

Peligrosidad del aire en el interior de las tuberías^(*)

Por ENRIQUE MENDILUCE ROSICH

Doctor ingeniero industrial

En este trabajo se trata, con una orientación eminentemente práctica, de las perturbaciones producidas por el aire incontrolado encerrado en el interior de las tuberías, recomendándose la instalación de ventosas, no sólo en los puntos altos, sino en otros puntos singulares que detalla.

1. INTRODUCCION

Desde el punto de vista resistente, las tuberías destinadas al transporte de agua a presión deben estar preparadas para soportar distintos esfuerzos, que es necesario valorar y tener en cuenta para elegir acertadamente el timbraje o clase adecuada de los tubos.

En primer lugar actúa la presión estática, cuyo conocimiento puede bastar para la elección del timbraje de los tubos en el caso de conducciones por gravedad, pero que debe ser incrementada por la pérdida de carga en impulsiones.

En segundo lugar deberemos evaluar el golpe de ariete, que es inseparable del agua en movimiento, ya que se producirá como consecuencia de la apertura o cierre de válvulas, el arranque o parada de grupos y su valor puede alcanzar gran importancia en relación con la presión estática en algunas conducciones y en casi todas las impulsiones.

Es raro ya encontrar un estudio o proyecto de impulsión en el que no estén claramente determinados ambos esfuerzos, pero también es poco frecuente que se tantee el valor de la sobrepresión por cierre de válvula o que se limite su tiempo de cierre mínimo en conducciones, lo cual puede ser causa de sorpresas.

Hay otro esfuerzo inseparable también de las tuberías enterradas e importante en diámetros

de alguna entidad, que es la carga de aplastamiento, la cual combinada con los esfuerzos anteriores puede obligar a reforzar el espesor de los tubos, especialmente en timbrajes bajos.

Además de los anteriores, será excepcional la instalación que no se vea sometida a otro esfuerzo, principalmente en las puestas en servicio, difícil de valorar, fácil de evitar y que, sin embargo, puede alcanzar valores superiores a la suma de los tres primeros, al que en la práctica se le dedica poca atención con la consecuencia de que con frecuencia se rompen las tuberías por esta causa, achacando injustificadamente esta incidencia a la falta de calidad de los tubos.

Nos referimos al efecto del aire incontrolado aprisionado en el interior de la instalación, cuestión poco estudiada y muy polémica en la mayoría de los casos, sobre la que tenemos una inolvidable evidencia todos cuantos hemos tenido la responsabilidad de la fabricación e instalación de tuberías y sobre la que deseamos exponer nuestras ideas respecto a su evolución y repercusión en la conservación de las instalaciones.

2. PROCEDENCIA DEL AIRE

En las tuberías se encuentra siempre aire de mayor o menor proporción, de las siguientes procedencias:

a) El que llena totalmente su interior cuando van a ponerse en servicio por primera vez o han sido vaciadas por cualquier causa. Este es el

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de mayo de 1984.

caso que mayor atención exige por el gran volumen de aire que ha de evacuarse y por la gran velocidad que el agua alcanza en muchas ocasiones, por lo menos en alguna parte de la traza.

b) El que normalmente lleva el agua emulsionado.

c) El que siempre está disuelto en el agua, en mayor cantidad cuanto mayor sea la presión y que, por lo tanto, se desprende cuando la presión disminuye. En realidad no es el aire el que se disuelve sino el oxígeno, puesto que el nitrógeno es prácticamente insoluble en ella. Es frecuente que cuando se toma agua de un grifo, en una distribución a gran presión, de las que van quedando pocas, el agua parece carbónica en los primeros instantes debido al desprendimiento del oxígeno disuelto, fenómeno que entre otros, pudimos observar en la villa de El Escorial, cuando hace varias décadas se distribuía el agua a casi nueve atmósferas. En alguna ocasión se ha confundido este fenómeno observado en experiencia de laboratorio, con la cavitación.

d) El que queda aprisionado en los intersticios de las juntas o se introduce por ellas al producirse eventualmente algún vacío en el interior de los conductos.

Resulta evidente que con tantos canales de suministro, será poco probable que no se encuentre aire en el interior de las tuberías en servicio y por ello habrá que dotarlas de holgados medios para evacuarlo, precaución que no recibe generalmente el tratamiento adecuado.

3. COMPORTAMIENTO DEL AIRE

La causa fundamental de la peligrosidad del aire en tales condiciones reside en su notable compresibilidad y el gran almacenamiento de energía que produce el aumento de la presión a los valores normales en los transportes de agua.

Esta energía potencial no resulta peligrosa en sí, mientras el aire permanece estático, como por ejemplo en un calderín antiarriete, pero resultará sumamente peligrosa en sus desplazamientos, bien arrastrado por la vena líquida o ascendiendo en sentido contrario puesto que

pueden provocarse estrangulamientos o separaciones de ésta, en cuyo caso la suma de las energías cinética del agua y potencial del aire actuarán en forma prácticamente explosiva.

Como hemos indicado, los efectos del aire incontrolado se manifiestan con más intensidad en el llenado de las instalaciones debido a la gran cantidad de aire a evacuar, el cual dada su naturaleza distinta del agua, se resiste a seguir sus leyes dando origen a perturbaciones que a continuación tratamos de explicar.

Por otra parte, no es fácil conseguir la evacuación rápida de todo el aire que de hecho se queda en los puntos altos inadvertidos, en los tramos de mínima pendiente, en los cambios marcados de pendiente que alteran su velocidad de desplazamiento..., etc., y por ello resulta frecuente que, días después de funcionamiento aparentemente normal, se produzcan roturas de tubería, que suelen ser achacadas por la propiedad o la dirección de la obra a falta de resistencia de los tubos, lo cual será cierto, pero también será cierto que la presión que los rompe es muy superior a la admitida por el timbraje de las tuberías instaladas.

Consideramos que este tipo de fenómeno, al igual que en los otros que hemos mencionado en la introducción, nuestra primera atención debe centrarse en el conocimiento de su desarrollo físico, que entendemos será necesario para poder poner los medios de evitarlo, por lo que vamos a analizar los casos más característicos con el fin de tratar de explicar la razón de que la presencia del aire pueda producir tales roturas.

En las operaciones de llenado el agua alcanza velocidades insospechadas en los tramos de pendiente acusada favorable a la corriente, muy frecuentes en las instalaciones y como el aire ocupa inicialmente todo el interior se verá obligado a salir por el punto alto anterior si dispone de ventosa, circulando en sentido contrario al agua, puesto que en el punto bajo se formará en los primeros momentos un tapón hidráulico, situación poco estable muy propicia para que se produzcan estrangulamientos o cortes de la vena líquida y las sobrepresiones correspondientes.

En la rama descendente de un sifón, en la que la pendiente sea de 150 m/km, por ejemplo, la velocidad que puede alcanzar el agua será de 12,5 m/s, con un calado de 80 por 100 y el aire que circulará en sentido contrario buscando la salida por el punto alto inicial puede llevarla mayor, lo que representa una velocidad relativa de agua-aire de varias decenas de metros por segundo.

En estas condiciones no es de extrañar que se produzcan roturas, como las que se originaron en una arteria de distribución con un largo tramo de la citada pendiente, de una importante capital de provincia, que no pueden ser atribuidas a otra causa que el aire, ya que la instalación de ventosas en los puntos señalados en nuestro dictamen resolvió la situación sin incidencias posteriores.

En tramos de escasa pendiente, que a veces es difícil materializar en la realización del montaje, el aire puede encontrarse indeciso entre la corriente y una débil pendiente que tienda a impulsarlo en sentido contrario, o bien en la parte superior de algunos puntos altos poco marcados y en esa situación cualquier efecto turbillonar o modificación del régimen, puede juntar varios volúmenes de aire en situación similar y provocar el temido corte o estrangulamiento.

En los cambios fuertes de la pendiente, tanto a favor como en contra de la corriente, el aire ascendente perderá velocidad y aumentará su volumen propiciándose las situaciones anteriores.

El efecto del aire es siempre insidioso y aunque en algunas ocasiones la forma explosiva de las roturas, incluso con lanzamiento del relleno a distancia no deja lugar a dudas respecto a su causa, en otras más similares a las producidas por la presión estática o dinámica, su atribución al aire suele parecer poco convincente, sobre todo por la falta de bibliografía que aborde teórica y prácticamente este problema, pero la realidad es que el aire es el enemigo máximo de la integridad de las instalaciones, deficientemente dotada por lo general de puntos de desaireación.

Evidentemente, nos movemos en el terreno de las especulaciones, pero lo cierto es que la

colocación de ventosas nos ha permitido eliminar de forma radical este tipo de roturas y resolver dilaciones y reclamaciones en la entrega de innumerables instalaciones a lo largo de varias décadas.

Vamos a apoyar estas afirmaciones, valorando, aunque sea de forma aproximada, las presiones que pueden derivarse de las modificaciones del régimen dinámico provocadas por el aire en sus desplazamientos en la tubería, que deliberadamente no llamamos golpes de ariete, porque tal designación corresponde a las oscilaciones de presión originadas por el accionamiento de válvulas o motobombas, a las que puede aplicarse una teoría basada en la continuidad de la vena líquida, que el aire destruye en el caso que estudiamos.

4. CALCULO DE LAS SOBREPRESIONES

El fundamento de estas alteraciones de presión reside en la transformación de la energía cinética del agua frenada, en compresión del aire encerrado, transformación que supuesta isoterma puede expresarse por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{2} m v^2 = 2,3 \times V_0 P_0 \log \frac{P_2}{P_0}$$

siendo:

- m = masa del agua en kg.
- v = velocidad del agua en m/s.
- V₀ = volumen inicial del aire en l.
- P₀ = Presión inicial en m.c.a.
- P₂ = presión final del aire en m.c.a.
- L = longitud del conducto a considerar.
- D = diámetro del conducto.

A continuación realizamos el cálculo de la presión que puede producirse por efecto del aire, en una conducción de tubería de 500 mm, con presión dinámica máxima de 5 atm, velocidad de 0,97 m/s y longitud total de 13.200 m, sin ventosas, con una gran parte central de muy escasa pendiente, en la que esporádicamente se vienen produciendo roturas de tubos.

PELIGROSIDAD DEL AIRE EN EL INTERIOR DE LAS TUBERIAS

Supongamos que a 7.000 m del embalse alimentador, con la presión dinámica indicada, se produce una acumulación de aire disperso de 600 l, que produce el corte de la vena líquida:

El peso del agua a considerar será:

$$\frac{\gamma D^2}{4} L = \frac{3,14 \Omega 0,5^2}{4} \times 7.000 = 1.373,75 \text{ tm.}$$

La energía cinética:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m v^2 &= \frac{1.373.750}{2 \text{ g.}} \times 0,97^2 = \\ &= 65.879 \text{ kgm.} \end{aligned}$$

La energía de la compresión isoterma:

$$\begin{aligned} 2,3 V_0 P_0 \log \frac{P_2}{P_0} &= 2,3 \times 5 \times 10,33 \times \\ &\times 600 \frac{P_2}{P_0} = 71.271 \log \frac{P_2}{5} \text{ kgm.} \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} 65.879 &= 71.277 \log \frac{P_2}{5}; \log \frac{P_2}{5} = \\ &= 8,5 \quad ; \quad P_2 = 42,5 \text{ atm.} \end{aligned}$$

Es decir que, en este caso, el corte de flujo provocado por la acumulación de aire, puede originar un aumento súbito de la presión desde 5 a 42,5 atm, que es lógico no soporte la tubería y que explica lo que viene ocurriendo en una conducción de tales características de otra capital de provincia, situación que no corregirán mientras no instalen ventosas que les tenemos recomendadas.

El volumen de aire elegido no ha sido caprichoso, sino que hemos considerado que tal volumen, equivalente al de tres metros de tubería, puede producir razonablemente el supuesto corte total del flujo, mientras que si el volumen fuese menor este corte resultaría menos probable. Si operamos con 300 l y suponemos el

corte de la mitad del flujo el resultado sería el mismo.

Admitimos el carácter aleatorio de los cálculos anteriores, pero siendo factible que tales supuestos puedan presentarse realmente, creemos que nos permiten comprender y explicar el origen de las roturas, con frecuencia explosivas, que se producen en las instalaciones, preferentemente en sus llenados.

5. ESTUDIO DE LA DESAIREACION

El sistema prácticamente único para conseguir la evacuación del aire es la utilización de las ventosas, ya que en pocas ocasiones puede recurrirse a las arquetas de rotura o a las chimeneas de equilibrio.

Los modelos básicos de ventosa son dos, desde hace muchas décadas, de bola y de campana, con el serio inconveniente de las primeras de la posibilidad de deformación de la bola construida de material ligero, en cuyo caso da pérdidas de agua o de su atranco en el agujero de la junta de estanquidad sin dejar salir al aire, extremos que con frecuencia hemos comprobado y que aconseja limitar su utilización a las instalaciones de baja presión.

La poca divulgación de estos inconvenientes y sobre todo el mayor precio de las ventosas de campana, han sido circunstancias decisivas para que el empleo de las de bola siga siendo casi exclusivo y únicamente las grandes empresas de abastecimiento de agua, como el Canal de Isabel II, Aguas Potables de Barcelona, etc., conscientes del enorme costo económico y social de las roturas de tuberías, utilizan las de campana, que son estancas, indeformables y de funcionamiento seguro.

Tenemos la impresión de que se ha estudiado muy poco esta cuestión y nos apoyamos para esta afirmación en el repaso de los trabajos publicados por la REVISTA DE OBRAS PUBLICAS desde 1953, en el que no hemos encontrado más que uno de don José García Agustín, abril de 1962, en el que de forma breve, se refiere a la instalación de ventosas en la arteria de San Bernardo del Canal de Isabel II. Tampoco tene-

mos noticias de otras publicaciones sobre el dimensionamiento, cuantificación y localización de ventosas y tampoco está recogido en principio, en la ambiciosa ponencia 15, «Transportes de agua a larga distancia», que se habrá presentado en el reciente congreso de la IWSA en Zurich.

Basados exclusivamente en nuestra experiencia de algunas décadas dedicadas directa o indirectamente a la instalación de tuberías y pretendiendo haber adquirido algún conocimiento práctico sobre el comportamiento del aire en estos casos, a costa de las numerosas incidencias que hemos tenido que subsanar y diagnosticar, nos animamos a exponer unas ideas concretas y razonadas al respecto, con la esperanza de que resulten de interés para quienes adquieran la responsabilidad del buen funcionamiento de un transporte de agua por tubería.

Las ventosas que no se olvidan en los estudios y proyectos son las situadas en los puntos altos marcados, porque de no colocarlas el agua deja de circular tan pronto se acumule el aire en dichos puntos, pero además su omisión pondrá en peligro la tubería si la acumulación de aire se produce súbitamente (fig. 1).

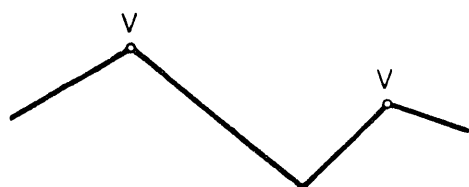


Fig. 1.

Será muy recomendable la instalación de ventosas a la salida de depósitos que alimentan sifones, para evitar que el aire de la rama descendente tenga que llegar al depósito a través de la válvula, venciendo una corriente contraria posiblemente turbulenta, especialmente en los llenados (fig. 2).



Fig. 2.

En las ramas descendentes de los sifones de más de 500 metros de longitud, resultará eficaz la instalación de ventosas en función de la longitud, para evitar el largo recorrido del aire en sentido contrario a la corriente de agua, hasta encontrar la ventosa del punto alto inicial, dado que en los primeros momentos del llenado se formará un tapón hidráulico en el punto bajo, impidiendo la salida del aire por la rama ascendente (fig. 3).

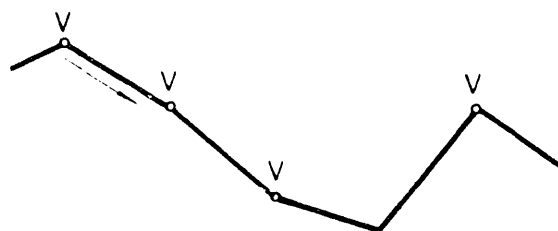


Fig. 3.

Estará indicada la instalación de ventosas en los cambios marcados de pendiente, aunque no aunque no formen puntos altos, tanto en la rama descendente como ascendente de los sifones, puesto que el aire en su ascensión, a favor o contra la corriente, aumentará su volumen por pérdida de presión y perderá velocidad al disminuir la pendiente, acumulándose peligrosamente (Fig. 4).

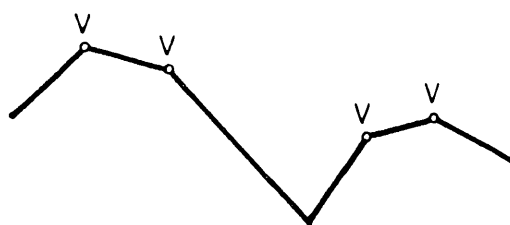


Fig. 4.

Los tramos sin pendiente o poco definida precisarán de ventosas para evitar que el aire indeciso pueda acumularse, produciendo el corte o estrangulamiento de la vena. En estos casos el número y situación de las ventosas estará en función de la longitud del tramo (Fig. 5).

En las redes de distribución habrán de instalarse también, convenientemente distribuidos

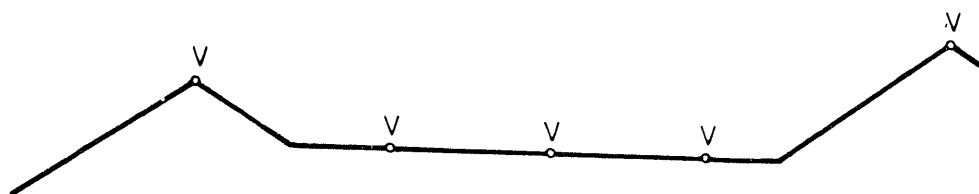


Fig. 5.

para facilitar el llenado rápido después de los vaciados por restricciones, modificaciones, ampliaciones o roturas. Es una gran equivocación pensar en que las tomas de abonado puedan bastar para la desaireación en tales casos.

Las instalaciones de riego por aspersión son muy propicias a los efectos del aire, especialmente aquellas que se vacían después de cada riego, por los aspersores situados en las costas bajas, por lo que conviene reforzar los puntos de desaireación, siendo incluso recomendable que las ventosas se coloquen en derivaciones verticales del mismo diámetro de la tubería, para evitar que las bolsas de aire pasen rápidamente por la toma habitual de éstas, sin tiempo para que sean evacuadas en su totalidad.

Todo lo indicado es aplicable por igual a conducciones por gravedad como a impulsiones.

Podríamos presentar con detalle numerosas instalaciones en las que la colocación de ventosas permitió eliminar las roturas que impedían su puesta en servicio, las cuales apoyan las distintas situaciones recomendadas para las ventosas, representadas en las figuras anteriores, pero prologaríamos excesivamente este trabajo, por lo que limitaremos nuestras referencias a otros tres casos muy representativos, cuya localización también silenciamos, puesto

que las incidencias se produjeron por evidentes fallos personales.

Para el abastecimiento de una población se instaló un sifón de 4.800 m. de longitud, 200 m. de diámetro de amiantocemento, con un escalonamiento de presiones hasta 10 atm. de trabajo, para cubrir una diferencia de alturas máxima de 82 m., según perfil esquemático (Fig. 6), si bien la dirección de la obra decidió suavizar los cambios de pendiente y suprimir las ventosas 2, 3 y 4, siguiendo el criterio expuesto en la página 820 del Gómez Navarro.

Terminando el montaje de la tubería, se realizaron satisfactoriamente las pruebas de presión interna a 1,4 de la presión de trabajo de cada tramo. Sin embargo, cuantas veces se pretendió llenar el sifón para ponerlo en servicio se produjeron roturas de tubos, todas en el ramal descendente, repitiéndose los intentos más de diez veces con los mismos resultados negativos, hasta que a exigencias nuestras, la dirección de la obra decidió instalar las ventosas que estaban proyectadas, con lo cual el sifón entreó en servicio y sigue funcionando sin incidencia alguna desde hace más de catorce años.

Para la mejora del abastecimiento de una capital de provincia se proyectó y ejecutó una elevación directa a la red de distribución, con depósito regulador en cola, mediante tubería de

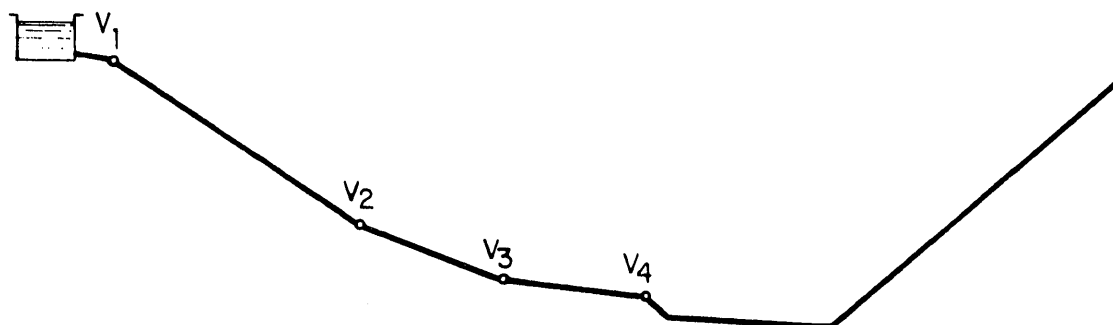


Fig. 6.

PELIGROSIDAD DEL AIRE EN EL INTERIOR DE LAS TUBERIAS

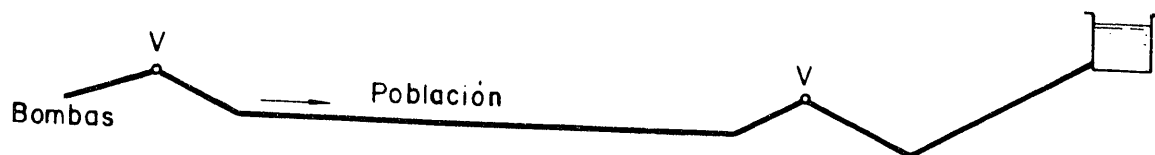


Fig. 7.

600 m., de fundición con longitud total de unos 5.000 m., de perfil esquemático representado en la figura 7.

Al intentar poner en servicio el bombeo, en cuya construcción no intervinimos, comenzaron a romperse tubos en la zona llana coincidente con las calles de la población, pasando de 20 los tubos rotos en otros tantos intentos y creando la situación ciudadana que puede imaginarse. Encargados del estudio de las causas de las roturas y de su eliminación, conseguimos tal objetivo mediante la colocación de ventosa de 100 mm. en la parte llana, con separaciones entre ellas de 250 m., cesando las roturas de forma radical.

Para terminar diremos que otro caso de roturas explosivas y reiteradas, lo resolvimos casualmente sin más que abrir la llave de paso de una ventosa de 100 m. situada en un punto alto, que un vigilante había cerrado por perder agua.

6. DIMENSIONAMIENTO DE LAS VENTOSAS

Los fabricantes de tubería de fibrocemento vienen recomendando tradicionalmente que el diámetro de las ventosas esté relacionado con el de la tubería de la siguiente forma:

$\varnothing$ tubería (mm.)	$\varnothing$ ventosa (mm.)
Hasta 80	20
De 100 a 200	40
De 250 a 450	80
De 500 a 1.000.....	100

y esta relación viene prácticamente impuesta por la disponibilidad de las piezas especiales para el acoplamiento de las ventosas.

El criterio de un importante fabricante de ventosas es el siguiente:

$\varnothing$ tubería (mm.)	$\varnothing$ ventosa (mm.)
Hasta 200	50
De 250 a 450.....	80
De 450 a 600.....	100
De 700 a 800.....	150
De 900 a 1.200.....	200
De 1.300 a 1.600.....	300
De 1.700 a 2.000.....	400

Tratamos de realizar algún cálculo sobre la capacidad de desaireación de las ventosas, pero encontramos una clara falta de orientación en los medios especializados consultados, puesto que unos relacionan el aire evacuado con la presión, mientras que otros lo hacen con su raíz cuadrada. Por otra parte, no habrá posibilidad de conocer, ni aproximadamente, la presión del aire antes de ser evacuado por la ventosa, con lo que los cálculos que se intenten tendrán escasa garantía.

No obstante, recogemos la información facilitada por el mismo fabricante sobre caudales de salida del aire a presión interior de dos atmósferas absolutas:

$\varnothing$ ventosa (mm.)	Q (l/s.)	$\varnothing$ ventosa (mm.)	Q (l/s.)
80	60	200	350
100	100	300	750
150	200	400	1.400

Del estudio de estos datos y del único facilitado por García Agustín en el trabajo antes citado que recomienda no esperar de una ventosa de 100 m. más de 125 l/s., llegamos a la conclusión de que los anteriores caudales permitirán muy holgadamente la evacuación del aire en las instalaciones en servicio, pero para un llenado rápido precisaremos varias ventosas

por cada sifón que se forme en la instalación, que serán totalmente independientes de tal respecto.

Estamos seguros de que atendiendo las recomendaciones que hemos formulado en el apartado anterior, suscitadas principalmente por razones dinámicas, habremos dotado a las instalaciones de la suficiente aireación para realizar el vaciado o llenado de gran rapidez, eliminando los peligros que hemos denunciado.

7. CONCLUSIONES

El aire aprisionado en el interior de las tuberías, es el principal causante de las roturas en las instalaciones.

Es imprescindible pensar en que el aire que ocupa una instalación vacía y el que llevará disuelto o emulsionado el agua que la llena, tiene que salir por alguna parte y el estudio de las salidas adecuadas y suficientes debe ser motivo de preocupación del proyectista y del director de la obra.

Las ventosas de bola pueden funcionar defectuosamente a presiones superiores a 5 atm., como tienen previsto sus fabricantes y por ello es recomendable recurrir a las de campana metálica en tales casos.

Las ventosas, como todo elemento mecánico, requieren una conservación o mantenimiento que habitualmente no reciben, y en caso de revisión, reparación o sustitución, será recomendable que el cierre de la válvula que la aísla dure el menor tiempo posible, para evitar que el aire se acumule y pueda romperse un tubo o cortarse el servicio.

Una buena desaireación dependerá más del número y localización de las ventosas, que de su diámetro.

No es difícil encontrar técnicos hidráulicos que aplican el criterio de Gómez Navarro a que antes nos hemos referido y otros que olvidan totalmente la desaireación en el proyecto, a los que recomendamos que mediten sobre el tema antes de verse complicados en incidentes como los que hemos detallado.

Como estos poco gratos contratiempos implican normalmente al director de la obra, al constructor y al fabricante de la tubería, de forma difícil de discriminar, se procura resolver la situación de la manera más discreta posible, lo que es causa de la escasa divulgación de este tipo de averías y del nulo o escaso aleccionamiento general que de éstas se obtiene.

Enrique Mendiluce Rosich.



El autor de este artículo, con gran experiencia hidráulica en el campo de los transportes de agua por tubería, adquirida en su prolongada actividad profesional en dos importantes empresas fabricantes de tubos de amianto-cemento, tiene publicados numerosos trabajos, de marcada orientación práctica, en revistas técnicas, tanto nacionales como extranjeras, sobre pérdidas de carga, velocidades, diámetros recomendables, antiarrietes, esfuerzos combinados, etc., destacando su investigación teórico-práctica sobre los valores del golpe de ariete en impulsiones que le permitió establecer un sistema de cálculo analítico, basado en sus dos fórmulas del tiempo de parada o maniobra, que ha alcanzado gran divulgación y aceptación por su sencillez y fiabilidad.
