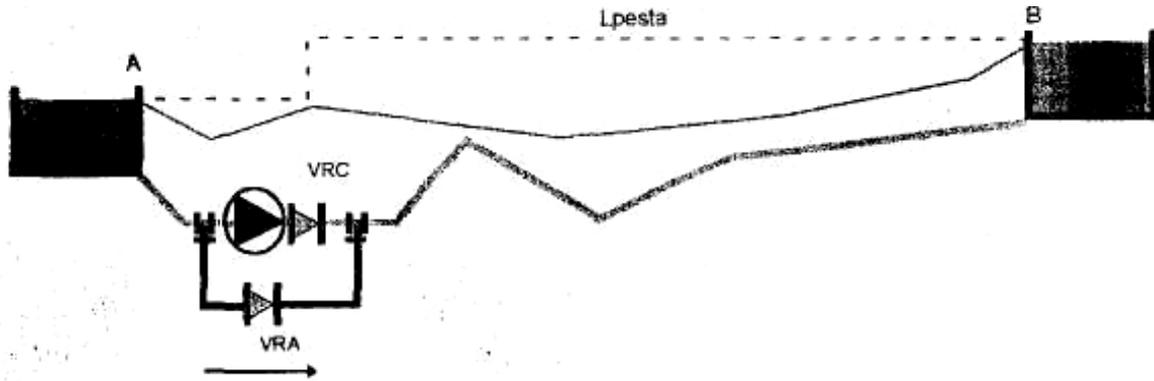


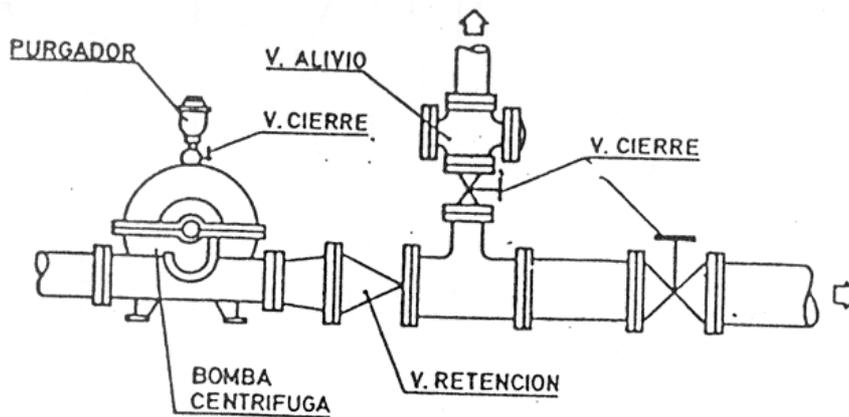
Figura N.17.

▪ BY-PASS EN LA BOMBA

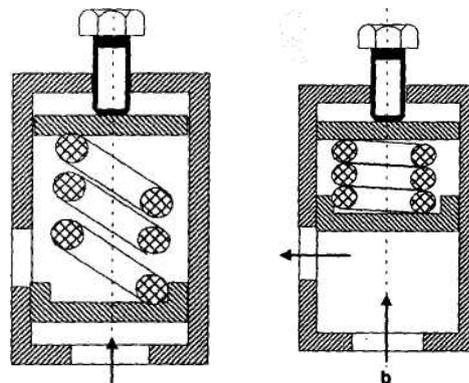




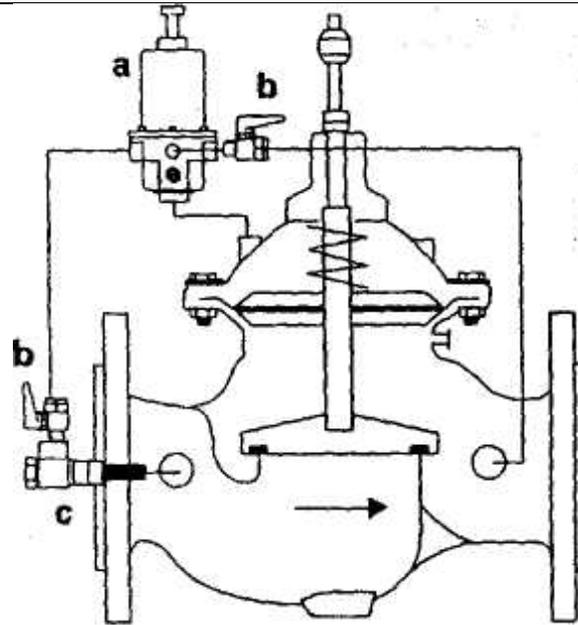
■ VÁLVULAS DE ALIVIO RÁPIDO



o De acción directa.



o Válvulas hidráulicas con piloto de alivio rápido.



- VÁLVULA ANTICIPADORA DE ONDA O ANTI-ARIETE