

Sobre el límite de la velocidad del agua en las conducciones forzadas

El cálculo del caudal que puede circular por una tubería no presenta grandes dificultades en los casos que más frecuentemente se encuentran en la práctica. En teoría, al menos, el problema no puede ser más sencillo; si la tubería parte de un depósito cuyo nivel de agua es conocido y constante, y desemboca en otro cuyo nivel sea igualmente conocido, la diferencia entre los dos niveles o *carga total* deberá ser igual a la suma de todas las pérdidas de carga que pueden producirse de un extremo a otro de la tubería.

Ahora bien, estas pérdidas de carga vienen expresadas por fórmulas empíricas en las que intervienen las velocidades locales y la disposición y dimensiones de los distintos elementos de la tubería (diámetros, longitudes, ángulos...). Estos últimos se suponen conocidos; no queda, pues, en cada punto otra incógnita que la velocidad que suele entrar en las fórmulas elevada al cuadrado.

Por otra parte, si la tubería no tiene derivaciones y se la supone en carga, el caudal tendrá que ser el mismo en todas las secciones, y en cada una de ellas la velocidad media (que es la que entra en las fórmulas y la que define el caudal) será inversamente proporcional a la superficie de la sección, igual exactamente al caudal, Q , dividido por la superficie, que se considera conocida.

Esto permite reducir todas las incógnitas a la sola incógnita Q y la ecuación final vendrá a tomar la forma

$$AQ^2 = H$$

en la que A será una función conocida de los elementos de la tubería y H el desnivel entre los dos depósitos. La solución es inmediata.

Pero si el cálculo es sencillo, su precisión deja bastante que desear, como lo demuestra el considerable número de fórmulas propuestas para expresar esas pérdidas de carga, fórmulas que con frecuencia son bastante discordantes, hasta el punto de conducir a resultados que pueden variar a veces del sencillo al doble.

Proceden en parte estas divergencias de que la supuesta proporcionalidad de las resistencias al cuadrado de la velocidad no es más que aproximada y de que aun en aquellos casos en que parece indicada por la teoría (pérdidas de carga por ensanchamiento de sección) la fórmula teórica se funda sobre hipótesis que la realidad no confirma plenamente, obligando a la introducción de coeficientes que vengan a corregir la deficiencia del supuesto.

Por eso será preciso escoger en cada caso, y aun para cada trozo de la tubería, aquellas fórmulas que hayan sido obtenidas en las condiciones experimentales más parecidas a las realizadas en la tubería en estudio. Aun así habrá que proceder con prudencia y con la suficiente amplitud para no verse defraudado en las pruebas o más tarde, cuando ya la tubería en servicio, pudieran deteriorarse sus paredes o producirse depósitos capaces de reducir el desagüe.

Más aun admitiendo que con todas estas precaucio-

nes se hubiera llegado a escoger las fórmulas más apropiadas, no hay que olvidar la hipótesis que sirve de fundamento a todo el cálculo, y es que la tubería se ha de encontrar en carga en todos sus puntos. Si esta condición falta, se habrá resuelto la ecuación, pero la ecuación no corresponderá ya a la realidad.

¿Y cómo asegurarse de que la condición se cumple? Para ello será desde luego preciso, aunque no suficiente, que la *presión absoluta no sea en ningún punto negativa*, pues los líquidos no pueden resistir tensiones apreciables. Si éstas se presentan, el líquido se rompe y la tubería dejará de correr a boca llena; las leyes de su movimiento serán ya distintas de las de las conducciones forzadas.

El cálculo de la presión en cada punto no es más difícil que el del caudal si éste ya se supone conocido. Bastará aplicar el teorema de Bernoulli

$$\frac{p}{\omega} + \frac{v^2}{2g} + z = H - 0$$

Si se toma como plano de comparación el correspondiente al nivel del depósito inferior, H tendrá el mismo valor definido antes, z será la ordenada del punto que se considera, donde la sección será conocida y la velocidad será función del caudal y de la sección; θ será la suma de todas las pérdidas de carga *aguas arriba del punto z* , que serán igualmente conocidas si es conocido Q . Se podrá, pues, despejar p .

Pero esta presión p no es la presión absoluta; para obtenerla será preciso añadirle la presión atmosférica, p_0 , a la que está sometido todo el sistema, y es la suma $p + p_0$ la que tendrá que ser positiva para que no aparezcan tensiones.

Y ya se dijo que esta condición, que era necesaria, no es, sin embargo, suficiente, porque aun antes de presentarse la tensión pueden producirse desprendimientos de gases o vapores que ocupen una parte de la sección y que acumulándose en los puntos altos pueden llegar a interceptar casi por completo el desagüe. El agua, en efecto, contiene naturalmente siempre aire en disolución, y la tensión de su vapor a la temperatura ordinaria puede alcanzar valores bastante apreciables: 23,6 cm de agua a 20°.

Por esta razón, el límite que primero hemos considerado es un límite teórico, y antes que se llegue a él la corriente habrá perdido el carácter de corriente forzada. No bastará, pues, que se tenga

$$p + p_0 > 0$$

sino que se deberá tener

$$p + p_0 > \varphi$$

siendo φ una presión dependiente principalmente de la temperatura.

Y, sin embargo, esta comprobación suele omitirse en muchos casos sin que de ello se sigan graves inconvenientes en la práctica, porque las velocidades que ordinariamente se alcanzan son velocidades reducidas

y hay interés en que así sea para evitar otros perjuicios. Así, por ejemplo, si se trata de una conducción de aguas o de una distribución urbana, grandes velocidades exigirían, para ser conservadas a lo largo de las tuberías, disponer de desnives considerables con los que no siempre se cuenta; y aunque se contara con ellos, se correría el peligro de los fuertes golpes de ariete a que pudieran dar lugar los cierres bruscos de las llaves o las variaciones del servicio.

Una cosa análoga ocurre con las tuberías de bajada para alimentación de las turbinas. También allí las grandes velocidades consumirían en pura pérdida una parte considerable de la energía disponible cuando es precisamente la utilización de esta energía el objeto de la instalación; y tampoco son aquí menos terribles los golpes de ariete que en más de una ocasión han originado accidentes graves.

Es claro que para reducir las velocidades hay que aumentar las secciones y con ellas los gastos de primer establecimiento: el problema que se presenta entonces es un problema económico que habrá de resolverse por consideraciones de este orden, las cuales suelen conducir casi siempre a la adopción de velocidades moderadas.

La creación o la destrucción de estas velocidades no absorbe entonces sino una parte relativamente insignificante de la carga total: la velocidad de un metro por segundo no exige sino 51 mm de caída; la caída de un metro puede originar una velocidad 4,43 metros por segundo. Son términos despreciables o poco importantes al lado de los correspondientes a los demás motivos de pérdidas de carga.

Muy distinto es ya el caso cuando es otro el objeto de la obra, y especialmente cuando se trata no ya de utilizar el agua, sino de alejarla lo más pronto posible de donde se la encuentra con excesiva abundancia. Entonces y siempre que la obra misma no corra peligro serán precisamente las grandes velocidades las que convendrá utilizar, aunque también en este caso podrá el ingeniero encontrar un límite en el desnivel disponible.

Encuéntrense ejemplos de ello en los aliviaderos de los pantanos, en los que el desagüe se hace por medio de un sifón o de un pozo o sumidero en comunicación con una galería que desemboca en el río. De estos últimos se citan tres (Marklissa, Davis Bridge y Suviana) en la excelente obra *Salto de agua y presas de embalse* (páginas 914 a 920) de nuestro compañero Sr. Gómez Navarro. Otros se han construido, y alguno se ha proyectado entre nosotros.

En estos casos, si se quiere calcular la verdadera capacidad de desagüe del aliviadero (y es este punto, como se sabe, de capital importancia para la seguridad de la obra de embalse), se podrá emplear el método más atrás indicado, siempre con las dificultades que supone la elección de fórmulas adecuadas para la expresión de las pérdidas de carga, en las que una extrapolación excesiva puede conducir a resultados completamente inaceptables.

Pero de lo que no se podrá prescindir nunca es de la comprobación de las presiones, que en este caso será aún más obligada porque podrá fallar con más frecuencia. De las indicaciones hechas más atrás se deduce una regla que en muchos casos puede ser útil y que, si no da precisamente el caudal que se busca,

da un límite máximo que dicho caudal nunca podrá alcanzar. La regla es la siguiente:

EN NINGÚN PUNTO DE UNA CONDUCCIÓN FORZADA PUEDE ALCANZAR EL LÍQUIDO UNA VELOCIDAD MAYOR DE LA QUE RESULTE DE LA CAÍDA DESDE EL NIVEL LIBRE DEL AGUA AUMENTADA EN LA ALTURA CORRESPONDIENTE A LA PRESIÓN (ordinariamente la atmosférica) QUE SE EJERCE SOBRE ESA SUPERFICIE LIBRE.

En efecto, si se somete entonces el caso a la comprobación indicada se tendría ya a lo sumo

$$p + p_0 = 0$$

y eso sin contar con todas las pérdidas de carga que pudieran producirse aguas arriba del punto de referencia.

Esa regla es, por otra parte, casi evidente y puede ser comprendida sin ningún cálculo: las únicas fuerzas que empujan entonces al líquido situado aguas arriba son la carga de agua y la presión atmosférica; la presión del líquido de aguas abajo no puede hacer más que oponerse al movimiento y reducir la velocidad que sin ella se produciría. Nunca llegará a tirar del líquido de aguas arriba, porque a la menor tensión sobrevendría la rotura de la corriente y desaparecería toda influencia del líquido de aguas abajo respecto del de aguas arriba. Es el mismo fenómeno que limita la altura de aspiración de las bombas y que corta la corriente en los sifones.

Por claro que sea el razonamiento, pasa, sin embargo, inadvertido a algunos ingenieros que, acostumbrados a prescindir de aquella comprobación en los casos ordinarios, sin que la experiencia les haya mostrado su necesidad, llegan a vacilar en los primeros momentos ante la observación contraria, que encontrarán seguramente justificada después de un momento de reflexión. Es lo que me hace escribir este artículo, que creo que podrá ser útil, aunque no se repitan en él más que cosas bien sabidas.

El caso que me ha decidido a ello es sugestivo, y por eso he de resumirlo en breves palabras. Examinaba no hace muchos días un proyecto de vertedero con pozo análogo a los citados más atrás: debía ser capaz de desaguar 1 000 m³ por segundo y se pretendía que este caudal bajara por un pozo de 7,10 m de diámetro: la velocidad media en el pozo tendría que ser de 25,25 m por segundo y a esta velocidad corresponde una altura de caída de 32,53 m. Ahora bien, sobre el punto donde comenzaba la sección uniforme no podía haber más carga de agua (suponiendo la lámina vertiente con su máxima altura) que unos 15,50 m; la presión atmosférica, tratándose de un pantano que se encontraba entre 600 y 700 metros de altitud no podría ser como media muy superior a 700 mm de mercurio, equivalentes a 9,52 m de agua. La carga total en números redondos venía a ser de 25 m: le faltaban 7,50 para colocarse en los límites de la posibilidad teórica.

De la posibilidad práctica se encontraba mucho más apartado: se ha dicho ya que la conducción deja de correr a boca llena aun antes de que la presión absoluta se anule; por otra parte, se ha hablado de velocidad media, y la velocidad no se reparte uniformemente en la sección: el límite no habrá que aplicarlo a la velocidad media, sino más bien a la máxima, o por lo menos a una intermedia entre la me-

dia y la máxima; había que admitir, además, que no hubiera contracción alguna de la vena a su entrada en el pozo y que prescindir de todas las pérdidas de carga de agua, en su carrera desde el labio del aliviadero hasta la boca. La carga verdaderamente disponible para producir la velocidad había, pues, de reducirse considerablemente.

El ingeniero (por otra parte, un ingeniero distinguido) no había parado mientes en ello, confiado en que la total caída del máximo nivel del embalse hasta el río era de 40 ó 50 metros.

Y una observación, para terminar:

Ante la incertidumbre de las fórmulas que aspiran a representar las pérdidas de carga cuando las formas, las disposiciones y aun la escala difieren de las ya experimentadas, se tiende cada vez más a recomendar el estudio de estos problemas sobre modelos a escala reducida y la tendencia es sin duda laudable, aunque nunca debe dispensar del cálculo previo que oriente la experimentación y que en caso preciso sirva para interpretarla.

No es ocasión de profundizar este punto al finalizar un artículo ¹, pero sí conviene hacer notar

¹ Ya me ocupé de él en una Memoria presentada al Congreso de Navegación de Venecia de 1931, y que publicó la REVISTA en 1 de diciembre de aquel año, página 486.

que cuando como en este caso debe haber en el modelo elementos en los que la conducción vaya forzada, el experimentador no debe olvidar que la presión atmosférica no se ha reducido previamente, de acuerdo con la teoría de la semejanza, y que por esta circunstancia podría ocurrir que se mantuviera la continuidad de la corriente en el modelo cuando ya el agua en la realidad se habría desprendido de las paredes de las tuberías. La observación no habría que hacerla a los especialistas; pero nunca está de más para los aficionados.

Una medición de la presión local puede en estos casos resolver la duda sin necesidad de encerrar el modelo en una atmósfera artificial. También cabría ponerse en condiciones de semejanza utilizando en el modelo un líquido más pesado que el agua (mercurio, por ejemplo), y escogiendo para la relación de semejanza geométrica la inversa de la relación de densidades; pero esto sería práctica y económicamente imposible en casos como el presente, en los que habría que poner en movimiento pesos de mercurio del orden de varias toneladas por segundo.

Pedro M. GONZALEZ QUIJANO

Una solución del problema ferroviario

Para resolver el problema ferroviario parece que no se presentan más que tres soluciones, a saber:

- 1.^a Elevar las tarifas.
- 2.^a Que el Estado dé auxilios económicos directamente a las Empresas, y
- 3.^a El rescate por el Estado de las concesiones, con o sin arriendo ulterior de la explotación de las líneas.

La primera solución puede ser contraproducente, porque la elevación de tarifas lleva consigo una retracción del tráfico y podrá ocurrir que con ella bajen los ingresos en vez de subir, y esto es más de temer porque con el aumento de los precios de transporte se daría más campo a la competencia del automóvil; en todo caso, la elevación de tarifas causa grave daño a la economía nacional, que sufriría también grandes perjuicios si para defender a las Empresas ferroviarias de la concurrencia de los transportes por carretera se dificultasen o encareciesen éstos. Esta solución ha sido ya aplicada y los resultados obtenidos no parecen muy satisfactorios.

La segunda solución podrá ser muy satisfactoria para las Compañías ferroviarias, pero no es solución para el ferrocarril y se haría a expensas del contribuyente, cuyos intereses son por lo menos tan sagrados y respetables como los del accionista u obligacionista ferroviario, siendo menos admisible aún que la primera.

La tercera solución de rescate de concesiones, con o sin arriendo ulterior de su explotación, no es más que la misma anterior corregida y aumentada. El

rescate no puede hacerse sin la fijación de su precio de acuerdo con las Empresas, que no darán su conformidad al que se las proponga si no les es beneficioso, y dados los fracasos del Estado como negociante en ferrocarriles es muy de temer que la operación de rescatar las concesiones le resultase muy onerosa; pero, aunque así no fuese, con ella no se haría otra cosa que trasladar el mal negocio actual ferroviario al Estado, que pagaría sus pérdidas a costa del contribuyente, demasiado cargado ya de impuestos de todo género.

Ninguna de las tres soluciones lo es del problema ferroviario; lo serían, a lo sumo, de las Compañías, gravando en todo caso al contribuyente y con perjuicio para la economía nacional, siendo, por tanto, inadmisibles.

Existe, sin embargo, una solución completamente satisfactoria y bien sencilla.

Si la difícil situación de las explotaciones ferroviarias se debe principalmente a la competencia del automóvil y a la elevación de los gastos de personal producidos por las últimas disposiciones de carácter social, parece lo lógico buscar el remedio en la supresión de la competencia y en introducir economías en el personal que contrarresten dichos aumentos de gastos, y ello, como vamos a ver, es sencillamente un problema de velocidad.

Al establecerse los ferrocarriles, un tren de mercancías que hacía 10 ó 12 km por hora era una centella, con la que no se atrevían a competir ni el carro de bueyes ni la galera con su buena reata de