

LOS AMORTIGUADORES A VEJIGA DE AIRE COMPRIMIDO COMO PROTECCION EN LAS ELEVACIONES (*)

Por ENRIQUE MENDILUCE

[Dr. Ingeniero Industrial.

En este trabajo el autor expone su experiencia sobre los amortiguadores a vejiga, de reciente introducción en España, como protección de las elevaciones y desarrolla su cálculo en el que introduce razonadas modificaciones, para obtener una fórmula monomía de cómoda utilización, sin sacrificio de su exactitud.

1. Introducción.

Se conocen y se utilizan distintos sistemas para reducir las sobrepresiones producidas por las modificaciones del régimen hidráulico en las tuberías y en especial en las elevaciones, por parada brusca del grupo motobomba.

Uno de los más eficaces es el acoplamiento a la tubería de elevación en su parte inicial, de un recipiente hermético lleno parcialmente de aire, que comprimido a la presión manométrica aporta su energía potencial a la continuidad del movimiento del agua, después del corte de la energía eléctrica, con lo que el aire expansionado en este primer tiempo sirve de freno en el retroceso del agua, al absorber en su compresión consecutiva, la mayor parte de la energía de la gravedad.

Es difícil evitar permanentemente las fugas de aire del recipiente y su disolución en el agua es constante, motivo por el que es necesaria su reposición periódica, a veces muy frecuente, lo que exige la incorporación de un compresor y una vigilancia continua. Por otra parte, es prudente que el volumen del aire a la presión de servicio no exceda de la mitad del recipiente, para evitar que en las caídas de presión, el aire pueda pasar a la tubería, lo cual aumenta el tamaño de este aparato, a la vez que lo encarece.

Pueden evitarse estos graves inconvenientes mediante el empleo de una vejiga elástica interior, que dotando al conjunto de gran her-

meticidad, hace innecesario el compresor y la vigilancia, siendo suficiente la verificación de la presión del aire o gas, cada seis meses o incluso cada año.

2. Descripción.

Es un aparato simple y compacto formado por un cuerpo cilíndrico de acero de alta resistencia de la capacidad adecuada, provisto en un extremo de una válvula de hinchado de la vejiga y en el otro de un orificio de comunicación con la tubería, a la que se une mediante pieza en T o roscada.

En su interior se aloja una vejiga de caucho especial, de tres lóbulos, destinada a contener el aire o gas a la presión requerida con absoluta estanqueidad, que responde inmediatamente a cualquier variación de la presión de la tubería, mediante expansiones o contracciones proporcionadas.

Las características de funcionamiento de estos aparatos en elevaciones son las siguientes:

- Reduce la sobrepresión por golpe de ariete al valor que se desee.
- Eleva la presión mínima producida por el golpe de ariete, eliminando las presiones inferiores a la atmosférica.
- Absorbe las alteraciones de presión producidas por las pulsaciones de las bombas, regularizando el caudal y la presión en las tuberías.
- Absorbe igualmente las variaciones provocadas por diferencias de temperatura.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 31 de marzo de 1975.

- Sólo precisa una comprobación semestral de la presión de la vejiga, siendo fácil y rápido su eventual llenado.
- Se acopla tanto vertical como horizontalmente.

En instalaciones hidráulicas puede emplearse aire para el llenado, pero en aquellas otras en que el oxígeno pueda resultar peligroso, se emplea el nitrógeno, para mayor seguridad.

Para conocer estos aparatos y comprobar su eficacia, fuimos invitados a visitar unas elevaciones protegidas mediante amortiguadores de vejiga, instaladas en el norte de Francia, teniendo ocasión de comprobar la sobrepresión en parada en una de ellas, de las siguientes características (fig. 1):

$$\begin{aligned}\varnothing &= 250 \text{ mm.} \\ Q &= 80 \text{ m}^3/\text{h} = 23 \text{ l/s.} \\ J &= 4 \text{ m.} \\ H_m &= 50 \text{ m.} \\ L &= 1.400 \text{ m.}\end{aligned}$$

Como particularidad, hemos de añadir que el nivel del agua en el pozo estaba a 15 m de profundidad.

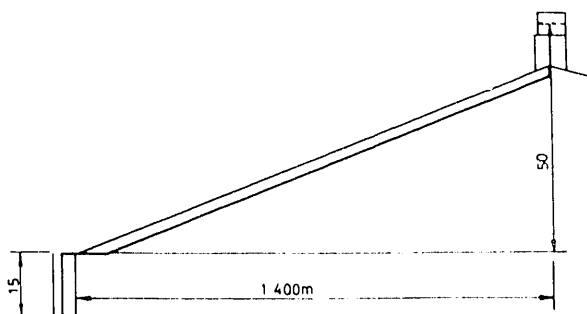


Figura 1.

Como es habitual en estos casos, no conseguimos autorización, del ingeniero municipal responsable de la instalación, para provocar el golpe de ariete aislando los amortiguadores, por lo que procedimos a su cálculo teórico.

Para determinar el tiempo de parada utilizamos la fórmula del autor de este trabajo:

$$T = C + \frac{K L V}{g H_m} = 1 + \frac{1,5 \times 1.400 \times 0,48}{9,81 \times (54 + 15)} = 2,4 \text{ seg}$$

La celeridad de la tubería de fundición centrífuga de 250 es del orden de 1.200 m/seg., por lo que la longitud crítica en esta instalación es:

$$L_c = \frac{a T}{2} = \frac{1.200 \times 2,4}{2} = 1.440 > L$$

al ser la impulsión corta, el golpe de ariete alcanzaría el valor de Michaud:

$$\Delta H = \frac{2 L V}{g T} = 57 \text{ m.}$$

Esta sobrepresión está calculada inmediatamente aguas arriba de la válvula de retención situada a nivel del piso de la sala de máquinas, punto en el que estaban acoplados los amortiguadores.

La presión total que debería haberse registrado en parada brusca sin protección resulta:

$$57 + 50 = 107 \text{ m.}$$

sin embargo, por la acción de dos amortiguadores de 50 l, esta presión en parada provocada solamente alcanzó 70 m.

Este resultado favorable, obtenido mediante dos amortiguadores de pequeña capacidad, resulta sumamente interesante, y por ello están en proceso de montaje varias protecciones de este tipo en España de las que luego hablaremos.

3. Cálculo del volumen del amortiguador.

Vamos a exponer el proceso de cálculo desarrollado por Carlo Corbellini, doctor ingeniero ESTP d'Affaires de Olier Industries, de París.

A temperatura constante, en un fluido se cumplirá siempre la ley de Boyle-Mariotte:

$$P \times V = \text{constante} \quad (I)$$

Un amortiguador instalado en una elevación puede encontrarse en cuatro estados principales, que son los que determinan las presiones y volúmenes que intervendrán en el cálculo:

Estado $P_0 V_0$ = tubería vacía: P_0 = presión de llenado.
Estado $P_m V_m$ = elevación en servicio: P_m = presión manométrica.

Estado $P_1 V_1$ = elevación parada: P_1 = presión estática.

Estado $P_2 V_2$ = sobrepresión por parada: P_2 = presión máxima prevista.

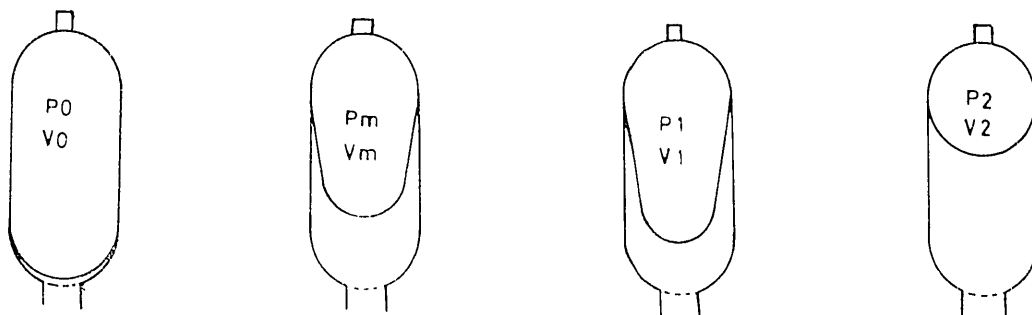


Figura 2.

En proceso isotermo y presiones absolutas tendremos:

$$P_0 V_0 = P_m V_m = P_1 V_1 = P_2 V_2 = K;$$

$$V_1 = \frac{P_0 V_0}{P_1}; \quad V_{1'} = \frac{P_0 V_0}{P_{1'}}; \quad V_1 - V_m = \frac{P_0 V_0 (P_m - P_1)}{P_1 P_{1'}}$$

En la práctica es prudente introducir el coeficiente 0,8 para compensar la influencia de la inevitable variación de temperatura durante el proceso de expansión:

$$\Delta V_{e'} = V_1 - V_m = \frac{0,8 P_0 V_0 (P_{1'} - P_1)}{P_m P_1} \quad (II)$$

y de la misma forma en la compresión, partiendo de los estados P_1 y P_2 :

$$\Delta V_c = V_1 - V_2 = \frac{0,8 P_0 V_0 (P_2 - P_1)}{P_2 P_1} \quad (III)$$

Vamos a realizar el balance de energías que intervienen en el proceso que se desarrolla consecutivamente a la parada brusca de la elevación por corte de energía.

Al producirse este corte comienzan a intervenir las siguientes energías principales:

$E_{c.i.}$ = energía cinética.

$E_{e'}$ = energía de la expansión del aire contenido en el amortiguador.

$E_{c.c.}$ = energía de la compresión por retroceso del agua.

E_p = pérdida de carga durante el recorrido de ida y vuelta.

Las dos primeras energías prolongan la ascensión del agua por la tubería, mientras que las otras dos actúan en sentido contrario.

Sería sensible la aportación de energía procedente de la inercia del grupo motobomba, pero, al igual que ocurre con los calderines de aire tradicionales, la presencia de aire a presión y su inmediata expansión cierra instantáneamente la válvula de retención e impide la entrada de agua posterior al corte de energía, por lo cual no se transmite esta energía (fig. 6).

Tampoco se tienen en cuenta las energías procedentes de la expansión del agua y contracción del conducto en el primer tiempo, por compensarse sensiblemente con las de compresión del agua y dilatación del conducto en el segundo tiempo.

A continuación acometemos el cálculo de cada una de ellas.

Energía cinética:

$$E_{c.i.} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{10 L Q^2}{2 g s} \text{ Kgm}$$

(L en m, Q en l/seg. y s en cm²).

Energía de la expansión:

Funcionando la instalación a su régimen de servicio, la presión en el amortiguador será P_m y su volumen V_m . El corte de energía y el golpe de ariete consiguiente hará descender la presión a P_1 , a la que la corresponde el volumen V_1 .

Representando esta fase gráficamente tendremos la figura 3.

La energía que buscamos viene representada por la superficie rayada S, ya que:

$$\Sigma V \times \Sigma P = \Sigma \text{ cm}^3 \times \Sigma \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = \Sigma \text{ Kg} \times \text{cm}.$$

Por integración se llegaría a la conocida fórmula:

$$E = 2,3 P_m V_m \log \frac{P_1}{P_m}$$

que nos proporciona la energía que buscamos, pero también puede recurrirse a la resolución gráfica, descomponiendo el área rayada de la figura 3, en el rectángulo S_2 , cuyos lados son ΔV_c y P_1 , y el triángulo S_1 de hipotenusa curva y catetos ΔV_c y $P_m - P_1$.

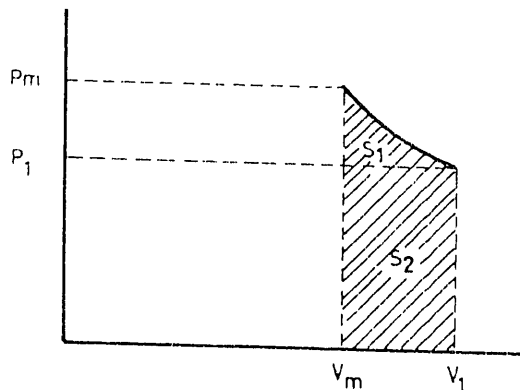


Figura 3.

Expresando las presiones en atmósferas absolutas y los volúmenes en litros, tendremos S_2 y S_1 en Kgm por las siguientes expresiones:

$$S_2 = 10 P_1 \Delta V_c;$$

$$S_1 \approx \frac{10}{3} (P_m - P_1) \Delta V_c \approx 3 (P_m - P_1) \Delta V_c$$

y, en consecuencia:

$$E_c = S_1 + S_2 = \Delta V_c (7 P_1 + 3 P_m) \text{ Kgm.}$$

La suma de estas dos energías, menos la energía de la pérdida de carga de la primera fase, que luego calcularemos, nos lleva a una situación de desequilibrio físico que origina el retroceso del agua y la compresión del aire del amortiguador, interviniendo las energías siguientes:

Energía de la compresión:

Representando gráficamente el paso de la presión P_1 a la P_2 , valor máximo de la sobrepresión admitida, tendremos la figura 4: y procediendo de forma idéntica a la anterior:

$$E_{c'} = S'_1 + S'_2 = \Delta V_c (7 P_1 + 3 P_2) \text{ Kgm.}$$

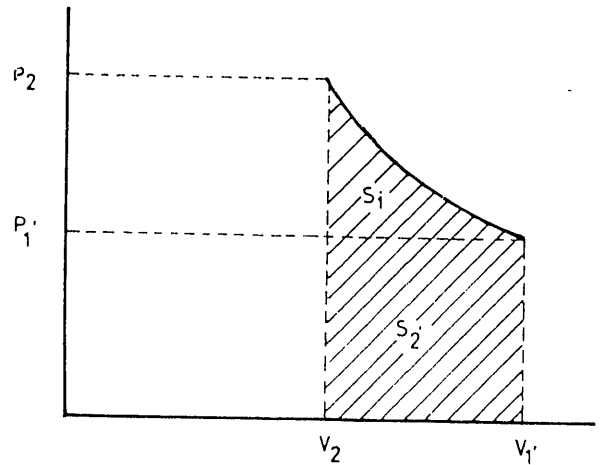


Figura 4.

Energía de la pérdida de carga:

Por no prolongar demasiado esta exposición, consignemos que, por un método gráfico análogo al aplicado en los casos anteriores, obtenemos la siguiente expresión:

$$E_p = 3,33 \Delta_p (\Delta V_c + \Delta V_{c'}) \text{ Kgm,}$$

siendo Δ_p la pérdida de carga en atmósferas.

Tenemos todos los elementos para establecer la ecuación de equilibrio en función del valor V_m , volumen inicial del amortiguador:

$$E_{c'} + E_c = E_p + E_{c''};$$

$$\frac{10 L Q^2}{2 g s} + \Delta V_c (7 P_1 + 3 P_m) = 3,33 \Delta_p (\Delta V_c + \Delta V_{c'}) + \Delta V_{c'} (7 P_1 + 3 P_2).$$

Las fórmulas (II) y (III) nos proporcionan los valores de ΔV_c y $\Delta V_{c'}$ en función de V_0 y, como todos los demás valores son conocidos, podremos deducir el volumen que buscamos.

A continuación realizamos un ejemplo de cálculo referido a una instalación en montaje en España.

Se trata de una elevación para riego del canal de Guadarranque, en Málaga, de las características siguientes:

$$\begin{aligned}
L &= 385 \text{ m;} \\
H_g &= 44 \text{ m;} \\
Q &= 160 \text{ l/seg.;} \\
\phi &= 500 \text{ mm;} \\
j &= 0,4 \text{ m.}
\end{aligned}$$

En este caso:

$$\begin{aligned}
P_1 &= 4,4 + 1 = 5,4 \text{ atm.;} \\
P_m &= 5,44 \text{ atm.;} \\
P_0 &= 0,9 \times P_1 = 4,8 \text{ atm.;} \\
P_2 &= 1,20 \times P_m = 6,5 \text{ atm.}
\end{aligned}$$

Estos valores están expresados en presiones absolutas.

Energía cinética:

$$\frac{10 L Q^2}{2 g s} = \frac{10 \times 385 \times 25.600}{2 \times 9,8 \times 1.963,5} = 2.562 \text{ Kgm.}$$

Expansión:

$$\begin{aligned}
\Delta V_e &= V_1 - V_m = \frac{0,8 P_0 V_0 (P_m - P_1)}{P_m P_1} = \\
&= \frac{0,8 \times 0,9 P_1 (P_m - P_1)}{P_m P_1} V_0 = \\
&= \frac{0,72 \times 0,04}{5,44} = V_0 = 0,005 V_0;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_e &= \Delta V_e (7 P_1 + 3 P_m) = 0,005 (37,8 + 15,3) \\
V_0 &= 0,265 V_0.
\end{aligned}$$

Compresión:

$$\begin{aligned}
\Delta V_c &= V_1 - V_2 = \frac{0,8 P_0 V_0 (P_2 - P_1)}{P_2 P_1} = \\
&= \frac{0,72 \times 1,1}{6,5} V_0 = 0,122 V_0;
\end{aligned}$$

$$E_{c,c} = 0,122 \times 57,30 V_0 = 6,99 V_0.$$

Pérdida de carga:

$$E_p = 3,33 \Delta_p (\Delta V_e + \Delta V_c) = 0,016 V_0.$$

Ecuación de energías:

$$\begin{aligned}
2.562 + 0,265 V_0 &= 0,016 V_0 + 6,99 V_0; \\
V_0 &= 380 \text{ l.}
\end{aligned}$$

Este resultado indica que acoplando a la elevación un amortiguador del volumen comercial más próximo, que es de 400 l, el golpe de ariete quedará limitado a una atmósfera.

El cálculo fraccionado de las energías que intervienen en la parada hace, evidentemente, laboriosa la determinación del volumen necesario y facilita los errores en su reiterada aplicación a cada caso que pueda presentarse, motivo por el que hemos profundizado en su desarrollo e introducido una notable simplificación que exponemos en el siguiente apartado.

4. Cálculo abreviado del autor.

Puede introducirse una notable simplificación al sistema de cálculo expuesto, si se tiene en cuenta que, salvo para velocidades desusadamente elevadas o grandes longitudes, la energía de la pérdida de carga puede despreciarse, frente a las energías restantes, como es fácil comprobar en el cálculo que acabamos de desarrollar.

Completamos la simplificación que nos proponemos adoptando la siguiente fórmula de la energía cinética, en la que L y D se expresan en metros y Q en metros cúbicos por segundo, que evita el cálculo de la sección de la tubería:

$$E_{c,i} = \frac{65 L Q^2}{D^2} \text{ Kgm.}$$

Por otra parte, si nos fijamos en la figura 5 vemos que se puede realizar el cálculo directo de la diferencia entre las energías de expansión y compresión, dado que la energía de la expansión entre V_m y V_0 puede considerarse idéntica que la de compresión entre V_0 y V_m .

En consecuencia, y siguiendo el mismo criterio, podemos establecer el valor de la disminución de volumen en la compresión desde P_m a P_2 por la expresión siguiente:

$$\Delta V = V_m - V_2 = \frac{0,8 P_0 V_0 (P_2 - P_m)}{P_m P_2},$$

y, adoptando la presión de llenado $P_0 = 0,9 \text{ m}$, llegamos a la expresión abreviada:

$$\Delta V = \frac{0,72 (P_2 - P_m)}{P_2} V_0 \quad (\text{IV})$$

Estableciendo la igualdad entre la energía cinética y la compresión a partir de V_m :

$$\frac{65 L Q^2}{D^5} = \frac{0,72 (P_2 - P_m)}{P_2} V_0 (7 P_m + 3 P_2),$$

de donde:

$$V_0 = \frac{90 L Q^2 P_2}{(P_2 - P_m) (7 P_m + 3 P_2) D^5} \quad (\text{V})$$

Fórmula que nos permite calcular con sencillez el volumen del amortiguador y que podemos simplificar notablemente si hacemos $P_2 = \alpha P_m$, valor que sustituido en V nos la transforma en:

$$V_0 = \frac{90 L Q^2 \alpha}{(\alpha - 1) (7 + 3 \alpha) P_m D^5}$$

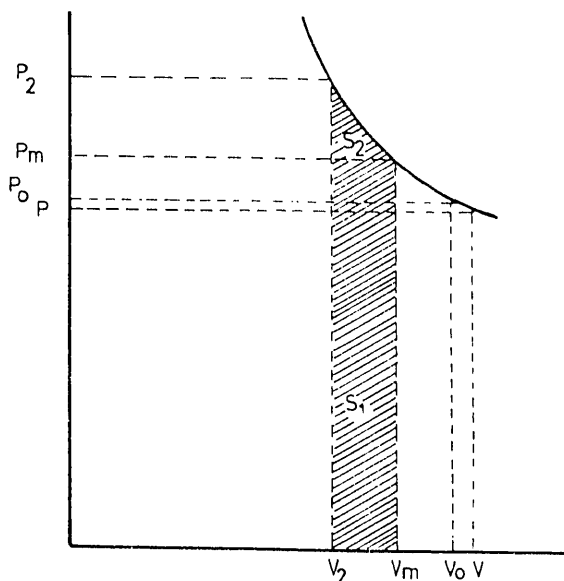


Figura 5.

Pero si hacemos:

$$W = \frac{90 \alpha}{(\alpha - 1) (7 + 3 \alpha)} \quad (\text{VI})$$

llegamos a la fórmula general abreviada, en la que L y D vienen expresados en metros, Q en metros cúbicos por segundo y P_m en atmósferas absolutas:

$$V_0 = \frac{W L Q^2}{D^5 P_m} \quad (\text{VII, Mendiluce})$$

En el siguiente cuadro vienen calculados los valores de W , para distintos valores de α :

CUADRO DE VALORES DEL COEFICIENTE W							
α	W	α	W	α	W	α	W
1,04	231	1,13	75	1,22	47	1,35	31
1,05	187	1,14	70	1,23	45	1,40	28
1,06	157	1,15	66	1,24	43	1,50	23
1,07	135	1,16	62	1,25	42	1,60	20
1,08	119	1,17	59	1,26	40	1,70	18
1,09	106	1,18	56	1,27	39	1,80	16
1,10	96	1,19	54	1,28	38	1,90	15
1,11	88	1,20	52	1,29	37	2,00	14
1,12	81	1,21	49	1,30	36		

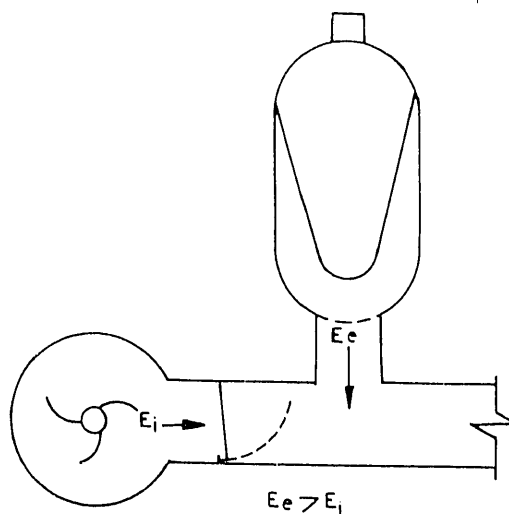


Figura 6.

Para establecer una comparación vamos a aplicar nuestra fórmula a la elevación de Guadarranque, cuya protección hemos calculado antes:

$$\alpha = \frac{P_2}{P_m} = \frac{6,5}{5,44} = 1,195; \quad W = 53;$$

$$V_0 = \frac{W L Q^2}{P_m D^2} = \frac{53 \times 358 \times 0,0256}{5,44 \times 0,25} = 384 \text{ l.}$$

Queda comprobada la gran aproximación de los resultados de ambos sistemas, máxime si se tiene en cuenta la necesidad de ajustarse a los volúmenes comerciales.

Podemos utilizar esta fórmula para calcular la presión total previsible, mediante el acoplamiento de un volumen determinado de amortiguador despejando el valor de W , e igualmente podemos utilizarla para el cálculo del volumen necesario para corregir simultáneamente las presiones máxima y mínima, evitando también la depresión en cualquier punto de la tubería.

5. Aplicaciones.

Son ya numerosas las aplicaciones de estos amortiguadores, que han sido utilizados con resultados satisfactorios por diversas entidades, como las Confederaciones Hidrográficas del Sur de España y Pirineo Oriental, Sociedad General de Aguas de Barcelona, Ayuntamientos, etc., tanto para reducir la presión máxima como para elevar a la vez la presión mínima.

La eficacia, robustez y facilidad de transporte y acoplamiento de estos aparatos, cuyo precio es comparable ventajosamente con el del calderín tradicional del mismo efecto, ha motivado el interés general por su instalación en España, por lo que hemos considerado oportuno divulgar sus características y facilitar su método de cálculo, que mediante su publicación en la REVISTA DE OBRAS PUBLICAS y su inclusión, juntamente con otros sistemas de protección en el libro "El Golpe de ariete en impulsiones", actualmente en impresión en el Servicio de Publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, que también realizará su distribución.