ANEJO 15: TUBERÍA DE IMPULSIÓN. GOLPE DE ARIETE. ESTUDIO DE VENTOSAS

INDICE:

1. INTRODUCCIÓN 1
2. DIMENSIONAMIENTO 1
3. GOLPE DE ARIETE..... 1
4. CALCULO MECÁNICO 3
5. PÉRDIDAS DE CARGA EN LA TUBERÍA DE IMPULSIÓN 3
6. CONDICIONES DE INSTALACIÓN DE LA TUBERÍA..... 4
7. ESTUDIO DE VENTOSAS 5
7. 1. CLASIFICACIÓN DE LAS VENTOSAS A INSTALAR 6
7. 2. UBICACIÓN DE LAS VENTOSAS..... 6
7. 3. DIMENSIONAMIENTO DE LAS VENTOSAS..... 8
7.3.1. DIMENSIONAMIENTO DE PURGADORES 9
7.3.2. DIMENSIONAMIENTO VENTOSAS DE GRAN ORIFICIO 11
APENDICE1: ESTUDIO DE GOLPE DE ARIETE DE LA CONDUCCIÓN
APENDICE 2 CÁLCULOS MECÁNICOS DE LA TUBERÍA

1. INTRODUCCIÓN

La Tubería de Impulsión (T) es la encargada de transportar el fluido desde la estación de bombeo a los ramales de riego. En caso de no consumo o de operación de llenado de balsa, esta tubería conducirá el agua hasta la balsa de acumulación.

La tubería trabaja en dos direcciones, proporcionando agua a los cultivos directamente desde el río o desde la balsa de acumulación.

La estación de bombeo que impulsa el agua del río a la balsa, está alimentada por la red eléctrica y por energía fotovoltaica.

2. DIMENSIONAMIENTO

La tubería de impulsión (T) presenta las siguientes características teóricas de partida, considerando la obra completa (obra ITACYL+ obra SEIASA):

- Longitud: 1801,75 m
- Material: Acero helicosoldado
- Tipo acero: S 275JR
- Altura de cabecera conocida-cota máxima de la balsa: 736 m
- Consumo diario máximo: 24.250,05 m3
- Velocidad máxima permitida en impulsión: 1,6 m/s

El caudal máximo que circula con 4 bombas a nominal es de 2.275,2 m3/h (632 l/s), con lo que corresponderá una sección de funcionamiento de:

S= 0,632 m3/s / 1,6 m/s = 0,395 m2

Con objeto de obtener un resguardo, disminuir los transitorios y las pérdidas de carga en los ramales cuando la tubería actúa desde la balsa de acumulación, se elige el diámetro para la tubería de acero helicosoldado de 30" (762 mm exterior y 749,2 mm interior) y espesor de 6,4 mm con revestimiento flexible.

La velocidad de régimen del agua sería por tanto 1,43 m/s.

3. GOLPE DE ARIETE

Conforme a las características de la instalación, la mayor sobrepresión sobre la misma se produce como consecuencia de la parada de bombas en la tubería de impulsión.

Para impulsiones, se propone la siguiente fórmula para el cálculo de los tiempos de parada de la estación de bombeo:

$$T = C + \frac{K * L * V}{g * Hm}$$, resultando T = 4,06 s

Siendo:

L Longitud de la conducción, 1.801,75 m
V Velocidad de régimen del agua, 1,43 m/s

G Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s^2
Hm Altura manométrica proporcionada por el grupo de bombeo, 96 m
C con valor 1 en función de la pendiente
K con valor 1,12 por longitud de la conducción

La celeridad se calcula conforme a la siguiente expresión:

$$a = \frac{9.900}{\sqrt{48{,}3 + K_c \frac{D_i}{e}}}$$

Siendo:

Kc Coeficiente función del módulo de elasticidad del acero, 0,4761

Di Diámetro interior de la tubería, 749,2 mm

e Espesor de la tubería, 6,4 mm

Resultando el valor de a = 970,62 m/s

Longitud crítica:

$$Lc = \frac{T * a}{2} = 1970{,}36 \text{ m} > 1801{,}75 \text{ m CONDUCCIÓN CORTA}$$

Siendo:

2*L/a = 3,71 s < 4,06 s (al tiempo de parada), nos situaremos en un escenario de CIERRE LENTO,

$$AH = 2 * \frac{L * V}{g * T} = 129{,}52 \text{ mca}$$

Siendo:

AH Sobrepresión debida al golpe de ariete, mca

L Longitud de la tubería, 1801,75 m

V Velocidad de régimen del agua, 1,43 m/s

g Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s^2

T Tiempo de parada, 4,06 s

4. CALCULO MECÁNICO

Las principales comprobaciones que deben de hacerse para la estimación de los tubos de acero, en el caso de conducciones enterradas, son las que se describen a continuación:

Hipótesis I: Estado tensional debido a la acción única de la presión interna.

En la hipótesis de actuación única de la presión interna del agua, debe comprobarse que dicha presión produce un estado tensional inferior al admisible.

Hipótesis II: Deformaciones causadas por la acción de las cargas externas

En lo que se refiere a las acciones externas al tubo, debe comprobarse que la deformación máxima debida a la flexión transversal no supera la admisible. Como deformaciones máximas admisibles suelen admitirse valores entre el 2 y el 5% del diámetro exterior.

Hipótesis III: Pandeo, colapso y abolladura

Ante la actuación conjunta de las cargas externas y de las posibles presiones internas, debe comprobarse que el coeficiente de seguridad C frente al pandeo sea al menos 2,5 o 3 (Manual AWWA M11, apartado 6.3).

En el apéndice nº 2 figuran los cálculos mecánicos efectuados por NOKSEL ESPAÑA,S.A. para la tubería de impulsión.

5. PÉRDIDAS DE CARGA EN LA TUBERÍA DE IMPULSIÓN

Las pérdidas de carga de la tubería serán las primarias debidas al rozamiento en su recorrido y secundarias debidas a los codos, derivaciones y valvulería de que se dota.

<u>PÉRDIDAS DE CARGA PRIMARIAS</u>

El cálculo de las pérdidas de carga primarias se obtiene mediante la ecuación de Darcy Weisbach:

$$Hp = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} = 6{,}27 \text{ m.c.a.}$$

Donde:

Hp Pérdidas de carga primarias, en m.c.a.

f Factor de fricción adimensional, calculado = 0,025

L Longitud del conducto, 1801,75 m

D Diámetro de la sección interior tubería, 0,7492 m

V Velocidad del fluido, 1,43 m/s

g Gravedad, 9,81 m/s2

Para el cálculo de F se ha utilizado el ábaco de Moody, considerándose:

Número de Reynolds calculado, Re = 1071356 (from hydraulic-calculation)
Rugosidad del tubo de acero, E = 0,15 mm (se considera la degradación)
Rugosidad relativa de la tubería, E1= 0,00021

PÉRDIDAS DE CARGA SECUNDARIAS

El cálculo de las pérdidas de carga secundarias tenemos:

Codos: 0,42 (5 unidades)

Válvula:0,65 (1 unidad)

Desagüe: 0.15 (1 unidad)

Te: 0.5 (1 unidad)

Cruce: 0,5 (1 unidad)

Pérdidas totales: 3,90 m.c.a.

PÉRDIDAS DE CARGA TOTALES EN LA TUBERÍA DE IMPULSIÓN

Las pérdidas de carga totales que se tienen en la tubería de impulsión, serán la suma de las pérdidas de carga continuas a lo largo del conducto y las pérdidas de carga localizadas en los accesorios montados en la tubería.

Ht = Hp + Hs = 10,17 m.c.a.

6. CONDICIONES DE INSTALACIÓN DE LA TUBERÍA

La tubería debe instalarse respetando las siguientes condiciones:

1.- Protección contra la corrosión.

2.- En los cálculos mecánicos se ha supuesto la inexistencia de freático. Estás condiciones no se producen en el tramo inicial, en los 160 m iniciales en los que discurre paralela al río Duero y sobre un camino. En esta distancia, la tubería deberá ir necesariamente hormigonada.

3.- La profundidad de instalación se realizará al menos 1,20 m de profundidad del suelo, medido desde la generatriz superior del tubo.

4.- Será necesaria la instalación de medidas antitransitorios. En el apéndice que acompaña al presente anejo "Estudio de golpe de ariete conducciones de agua" realizado por BERMARD EUROPE S.L. para las condiciones preliminares de instalación de la tubería que no se alejan de las finales, se establecen 3 medidas para la protección de la tubería:

- a) Colocación de un calderín BERMAD WW-10000-RM-16-DN200

-b) Medidas antiariete en el colector principal de la estación de bombeo, instalando 4 ventosas trifuncionales para agua limpia con protección frente al golpe de ariete.

-c) Instalación de ventosas trifuncionales en los puntos altos y claves de la tubería DN 150.

7. ESTUDIO DE VENTOSAS

El aire atrapado en las conducciones a presión constituye una fuente de numerosos problemas, que pueden llegar incluso a ser catastróficos para la instalación. El aire se introduce en los sistemas a presión por motivos muy diversos y cuya presencia en cantidades incontroladas puede reducir seriamente su rendimiento, llegando en casos extremos a detener el flujo de agua, bloqueando la tubería.

Un exceso de aire en las conducciones provoca una reducción de la sección de paso del tubo y, por consiguiente, de la capacidad de transporte, lo que incrementa notablemente las pérdidas de carga en la tubería. El exceso de aire puede originar presiones muy elevadas provocando incluso la rotura de la instalación.

Asimismo se producirán situaciones en los que el aire no puede entrar en el sistema mientras éste está vaciándose (operaciones de limpieza, mantenimiento y reparaciones o roturas incontroladas), lo que crea un vacío cuyo resultado puede ser el colapso y aplastamiento de las tuberías.

Así pues, tanto el aire disuelto en el agua que recorre la red de tuberías como el que pueda entrar en el sistema desde el exterior o quedar atrapado en su interior por causas intencionadas (procesos de llenado y vaciado de la conducción, puesta en funcionamiento o interrupción temporal de las instalaciones, etc.) o accidentales (vórtices en la aspiración de las bombas, roturas, liberación de aire disuelto al reducirse la presión, etc.), conlleva a una serie de problemas tales como roturas repetitivas de los tubos, consumo excesivo y disminución del rendimiento de los grupos de bombeo debido al incremento de las pérdidas de carga generadas por la obstrucción parcial de la sección de paso, ruidos y vibraciones en las conducciones, caudales más bajos que los de diseño, desgaste, corrosión y cavitación destructiva de los materiales en el interior de las conducciones y de las partes móviles de los accesorios y elementos instalados, generación de errores de importancia en los medidores instalados, problemas con los filtros al perder su eficacia y, en general, un funcionamiento variable e inesperado que se aleja del punto o rango óptimo de diseño del sistema.

Para evitar estas perturbaciones importantes en el funcionamiento normal de la red debido a la existencia de aire en las tuberías en carga y al efecto de vacío o rotura de la columna de agua, se llevará a cabo el control adecuado y la eliminación del aire, instalándose para ello las correspondientes ventosas con dos objetivos fundamentales:

- Para la ventilación del sistema.
- Como dispositivo de protección frente a un posible golpe de ariete.

Por un lado, como elemento de ventilación de la red, las ventosas tienen básicamente dos funciones:

- Permitir la salida del aire durante el llenado de la tubería o la entrada del mismo en la tubería durante el vaciado o ante una posible rotura de la misma.
- Posibilitar la expulsión del aire liberado durante el funcionamiento normal del sistema, impidiendo que el mismo se acumule en determinadas zonas de la instalación.

Por otro lado, como elemento de protección frente al golpe de ariete, la función principal de la ventosa es:

Evitar las depresiones durante los transitorios, que en caso de ser muy severos, pueden provocar incluso el colapso de la tubería.

En cualquier caso, el aire presente en la instalación (por uno u otro motivo) deberá ser expulsado, lo cual deberá hacerse con sumo cuidado para que, durante este proceso, no se generen golpes de ariete indeseados.

En este sentido, hay que decir que la presencia de ventosas no siempre ofrece la fiabilidad necesaria y puede ocasionar situaciones más problemáticas que las que pretendía evitar. Un diseño o una selección incorrecta, un funcionamiento defectuoso o un emplazamiento que no permita la salida de toda la masa de aire atrapado, pueden ser la causa de un problema que se suponía resuelto; por ello, en los siguientes apartados veremos con detalle la metodología para elegir correctamente una ventosa, lo que conlleva estudiar la clase o tipo de ventosa a instalar, su ubicación o localización en la red y el cálculo de su diámetro correspondiente o tamaño de ventosa.

7. 1. CLASIFICACIÓN DE LAS VENTOSAS A INSTALAR

El tipo de ventosas a instalar en los tramos de conducciones y elementos que integran la red de riego o la impulsión vendrán según la función básica que realiza. De toda la gama existente en el mercado se opta por la instalación de ventosas trifuncionales, que combinan en un solo cuerpo o en dos cuerpos separados, las funciones de las ventosas de efecto automático y las de efecto cinético (que posibilitan la expulsión e impulsión de grandes cantidades de aire), actuando en tres momentos diferentes durante el funcionamiento de la instalación: evacuando el aire de las tuberías en el momento de llenado, purgando pequeñas cantidades de aire cuando la red está presurizada y permitiendo la entrada de aire en el momento de la descarga.

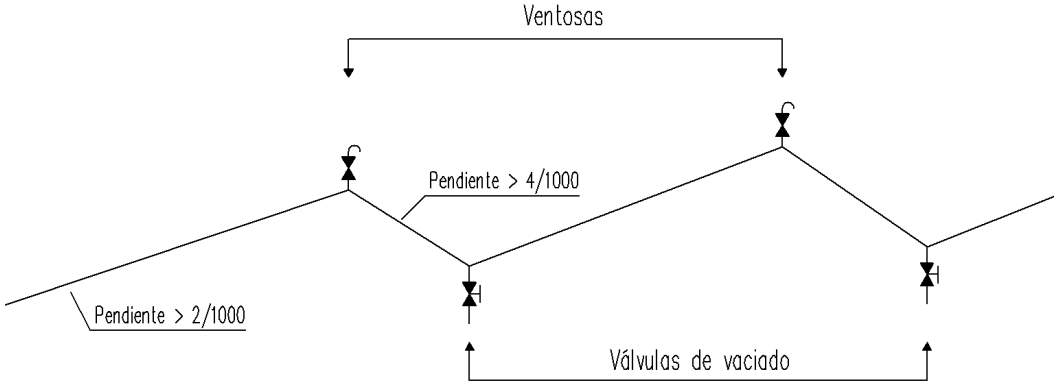
7. 2. UBICACIÓN DE LAS VENTOSAS

La correcta ubicación de las ventosas es de fundamental importancia, pues repercutirá directamente en la eficiencia de operación de éstas y de la conducción en su conjunto. La localización de las ventosas se realiza en función del perfil longitudinal que presenta la instalación, donde se representa los puntos altos y bajos de la conducción.

Por ello, a los efectos de asegurar un transporte adecuado del aire y permitir la acumulación de éste en los puntos altos para su eliminación por medio de las ventosas, así como facilitar el arrastre de los sedimentos hacia los puntos bajos

para su posterior eliminación por los desagües, los perfiles longitudinales de los ramales se proyectan teniendo presente los problemas de la admisión y expulsión de aire.

De esta forma deben evitarse los tramos horizontales, adoptando en lo posible un perfil quebrado o en "diente de sierra" en aquellos ramales de longitud suficiente, con puntos altos y bajos, otorgando una pendiente más pronunciada a los tramos descendentes, a los efectos de facilitar el ascenso del aire hasta el punto alto, ya que dicho ascenso se ve dificultado debido a que debe hacerse en sentido opuesto a la dirección del flujo. Por este motivo se proyectan las pendientes ascendentes para que no sean menores del 0,25% y las descendentes no sean inferiores al 0,4%.



Si adoptamos esta altimetría con ascensos de poca pendiente y descensos de mayor pendiente se favorece que el aire avance hasta los puntos altos y permanezca allí, desde donde podrá evacuarse utilizando para ello las ventosas. De esta forma se instalan ventosas trifuncionales en todos los puntos altos, mientras que en algunos puntos bajos se colocan los desagües.

Un error frecuente constituye el suponer que la ubicación de las ventosas debe limitarse a los puntos altos de la conducción, pudiendo conducir este criterio a la ruina de la instalación. Por ello, no se debe limitar a colocar ventosas sólo en los puntos altos, sino que también se estudia la necesidad de colocarlas en otros puntos del sistema, siguiendo los siguientes criterios:

- Cuando el perfil de la conducción no presenta puntos altos y bajos bien definidos o se tienen tramos inclinados u horizontales rectilíneos y largos, deberán colocarse ventosas distribuidas a distancias más o menos iguales, del orden de 500 a 1.200 metros entre ellas.
- En los puntos en los que se produzcan cambios bruscos de pendiente de la tubería (incrementos de la pendiente en tramos descendentes, decrementos de la pendiente en tramos ascendentes), no sólo respecto a la horizontal sino también respecto al gradiente hidráulico de la instalación así como también

en aquellos puntos donde la tubería se eleve por encima de la superficie del terreno o para sortear un accidente geográfico.

- Al inicio de los ramales que empiezan con pendiente descendiente y tengan una longitud considerable.
- Al final de los ramales que terminan con pendiente ascendente y tengan una longitud considerable.
- Válvulas de seccionamiento: aguas abajo en los descensos y aguas arriba en los ascensos.
- En los puntos en los que cambie el diámetro de la tubería o se produzcan estrechamientos bruscos de sección.
- En las proximidades de contadores de agua y aparatos de medida.
- A la salida de grupos de bombeo.
- Aguas abajo de las válvulas reductoras de presión.
- Aguas abajo de las válvulas de sobrevelocidad.
- En las proximidades de sistemas de filtrado.
- A la salida de la balsa si la conducción es descendente y a la entrada si es ascendente.

Resumiendo, en todos aquellos puntos de la instalación que sean susceptibles de almacenar aire se han colocado ventosas para su eliminación evitando así una potencial fuente de problemas.

7. 3. DIMENSIONAMIENTO DE LAS VENTOSAS

El correcto dimensionado de las ventosas debe realizarse de acuerdo a las prestaciones requeridas y siempre teniendo en cuenta el diámetro del orificio de salida de las mismas.

En movimiento permanente del agua, a una ventosa se le deben exigir una serie de características que garanticen el normal funcionamiento de la instalación:

- Gran capacidad de expulsión de aire durante el llenado de la conducción.
- Gran capacidad de admisión de aire durante el vaciado o drenaje de la misma o ante una rotura de la conducción.
- Capacidad discreta de eliminación del aire acumulado bajo presión en los puntos altos.

Durante un transitorio hidráulico, a las ventosas se les debe exigir las siguientes prestaciones:

- Gran capacidad de admisión de aire para evitar la generación de presiones negativas en puntos críticos.

- Capacidad discreta de eliminación de aire, para evitar que las posibles bolsas de aire creadas generen picos de presión muy elevados.

Como puede deducirse, las prestaciones exigidas durante el transitorio a las ventosas pueden ser incompatibles con las exigidas durante el normal funcionamiento.

Respecto a la modelización matemática para determinar las ecuaciones características que definen el funcionamiento de las ventosas y entender así su comportamiento, al ser el aire un fluido compresible cuyos fenómenos que se producen en su movimiento son más complejos que si fuera un fluido incompresible (agua), suele hacerse una analogía entre el flujo de aire a través de una ventosa y el flujo isoentrópico en toberas (Wylie y Streeter, 1982; Chaudhry, 1987).

7.3.1. DIMENSIONAMIENTO DE PURGADORES

Las ventosas de pequeño orificio o purgadores automáticos están diseñadas para eliminar las pequeñas cantidades de aire que se van almacenando en determinados puntos de la instalación durante el funcionamiento normal de la misma.

A la hora de dimensionar el purgador, en primer lugar, se debe determinar la presión de trabajo. Esta presión será la que exista en la tubería en el punto donde se va a colocar el purgador y coincidirá con la presión diferencial puesto que la presión exterior es la atmosférica.

Seguidamente se estima el caudal máximo de aire a evacuar. Normalmente, el caudal que el purgador deberá evacuar será como máximo la cantidad total de aire disuelto en el agua a la temperatura de trabajo, lo cual supone que todo el aire disuelto se libera, con lo que estaremos del lado de la seguridad.

Este caudal a purgar se desconoce de antemano y para estimarlo, una muy buena aproximación es considerar una cantidad de aire disuelta en el agua equivalente al 2% del caudal de agua transportado por la conducción, ya que es aproximadamente esta cantidad la que corresponde al aire disuelto en agua para una temperatura de unos 15 ºC.

Los purgadores funcionan como una ventosa en fase de expulsión, con la diferencia que habitualmente trabajan en la denominada zona sónica. Dicha zona sónica acontece cuando la diferencia de presiones entre el interior y el exterior es superior a 0,9 bares, es decir, prácticamente siempre. En estas condiciones, las características de expulsión de aire vienen dadas por la siguiente ecuación:

$$Q = cte \cdot A_{exp} \cdot p_t^*$$

sustituyendo valores

$$Q\,(Nm^3/min) = 0{,}007912 \cdot d(mm)^2 \cdot p_t^*(bar)$$

En la expresión anterior Q es el caudal máximo de aire medido como caudal volumétrico (Nm^3/min) en condiciones de referencia (normalmente presión atmosférica y temperatura de 20 ºC); d es el diámetro del orificio (mm) y es la presión absoluta del aire en el interior de la conducción en bares.

Una vez conocido el caudal máximo de aire a evacuar y la presión de trabajo en el interior de la tubería, se determina el diámetro mínimo del orificio del purgador necesario para cumplir con las especificaciones impuestas (a mayor presión de trabajo, menor diámetro de orificio), simplemente despejando el diámetro de la ecuación anterior:

$$d\,(\mathrm{mm}) = \sqrt{\frac{Q\,(\mathrm{Nm^3/min})}{0{,}007912 \cdot p_t^*(bar)}}$$

Resumiendo, los parámetros necesarios para elegir el purgador más adecuado son la presión de trabajo y la cantidad de aire que debe expulsarse, para las condiciones más pesimistas o de máxima demanda. A partir de estos valores se dimensionará el orificio de salida.

La siguiente tabla muestra un resumen de los diámetros de purgadores que se pueden instalar en la red de las conducciones proyectadas, calculados según la metodología descrita. Como se observa de la tabla, el caudal de agua de partida para calcular el de purga se corresponde con el máximo teórico que puede circular por un tubo de cualquier diámetro si circula el agua a una velocidad de 2,0 m/s, rango de velocidad máxima con la que se ha diseñado la red de riego.

Respecto a la presión nominal, la mayoría de los tubos son de PN 16. Así pues, para estar del lado de la seguridad, se calcularán todos los purgadores para esta última presión nominal, exigiéndose instalar purgadores con las siguientes capacidades mínimas de venteo y diámetro mínimo de orificio de purga.

DN	Velocidad (m/s)	Q tubería (l/s)	Q purga (l/s)	P trabajo (bar)	Q purga (Nm^3/min)	Diámetro orificio purga (mm)
140	2,0	30,79	0,62	16	0,037	0,54
160	2,0	40,21	0,80	16	0,048	0,62
200	2,0	62,83	1,26	16	0,076	0,77
225	2,0	79,52	1,59	16	0,095	0,87
250	2,0	98,17	1,96	16	0,117	0,96
315	2,0	155,86	3,12	16	0,187	1,21
400	2,0	251,33	5,03	16	0,302	1,54
450	2,0	318,09	6,36	16	0,381	1,73
500	2,0	392,70	7,85	16	0,471	1,93
600	2,0	562,49	11,32	16	0,678	2,31
762	2,0	912,08	18,24	16	1,094	2,94

Con el resultado del diámetro se procede a la selección del purgador necesario para el punto calculado. No obstante, los cálculos anteriores también pueden realizarse consultando las gráficas comerciales suministradas por los fabricantes, que relacionan la presión en el interior de la conducción con el caudal de aire a evacuar, eligiendo de la gama de fabricantes, el purgador que más se acerque a las condiciones de proyecto.

7.3.2. DIMENSIONAMIENTO VENTOSAS DE GRAN ORIFICIO

Obviamente, las tuberías se encuentran totalmente vacías cuando se instalan por primera vez, de manera que deberán llenarse de agua. Por otra parte, para realizar trabajos de mantenimiento, limpieza o reparaciones, las tuberías deberán vaciarse y, una vez terminados los trabajos, deberán llenarse de nuevo.

Así pues, el llenado y vaciado de las conducciones son operaciones habituales que se repiten periódicamente y que deben estar previstas en la etapa del diseño de las ventosas para evitar problemas posteriores. Durante el proceso de llenado debe permitirse la salida del aire para evitar sobrepresiones y durante el vaciado debe dejarse entrar el aire para evitar depresiones.

Puesto que tanto el llenado de la tubería como el vaciado por los desagües es una acción controlada, la situación más peligrosa es un vaciado no controlado provocado por la rotura de la tubería. Por ello, se analizará por separado el dimensionado de las ventosas considerando las siguientes hipótesis de trabajo:

- Llenado de la tubería
- Vaciado de la tubería por los desagües
- Posible rotura de la tubería

<u>Dimensionado de la ventosa para el llenado de la conducción (fase de expulsión)</u>

La operación de llenado de una conducción supone la expulsión del aire a la atmósfera y su sustitución por agua, produciéndose fundamentalmente a través de las ventosas distribuidas a lo largo de su trazado. Éstas deben estar colocadas en todos aquellos puntos donde pueda quedar aire atrapado durante el llenado.

El dimensionado correcto de la ventosa en la fase de expulsión de forma cualitativa es muy sencillo de entender. Durante el proceso de llenado, el aire que ocupa la tubería debe ser evacuado a la atmósfera a medida que el agua avanza por el interior de la conducción. Esto debe hacerse controlada y eficazmente para evitar sobrepresiones y golpes de ariete, de forma que el agua pueda llenar completamente la conducción sin dejar aire atrapado.

Si el orificio de salida de la ventosa es demasiado pequeño, la ventosa no será capaz de expulsar la cantidad suficiente de aire y éste se comprimirá dentro de la tubería dando lugar a importantes sobrepresiones que pueden ser perjudiciales para la instalación. Por el contrario, si el orifico de la ventosa es demasiado grande, el aire se expulsa con mucha rapidez y, en consecuencia, la

columna de agua alcanza una gran velocidad. Cuando el agua llega a la posición de la ventosa, el flotador cierra ésta bruscamente generando un golpe de ariete que puede ser muy peligroso.

En consecuencia, la elección del tamaño de la ventosa a colocar para que el funcionamiento durante el proceso de llenado sea el correcto se realizará con sumo cuidado, de forma que se permita la salida del aire pero limitando la velocidad del agua a un valor que produzca un golpe de ariete aceptable cuando cierre.

Se trata, pues, de determinar el caudal máximo de agua de llenado tal que, al llegar el agua a la ventosa y cerrarse ésta, el golpe de ariete producido por este cierre en la tubería de conexión, y que se transmite a la tubería principal a través de la columna de agua que la llena, no origine en esta última una sobrepresión que pueda llegar a romperla.

El caudal de llenado de la tubería (Q_{ll}) será el correspondiente al de una velocidad de llenado de 0,4 m/s y, por lo tanto, será el mismo que el caudal volumétrico de aire evacuado en las condiciones del interior de la tubería, o sea, a la presión P_{exp} del orden de 1,5 m.c.a. Este caudal de aire se deberá pasar a condiciones normales, $Q_{aire\ atm}$, evidentemente a presión atmosférica P_{atm}, que es el que se indica en las curvas de funcionamiento de las ventosas dadas por los fabricantes. Se utilizará la siguiente expresión:

$$Q_{\text{aire atm}} = \frac{P^*_{\text{exp}} \cdot Q_{ll}}{P^*_{atm}}$$

donde P* indica presión absoluta.

En los tubos del presente proyecto, con diámetros nominales de hasta 762 mm, se instalará una única ventosa.

Todo lo anterior está condicionado a mantener un caudal de agua de llenado (Q_{ll}) que nunca supere los valores considerados. Ello puede realizarse de forma controlada mediante la estrangulación del flujo del agua con una válvula manual situada al principio de la tubería (a la salida de la bomba o de la balsa).

Para determinar el diámetro nominal de la ventosa se deberá hacer uso de la información de catálogo dada por los fabricantes. Así, tomamos los siguientes valores de un fabricante para una presión interna de 1,5 m.c.a.

DN Ventosa	Q_{salida} (l/s)
25 mm	42
50 mm	152
80 mm	424
100 mm	622

DN Ventosa	Q_{salida} (l/s)
150 mm	1.414
200 mm	2.829

A continuación, elaboramos una tabla donde se indica, para cada diámetro de tubo y con la velocidad de llenado de 0,4 m/s, el caudal de llenado del tubo que le corresponde con esta velocidad, el caudal de salida que le correspondería a la ventosa y la transformación a caudal a evacuar por la ventosa para la presión de 1,5 m.c.a. Finalmente y conforme a los datos suministrado por el fabricante, se indica el diámetro de ventosa que le corresponde a cada tubo.

DN tubería	Velocidad llenado (m/s)	$Q_{llenado}$ tubería (l/s)	$Q_{expulsión}$ ventosa (l/s)	P_{exp} (m.c.a.)	P^*_{exp} (m.c.a.)	P^*_{atm} (m.c.a.)	$Q_{aire\ atm}$ (l/s)	DN ventosa (mm)
140	0,4	6	6	1,5	11,5	10	7	25
160	0,4	8	8	1,5	11,5	10	9	25
200	0,4	13	13	1,5	11,5	10	14	25
225	0,4	16	16	1,5	11,5	10	18	25
250	0,4	20	20	1,5	11,5	10	23	25
315	0,4	31	31	1,5	11,5	10	36	25
400	0,4	50	50	1,5	11,5	10	58	50
450	0,4	64	64	1,5	11,5	10	73	50
500	0,4	79	79	1,5	11,5	10	90	50
600	0,4	113	113	1,5	11,5	10	130	50
762	0,4	183	183	1,5	11,5	10	210	80

Dimensionado de la ventosa para el vaciado de la conducción (fase de admisión)

El problema de la admisión de aire en las ventosas es ligeramente más complejo que el de llenado. La razón radica en que dicho proceso de vaciado puede acontecer de manera programada, debido a una parada proyectada de la instalación, o de manera involuntaria al producirse una determinada rotura en el sistema.

En el caso de que la admisión de aire esté originada por una parada voluntaria de la instalación, el caudal de aire admitido está controlado por la velocidad a la que se produce el vaciado de la conducción, mediante los correspondientes desagües.

Por el contrario, si la admisión de aire está originada por una rotura de la conducción, el aire admitido depende de las características de la rotura. Sin duda es el caso de la rotura de la conducción el acontecimiento que genera mayores caudales y depresiones en la instalación.

Por este motivo, de seguido se realiza el dimensionado de las ventosas en fase de admisión con dos hipótesis de trabajo: vaciado de la conducción por los desagües y rotura franca.

Dimensionado de la ventosa por vaciado controlado de la conducción

En cuanto a la operación de vaciado de una conducción, ésta se realiza mediante los desagües colocados en los puntos bajos del perfil junto con las ventosas de gran orificio localizadas en los puntos altos de la conducción.

Al abrirse una válvula de vaciado, aguas abajo de la misma se tiene la presión atmosférica y, si en la tubería no se admitiese aire atmosférico, ésta, no sólo no se vaciaría completamente, sino que se generarían depresiones en la tubería que podrían ocasionar el colapso de la misma.

Por este motivo, la operación de vaciado de la conducción exige la colocación de ventosas que permita la entrada del aire para llenar el vacío dejado por el agua y evitar la separación de la columna líquida, la cual puede dar lugar a la formación de depresiones que podrían ser tan dañina como la sobrepresión, produciendo el colapso de la tubería. Lógicamente, el caudal de agua que sale por las válvulas de vaciado debe ser repuesto con idéntico caudal de aire entrando a través de las ventosas de gran orificio.

Así pues, el dimensionado de la ventosa de gran orificio para el vaciado de la conducción deberá realizarse de tal forma que el orificio permita la entrada suficiente de aire para que no se produzca una depresión importante en el interior de la tubería.

Para dimensionar las ventosas de admisión de aire es necesario conocer cuáles son las depresiones máximas que puede soportar la tubería afectada por el vaciado en cada tramo. Como dato razonable, a priori, se elige 3,5 m.c.a. de depresión máxima admisible.

Respecto al caudal de diseño en la operación de vaciado, es conveniente calcular el caudal máximo que, por gravedad, puede fluir hacia la correspondiente válvula de vaciado completamente abierta. Este caudal máximo de agua deberá ser igual al caudal de aire que entra por todas las válvulas de admisión de aire que trabajen simultáneamente en el tramo en cuestión.

Como para una serie de diámetros continuos se colocará el mismo diámetro de desagüe (80 mm y 200 mm), el caudal que teóricamente circula por dichas conducciones será el mismo e igual al que circula por la válvula del desagüe. Dicho caudal de vaciado de la conducción principal se obtiene con una velocidad de vaciado máxima de 0,4 m/s.

Este caudal hay que pasarlo a condiciones normales para determinar el diámetro de la ventosa, mediante la siguiente expresión:

$$Q_{\text{aire atm}} = \frac{P^*_{\text{adm}} \cdot Q_{adm}}{P^*_{atm}}$$

donde P* indica presión absoluta. Respecto a la presión de admisión (P^*_{adm}), se estima una máxima depresión de -3,5 m.c.a. que puede aguantar la tubería, resultando un valor absoluto de:

$$P^*_{adm} = -3,5 + 16 = 12,5 \text{ m.c.a.}$$

Con la diferencia de presión establecida (-3,5 m.c.a.) y con el caudal de aire que debe admitir la ventosa para suplir el caudal de agua que sale por la válvula de vaciado, se selecciona la ventosa más adecuada respecto a los datos que suministra los fabricantes.

De esta forma, haciendo uso de la información de un catálogo dada por un fabricante de ventosas para una presión interna de -3,5 m.c.a., se obtiene el diámetro nominal de ventosa correspondiente.

DN Ventosa	$Q_{entrada}$ (l/s)
25 mm	71
50 mm	311
80 mm	650
100 mm	877
150 mm	2.263
200 mm	3.678
250 mm	5.941
300 mm	8.488
350 mm	11.600
400 mm	16.409

En función de los desagües seleccionados y del caudal que arrojan dichos desagües, se construye la siguiente tabla.

DN tubería	Velocidad vaciado (m/s)	$Q_{vaciado}$ tubería (l/s)	DN desagüe (mm)	$Q_{admisión}$ ventosa (l/s)	P_{exp} (m.c.a.)	$Q_{aire\ atm}$ (l/s)	DN ventosa (mm)
140	0,4	6	80	6	-3,5	8	25
160	0,4	8	80	8	-3,5	10	25
200	0,4	13	80	13	-3,5	8	25
225	0,4	16	80	16	-3,5	16	25
250	0,4	20	80	20	-3,5	25	25
315	0,4	31	80	31	-3,5	39	25
400	0,4	50	200	50	-3,5	62	25
450	0,4	64	200	64	-3,5	80	50
500	0,4	79	200	79	-3,5	99	50
600	0,4	113	200	113	-3,5	177	50
762	0,4	183	200	183	-3,5	229	50

Naturalmente, la propia válvula de vaciado debe dimensionarse de acuerdo con la carga hidrostática que actúa sobre ella, pero de tal forma que no descargue

caudales demasiados elevados, lo cual obligaría a disponer de ventosas con una capacidad de admisión desmesurada.

Dimensionado de la ventosa por rotura de la conducción

En el caso de suponer una rotura franca de la instalación, se dispone de la totalidad de carga entre la ventosa y el punto de la rotura como energía disponible. En este caso, a partir de la pendiente hidráulica disponible y de las características de la instalación puede determinarse el caudal máximo que puede salir por rotura utilizando cualquiera de las fórmulas comunes.

Se emplea la fórmula de Hazen-Williams, con un coeficiente C del material de 140 y mayorando las pérdidas continuas un 5% para tener en cuenta las singularidades.

$$\Delta H = 1{,}05 \times \frac{10{,}62 \times L \times Q^{1{,}85}}{140^{1{,}85} \times D^{4{,}87}} \quad \Rightarrow \quad Q_{aire}(m^3/s) = 38 \times \sqrt[1{,}85]{\frac{\Delta H}{L} \times D(m)^{4{,}87}}$$

$$Q_{aire}(l/s) = 38.000 \cdot \sqrt[1{,}85]{Pendiente \times D(m)^{4{,}87}}$$

Dicho caudal máximo es el que se adopta como caudal máximo de aire admitido (Q_{adm}) por la ventosa por encima del punto de rotura.

El principal inconveniente que se presenta a la hora de realizar el cálculo del caudal de rotura es, establecer la pendiente hidráulica que hay que fijar en la fórmula, pues si asumimos la máxima pendiente existente en toda la instalación, estaríamos sobredimensionando todas las ventosas para todos los diámetros de tuberías y en todos los tramos de la red.

Además, el caudal de rotura depende en dónde se produzca la rotura y del tipo de rotura (franca o parcial), ya que el caudal que arroja un tubo de un mismo diámetro varía si desde el punto de carga de la instalación (la balsa o el bombeo) hasta el punto de rotura existe mucha o poca distancia.

Dicho esto, se ha establecido una pendiente media para todas las tuberías del 1% (0,01 m/m).

Otro inconveniente que presenta la estimación del caudal máximo admitido mediante la expresión anterior es que los valores que se obtienen normalmente son muy elevados.

Este caudal hay que pasarlo a condiciones normales para determinar el diámetro de la ventosa, mediante la siguiente expresión:

$$\mathrm{Q}_{\text{aire atm}} = \frac{\mathrm{P}^*_{\text{adm}} \cdot Q_{adm}}{P^*_{atm}}$$

donde P* indica presión absoluta. Respecto a la presión de admisión (P^*_{adm}), se estima una máxima depresión de -5,5 m.c.a. que puede aguantar la tubería, resultando un valor absoluto de:

$$P^*_{adm} = -3,5 + 16 = 12,5 \text{ m.c.a.}$$

Con la diferencia de presión establecida (-3,5 m.c.a.) y con el caudal de aire que debe admitir la ventosa para suplir el caudal de agua que sale por la rotura, se selecciona la ventosa más adecuada respecto a los datos que suministra los fabricantes.

A continuación elaboramos una tabla donde se indica, para cada diámetro de tubo y con las pendientes establecidas, el caudal por rotura franca del tubo que le corresponde con esta pendiente y la transformación a caudal a admitir por la ventosa para la presión de -3,5 m.c.a. Finalmente y conforme a los datos suministrado por el fabricante (misma tabla que para el vaciado por desagüe), se indica el diámetro de ventosa que le corresponde a cada tubo.

DN tubería	Pendiente promedio (m/m)	$Q_{rotura\ frsanca}$ (l/s)	Q_{adm} ventosa (l/s)	P_{exp} (m.c.a.)	$Q_{aire\ atm}$ (l/s)	DN ventosa (mm)
140	0,01	18	18	-3,5	23	25
160	0,01	25	25	-3,5	32	25
200	0,01	46	46	-3,5	58	25
225	0,01	63	63	-3,5	78	50
250	0,01	82	82	-3,5	102	50
315	0,01	151	151	-3,5	189	50
400	0,01	283	283	-3,5	184	50
450	0,01	385	385	-3,5	481	50
500	0,01	508	508	-3,5	635	80
600	0,01	822	822	-3,5	1028	150
762	0.01	1433	1433	-3,5	1791	150

Como resumen de lo expuesto anteriormente, la metodología de cálculo a seguir es:

- Determinar el diámetro de las ventosas a colocar para expulsar el aire durante el llenado de la conducción. El caudal de llenado es el valor que hace que la velocidad del agua en la conducción principal sea de 0,4 m/s; y elegir la ventosa más adecuada para que expulse el caudal necesario con la restricción de una tener presión máxima del aire en el interior de la tubería (en contacto con la ventosa) de 1,5 m.c.a.
- Determinar el diámetro de la ventosa para el vaciado controlado de la conducción mediante los correspondientes desagües, para un caudal de vaciado de la conducción principal obtenido con una velocidad de vaciado máxima de 0,4 m/s y una depresión en el interior de la tubería de -3,5 m.c.a.
- Determinar el tamaño de la ventosa para el vaciado por rotura y una depresión de -3,5 m.c.a. en el interior de la tubería.

- Calculados los caudales de vaciado y llenado se dimensiona la ventosa en cada caso y se escoge el diámetro nominal de la ventosa en el caso más desfavorable.

A continuación se presenta una tabla indicando los tamaños de ventosas que han salido para los tres casos estudiados (llenado de la conducción, vaciado controlado y rotura), señalando la última columna el diámetro de ventosa escogido, según el caso más desfavorable.

DN tubería	DN llenado (mm)	DN vaciado controlado (mm)	DN rotura (mm)	DN Ventosa a instalar (mm)
140	25	25	25	50
160	25	25	25	50
200	25	25	25	50
225	25	25	50	50
250	25	25	50	50
315	25	25	50	50
400	50	25	50	50
450	50	50	50	80
500	50	50	80	80
600	50	50	150	150
762	80	50	150	150

APENDICE 1 ESTUDIO DE GOLPE DE ARIETE CONDUCCIÓN DE AGUA

APENDICE 2 CÁLCULOS MECÁNICOS DE LA TUBERÍA