

EL GOLPE DE ARIETE EN IMPULSIONES LARGAS DE CARACTERISTICAS VARIABLES(*)

Por ENRIQUE MENDILUCE ROSICH

Dr. Ingeniero Industrial

En este artículo, que puede considerarse continuación del publicado por el mismo autor en nuestro número 3.130, de febrero pasado, se estudia la influencia práctica de la velocidad y de la celeridad, en el golpe de ariete producido en impulsiones "largas" de características variables.

Nos comunica en él, el resultado de una reciente experimentación, en la que comprueba que en una impulsión larga, de diámetro variable, sin ramificaciones, es suficiente una pequeña longitud de diámetro menor, para que el golpe de ariete aumente en función del aumento de la velocidad del agua en dicho tramo, lo que plantea la inquietud respecto a la rapidez efectiva de esta acomodación, que puede hacer puntos peligrosos los estrangulamientos de varios metros de largo de los acoplamientos de los motores a la elevación general.

En nuestro trabajo "El golpe de ariete en operaciones lentas", publicado recientemente en esta Revista, nos referíamos a varias particularidades de las impulsiones "cortas", en las que el valor del incremento de presión es directamente proporcional a la longitud, y está relacionado también directamente con la velocidad.

En las impulsiones "largas", este incremento es directamente proporcional a la celeridad y a la velocidad, siendo independiente de la longitud, en la zona en que $l > l_c$.

1. INFLUENCIA DE LA CELERIDAD

El valor de la celeridad es variable con el diámetro, el espesor de pared y con el módulo de elasticidad de la tubería, estando comprendido, en términos generales, entre unos 400 m/seg. para tubería de polivinilo y 1.200 m/seg. para las de fundición y hormigón armado.

Es muy frecuente el empleo de distintos espesores de tubería dentro de la misma instalación, y su consecuencia es que el valor del golpe de ariete varía en la zona "larga" de la impulsión, de forma que la línea de carga en parada resultará escalonada (fig. 1) en la zona de Allievi, según ya representábamos en nuestro primer trabajo sobre este tema, publicado en la revista *Dyna* en septiembre de 1962.

En un mismo material y diámetro, la variación del valor de la celeridad resulta discreta, y por ello puede recomendarse operar con la celeridad más elevada, en vez de hacerlo con la media, introduciendo así un ligero margen por exceso en el valor del golpe de ariete en los tramos de timbrajes intermedios.

Sin embargo, esta variación puede ser importante al cambiar de material y su

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 31 de octubre de 1976.

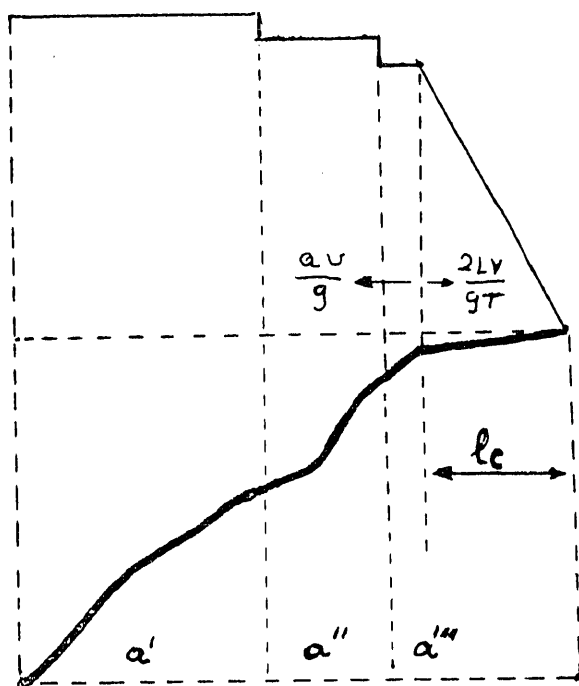


Fig. 1.— Celeridad variable.

repercusión en el incremento de presión muy notable, como puede apreciarse en la figura 2, representación de la línea de carga en parada de una elevación de una velocidad de 1,5 m/seg., cuya parte baja es de hormigón armado, y el resto, de polivinilo. La sobrepresión de 18 atmósferas en la zona baja, se reduce a 6 atmósferas en la zona "larga" de polivinilo.

No es probable un cambio de tubería tan extremo, pero no siendo imposible, creemos que lo que dejamos indicado servirá para fijar ideas y como introducción al caso real que exponemos a continuación.

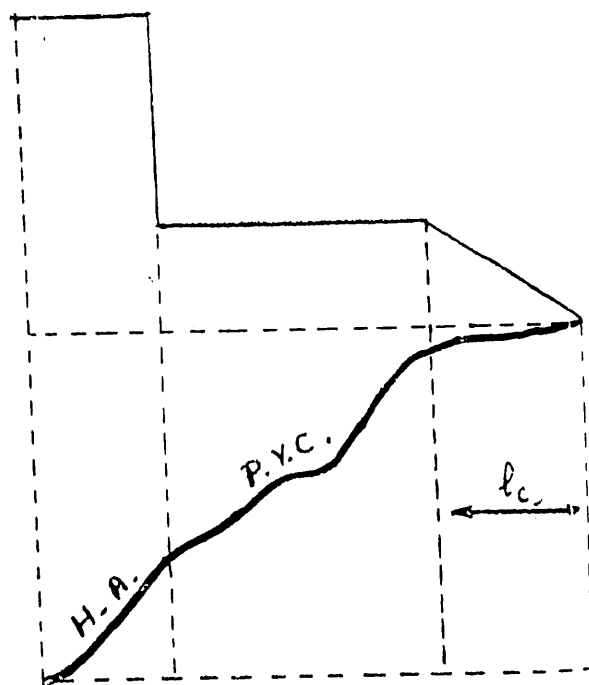


Fig. 2.— Celeridad variable.

2. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD

No es frecuente que en impulsiones directas a depósito varíe el diámetro de la tubería, motivo por el que hasta ahora no nos habíamos ocupado de este caso singular.

La interesante experiencia obtenida recientemente y su posible repetición en casos similares, dando origen a perturbaciones peligrosas, es motivo de esta comunicación orientada hacia un conocimiento más íntimo de las particularidades de este fenómeno hidráulico.

Al efectuar las pruebas de puesta en servicio de una impulsión de 1.500 m de tubería de amianto-cemento de 500 mm con 95 m de altura manométrica, 93 litros por segundo de caudal y válvula de retención a la salida del pozo, en la que se había previsto una sobrepresión de 47 m, se comprobó con sorpresa que efectuada la parada, el manómetro colocado inmediatamente aguas arriba de la válvula de retención, descendió bruscamente a 0, produciéndose fuertes y repetidos golpes de la clapeta de la válvula de retención, evidenciándose un vacío parcial al ser el golpe de ariete mayor que la presión estática.

Dado que esta circunstancia resultaba anormal, teniendo en cuenta las características que conocíamos de la instalación, hicimos las indagaciones pertinentes para averiguar las causas de la aparente anomalía, enterándonos entonces de que la impulsión partía de la bomba sumergida con tubería de 200 mm en 45 m, empalmado a la salida del sondeo con otra de 250 mm con 70 m de longitud, continuando en los 1.430 m restantes con diámetro de 500 mm, siendo este último tramo receptor en el futuro del caudal de otro pozo.

Siendo las velocidades en los tramos de 2,96, 1,90 y 0,46 m/seg., respectivamente, el cálculo que desarrollamos a continuación justifica plenamente lo ocurrido:

$$T = C + \frac{K L V}{g H_m} = 1 + \frac{1,25 (45 \times 2,96 + 70 \times 1,90 + 1.430 \times 0,46)}{9,81 \times 95} = 2,2 \text{ s.}$$

La impulsión es "larga", puesto que:

$$I_c = \frac{a T}{2} = 1.100 \text{ m} < 1.500$$

y, por tanto, el golpe de ariete en la tubería de 250 mm, donde se acopla el manómetro, debe ser:

$$\Delta H = \frac{a v}{g} = \frac{1.100 \times 1,90}{9,81} = 213 \text{ m. c. a.}$$

sin embargo, en la zona de la tubería de 500 mm, cuya distancia al depósito es mayor que la longitud crítica, este valor se reduce a:

$$\Delta H = \frac{a v}{g} = \frac{1.000 \times 0,46}{9,81} = 47 \text{ m. c. a.}$$

La representación gráfica de estos resultados es la de la figura 3.

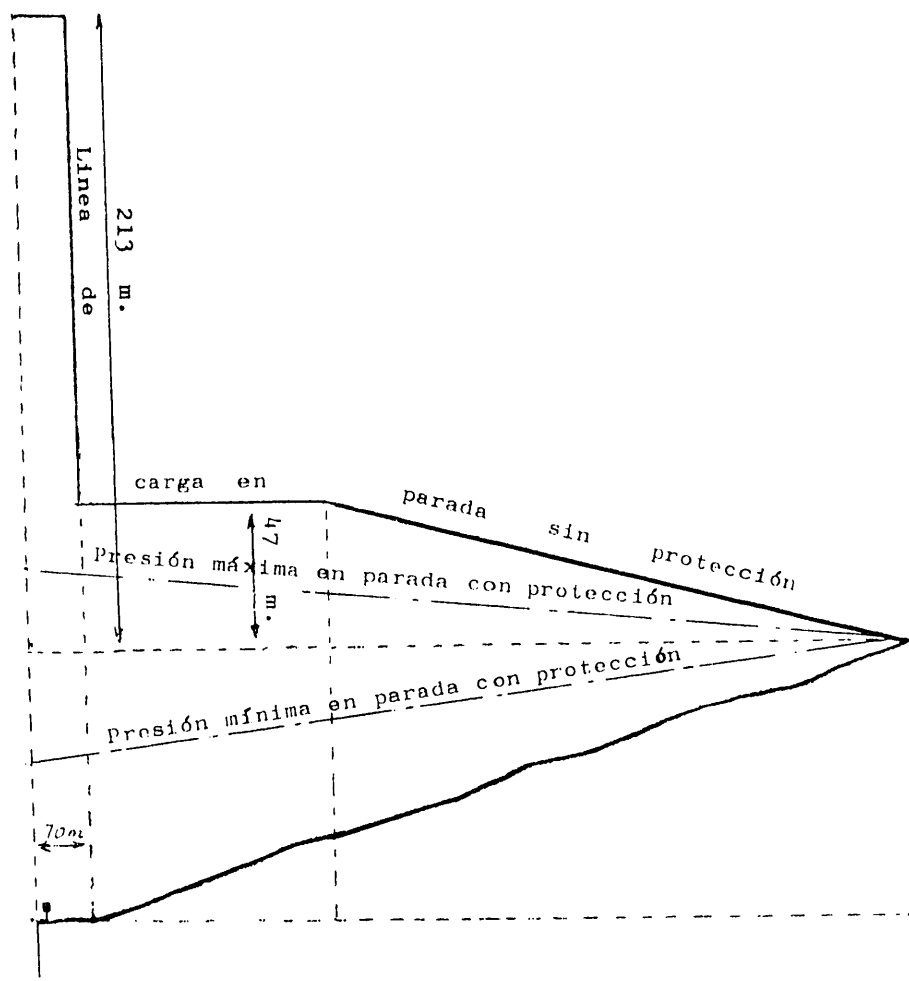


Fig. 3. — Velocidad variable.

La experimentación tropieza con grandes dificultades cuando se trata de efectuarla en obras en servicio, y, por ello, nos fue imposible realizar nuevos ensayos colocando manómetros en la tubería de 500 mm, y un vacuómetro en la tubería de 250 mm, con lo que hubiésemos obtenido mejor conocimiento de la variación de presiones, así como tampoco nos fue posible medir la sobrepresión real por estar la instalación protegida mediante amortiguadores de vejiga de aire comprimido, pero estas circunstancias no impiden obtener interesantes consecuencias.

Resulta evidente, por nuestra comprobación manométrica, que el golpe de ariete en la tubería de 250 mm fue, por lo menos, de 9,3 atmósferas, presión estática de la instalación, y puede asegurarse que en la zona "larga" de la tubería de 500 mm este valor ha de reducirse a 47 m, aproximadamente, no habiendo duda, por tanto, de que el incremento de presión tiende a tomar rápidamente el valor que le corresponde, según la celeridad de la tubería por la que circula la onda y la velocidad del agua antes de la parada, en la misma tubería, lo que demuestra una memoria selectiva de este fenómeno prodigiosa.

Es de suponer que este incremento no se produce de forma instantánea, como se representa en la figura 3, sino que tenga lugar en la forma progresiva que intentamos interpretar en la figura 4, en la que se representa tres variantes de la línea de carga en parada, en la zona de 70 m, en la que se reduce el diámetro y la velocidad es mayor.

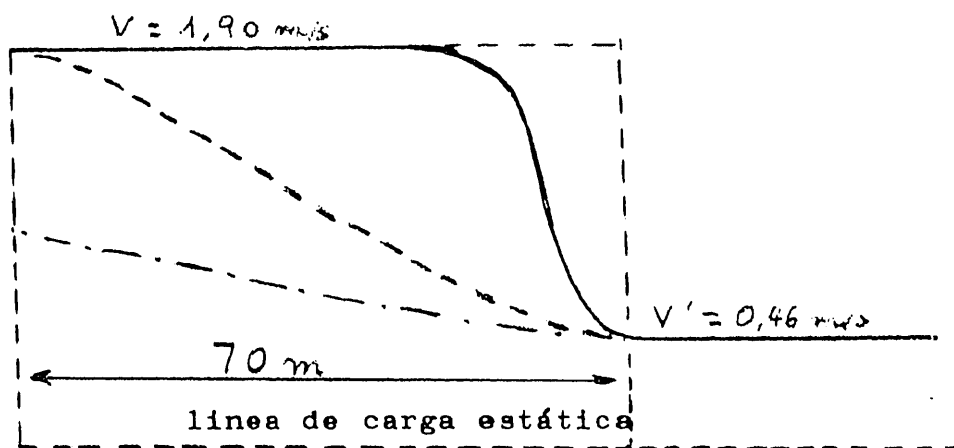


Fig. 4. — Posibles leyes de variación de ΔH .

En esta figura planteamos la trascendental incógnita que supone el conocimiento de la distancia o el tiempo que precisa la onda de golpe de ariete para que alcance la presión que le corresponde, según la celeridad de la tubería y la velocidad que llevaba por ella el agua antes de la parada.

Son frecuentes los acoplamientos de las bombas a las tuberías generales de elevación, mediante ramales de empalme de longitudes variables y diámetro reducido, o los estrangulamientos de otros tipos, en los que con seguridad se producirán incrementos de presión imprevistos, quizá causantes de trastornos o averías que no se saben diagnosticar certeramente.

Corrección de la depresión.

Volviendo a las pruebas en cuestión, y como ya se ha indicado, no fue posible conocer la sobrepresión real por estar protegida la instalación mediante amortiguadores, con volumen total de 400 l, hinchados en fábrica a una presión $P_0 = 0,9 P_m$ de 8,5 atmósferas, sin cuya acción la presión total en parada se hubiera elevado a 30 atmósferas en la tubería de 250 mm de diámetro.

El cálculo de esta protección se realizó para el caudal final de proyecto de 120 l/seg., para una presión máxima admisible de 12 atmósferas, según se reproduce a continuación, por el método del autor de este trabajo (*):

$$\alpha = \frac{P_m}{P_0} = \frac{13}{10,5} = 1,23; \quad W = \frac{90 \alpha}{(\alpha - 1)(7 + 3 \alpha)} = 45$$

$$V_0 = \frac{W L Q^2}{P_m D^2} = \frac{45 \times 1.500 \times 0,120}{10,5 \times 0,25} = 370 \text{ l}$$

adoptándose el volumen comercial de 400 l.

(*) Los amortiguadores a vejiga de aire comprimido, como protección de las elevaciones. R.O.P., número 3.116, de diciembre de 1974.

Comprobado por los ensayos que los resultados obtenidos no coincidían con los previstos, por modificaciones de los datos iniciales, produciéndose una fuerte y peligrosa depresión, se procedió a rebajar la presión de hinchado a 5 atmósferas, con lo que la protección quedó dispuesta para limitar la caída de presión, mediante la aducción del agua contenida en los amortiguadores a la presión de servicio.

Realizado un nuevo ensayo de parada, las presiones extremas registradas fueron 12 y 5 atmósferas, eliminándose consecuentemente los golpes y trepidaciones de la válvula de retención.

Este satisfactorio resultado se justifica analíticamente de la forma siguiente:

Si deseamos elevar la presión mínima en parada a P_1 , la presión de hinchado deberá ser $P_m - P_1$, valor que introducido en el desarrollo del cálculo de estos amortiguadores transforma la expresión del volumen y de la presión mínima en las siguientes:

$$V_0 = \frac{W L Q^2}{(P_m - P_1) D^2} \quad \text{y} \quad P_1 = P_m - \frac{W L Q^2}{V_0 D^2}$$

A estas expresiones ha de afectárseles de un coeficiente reductor de 0,8, por efecto de la energía de la pérdida de carga producida por una velocidad próxima a 0,5 m/seg., que es el caso que queremos calcular.

Antes de aplicar valores hemos de hallar la longitud equivalente de diámetro único, a efectos de la energía cinética:

$$\frac{65 L Q^2}{0,25} = \frac{65 L_1 Q^2}{0,04} + \frac{65 L_2 Q^2}{0,0625} + \frac{65 L_3 Q^2}{0,25}$$

de donde:

$$L = 1.990 \text{ m}$$

Siendo:

$$\alpha = \frac{13}{10,6} = 1,23, \quad W = 45$$

como en el cálculo anterior y sustituyendo:

$$P_m - P_1 = P_m - \frac{45 \times 1.990 \times 0,00864 \times 0,8}{400 \times 0,25} = 4,4 \text{ atm absolutas}$$

Esto nos indica que teóricamente la presión mínima debería haber sido de 3,4 atmósferas relativas, y la máxima, por condición inicial (α), de 12 atmósferas y las registradas en las pruebas fueron 5 y 12 atmósferas, respectivamente; resultados de muy aceptable aproximación.

Las pruebas y comprobaciones fueron realizadas en presencia de una numerosa representación de la Dirección Facultativa de la obra y de las entidades que colaboraron en la instalación.

Nos hemos salido en esta última parte del tema fundamental de este trabajo, pero creemos de interés práctico el conocimiento de esta experiencia, que nos muestra la forma sencilla y segura de manipular a voluntad con las presiones derivadas de la parada de motores.

3. CONCLUSIONES

En tubería del mismo material y distinto espesor, es preferible, por seguridad y comodidad, operar con la celeridad máxima.

En las elevaciones con tuberías de distintos materiales, es aconsejable operar con la celeridad de cada tramo, puesto que, como hemos visto, la diferencia puede ser estimable.

Resulta evidente la necesidad de experimentar y divulgar los resultados obtenidos, relativos a la distancia que ha de recorrer la onda de golpe de ariete, para adquirir la presión que le corresponda, según las características del tramo de tubería por el que circula.

Será preciso prestar la máxima atención a las velocidades secundarias que puedan producirse en las elevaciones, aunque afecten a tramos cortos, ya que pueden originar sobrepresiones imprevistas y peligrosas.

La doble acción de los amortiguadores, manejada a voluntad, mediante un sistema de cálculo racional, confirmado en la práctica, permite disminuir las oscilaciones de presión, mejorando la conservación de las instalaciones.