

INFLUENCIA DE DIVERSAS CONDICIONES DE CONTORNO SOBRE EL GOLPE DE ARIETE

EMILIO CAMACHO POYATO (*)

JOSE ROLDAN CAÑAS (*)

MIGUEL ALCAIDE GARCIA (*)

RESUMEN. En este trabajo se estudia el efecto que diversas condiciones de contorno tienen sobre la variación de presiones y velocidades debidas al golpe de ariete en conductos forzados. El proceso de cálculo seguido consiste en la integración de las correspondientes ecuaciones diferenciales mediante el método de las características y, facilitado por el uso del ordenador, permite el diseño de los dispositivos de control y prevención del golpe de ariete de acuerdo con las presiones que se deseen en la tubería. También es útil para conocer la máxima presión permitida por el dispositivo elegido y, de ahí, calcular el timbrado adecuado en cada caso.

ABSTRACT. In this work, the effect of several boundary conditions on pressure and velocity variations along pipelines due to waterhammer is studied. Partial differential equations are integrated by the characteristics method. Computation process permits the design of devices for controlling transients according to required pressure in pipelines. Also, the maximum pressure permitted can be known and, there, the required thickness of pipelines.

1. INTRODUCCION

Como es bien sabido, el golpe de ariete es un fenómeno que ocurre en sistemas cerrados cuando se modifica el régimen de circulación, estableciéndose en los mismos un régimen variable. Cuando los cambios de velocidad son relativamente rápidos, de modo que la energía cinética se transforme, entre otras, en energía elástica, tanto del fluido como de la tubería, es cuando cabe hablar de golpe de ariete. Caso contrario, el supuesto de la incompresibilidad puede aceptarse y la teoría de la columna rígida sirve de base al estudio de la oscilación en masa que tiene lugar (Losada, 1988).

En una red de riego las causas principales que pueden originar un golpe de ariete son: el cierre de una llave de paso, la parada y arranque de bombas y la presencia de aire.

El efecto producido por el cierre de llaves de paso se puede aminorar siguiendo una ley de cierre en la que nosotros podemos seleccionar un tiempo de cierre mínimo adecuado para no producir sobrepresiones que causen daño a la red.

En la parada y arranque de bombas podemos aten-

nuar el golpe de ariete mediante protecciones adecuadas (calderines, válvulas de retención, válvulas de seguridad, etc.).

Por último, la presencia de aire puede evitarse mediante un adecuado sistema de ventosas.

La forma en que tales singularidades (bombas, llaves de paso, válvulas, etc.) afectan el modelo de variación de presiones y velocidades debido al golpe de ariete es objeto del presente trabajo.

2. ECUACIONES FUNDAMENTALES

Las ecuaciones fundamentales del golpe de ariete en forma diferencial (Wylie y Streeter, 1978) para una tubería de característica única ($A=cte$), donde se desprecian las variaciones espaciales frente a las temporales, son:

1. Ecuación de equilibrio dinámico (*):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{fU|U|}{2D} = 0 \quad [1]$$

2. Ecuación de continuidad:

$$\frac{a^2}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad [2]$$

(*) Ver glosario de símbolos empleados.

(*) Hidráulica y Riegos. Dpto. de Agronomía. E.T.S.I. Agrónomos. Universidad de Córdoba.

Estas ecuaciones constituyen un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de tipo hiperbólico con dos variables independientes (x y t) y dos dependientes (U y h). La solución del mismo puede acometerse de diversas formas (Carnacho, 1990), aunque quizás el único método que permite su resolución sin necesidad de simplificaciones sea el de las características.

3. METODO DE LAS CARACTERISTICAS

No es éste un método exclusivo del golpe de ariete, sino que es un método numérico mediante el cual un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de tipo hiperbólico puede transformarse en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias. En nuestro caso, [1] y [2] pasan a ser:

$$C^+ \begin{cases} \frac{g}{a} \frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta U}{\delta t} + \frac{fU|U|}{2D} = 0 & [3] \\ \frac{\delta x}{\delta t} = +a & [4] \end{cases}$$

$$C^- \begin{cases} -\frac{g}{a} \frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta U}{\delta t} + \frac{fU|U|}{2D} = 0 & [5] \\ \frac{\delta x}{\delta t} = -a & [6] \end{cases}$$

en donde las ecuaciones [4] y [6] representan en el plano x - t rectas de pendiente $\pm a$, llamadas curvas características (figura 1), mientras las ecuaciones [3] y [5] son válidas si se cumplen las restricciones [4] y [6] respectivamente.

Las ecuaciones diferenciales ordinarias se integran dando lugar a ecuaciones en diferencias finitas (Chaudry, 1979), que se operan numéricamente en el ordenador. En efecto, dividiendo la tubería en N tramos iguales de longitud Δx , tomando como incremento de tiempo ($\Delta t = L/Na$) e integrando las ecuaciones [3] y

[5] sobre las curvas características y entre los límites definidos por A , P y B , P respectivamente (ver figura 1), resulta:

$$h_{p(i)} - h_{A(i+1)} + \frac{a}{gA} (Q_{p(i)} - Q_{A(i+1)}) + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_{A(i+1)} | Q_{A(i+1)} | = 0 \quad [7]$$

$$h_{p(i)} - h_{B(i+1)} + \frac{a}{gA} (Q_{p(i)} - Q_{B(i+1)}) - \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_{B(i+1)} | Q_{B(i+1)} | = 0 \quad [8]$$

si llamamos:

$$M = \frac{a}{gA} \quad [9]$$

$$T = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad [10]$$

$$K_{A(i+1)} = h_{A(i+1)} + MQ_{A(i+1)} - TQ_{A(i+1)} | Q_{A(i+1)} | \quad [11]$$

$$K_{B(i+1)} = h_{B(i+1)} - MQ_{B(i+1)} + TQ_{B(i+1)} | Q_{B(i+1)} | \quad [12]$$

las expresiones [7] y [8] resultan finalmente:

$$h_{p(i)} = K_{A(i+1)} - MQ_{p(i)} \quad [13]$$

$$h_{p(i)} = K_{B(i+1)} + MQ_{p(i)} \quad [14]$$

Por tanto, a partir de los datos iniciales, normalmente un régimen permanente perfectamente definido, podemos calcular los valores de altura piezométrica y de caudal para instantes posteriores y en cualquier posición de la tubería excepto en sus extremos. Para el caso de estos últimos necesitamos otra ecuación que nos relacione $h_{p(i)}$ y $Q_{p(i)}$ puesto que por el extremo tan sólo pasa una curva característica (ver figura 1). En dicha

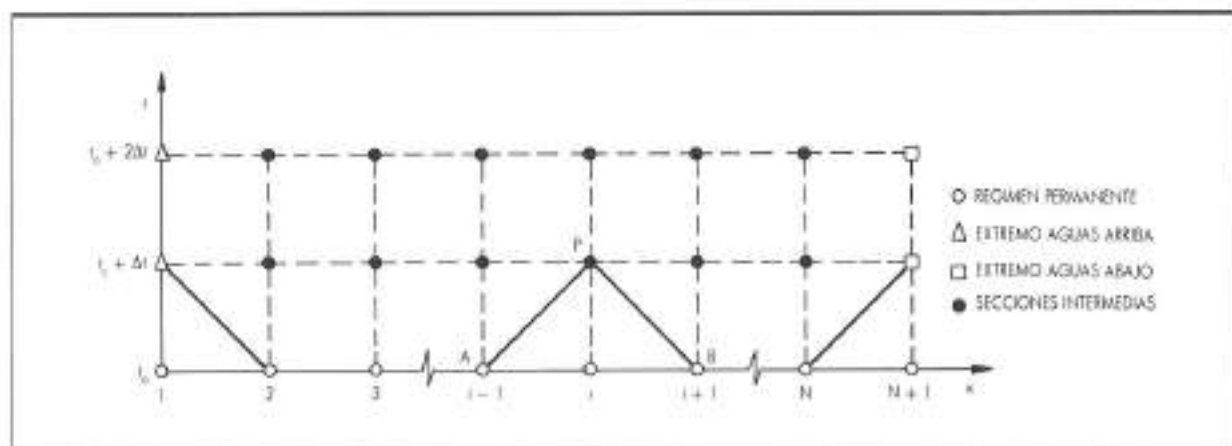


FIGURA 1. Curvas características.

figura se aprecia que la única ecuación disponible para el extremo aguas arriba es la [14] y para el extremo aguas abajo la [13]. La ecuación necesitada dependerá de las condiciones de contorno de cada extremo.

4. CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno que vamos a estudiar son las correspondientes a una bomba que sufre una parada, a un calderín o depósito hidroneumático, a una válvula de retención y a un depósito de nivel constante.

4.1. PARADA DE UNA BOMBA

Para este caso las ecuaciones a tener en cuenta son (Cátedra de Mecánica de Fluidos U.P. Valencia, 1986):

1. Ecuación de inercia de la bomba. Puesto que el motor sigue girando después de la parada, voluntaria o no, de la bomba se tiene que cumplir la ecuación fundamental de la dinámica de rotación:

$$M = -I \frac{\delta \omega}{\delta t} \quad [15]$$

Integrando esta ecuación entre dos instantes consecutivos separados Δt , se llega a:

$$\beta + \beta_p = K(a - a_p) \quad [16]$$

siendo:

$$k = \frac{2I\omega_0}{M_0 \Delta t} \quad [17]$$

$$\beta_p = \frac{M_p}{M_0} \quad [18]$$

$$a_p = \frac{\omega_p}{\omega_0} \quad [19]$$

2. Curva característica $h = f(Q)$. Para su tratamiento informático, podemos ajustar la curva característica a un polinomio de segundo grado. Para una velocidad de rotación de $n = n_0$, tenemos:

$$h_{p(n_0)} = C - DQ^2 \quad [20]$$

Para $n < n_0$, que es lo que interesa, obtenemos la curva característica mediante fórmulas de semejanza:

$$h_{p(n)} = Ca^2 - DQ^2 \quad [21]$$

La altura piezométrica a la salida de la bomba y la altura manométrica suministrada por ella se relacionan mediante la expresión:

$$h_{p(1)} = h_{p(0)} + \Delta \quad [22]$$

Teniendo en cuenta [21] resulta:

$$h_{p(1)} = Ca^2 - DQ^2 + \Delta \quad [23]$$

3. Curva característica $\eta = f(Q)$. Al igual que antes podemos ajustar la curva rendimiento-caudal a un polinomio de segundo grado:

$$\eta(n_0) = EQ_0^2 + FQ_0 \quad [24]$$

y para $n \neq n_0$:

$$\eta(n) = \frac{E}{a^2} Q^2 + \frac{F}{a} Q \quad [25]$$

El par motor para régimen permanente es:

$$M_0 = \frac{\gamma Q_0 h(Q_0)}{\eta(Q_0) \omega} \quad [26]$$

y para $n < n_0$:

$$M = \frac{\gamma Q h(Q, a)}{\eta(Q, a) \omega} \quad [27]$$

teniendo en cuenta [25], [26] y [27] se llega a la expresión:

$$h_{p(1)} = \beta p (C_1 \frac{Q_{p(1)}}{a_p} + C_2) \quad [28]$$

siendo:

$$C_1 = \frac{E(C - DQ_0^2)}{EQ_0 + F}$$

$$C_2 = \frac{F(C - DQ_0^2)}{EQ_0 + F}$$

Así pues, para esta condición de contorno las incógnitas son a_p , βp , $h_{p(1)}$, $Q_{p(1)}$ y las ecuaciones que las relacionan, [16], [23], [28] y la ecuación de transición particularizada para el extremo aguas arriba (expresión [14] con $i = 1$):

$$h_{p(1)} = K_{p(2)} + M Q_{p(1)} \quad [14']$$

Para la resolución de este sistema se ha utilizado el método de Newton-Raphson (Carnahan, 1979).

4.2. DEPOSITO HIDRONEUMATICO

En la figura 2 puede verse la ubicación del depósito hidroneumático.

Las ecuaciones que reflejan esta condición de contorno son:

1. Ecuación de continuidad. La ecuación de continuidad en el punto inicial de la tubería puede escribirse en la forma:

$$V_p = V + \Delta t \frac{Q_{(1)} + Q_{p(1)}}{2} \quad [30]$$

siendo V el volumen que hay en el calderín en un instante t y V_p el volumen en el instante $(t + \Delta t)$.

2. Ecuación termodinámica. Una ecuación de este tipo relaciona la presión y el volumen de la siguiente forma:

$$P_p V_p^k = P_c V_c^k \quad [31]$$

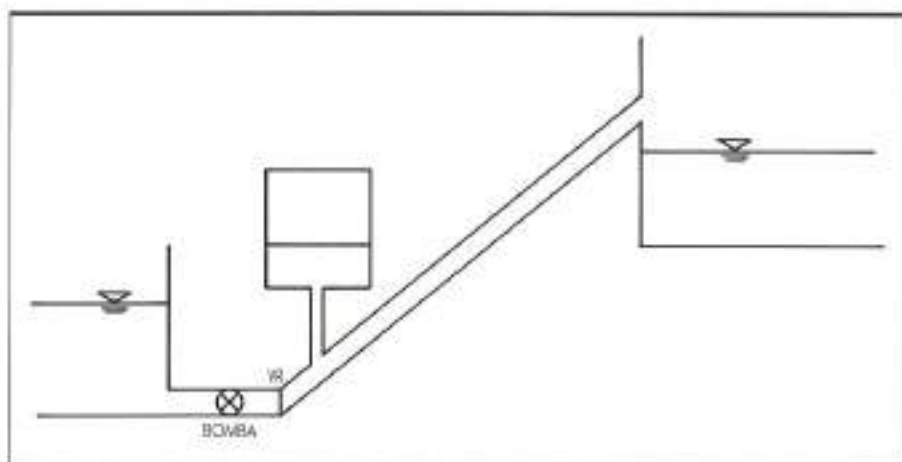


FIGURA 2. Ubicación del depósito hidroneumático en una impulsión.

siendo k el exponente politrópico intermedio entre una isoterma y una adiabática.

Mediante la aplicación de la ecuación de la energía se puede establecer una relación entre la presión y la altura piezométrica de la tubería:

$$P_p = \rho g (h_{p(1)} + 10,33 - z + C_p Q_{p(1)}^2) \quad [32]$$

siendo:

- z , altura de agua en el calderín
- C_p coeficiente de pérdidas en la tobera de unión entre el calderín y la tubería (Dupont, 1977).

La altura de agua en el calderín se puede expresar como:

$$z = H_c - \frac{V_p}{A_c} \quad [33]$$

siendo:

- H_c altura del calderín
- A_c área del calderín

sustituyendo la ecuación [33] en la [32] y a su vez ésta en la [31], se obtiene V_p :

$$V_p = \left(\frac{P_o V_o^k}{\rho g (h_{p(1)} + 10,33 - H_c + V_p/A_c + C_p Q_{p(1)}^2)} \right)^{1/k} \quad [34]$$

Las incógnitas para esta condición de contorno son V_p , $Q_{p(1)}$ y $h_{p(1)}$ y las ecuaciones que las relacionan: [30], [34] y la de transición particularizada para el extremo aguas arriba:

$$h_{p(1)} = K_{B(2)} + M Q_{p(1)} \quad [14']$$

Otra condición de contorno que se puede presentar es la de depósitos hidroneumáticos intermedios (Tullis, 1989) (figura 3). En este caso las incógnitas son: V_p , $Q_{pA(i)}$, $Q_{pD(i)}$, $Q_{p(i)}$ y $h_{p(i)}$. Las ecuaciones que las relacionan son además de la [30], [34] y la [14'], todas ellas particularizadas para el punto intermedio i , las siguientes:

$$h_{p(i)} = K_{A(i-1)} - M Q_{pA(i)} \quad [35]$$

$$Q_{p(i)} = Q_{pA(i)} + Q_{pD(i)} \quad [36]$$

De esta forma tenemos un sistema de cinco ecuaciones y cinco incógnitas.

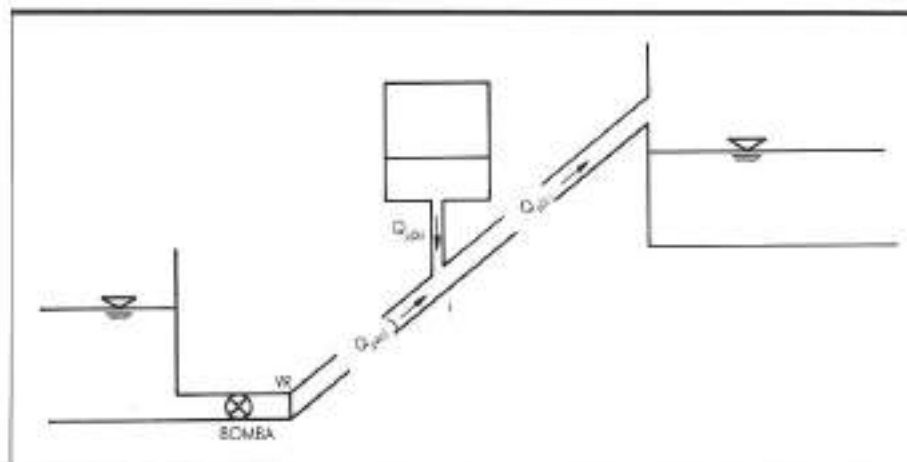


FIGURA 3. Depósito hidroneumático intermedio.

Puesto que en cada punto de la tubería la presión y el caudal se calculan a partir de la intersección de las características C^+ y C^- , el depósito hidroneumático debe situarse sobre los puntos de cálculo. Esto no es ninguna limitación, pues siempre podemos dividir la tubería en tantos intervalos como queramos.

4.3. VALVULA DE RETENCION INTERMEDIA

Al igual que los depósitos hidroneumáticos, las válvulas de retención deben situarse sobre puntos de cálculo. Las condiciones de contorno para válvulas de retención intermedias cuando el flujo es negativo, es decir, cuando la válvula ya está cerrada, necesitan un trato independiente aguas arriba y aguas abajo de la misma. Las ecuaciones C^+ y C^- se desacoplan, el caudal en el punto en el que se encuentra la válvula de retención se hace cero y las alturas piezométricas aguas arriba y aguas abajo son:

$$h_{p(i)}^{or} = h_{(i-1)} + MQ_{(i-1)} - TQ_{(i-1)} \mid Q_{(i-1)} \mid [37]$$

$$h_{p(i)}^{ab} = h_{(i-1)} - MQ_{(i+1)} + TQ_{(i+1)} \mid Q_{(i+1)} \mid [38]$$

En el caso que el flujo sea positivo, los puntos en los que se encuentran las válvulas de retención se estudiarán como el resto de los puntos, pues se desprecian las pérdidas existentes en ellas. Estas pérdidas, si bien tienen importancia a efectos de gasto de energía, no son importantes en el estudio que estamos haciendo, pues las presiones máximas serán aún mayores, por lo que de esta forma quedamos del lado de la seguridad. No obstante, y como cualquier singularidad, las pérdidas se pueden considerar como longitud equivalente.

4.4. DEPOSITO

La altura piezométrica en el punto que se encuentra el depósito podemos suponer que es igual a la cota geométrica del depósito en el caso que la tubería desagüe libremente a la atmósfera (figura 4), quedando como ecuación:

$$h_{p(n+1)} = h_D [38]$$

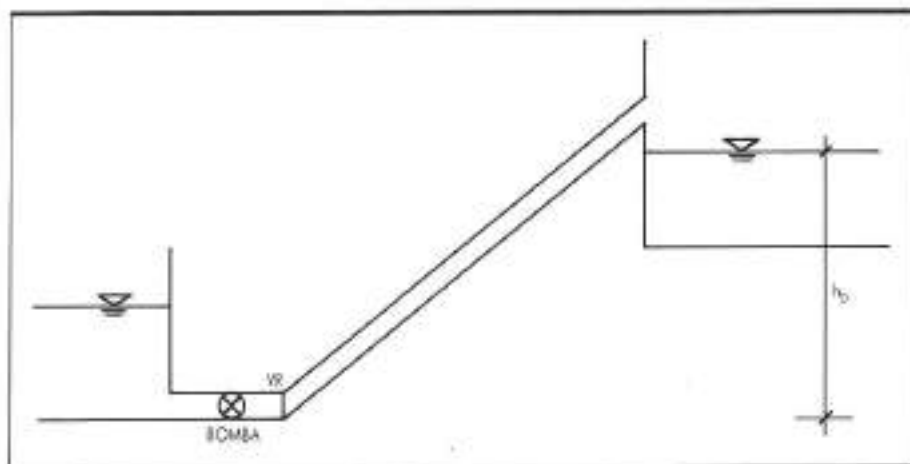


FIGURA 4. Situación del depósito.

5. EJEMPLOS DESARROLLADOS

Todos los ejemplos que se exponen a continuación corresponden al mismo grupo de bombeo en análogas condiciones de impulsión. Lo único que se cambia de uno a otro es el elemento de protección. De este modo podemos compararlos fácilmente. En resumen, se trata de la situación representada en la figura 4. Las curvas características de la bomba son (unidades en el S.I.):

$$H = 130,55 - 3,867,47 \cdot Q^2$$

$$\eta = 24,33 \cdot Q - 193,53 \cdot Q^2$$

su inercia es de $I = 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ y su velocidad inicial de rotación de 2.900 rpm.

Los parámetros que caracterizan la tubería de impulsión son:

Longitud = 1.600 m.

Diámetro = 0,5 m.

Factor de rozamiento = 0,018.

El caudal circulante es de $0,052 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y la altura de impulsión de 120 m, considerándose nula la de aspiración.

5.1. GOLPE DE ARIETE PROVOCADO POR PARADA DE UNA BOMBA PROTEGIDA CON VALVULA DE RETENCION

Como se aprecia en la figura 5, la presión a la salida de la bomba sufre grandes oscilaciones, pasando de sobrepresiones cercanas a 150 m hasta depresiones próximas a los 90 m. En el problema 1 se expone un listado de los datos de entrada al problema y de los resultados para los instantes más representativos.

5.2. GOLPE DE ARIETE PROVOCADO POR PARADA DE UNA BOMBA PROTEGIDA CON VALVULA DE RETENCION A LA SALIDA DE ESTA Y VALVULA DE RETENCION INTERMEDIA

Como se muestra en la figura 6, la evolución de la presión a la salida de la bomba sufre inicialmente una depresión, similar a la del caso anterior, y posteriormente

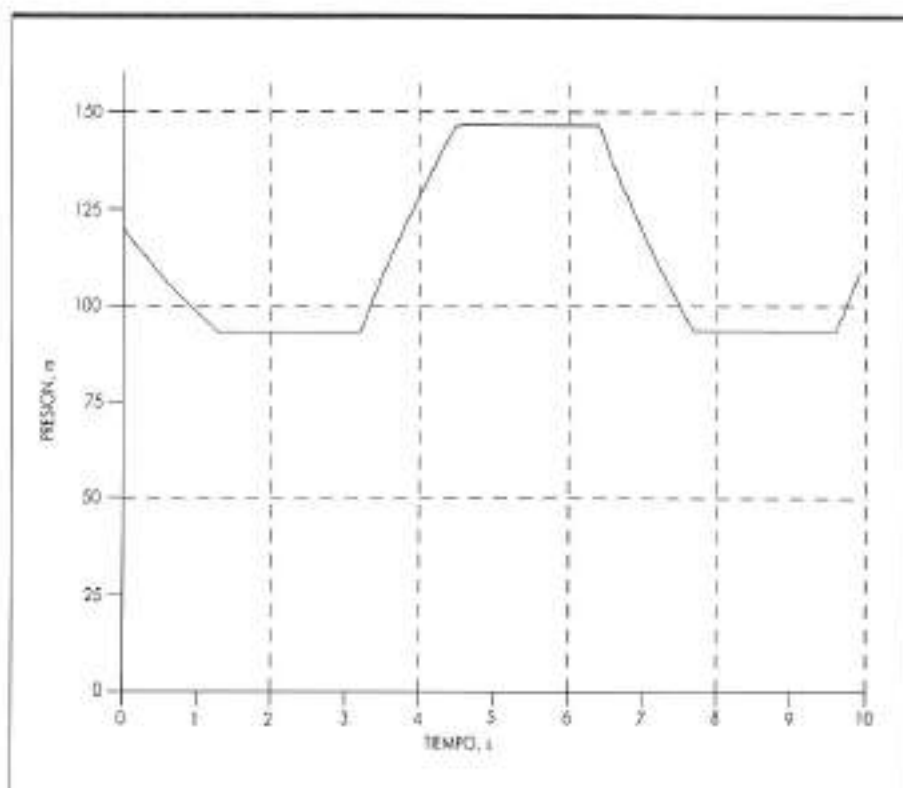


FIGURA 5. Evolución de la presión a la salida de la bomba protegida con válvula de retención.

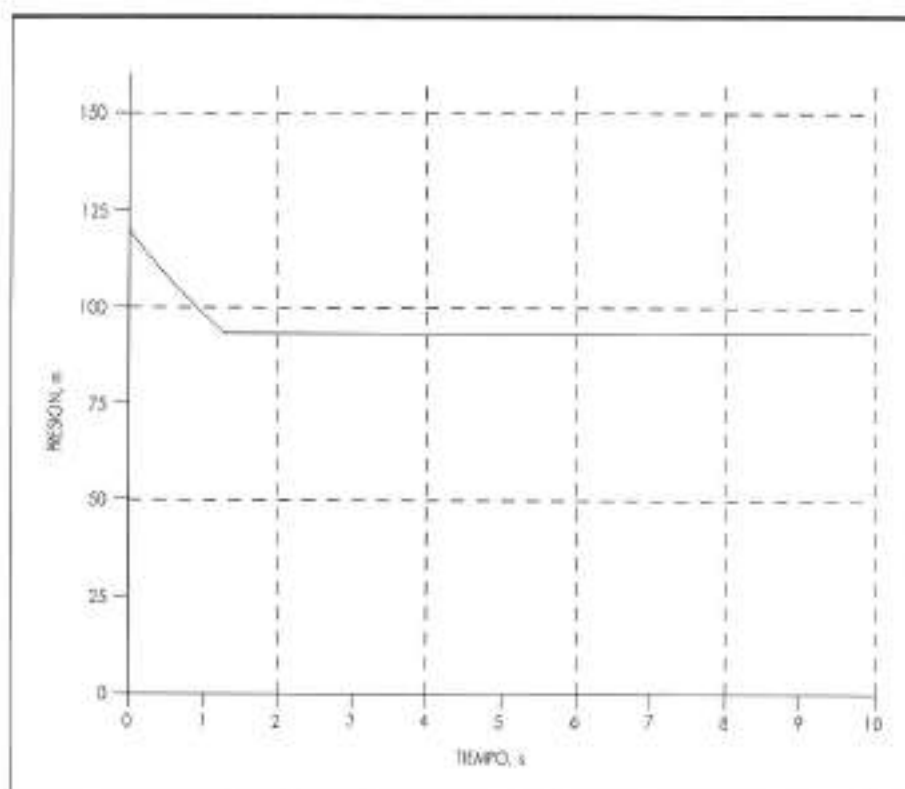


FIGURA 6. Evolución de la presión a la salida de la bomba protegida con dos válvulas de retención, una situada a su salida y otra en posición intermedia.

DATOS DEL PROBLEMA

longitud = 1.600 m	Celeridad = 1.000 m/s
Diámetro = 0,50 m	Factor de rozamiento = 0,018
Inercia = 5 kg x m ²	Velocidad inicial de rotación = 2.900 rpm
Altura de impulsión = 120 m	Altura de aspiración respecto bomba = 0 m
Número de intervalos = 10	Tiempo máximo = 10,00 s
Curva característica bomba $H = 130,55 - 3,86745 \cdot Q^2$	
Curva rendimiento bomba $\eta = 24,33 \cdot Q - 193,53 \cdot Q$	

RESULTADOS

Caudal = 0,052 m ³ /s				$\eta = 0,741$						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
T = 0,000				$\alpha = 1,000$						
P = 120,20	108,18	96,16	84,14	72,12	60,10	48,08	36,06	24,04	12,02	0,00
H = 120,20	120,18	120,16	120,14	120,12	120,10	120,08	120,06	120,04	120,02	120,00
Q = 0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T = 0,160				$\alpha = 0,973$	$\beta = 0,887$					
P = 116,15	108,18	96,16	84,14	72,12	60,10	48,08	36,06	24,04	12,02	0,00
H = 116,15	120,18	120,16	120,14	120,12	120,10	120,08	120,06	120,04	120,02	120,00
Q = 0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T = 0,320				$\alpha = 0,949$	$\beta = 0,795$					
P = 112,39	104,13	96,16	84,14	72,12	60,10	48,08	36,06	24,04	12,02	0,00
H = 112,39	116,13	120,16	120,14	120,12	120,10	120,08	120,06	120,04	120,02	120,00
Q = 0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T = 4,320										
P = 140,65	128,58	113,60	98,44	83,13	67,64	51,93	35,94	23,96	11,98	0,00
H = 140,65	140,58	137,60	134,44	131,13	127,64	123,93	119,94	119,96	119,96	120,00
Q = 0,00	-0,01	-0,02	-0,02	-0,03	-0,04	-0,04	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
T = 4,480										
P = 146,42	131,61	116,66	101,61	86,45	71,14	55,65	39,94	23,96	11,98	0,00
H = 146,42	143,61	140,66	137,61	134,45	131,14	127,65	123,94	119,96	119,98	120,00
Q = 0,00	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,03	-0,04	-0,04	-0,05	-0,05	-0,05
T = 9,600										
P = 93,51	85,46	77,16	68,62	59,92	51,06	42,09	33,03	23,90	11,98	0,00
H = 93,51	97,46	101,16	104,62	107,92	111,06	114,09	117,03	119,90	119,98	120,00
Q = 0,00	-0,01	-0,02	-0,02	-0,03	-0,04	-0,04	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
T = 9,760										
P = 101,41	89,15	80,61	71,91	63,05	54,08	45,01	35,88	23,96	11,98	0,00
H = 101,41	101,15	104,61	107,91	111,05	114,08	117,01	119,88	119,96	119,98	120,00
Q = 0,00	-0,01	-0,01	-0,03	-0,03	-0,04	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
T = 9,920										
P = 108,79	96,56	83,89	75,03	66,06	56,99	47,86	35,94	23,96	11,98	0,00
H = 108,79	108,56	107,89	111,03	114,06	116,99	119,86	119,94	119,96	119,98	120,00
Q = 0,00	-0,01	-0,03	-0,03	-0,04	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05

PROBLEMA 1.

mantiene casi constante la presión. Es éste sin duda un buen sistema para evitar las fuertes sobrepresiones que tienen lugar durante el golpe de ariete. Por contra, es un sistema ineficaz contra las depresiones iniciales. Los datos de entrada al problema, así como los resultados para diversos instantes, pueden verse en el problema 2.

5.3. GOLPE DE ARIETE PROVOCADO POR PARADA DE UNA BOMBA PROTEGIDA CON VALVULA DE RETENCION Y DEPOSITO HIDRONEUMATICO

En este caso la evolución de la presión a la salida de la bomba apenas sufre oscilaciones manteniendo un valor casi constante y cercano a la presión en régimen permanente (figura 7). Es, pues, este sistema muy eficaz tanto para las sobrepresiones como para las depresiones.

En el problema 3 se muestran los datos de entrada al problema, así como los resultados para diversos instantes.

En la figura 8 se puede observar la evolución de la presión a la salida de la bomba para los tres casos estudiados.

6. CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado permite conocer tanto las sobrepresiones máximas como las depresiones mínimas que se pueden producir en una conducción forzada al generarse un régimen variable con cambios rápidos de la velocidad.

La sobrepresión máxima puede orientar sobre el

DATOS DEL PROBLEMA

Longitud = 1.600 m	Celeridad = 1.000 m/s
Diámetro = 0,50 m	Factor de rozamiento = 0,018
Inercia = $5 \text{ kg} \times \text{m}^2$	Velocidad inicial de rotación = 2.900 rpm
Altura de impulsión = 120 m	Altura de aspiración respecto bomba = 0 m
Número de intervalos = 10	Tiempo máximo = 10,00 s
Puntos en los que se encuentran las válvulas de retención: 1 6	
Curva característica bomba $H = 130,55 - 3,86745 \cdot Q^2$	
Curva rendimiento bomba $\eta = 24,33 \cdot Q - 193,53 \cdot Q^2$	

RESULTADOS

Caudal = 0,052 m³/s $\eta = 0,739$										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
T = 0,000										
P = 120,20	108,18	96,16	84,14	72,12	60,10	48,08	36,06	24,04	12,02	0,00
H = 120,20	120,18	120,16	120,14	120,12	120,10	120,08	120,06	120,04	120,02	120,00
Q = 0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T = 0,160										
P = 116,16	108,18	96,16	84,14	72,12	60,10	48,08	36,06	24,04	12,02	0,00
H = 116,16	120,18	120,16	120,14	120,12	120,10	120,08	120,06	120,04	120,02	120,00
Q = 0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T = 0,320										
P = 112,41	104,14	96,16	84,14	72,12	60,10	48,08	36,06	24,04	12,02	0,00
H = 112,41	116,14	120,16	120,14	120,12	120,10	120,08	120,06	120,04	120,02	120,00
Q = 0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T = 4,320										
P = 93,44	81,44	69,44	57,44	45,49	33,11	20,33	7,95	-4,77	-17,70	-30,00
H = 93,44	93,44	93,44	93,44	93,49	131,11	131,33	131,95	128,77	125,70	120,00
Q = 0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,03	0,04	0,04
T = 4,480										
P = 93,43	81,43	69,43	57,48	45,48	33,12	20,30	7,84	29,72	14,75	0,00
H = 93,43	93,43	93,43	93,43	93,48	93,48	124,12	124,30	124,84	125,72	120,00
Q = 0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,05
T = 9,600										
P = 93,41	81,46	69,46	57,46	45,46	33,79	20,67	7,31	31,55	15,88	0,00
H = 93,41	93,46	93,46	93,46	93,46	128,79	128,67	128,31	127,55	123,88	120,00
Q = 0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,01	-0,02	-0,04	-0,04	-0,05
T = 9,760										
P = 93,50	81,45	69,45	57,45	45,45	33,84	20,75	7,30	35,02	19,56	0,00
H = 93,50	93,45	93,45	93,45	93,45	134,84	134,75	134,30	131,02	127,56	120,00
Q = 0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,01	-0,02	-0,03	-0,04	-0,04
T = 9,920										
P = 93,49	81,49	69,44	57,44	45,44	33,72	20,47	7,36	38,31	19,14	0,00
H = 93,49	93,49	93,44	93,44	93,44	140,72	140,47	137,46	134,31	127,14	120,00
Q = 0,00	0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02

PROBLEMA 2.

timbrado necesario en la tubería, mientras que la depresión mínima mostrará si se produce cavitación. No obstante, lo frecuente es reducir esos valores extremos mediante los adecuados dispositivos de protección, evitando timbrados excesivos o la indeseable presencia de vapor en la tubería.

La protección frente al golpe de ariete producido por parada de un grupo de bombeo se estudia situando en la tubería válvulas de retención y depósitos hidroneumáticos. Este último dispositivo es el que permite una menor desviación de los valores extremos de la presión. Procediendo a la inversa, se puede calcular el volumen óptimo de un depósito hidroneumático necesario para mantener

la presión entre unos límites previamente fijados. Asimismo, se puede estudiar la mejor ubicación de una válvula de retención o de un depósito hidroneumático intermedio con análogo objetivo.

7. GLOSARIO

a	Celeridad de la onda de presión, aceleración.
A	Área de la tubería.
A_c	Área del depósito hidroneumático.
b	Parámetro.
C	Constante, coeficiente.
C_p	Coefficiente de pérdidas en la tobera.
C_1, C_2	Constantes.

DATOS DEL PROBLEMA

longitud = 1.600 m	Calidad = 1.000 m/s
Diámetro = 0,50 m	Factor de rozamiento = 0,018
Area calderín = 3,00 m ²	Altura del calderín = 2,5 m
Altura de impulsión = 120 m	Volumen inicial de aire = 2,00 m ³
Número de intervalos = 10	Tiempo máximo = 10,00 s
Exponente politrópico = 1,20	Caudal inicial = 0,052 m ³ /s
Coeficientes de pérdida en la tobera:	
— Flujo entrante = -149,26 m ³ /m ³ /s ²	
— Flujo saliente = 28,79 m ³ /m ³ /s ²	

RESULTADOS

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
T = 0,000										
P = 120,20	108,18	96,16	84,14	72,12	60,10	48,08	36,06	24,04	12,02	0,00
H = 120,20	120,18	120,16	120,14	120,12	120,10	120,08	120,06	120,04	120,02	120,00
Q = 0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T = 0,160										
P = 119,50	108,19	96,16	84,14	72,12	60,10	48,08	36,06	24,04	12,02	0,00
H = 119,50	120,19	120,16	120,14	120,12	120,10	120,08	120,06	120,04	120,02	120,00
Q = 0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T = 0,320										
P = 118,89	107,48	96,16	84,14	72,12	60,10	48,08	36,06	24,04	12,02	0,00
H = 118,89	119,48	120,16	120,14	120,12	120,10	120,08	120,06	120,04	120,02	120,00
Q = 0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T = 0,480										
P = 108,80	97,97	87,17	76,39	65,65	54,94	44,27	33,71	23,48	11,24	0,00
H = 108,80	109,97	111,17	112,39	113,65	114,94	116,27	117,71	118,48	119,24	120,00
Q = 0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
T = 0,640										
P = 108,66	97,78	86,92	76,09	65,29	54,52	43,79	33,10	22,51	11,26	0,00
H = 108,66	109,78	110,92	112,09	113,29	114,52	115,79	117,10	118,51	119,26	120,00
Q = 0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
T = 0,800										
P = 114,94	103,72	92,32	80,89	69,42	57,91	46,33	34,82	23,19	11,60	0,00
H = 114,94	115,72	116,32	116,89	117,42	117,91	118,33	118,82	119,19	119,60	120,00
Q = -0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
T = 0,960										
P = 115,42	104,62	93,11	81,58	70,01	58,38	46,76	35,05	23,42	11,69	0,00
H = 115,42	116,62	117,11	117,58	118,01	118,38	118,76	119,05	119,42	119,69	120,00
Q = -0,04	-0,04	-0,04	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
T = 1,120										
P = 115,94	104,81	93,88	82,23	70,54	58,87	47,09	35,37	23,54	11,82	0,00
H = 115,94	116,81	117,88	118,23	118,54	118,87	119,09	119,37	119,54	119,82	120,00
Q = -0,04	-0,04	-0,04	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05

PROBLEMA 3.

d	Diámetro de la tobera.
D	Diámetro de la tubería, coeficiente.
f	Factor de rozamiento.
g	Aceleración de la gravedad.
h	Altura piezométrica en general.
h_0	Altura manométrica de la bomba.
h_D	Elevación de la superficie libre de depósito.
$h_{p(i)}$	Altura piezométrica en el punto i en el instante $(t_i + \Delta t)$.
$h_{(i)}$	Altura piezométrica en el punto i en el instante t_i .
H_c	Altura del calderín.
I	Momento de inercia.
K_A, K_B	Constantes.
L	Longitud.
M	Constante.

M_i	Par en el eje de la bomba en un instante cualquiera.
n_i	Velocidad de rotación de la bomba en rpm en t_i .
N	Número de intervalos en los que se divide la tubería.
P, P_p	Presiones absolutas inicialmente y un instante posterior respectivamente.
$Q_{p(i)}$	Caudal en el punto i y en el instante $(t_i + \Delta t)$.
$Q_{(i)}$	Caudal en el punto i y en el instante t_i .
t_i	Instante genérico cualquiera.
U	Velocidad.
x	Variable de posición.
z	Altura de agua en el calderín.
α_i, α_p	Relación entre las velocidades de rotación de la bomba en los instantes t_i y $(t_i + \Delta t)$ respectivamente y en el régimen permanente.
β_i, β_p	Relación entre los pares en el eje de la bomba en los

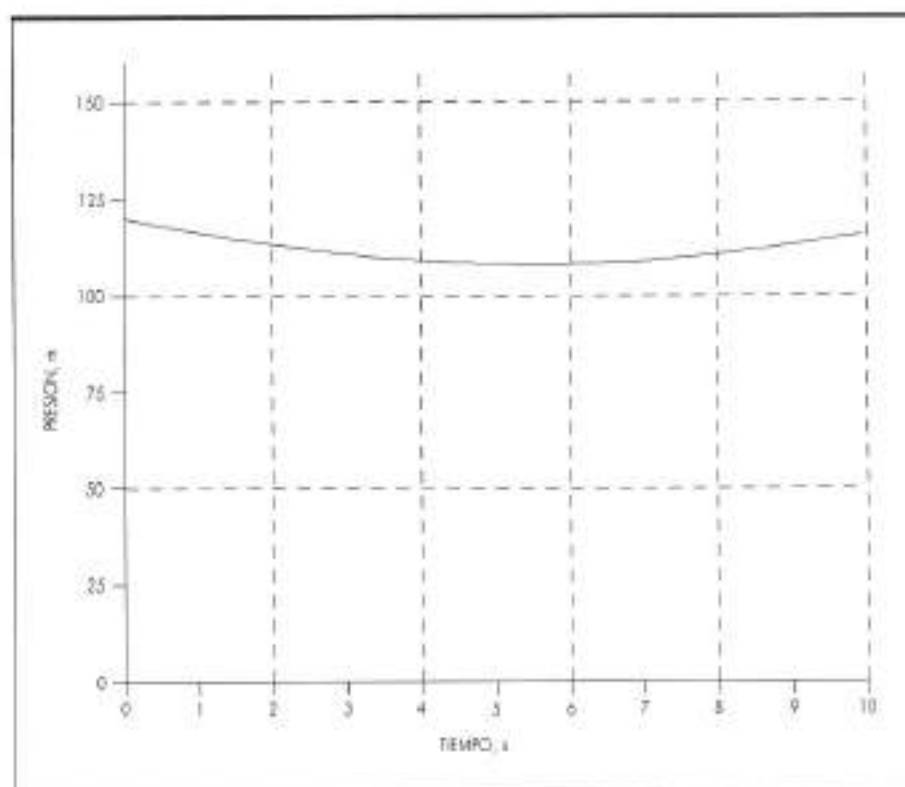


FIGURA 7. Evolución de la presión a la salida de la bomba protegida con válvula de retención y depósito hidroneumático.

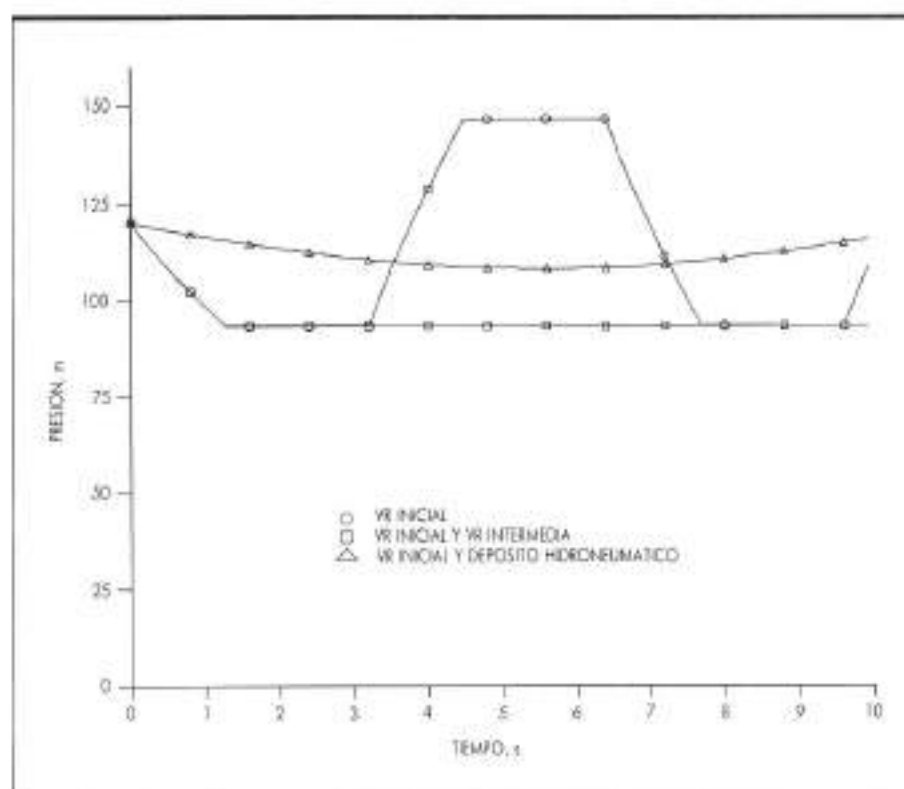


FIGURA 8. Comparación de la evolución de la presión para los tres casos estudiados.

- instantes t_1 y $(t_1 + \Delta t)$ respectivamente y en el régimen permanente.
- ω_1, ω_2 Velocidad de rotación de la bomba en rad/s en t_1 y en régimen permanente, respectivamente.
- V, V_p Volumen de aire en el calderín en el instante t_1 y en el instante $(t_1 + \Delta t)$, respectivamente.
- Δ Diferencia de cota entre la bomba y la superficie libre del líquido en la aspiración.

BIBLIOGRAFIA

- CAMACHO, E. (1990). *Estudio del Golpe de Ariete en Taberías Forzadas Mediante el Método de las Características*; Trabajo fin de carrera, E.T.S.I. Agrónomos, Universidad de Córdoba.
- CARNAHAN, B.; LUTHER, H. A., y WILKER, J. O. (1979). *Cálculo numérico: Métodos, aplicaciones*; Ed. Rueda, Madrid.

- CATEDRA DE MECANICA DE FLUIDOS U.P. VALENCIA (1987). *3.º Curso de Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua*; Instituto de Estudios de Administración Local; Madrid.
- CHAUDRY, M. H. (1979). *Applied Hydraulic Transients*; Ed. Van Nostrand Reinhold Company.
- DUPONT, A. (1977). *Hidraulique Urbaine. Tome II. Ouvrages de Transport-Elevation et Distribution des Eaux*; Ed. Eyrolles.
- LOSADA, A. (1988). *El Riego. Fundamentos Hidráulicos*; Ed. Mundi Prensas.
- MANON, J. *Considérations sur le Calcul des Réservoirs Anti-Bélier*; Revue S-W N.º 20.
- TULLIS, J. PAUL (1989). *Hydraulics of Pipelines: Pumps, Valves, Cavitation, Transients*; Ed. Wiley.
- WYLIE, E. B., y STREETER, V. L. (1978). *Fluid Transients*; Ed. McGraw-Hill.

MURO



MASTER



D



Apoyo de jácenas



Instalación con ventanas de aireación

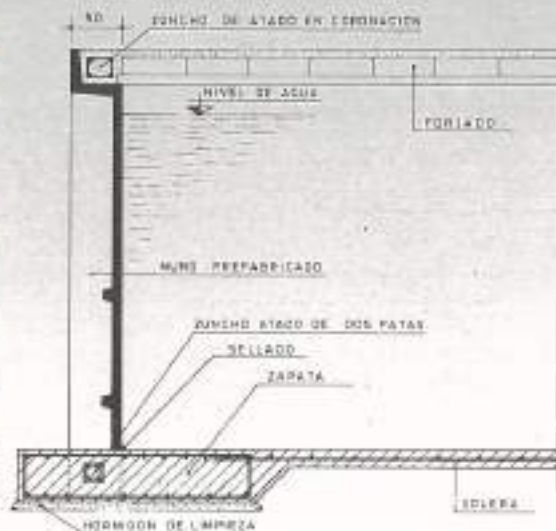


Depósitos

Depuradoras
Encauzamientos
Estribos-Aletas
Contención
de tierras
Sótanos

Señalado como sistema estructural de contención en general, posee sensibles ventajas en el proyecto y ejecución de DEPÓSITOS DE CONTENCIÓN DE LÍQUIDOS, dada su estudiada geometría. Cabe destacar:

- Adecuada distribución de empujes a través del conjunto resistente losa-nervadura secundaria (horizontal),
- nervadura principal (vertical).
- Eliminación de zonas de losa trabajando en voladizo.
- Diseño especial de la nervadura principal, que permite el hormigonado entre paneles contiguos, contribuyendo de manera eficaz a la estanqueidad del conjunto.
- Posibilidad de zunchado perimetral en coronación.
- Eliminación de encofrado perimetral en coronación de depósitos cubiertos.
- Perfecto acabado en pared nervada exterior del depósito, rompiendo la monótona uniformidad del paramento liso.
- Versatilidad en anchura, variable entre 2 y 2,5 m y altura de panel prefabricado, lo que permite adaptarse a cualquier diseño de depósito.
- Posibilidad de ventanas de aireación y alojamiento de jácenas.
- La simplicidad y rapidez de montaje, hacen del MUROMASTER el prefabricado idóneo para la ejecución de depósitos semiprefabricados.



Pieza de depuradora

MURO MASTER S.A.

PREFABRICADOS DE HORMIGÓN

Apartado 238 - 01080 VITORIA
Teléfonos: (945) 36 14 12 * - 37 13 00
Teletax: (945) 37 13 93
NANCLARES DE LA OCA (ALAVA)

DELEGACION CENTRO

Bruselas, 54 - 1º - 3
28028 MADRID
Teléfonos: (91) 256 90 60
y 355 29 24

DELEGACION CATALUÑA

Provenza, 281
08037 BARCELONA
Teléfono: (93) 215 85 37
Fax: 215 83 35

DELEGACION LEVANTE

Santana, s/n.
30120 EL PALMAR (MURCIA)
Teléfonos: (968) 84 00 62
y 84 00 66