

NOTAS SOBRE CALCULO DE SIFONES (*)

Por LUIS TORRENT

Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Aborda el autor en este trabajo el estudio del régimen transitorio en sifones intercalados entre tramos de canal a lámina libre. Con hipótesis simplificadoras, asimila la puesta en carga de los sifones a la oscilación de masa de una gran chimenea de equilibrio formada por el remanso del canal antes del sifón. Por último, hace algunas recomendaciones de orden práctico sobre los resguardos de las conducciones.

El "trilema".

A todo proyectista de canales, se le ha presentado alguna vez la necesidad de salvar una depresión geográfica intercalada en el trazado de la conducción en estudio. Son tres los caminos que se pueden seguir para resolver este típico problema: rodeo, acueducto o sifón.

La solución del "trilema" —según expresión feliz de un conocido chiste— se adopta, generalmente, por motivos económicos: coste versus cota, valorado esta última en términos energéticos o de superficie dominada, según se trate de un canal con finalidad hidroeléctrica o de una arteria del riego. Pero hay también otro aspecto que con frecuencia influye, más o menos abiertamente, en la elección del proyectista: la complicación del régimen hidráulico. Un rodeo del canal, por muy costoso que sea, no altera el régimen de los tramos inmediatos; un acueducto representa, a lo sumo, dos transiciones entre regímenes permanentes; pero intercalar un conducto en presión entre dos cauces a lámina libre, requiere un estudio riguroso del régimen hidráulico del canal.

El régimen transitorio.

Uno de los aspectos delicados del proyecto de un sifón, es el análisis del régimen transitorio o de "puesta en régimen" del mismo. Durante

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de mayo de 1970.

las interrupciones de servicio, el canal se vacía por su extremidad inferior; pero el sifón queda lleno casi en su totalidad. Al reanudarse la circulación del agua, la masa contenida en la tubería precisa un tiempo, generalmente largo, para adquirir la velocidad de régimen. Se producirá, pues, una acumulación de agua a la entrada del sifón, sobreelevándose el nivel en el tramo de canal anterior. Al aumentar la carga en la cabeza de la tubería, al cabo de un tiempo, la velocidad del agua será superior a la correspondiente al régimen, decreciendo después lentamente, conforme disminuye el gradiente de niveles entre la entrada y la salida.

Este proceso crea unas oscilaciones de caudales y de niveles en los tramos inmediatos al sifón, cuyo estudio, siquiera muy simplificado, constituye el objeto de estas notas.

Simplificaciones.

La primera simplificación que introduciremos en el estudio del régimen transitorio se refiere a la forma en que se presentan los caudales a la entrada del sifón. Creemos innecesario llevar a cabo un análisis de la onda de llenado del canal; de la configuración del frente de avance, etcétera para nuestro fin, ya que el tiempo de puesta en régimen del sifón suele ser de un orden muy superior al decalaje entre la onda de avance y la llegada del caudal pleno. En nuestros cálculos supondremos que el caudal se presenta de golpe, en frente abrupto, a la entrada del sifón, lo cual

es, en todo caso, una hipótesis más pesimista que la realidad. Este caudal llenará en un tiempo muy breve —y que, en principio, supondremos nulo— la rama superior del sifón y la cabeza de entrada hasta el nivel del tirante de agua en el canal. El instante cero de nuestro cálculo corresponde a ese momento, a partir del cual se inicia la sobreelevación o remanso en el canal. El sifón, que hasta ahora hemos supuesto “taponado” por el agua en reposo, empieza a fluir.

Otra simplificación, también del lado de la seguridad, que haremos en estas notas, es la de suponer que el agua a la salida del sifón adquiere el nivel del régimen correspondiente al caudal que sale en cada momento.

Cálculos auxiliares.

Los cálculos auxiliares para estudiar la puesta en régimen del sifón son, fundamentalmente, los de la curva de remanso del canal para el caudal nominal y, a partir de ella, los del volumen de almacenamiento del remanso. Cuando el remanso es libre, es decir, si puede desarrollarse en toda su longitud, el cálculo del almacenamiento es inmediato, aunque un tanto laborioso para canal no rectangular; si, por el contrario, algún obstáculo anterior (por ejemplo, otro sifón) limita la zona remansada, se obtendrá por diferencia entre dos curvas.

Para hallar la curva de remanso utilizaremos la conocida fórmula

$$\Delta x = \frac{Y_2 - Y_1 + V_2^2/2g - V_1^2/2g}{S_0 - S_f} \quad (1)$$

calculando las longitudes parciales a partir de valores prefijados del calado, que iremos aumentando paulatinamente (por ejemplo, de centímetro en centímetro). Obtenidos los volúmenes de almacenamiento correspondientes, podemos trazar una curva de “sobreelevación en la cabeza del sifón-volúmenes retenidos”, de la que se deduce que el canal, en su remanso, es equivalente a un depósito de gran sección horizontal que, en primera aproximación, puede suponerse constante, o variable linealmente con la altura.

Conocida también la ley de caudales-calados a la salida del sifón, podemos establecer la s

ecuaciones de cantidad de movimiento y de continuidad del sistema

$$\left. \begin{aligned} \frac{L}{g} \cdot \frac{dw}{dt} &= Z \pm p w^2 \\ f w + F \frac{dZ}{dt} &= Q \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

en la que

L = longitud del sifón (m.).

g = aceleración de la gravedad (m./seg.²).

w = velocidad del agua en el sifón (m/seg.).

t = tiempo (seg.).

Z = diferencia de niveles entre la entrada y la salida del sifón (m.).

p = coeficiente de pérdida de carga en el sifón.

f = sección transversal del sifón (m.²).

F = sección del “depósito de remanso” correspondiente a la sobreelevación de entrada (m.²).

Q = caudal de régimen (m.³/seg.).

Proceso de cálculo.

Las ecuaciones (2) son idénticas a las del cálculo de oscilación de masa en chimeneas de equilibrio. Es aplicable, por tanto, el mismo método de integración por diferencias finitas que se utiliza en aquéllas.

Se obtiene

$$\left. \begin{aligned} w_{i+1} &= \frac{\left\{ \frac{L}{g \Delta t} - \frac{f \Delta t}{4F} \right\} w_i + Z_i + \frac{Q \Delta t}{2F}}{\frac{L}{g \Delta t} + \frac{f \Delta t}{4F} + p w_i} \\ \Delta Z_i &= \frac{Q \Delta t}{F} - \frac{f \Delta t}{2F} (w_i + w_{i+1}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

en las que

$$Z_i = \sum \Delta Z_i + d + Y_0 - C_i$$

siendo

d = desnivel en metros entre los tramos de canal anterior y posterior al sifón.

Y_0 = calado teórico del caudal de régimen (m.).

C_i = calado instantáneo a la salida del sifón —deducido de la curva niveles— caudales (m.).

Si para los valores de F y C_i se asimilan leyes sencillas de variación —que pueden ser rectilíneas para el primero y parabólicas para el se-

gundo—, las fórmulas anteriores son fácilmente calculables con ordenador, y permiten conocer el máximo de sobreelevación, el máximo caudal subsiguiente a dicha sobreelevación y el período de oscilación del sistema.

Caudales parciales.

Entre el sifón esquemático supuesto en los cálculos que acabamos de presentar y el realmente proyectado o construido, existirán diferencias más o menos acusadas, que pueden llevar a discrepancias de resultados teóricos respecto a los verdaderos.

Así, por ejemplo, si la rama anterior del sifón es de suave pendiente, el tiempo de llenado de la misma no será despreciable, como hemos supuesto, y por tanto, en el instante que hemos considerado como inicial, existirá ya una apreciable *velocidad del agua de la tubería*, y la *sobre elevación en la entrada del sifón* será menor que la que se obtiene por el cálculo.

Este punto tiene particular importancia cuando se estudia la circulación de caudales parciales, los cuales producen una sobre elevación menor que la del caudal total, pero crean, en cambio, aguas abajo del sifón, oscilaciones de nivel más acusadas que las originadas por aquél.

La causa de esta aparente anomalía se encuentra en que el sifón, diseñado para el caudal máximo, supone un escalón piezométrico para caudales menores; durante la puesta en régimen, llega a producirse un gradiente de niveles de entrada y salida muy superior al necesario (más del cuádruple, si circula la mitad del caudal) y, por consiguiente, la masa de agua contenida en el sifón adquiere velocidades mucho más eleva-

das que en el régimen correspondiente, decreciendo a continuación, etc.

Para el estudio de estas oscilaciones con caudal parcial, puede resultar conveniente tener en cuenta la fase de llenado de la rama anterior del sifón, suponiéndola de pendiente uniforme y, por tanto, de sección horizontal constante, que se introduce en el cálculo del movimiento de masa como sección inicial de la chimenea de equilibrio equivalente.

El resguardo.

En todo proyecto de sifón se prevé un resguardo de nivel para tener en cuenta posibles errores de apreciación de pérdidas de carga, rugosidad de las tuberías, juntas, cambios de dirección, etc. Por consiguiente, el caudal nominal del sifón es inferior al máximo que podría transportar la conducción agotando el resguardo. En funcionamiento normal estará, pues, trabajando a "caudal parcial", con los problemas de puesta en régimen que acabamos de mencionar.

El proyectista —que hemos visto al comienzo de estas notas enfrentado con un "trilema"— se encuentra ahora ante un dilema (1): si deja poco resguardo, se expone a que el sifón no admita los caudales nominales; si proyecta un resguardo amplio, provoca unas oscilaciones de caudal importantes durante la fase de llenado del canal, que pueden incluso producir vertidos parciales por las almenaras de la conducción.

Conseguir el difícil equilibrio entre estos dos extremos debe ser una de las metas del proyectista de sifones.

(1) Total: un "hexalema".