

«De profundis»^(*)

Por LUIS TORRENT RODRIGUEZ

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Se estudia en estas notas el dimensionamiento de los desagües de los embalses para lograr reducir al mínimo las vibraciones de los conductos, de forma que la mayor parte de la energía se disipe fuera de la estructura, bien por lanzamiento del agua, bien mediante cuencos de amortiguación. Se dan las fórmulas que permiten calcular el diámetro óptimo de la válvula extrema del desagüe, en función del coeficiente de pérdidas de carga de la conducción y del coeficiente característico de dicho elemento final de obturación. La máxima eficacia del desagüe que produce mínimas vibraciones, se obtiene en el punto de enlace entre los regímenes «estable» e «inestable»; es decir, en el extremo de la «rama turbinable» del desagüe; en la que la potencia del chorro crece al aumentar el caudal.

I. El desagüe de un gran caudal por un conducto de alta presión es un espectáculo impresionante, tanto si el agua sale en forma de grueso chorro que se va desflecando a lo largo de su trayectoria, como cuando se abre en abanico de espumas blancas desde la boca de salida. El espectador se siente empequeñecido ante el despliegue de tan enorme potencia y ensordecido por el fragor de tanta energía fluvente.

Sin embargo, el espectador no está contemplando más que la porción externa del proceso energético que se desarrolla en el desagüe, puesto que una gran parte de la potencia hidráulica se ha consumido ya en la circulación del agua por el conducto y a su paso por la válvula final.

A este respecto, se puede plantear un dilema (**) al proyectar un desagüe en presión: ¿Es

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de octubre de 1989.

(**) El dilema solamente se «puede plantear» en el caso de conducciones largas, en las que

$$L \gg (22 + 27,5 K) d^{1,2}$$

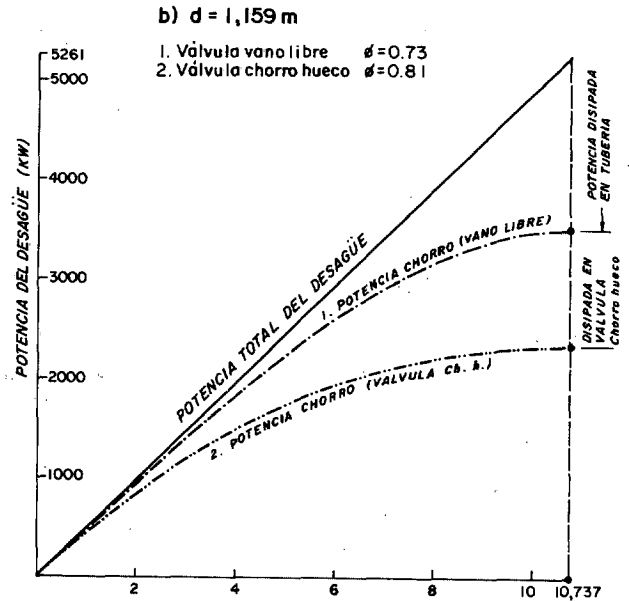
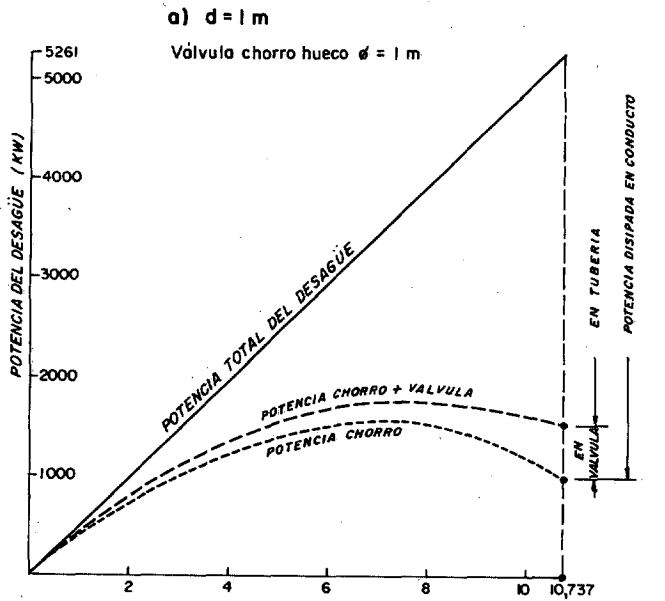
El entrecorillado obedece a que no tenemos referencia de ningún proyecto en el que se haya estudiado este aspecto energético del desagüe, limitándose los cálculos a los diámetros, los caudales y, en algún caso, al alcance del chorro (despreciando la resistencia del aire).

más conveniente que la disipación de energía se realice fuera de la conducción, mediante el rozamiento con el aire, cuencos de amortiguación, etc.? o, por el contrario, ¿es preferible que el agua pierda la mayor parte posible de su potencia antes de la salida, por lo que será más fácil amortiguar la energía residual del desagüe?

II. Veamos, en un ejemplo, estas dos soluciones extremas:

Una tubería de 200 m de longitud y 50 m de carga debe desaguar 10,737 m³/s. La condición se satisface con un conducto de 1 m de diámetro, en cuyo extremo se dispone una válvula de chorro hueco, con igual diámetro de entrada. La potencia total del desagüe es de 5.261 Kw, de los que 3.756 se disipan a lo largo de la tubería, 502 Kw se pierden en la válvula y al chorro le queda una potencia residual de 1.003 Kw. Si se aumenta el diámetro del tubo a 1,159 m, se estrecha su extremidad hasta un diámetro equivalente de 0,731 m y se coloca una válvula final de vano libre, se obtiene el mismo desagüe, pero la pérdida en la conducción será sólo de 1.753 Kw mientras que la potencia del chorro llegará a 3.507 Kw.

Con la primera disposición, al ir abriendo la válvula va creciendo el caudal y la energía del chorro hasta una cierta apertura, que corresponde a un desagüe de 7.337 m³/s, para el cual la potencia disipada en el conducto y su



DESAGÜES EN CARGA. $L = 200 \text{ m}$ $H = 50 \text{ m}$ $Q_{\text{max}} = 10,737 \text{ m}^3/\text{s}$

válvula es de 2.000 Kw, mientras que la residual del agua es de 1.600 Kw. Al proseguir la maniobra de la válvula, continúa aumentando el caudal, pero la energía del chorro disminuye cada vez más. Como la potencia total del desagüe sigue creciendo, todo ese incremento, más el decremento correspondiente a la del chorro, se tendrá que disipar en el conducto y en la válvula, lo que se traduce en ruidos y vibraciones cada vez más intensos que se transmiten a las estructuras de soporte de la conducción. Al final del proceso, el caudal habrá aumentado un 46 % respecto al de la apertura crítica, mientras que la energía consumida en el conducto será un 113 % superior a la de dicha apertura.

En la disposición de tubo con reducción anterior a la válvula, si esta reducción está adecuadamente dimensionada, el caudal y la energía del chorro están en la «rama estable de funcionamiento», es decir, a mayores aperturas, mayores caudales y potencias. La pérdida de energía en el tubo es el 33 % de la carga de agua, en lugar del 81 % que produce la otra solución.

Parece innecesario añadir que, en nuestra opinión, las respuesta al dilema planteado anteriormente está del lado del amortiguamiento exterior de la energía del desagüe.

III. A continuación se ofrecen las fórmulas

en que se apoyan los cálculos energéticos precedentes.

En una tubería de longitud L (m) y diámetro d (m), circula un caudal q (m^3/s) con una velocidad v (m/s). Expresando como pv^2 la suma de las pérdidas de carga que se producen en el conducto hasta la válvula final, la cual, a plena apertura, crea una pérdida adicional de $K v^2/2g$ (m), y llamando r a la relación entre el diámetro de esta válvula y del tubo, la velocidad de salida del agua será:

$$W = \left(\frac{2gH}{2gpr^4 + k + 1} \right)^{0,5} \text{ (m/s)} \quad [1]$$

siendo H la altura de carga del agua a la entrada de la tubería (m) y g la aceleración de la gravedad (m/s^2).

La potencia del chorro, en la boca de salida, es:

$$E_r (\text{Kw}) = \frac{qW^2}{2} = \frac{\pi d^2}{8} r^2 \left(\frac{2gH}{2gpr^4 + k + 1} \right)^{1,5} \quad [2]$$

Y la disipada en la tubería y válvula

$$E_d (\text{Kw}) = Hqg - E_r = \frac{\pi d^2}{8} \frac{(2gp r^4 + K) (2gH)^{1,5}}{(2gp r^4 + K + 1)^{1,5}} \quad [3]$$

de donde

$$\frac{E_d}{E_r} = 2gp r^4 + K \quad [4]$$

La máxima energía del chorro se obtiene para un estrechamiento r_0 tal que

$$r_0^4 = \frac{1 + K}{4gp} \quad [5]$$

para el cual, la potencia del chorro es

$$E_0 = \frac{\pi d^2}{6} g \frac{H^{1.5}}{(1 + K) (3p)^{0.5}} \text{ (kw)} \quad [6]$$

siendo

$$\frac{E_{d0}}{E_0} = \frac{1 + 3K}{2} \quad [7]$$

La energía total de un desagüe, expresada en carga de agua, se reparte como sigue:

	$r = 1$	$r = r_0$
Pérdida de carga en el tubo	$\frac{2gp H}{2gp + K + 1}$	$\frac{H}{3}$
Pérdida de carga en la válvula	$\frac{K H}{2gp + K + 1}$	$\frac{2K H}{3 (1 + K)}$
Altura cinética del chorro	$\frac{H}{2gp + K + 1}$	$\frac{2H}{3 (1 + K)}$

IV. Una expresión aproximada del «diámetro óptimo» del estrechamiento y válvula final, considerando coeficientes de rozamiento habituales, en tuberías de aguas limpias, es:

$$d_0 = 2,3 d^{1.3} \left(\frac{1 + K}{L + 5,5 d^{1.2}} \right)^{0.25} \quad [8]$$

El caudal, respecto a la solución sin estrechamiento, queda reducido a

$$q_0 = \left(3 \frac{L + 5,5 d^{1.2}}{L + (60 + 55 K) d^{1.2}} \right)^{0.5} q_1$$

por lo que será preciso aumentar el diámetro de la tubería para lograr el desagüe deseado.

Cuando la conducción en carga es muy lar-

ga, la mayor parte de la energía del agua se disipa en su recorrido, de forma que al chorro de salida apenas le queda una décima parte de la energía potencial, y la disipada en la válvula es todavía menor, si no existe estrechamiento final. En cambio, con una reducción de diámetro óptima, la energía a la entrada de la válvula será equivalente a los dos tercios de la total, y se transmitirá casi íntegramente al chorro, si la compuesta es de vano libre, o se repartirá entre el agua y la válvula, en la proporción de 1 a K.

V. Sin embargo, para conductos de longitudes excepcionales, puede no ser aconsejable llegar al estrangulamiento óptimo (aunque sí acercarse a él lo más posible) por las razones siguientes, de tipo económico:

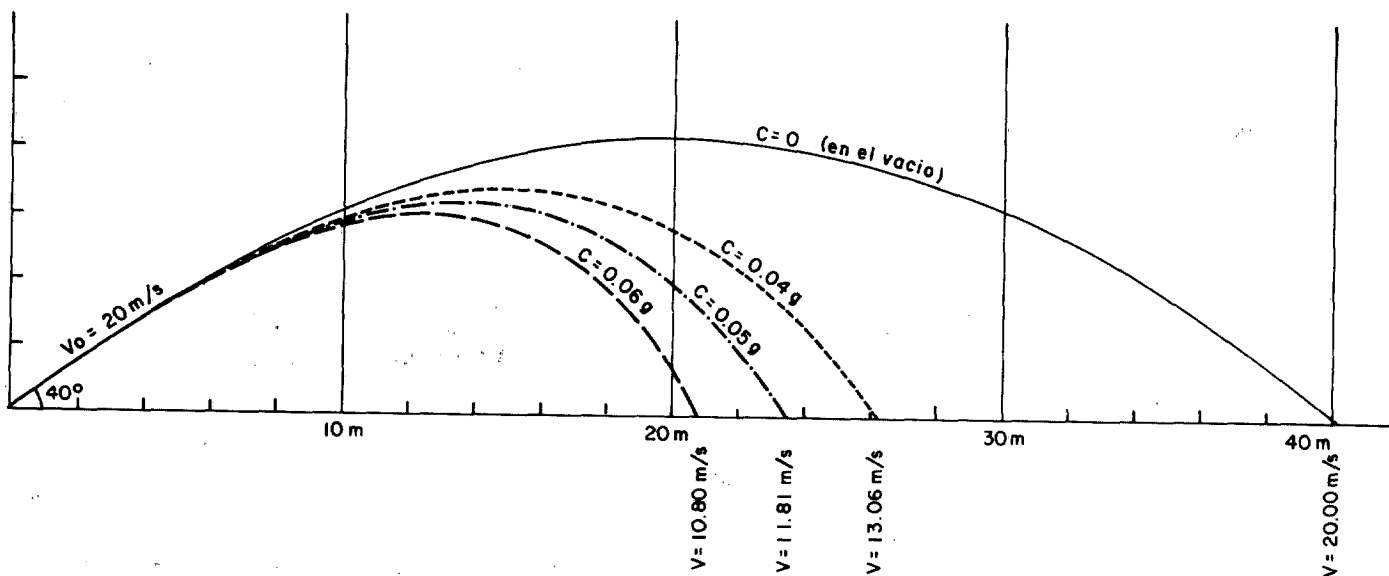
- El incremento del coste unitario de la tubería requerido para mantener el caudal de desagüe, por afectar a una gran longitud, puede producir un notable aumento del presupuesto de la instalación que no se compensa con el menor coste de la válvula final.
- La reducción «óptima» lleva a diámetros de salida muy pequeños, como consecuencia de la gran pérdida de carga del conducto (fórmula 5).
- El ángulo en el vértice de la pieza tronco-cónica de reducción debe ser muy agudo, a fin de no crear pérdidas de carga significativas, por lo que la transición de secciones tendrá una apreciable longitud, cuyo coste por metro es superior al del tubo.

En el desagüe que se ha puesto como ejemplo anteriormente, la tubería del esquema sin estrechamiento, con un espesor de 8 mm, tendría un peso total de unas 47 toneladas; mientras que con la segunda disposición se emplearían 7,5 toneladas más de acero; la válvula sería, en el primer caso, de 1 m de diámetro, frente a 0,73 m que tendría en el segundo. La pieza de reducción, con un ángulo de 3°, sería de 4 m de largo.

Pero si este desagüe, en lugar de los 200 m de longitud supuestos fuera de 600 m, la tubería sin estrechamiento, con un diámetro de 1,189 m (necesario para desaguar el mismo cau-

TRAYECTORIAS Y VELOCIDADES DE CAIDA DE GOTAS DE AGUA DE DIVERSOS TAMAÑOS

(C = Coeficiente de frenado del aire)



dal del ejemplo) pesaría unas 168 toneladas, y la reducida en su extremo, con un diámetro de 1,426 m, pesaría un 20 % más, lo que supone un incremento de coste que apenas queda disminuido por la diferencia de presupuesto entre las correspondientes válvulas. El estrechamiento del diámetro, manteniendo el ángulo del cono en 3°, requiere una pieza especial de 6,63 m de longitud.

VI. El disponer de un estrechamiento final en la conducción para incrementar la potencia del desagüe, es equivalente a lo que hace el jardinero cuando obtura con el dedo la boquilla de la manguera de riego, aumentando el alcance del chorro. Efectivamente, la velocidad del agua, al salir por la válvula terminal del desagüe, será muy superior en el caso de estrechamiento óptimo que si no se dispone de reducción alguna (*).

En el primer supuesto, si la válvula es de vano libre, la velocidad corresponde a los 2/3 de la carga total, puesto que las pérdidas en el

conducto equivalen a H/3. En el segundo, el agua sale con una velocidad

$$V_v = \sqrt{\frac{2gH}{2gp + K + 1}}$$

Referida al ejemplo anterior, resulta $V_v = 14,54$ m/s, en tanto que la velocidad correspondiente al estrechamiento óptimo es de 25,56 m/s (20,87 m/s si se dispone una válvula final de chorro hueco). Los alcances horizontales de estos chorros, haciendo abstracción del efecto del aire, serían el triple o el doble, respectivamente, del alcance del desagüe no estrechado. Pero esta abstracción no es lícita, ni en relación con las trayectorias del agua, ni desde el punto de vista de disipación de la energía.

VII. Al comienzo de estas notas se ha hecho referencia a dos tipos de desagües: uno de chorro macizo, y otro, abierto en abanico desde la válvula de salida. Es evidente que las trayectorias del agua y la disipación de su energía son muy diferentes en una u otra disposición. La primera se asemejará más al lanzamiento en el vacío y, por consiguiente, se conservará una gran parte de la potencia de salida del chorro. En la segunda, el alcance del agua será mucho

(*) Con independencia de los criterios energéticos que aquí se exponen, en el caso de válvulas finales de vano libre se debe siempre establecer una reducción de paso, para garantizar que el conducto trabaja a presión en toda su longitud y su contorno.

menor, al estar el caudal fraccionado en infinidad de pequeños chorritos, que serán rápidamente frenados por el aire, como lo son las gotas de lluvia en su caída.

El cálculo teórico de la trayectoria de una gota de agua, a partir de un ángulo y una velocidad inicial y sometida a un frenado proporcional a su velocidad instantánea, o al cuadrado de esta velocidad, es perfectamente abordable, aunque farragoso, si se conoce la velocidad límite de caída de la gota (*); pero esta velocidad depende del tamaño de la gota, que puede variar dentro de una amplia gama, por lo que la acotación resulta siempre imprecisa. Por otra parte, en los desagües, por muy divergentes que sean, el agua no sale en forma de gotas, sino que éstas se van desgajando de los chorros iniciales a lo largo de su trayectoria, con diversas velocidades de despegue y diferentes ángulos.

En los desagües concentrados, el frenado del aire aplicado a su contorno origina despegues de pequeños chorros y gotas que, al decelerarse rápidamente, se separan de la circulación principal o son recaptados por ésta. Dependiendo de la longitud de la trayectoria y del grosor del chorro inicial, esta especie de «capa límite» con aire emulsionado que se crea en la periferia, llegará o no a afectar al núcleo del chorro. La disipación de energía será tanto mayor cuanto menor sea la sección final maciza del desagüe.

De estas consideraciones se desprende la dificultad de cuantificar el amortiguamiento en el aire de la energía de un desagüe con lanzamiento, problema que tiene importancia por la erosión que puede ocasionar en los cauces y que difícilmente puede reproducirse en un modelo a escala.

(*) Si la resistencia del aire es $C_1 \times V$, la velocidad límite de caída es

$$\frac{g}{C_1}$$

Si esta resistencia fuera $C_2 \times V^2$, el límite de la velocidad de caída sería

$$\sqrt{\frac{g}{C_2}}$$

siendo g la aceleración gravitatoria.

CONCLUSION

VIII. El objetivo de estas notas es el de apuntar un aspecto de la hidráulica de conductos de presión que, en nuestra opinión, no está suficientemente estudiado en una gran parte de los proyectos de dispositivos de desagüe de las presas.

El dimensionamiento de estos conductos, sin tener en cuenta el problema de disipar adecuadamente la enorme cantidad de energía que se genera en los desagües profundos, lleva muchas veces a someter a estos órganos a fuertes vibraciones, acompañadas de ruidos ensordecedores, que van en detrimento de los propios materiales de la conducción, de sus soportes e incluso de las estructuras de la presa.

El temor a las posibles consecuencias de estas vibraciones conduce, además, a un escaso, por no decir nulo, uso de muchos desagües de fondo de los embalses, que quedan relegados a ser el recurso «in extremis» ante una emergencia de la instalación... si es que para entonces son todavía utilizables. ■

Luis Torrent Rodríguez



Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, promoción de 1950. Es Jefe del Servicio de Vigilancia de Presas del MOPU. En el INI (1956-1965) proyectó, bajo la dirección del Profesor Vallarino, los saltos del Cinca, central de grado I; chimeneas de San Sebastián, grado II; presas de Pías y Cubillos, embalse de Aumendrá, etc. Desde 1965 en el MOP, colaboró en el

proyecto de abastecimiento a Madrid por bombeo desde el Alberche (AMSO) y dirigió las obras del tramo I (Elevación Reversible de Altomira) del trasvase Tajo-Segura. Fuera del país ha diseñado la chimenea del salto de Valdesia (República Dominicana) y dirigido el proyecto de centrales de bombeo del acueducto de Santa Elena (Ecuador), dictando en Guayaquil un curso sobre canales. Asiduo colaborador de esta Revista, sus publicaciones versan sobre hidráulica de conducciones, chimeneas de equilibrio, instalaciones de bombeo, etc., son esporádicas incursiones de «divertimento» en otros campos.