

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

PUBLICACION TECNICA DEL CUERPO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DIRECTOR

D. MANUEL MALUQUER Y SALVADOR

COLABORADORES

LOS INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

SE PUBLICA LOS JUEVES

Dirección y Administración: Plaza de Oriente, 6, primero derecha.

NUEVAS ORIENTACIONES

PARA EL

CÁLCULO DE OBTURADORES HIDRÁULICOS

POR

DON CAYETANO ÚBEDA,

Ingeniero de Caminos Canales y Puertos (1).

TESIS: El cálculo de compuertas de cierre de galerías en los pantanos y válvulas de paso en las conducciones de aguas y receptores hidráulicos, partiendo de la consideración única de las presiones hidrostáticas, es deficiente.

ACLARACIÓN PREVIA.—El lema de esta nota parece desde luego abandonar la idea de que nada semejante á ella se ha propuesto antes de ahora en cuanto á los procedimientos de cálculo de compuertas y llaves de paso de aguas. Y bien vale la pena de que el autor del trabajo se descargue por anticipado del calificativo de presunción, que en justicia le cabría si no hubiese tal novedad. La literatura técnica es tan copiosa, los orígenes de ella y los puntos de su publicación tan distintos y tan apartados á veces, que es bien difícil seguir todos los rumbos de aquélla y enterarse al día de su contenido.

Y así aclarado el caso, al exponer lo que entendemos ser nueva orientación para el cálculo de los obturadores hidráulicos, queda sentado que la llamamos nueva porque en cuanto ha leído el autor acerca de la materia no la vió tratada de tal modo.

ORÍGENES Y FINALIDAD DE ESTE ESTUDIO.—Nacieron las consideraciones que se seguirán al proyectar las compuertas de cierre de galerías, de un pantano que el autor construye, y las válvulas para tomas de aguas en el mismo. Y esa finalidad se refleja en el alcance del presente estudio, que en realidad se contrae más particularmente al cálculo de compuertas de cierre de pantanos.

Llamó la atención del proyectista al hacer cálculos previos de los esfuerzos que serían necesarios para levantar y bajar las compuertas, después de haber visto las de tres pantanos construídos; que dadas las características de los mecanismos instalados, ni el esfuerzo ejercido ni la velocidad de apertura y cierre consiguiendo á dicho esfuerzo guardarán al parecer una relación directa con la potencia de aquellos mecanismos, ni con las dimensiones de las compuertas; habida cuenta, de que para proporcionar aquellos esfuerzos y estas potencias se había partido de la base uniforme

de que la presión que había de vencerse era la hidrostática, debida á la altura del embalse mantenido por los cierres.

La presión total debida á esa carga hidrostática, afectada numéricamente de un coeficiente de rozamiento más ó menos fuerte, y reducida por el beneficio más ó menos considerable de una subpresión ejercida sobre el borde inferior de la compuerta, al abrir ésta; y aumentado al cerrarla, ha venido constituyendo un término de la igualdad, que del otro lado del signo imponía la potencia exigible al mecanismo.

Autores y proyectistas nacionales y extranjeros se han ceñido constantemente á ese concepto. Tal criterio, del que también ha hecho aplicación el autor en la formación de algunos proyectos de pantanos por él suscritos, debe considerarse insuficiente. Demostrar este aserto y exponer cuál es la nueva orientación que proponemos para calcular las compuertas y válvulas de paso de aguas, es el objeto de esta nota.

Fundamentalmente es erróneo, á nuestro juicio, el procedimiento seguido; porque el problema lo es de carácter dinámico y no estático, para los dos elementos activo y pasivo de la cuestión. Y no se opone suficientemente á esta censura la consideración de que desde el momento en que hemos hecho intervenir los coeficientes de rozamiento, distintos no sólo según los materiales sino que se trate de deslizamientos ó rodaduras, ya consideramos las características del movimiento. No, no se opone, porque si bien hemos tenido en cuenta la dinámica en el movimiento propio de la compuerta, nos hemos olvidado de que también desde el primer momento, desde el instante en que un elemento obturador desliza ó rueda sobre su asiento, el agua del embalse, de la tubería, de la cámara de la turbina, del depósito, en fin, sea cual fuere, abandona su papel estático, entrando en juego la hidrodinámica, y con ésta, una alteración en el valor de las presiones sufridas por el obturador, elemento pasivo hasta dicho instante.

El momento en que se consigue «arrancar» de su asiento una compuerta de un pantano ó la válvula de una tubería forzada, es el inicial de un cambio de acciones y reacciones dinámicas, recíprocas, entre el líquido y el obturador; hasta que es llegado un instante que hoy no sabríamos ni podríamos precisar, en que, establecido un régimen regular para el gasto bajo el borde del obturador, predominan los fenómenos propios del desagüe por orificio de fondo, y poco á poco, en la maniobra de elevación del obturador, parece como si el mecanismo que lo eleva diera la «sensación» de que ya no «pesa» sobre aquél el agua.

ALGO QUE SE VE AL ABRIR Y CERRAR LAS COMPUERTAS DE UN PANTANO.—Los apuntes que vamos á dar aquí se refieren á observaciones propias hechas en los pantanos de Riudecañas, cerca de

(1) Memoria presentada al Congreso para el progreso de las Ciencias en Sevilla.

Reus, y en el de Mezalocha sobre el río Huerva en la provincia de Zaragoza.

En primer lugar, todo vibra desde que se hace el primer intento de apertura; vibran los mecanismos porque vibra la compuerta; vibra el mismo macizo de fábrica á pesar de sus grandes espesores porque vibran las moléculas líquidas en busca de un régimen que no alcanzan prontamente, y menos en las formas no circulares de las galerías de los pantanos.

Tampoco lo que pueden importar esas vibraciones ha entrado en cuenta en los cálculos que veníamos haciendo, no por no saber de ellas, ciertamente; más bien por dudar el cómo y en qué grado hacerlas intervenir.

En segundo término, cuando ya se ha iniciado, aunque sea mínimamente, la salida del líquido, cuando se ha conseguido «despegar» (si vale el verbo por más expresivo) la compuerta del marco en que se apoya, en el período de elevación, se observa que si la cabeza de compuerta no cierra el contorno de sus guías, la placa metálica, que en conjunto es aquella báscula sobre un eje horizontal probablemente, dejando paso al agua alternativamente por el borde superior ó por el inferior, con más ó menos intensidad.

La compuerta «dardea», como gráficamente dicen los maestros ajustadores de taller en casos parecidos.

A costa de una ducha, vimos este segundo hecho en Riudecañas, dejando abierta la compuerta horizontal que cierra la comunicación de la cámara de mecanismos con la de compuertas. Momento llegó en que en unión de mis buenos compañeros y amigos D. José P. de Petintó, Ingeniero-Director de aquella obra, y D. Veremundo García Marién, del pantano de Moneva, salimos huyendo de aquellos golpes de agua, traductores del movimiento ondulatorio de la masa fluida contenida en la galería, en su pugna por salir bajo el borde de la compuerta en mayor volumen que el que permitía la abertura dejada libre.

He ahí otro factor á tener en cuenta para la resolución del problema, y también dejado de lado al calcular los obturadores hidráulicos (1). La ondulación de la columna líquida da origen á un cambio en el valor de las presiones efectivas actuantes sobre los obturadores, produciendo un incremento sobre las estáticas.... y, sin embargo, aparece desdeñado.

Por último, otro hecho digno de anotarse es, el de que habiéndose abierto una compuerta de un pantano, y vuelto á cerrar, si se repite la operación de abrir, poco después (aun inmediatamente), el esfuerzo necesario para hacerlo, medido sobre el mecanismo y cronométricamente, es sensiblemente igual al primeramente realizado. Al practicar esta segunda operación los gárgaros y asientos de las compuertas han quedado limpios de sedimentos; ¿por qué el esfuerzo requerido no acusa la última favorable modificación? Hay que buscar una explicación, y ella no es, desde luego, la negativa absurda de que no importe nada que haya una sedimentación mayor ó menor en el emplazamiento. Por el contrario, hay sedimentos tan adherentes y tenaces, que dan lugar á verdaderos conflictos para lograr mover un obturador. Pero este es otro problema.

LAS VIBRACIONES.— El problema de la vibración de las placas, dice M. Bouasse, profesor de la Facultad de Ciencias de Toulouse, en su *Cours de mécanique physique*, 1912, «es de una complejidad matemática grande, y tipo del problema difícil que logra soluciones de ecuaciones diferenciales complicadas, á base de experiencias irrealizables con precisión». Y agrega más adelante: «es inconcebible que el infernal problema de las placas tiene sobre

todo á los Ingenieros».... «si el lector tiene tiempo, que consulte las obras de St.-Venant y Clebsch, trabajos muy bellos pero que aunque desaparecieran no sería de lamentar....., y dedíquese á ellos en las tardes que llueve, y no tenga mejor cosa que hacer».

Entre este sarcástico consejo y el de Bauschinger de triplicar la carga móvil que sobre una pieza produce vibraciones, para considerar aquella como estática, hay una distancia que prácticamente no puede salvarse apelando al humorismo de monsieur Bouasse.

Inútil es pensar en hacer aplicación de las consecuencias obtenidas en un laboratorio sobre placas delgadas y continuas, puestas en vibración con agente tan tenue como el arco de un violín, por ejemplo: á una placa metálica nervada, ya sea fundida en una sola pieza, ó bien compuesta por el cosido de hierros ó aceros laminados á una chapa de palastro y sometida al roce por instrumento tal como una vena líquida dotada de una velocidad de 20 metros por segundo, produciendo la fuerza viva correspondiente á la masa de los 1.000, 2.000 ó 20.000 kilos de peso del volumen evacuado.

Pero si no hay lugar (ahora al menos) para considerar aplicables esas leyes, sí que estimamos deben recordarse ciertas conclusiones de la Física moderna que tienen carácter general. Esas conclusiones son: que cuando un medio elástico *A* está limitado por otro medio elástico *B*, una conmoción, periódica ó no, producida en *A* se propaga á la intersuperficie *A-B*, y la experiencia demuestra que en esa superficie real de separación nacen otros movimientos y se propagan en la superficie *A* (conmociones reflejadas), y en el medio *B* (conmociones refractadas). La continuidad perfecta, cinemática y mecánica, implica para ambos lados de la intersuperficie las igualdades siguientes: de los desplazamientos normales, de los tangenciales, de las tensiones normales y de las tangenciales.

Y para realizar simultáneamente todas esas condiciones una *onda de condensación* (longitudinal) ó una de *distorsión* (transversal) deben dar origen á cuatro ondas, dos sobre cada lado de la intersuperficie; dos de condensación (reflejada y refractada), dos de distorsión (reflejada y refractada). En estas ondas vibratorias sólo por excepción ocurre que la inicial dé origen á otras de la misma especie.

Si uno de los medios elásticos es fluido en la reciprocidad de movimientos ondulatorios, el fluido no propaga más que ondas longitudinales positivas (acortamientos) ó negativas (dilataciones).

Dice M. Bouasse en la obra citada que la amplitud de las vibraciones longitudinales puede ser considerable, y que los desplazamientos obtenidos corresponden á alargamientos estáticos, producidos por tensiones, del orden de las que ocasionan deformaciones permanentes ó determinan la rotura.

Tomemos de los anteriores conceptos, derivados de estudios y experiencias sobre cuerpos no ligados en la forma que lo están la masa líquida en una galería de un pantano y la compuerta que la contiene, lo que el juicio de cada cual estime prudente. En intensidad no sabemos lo que sucede. Pero en modalidad, parece que ocurre, que al empezar la maniobra de levantar una compuerta, á la primera fracción de milímetro recorrida por el obturador, responde la masa líquida rozada transversalmente por aquella, con una vibración longitudinal «positiva ó acortamientos» de las separaciones de las moléculas fluidas.

De acortamiento tiene que ser la onda vibratoria en el líquido, porque si no es acortamiento, el obturador no se «despegaría» de su asiento. Por reducción al absurdo ha de descartarse la dilatación.

El rozamiento recíproco entre líquido y obturador, efectuado

(1) Los llamo así por brevedad y por no saber cómo hacerlo mejor, reconociendo que hay cierta incorrección del lenguaje.

tangencialmente por aquél sobre el segundo, pone en vibración la placa; y la onda longitudinal ó de condensación, sucesivamente reflejada y refractada sobre la masa líquida del depósito indefinido si se trata de un embalse; sobre la de la encerrada en la tubería si se trata de este caso; y en el otro extremo, sobre el obturador, dará lugar en éste á ondas vibratorias transversales y longitudinales conjugadas con aquélla, y cuya complejidad es de cierto grande.

Aún no ha salido una gota de agua desde el depósito al exterior; aún el intercambio de presión hidrostática en velocidad, y de ésta en presiones dinámicas, no ha podido alterar ni el valor ni la potencialidad de la carga de agua. Y ya hay movimientos reales en las masas sólida y fluida en contacto; y el sencillo estatismo no basta ya para dilucidar la cuantía de las fuerzas puestas en juego.

Esos movimientos del líquido tienen realización en la misma dirección y sentido contrario que las reacciones del obturador sobre sus asientos.

LAS ONDAS DE PRESIÓN.—Antes, al esbozar la toma en consideración de las vibraciones, háse presentado el fenómeno físico para el caso y momentos de abrir un obturador. Ahora, para ver cómo puede intervenir la oscilación de presiones, vamos primero á exponer sintéticamente el caso contrario: el de cierre por el obturador, y después volveremos al de apertura.

En este terreno ya tenemos más armas. Los estudios acerca de los golpes de ariete, cuya teoría bosquejó Resal, no faltan. El autor de esta nota ha tenido á la vista, aunque no completos, los del profesor ruso Jaukovsky, los de Allievi y Ratteau.

No hablaremos aquí más que de las consecuencias á que han llegado, sin entrar en el detalle de sus teorías ó de sus experiencias.

En el caso de cierre progresivo de una compuerta la sobrepresión tiende asintóticamente, y de modo muy rápido, hacia el valor $\Delta p = \frac{1}{a}$ por la fórmula

$$\Delta p = \frac{1}{a} \left[1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^{2a} \right]$$

en la que x y x_0 son los límites de excursión de la compuerta ó llave de paso.

La cantidad a tiene por expresión

$$a = \frac{g T}{\lambda u_0} - \frac{1}{2}$$

siendo T el tiempo que tarda en hacerse el cierre, si éste se hace á velocidad constante $\frac{dx}{dt} = \frac{1}{T}$, y x la fracción de abertura dejada por el obturador; λ es una constante que relaciona la longitud de tubería con la presión hidrostática $\lambda = l \cdot H$; por último, u_0 es la velocidad debida á esa carga H (Ratteau).

El cambio de signo de x da el valor de Δp para el caso de golpe de ariete por apertura.

Las experiencias del ruso Jaukovsky y de Allievi y el Conde de Sparve, acerca de los golpes de ariete en tuberías forzadas, les condujeron á establecer para valores de la velocidad de la onda de sobrepresión, fórmulas fraccionarias en que el numerador es un número constante y el denominador la raíz cuadrada de dos sumandos en que figuran los módulos de elasticidad del agua y de los materiales de la conducción, y los diámetros y espesor de ésta.

Jaukovsky dedujo para valor de la sobrepresión Δp el valor

$$\Delta p = u \cdot v \cdot \frac{\omega}{g}$$

siendo v la velocidad que se extingue, u la de la onda, y $\frac{\omega}{g}$ la densidad del agua. Este valor corresponde al caso en que el cierre se haga en un tiempo $t < \frac{2l}{u}$ siendo l la longitud de la tubería.

«El asiento de la onda inicial es el orificio de salida (L. Barbillion y E. Parson, *Revue Electrique*, 17 Abril 1914); remonta la conducción, se refleja en la extremidad superior y vuelve al origen.»

«Si el gasto no se interrumpe por completo, las ondas de sobrepresión sucesivas se amortiguan en el orificio de salida; y las oscilaciones no son forzosamente de forma sinusoidal.»

«A cada variación del gasto corresponde una serie de oscilaciones bastante rápidamente amortiguada; y si se trata de momentos de cierre, la oscilación comienza por una de sobrepresión.»

«En el cierre brusco, pero parcial, por una llave de paso, la ecuación del movimiento es la de un péndulo que oscila en un medio que resiste proporcionalmente á la velocidad, y la sobrepresión obedece á la ley del movimiento pendular amortiguado. Si el cierre es total, la ecuación del movimiento es la del péndulo simple oscilando en el vacío, y cuyas oscilaciones isócronas persistirían indefinidamente, si no fueran prontamente amortiguadas por los rozamientos del agua y los remolinos en el origen. El movimiento sería análogo al de las columnas oscilantes en los tubos.»

«Si una presión perturbadora es seguida de otras, pueden producirse fenómenos de interferencia, dando lugar á un refuerzo ó resonancia de las sobrepresiones de la primera serie, con funestos resultados.»

Llegó Jaukovsky en las experiencias apuntadas á registrar presiones en el golpe de ariete, diez veces mayores que la correspondiente á la carga hidrostática.

Afortunadamente las compuertas de los pantanos se cierran con bastante lentitud. Si así no hubiera sido, las compuertas sometidas á esfuerzos considerablemente mayores que aquellos para que fueron calculadas, no hubieran resistido. Pero sin llegar á ese extremo, ya queda apuntado que aun en el cierre progresivo se producen sobrepresiones.

Es punto que convendrá no olvidar ante la tentación de lograr que el funcionamiento de las compuertas de un pantano sea rápido.

Volvamos al caso de abrir lenta ó bruscamente un obturador. Entonces el golpe de ariete es negativo, y la onda comienza por una depresión. La forma de la onda es, en general, sinusoidal cuando la apertura se hace rápidamente, pero las oscilaciones de presión sobre y bajo la normal son menores que para el golpe de ariete positivo: la onda es más tendida, y las variaciones de sobrepresión y depresión menores.

Lo mismo en el caso de apertura que en el de cierre de un obturador las oscilaciones correlativas á las variaciones de presión y velocidad se amortiguan rápidamente, y la energía de la masa puesta en movimiento se disipa en calor en los trabajos moleculares producidos por las oscilaciones de amplitud decreciente.

Cuando se trata de conducciones forzadas, la intensidad de la onda de sobrepresión no disminuye proporcionalmente á la altura; la sobrepresión puede ser mayor á media altura y estallar allí la conducción.»

APLICACIÓN DE LOS ESTUDIOS ACERCA DEL GOLPE DE ARIETE, AL CÁLCULO DE LOS OBTURADORES HIDRÁULICOS.—En la práctica industrial de la construcción de tuberías y llaves de paso, las presiones de prueba á que se someten los productos garantizan en los

casos generales la resistencia á las sobrepresiones que puedan originar los golpes de ariete. Desde luego son estudiadas particularmente en los casos especiales, y la previsión de chimeneas piezométricas y cámaras de aire en las instalaciones de importancia pone de manifiesto ese cuidado.

No pasa lo mismo respecto á las compuertas de cierre de los pantanos, y, sin embargo, han de sufrir golpes de ariete, porque éstos se producen siempre en toda apertura ó cierre del paso de agua.

El estudio particular de este fenómeno en el caso concreto de las compuertas de pantanos no está hecho, y debe emprenderse empezando por instalar en todas las cámaras de mecanismos de los pantanos construídos ó en construcción, manómetros registradores que den la variación de presiones en la masa líquida; anuos aguas arriba y separarlos de las compuertas á la mayor distancia que permitan las condiciones peculiares de las galerías de desagüe, y otros también delante de las compuertas, pero en punto próximo á ellas.

Así lo proponemos para nuestro pantano de Cueva-Foradada, y algo creemos recordar que existe utilizable en tal sentido en el pantano de La Peña (Huesca). Es el camino de observación práctico y necesario que ha de seguirse.

¿Qué podemos recoger del memorandum de observaciones hechas hasta aquí respecto al fenómeno de los golpes de ariete, que sea aplicable á los pantanos? Poco y mucho. Poco en cuanto á fijar leyes. Mucho en cuanto que podemos presumir que la ley del movimiento se acercará á la pendular establecida por Ratteau y observada por nosotros, aunque sea con corta experiencia, en el pantano de Riudecañás.

Podremos, y esto sin duda alguna, establecer: que dependiendo el golpe de ariete (en intensidad) de un parámetro que relaciona la energía cinética con la potencial contenida en régimen normal, en la unidad de longitud de la tubería; y estando ese parámetro condicionado por las características funcionales de la conducción, incluyendo las constantes específicas que correspondan á sus materiales, no será lícito olvidar en el cálculo de las compuertas las condiciones de sección de las galerías ni la distancia á que se hallan las primeras de la embocadura de las segundas en el embalse. Para los casos en que las condiciones dichas sean las mismas, y la velocidad de la maniobra también, los valores de las sobrepresiones y depresiones iniciales serán iguales; cuando así no sean, no.

Puesto que no hay fuerzas, velocidades ni movimientos instantáneos, bien podemos pensar, aplicando los conocimientos citados, que en el momento de arrancar una compuerta de su asiento, iniciando su elevación, en aquel mismo instante existe una onda de depresión que poco después se traducirá en una sobrepresión (de aquí el dardeo de la compuerta); cómo al cerrar la compuerta tendrá que soportar una sobrepresión, que al no haber sido prevista, da lugar al flexamiento del borde inferior, y á que pueda suceder, como ha ocurrido en algún caso, que curvada la pieza tropiece con el borde rígido del marco horizontal y salte la tira de metal que realiza el ajuste.

Dan cuenta las fórmulas y valores que hemos tomado de las experiencias de Allievi y Jaukovsky, de la enorme velocidad de las ondas de ida y vuelta, que en las experiencias referidas pasan de 900 metros por segundo para el doble recorrido. Las vibraciones á que darán origen pueden y deben ser grandísimas en intensidad. Bien podrá pensarse, que transmitidas las ondulaciones en los pantanos, á una masa de agua cuya relación á la capacidad de gasto de la galería, es incomparablemente mayor que la que

puede significar 1.000 ó 2.000 metros de conducción forzada en tubería, con relación á su gasto; bien podrá pensarse, decimos, que la amortiguación del movimiento oscilatorio sea muy rápida; que la amplitud de cada elemento de onda sea muy pequeña, y la frecuencia muy grande en las maniobras de compuertas de pantanos, porque la distancia que separa el emplazamiento de las compuertas del depósito indefinido es, en general, relativamente pequeña.

MASAS QUE HAY QUE CONSIDERAR AL PLANTEAR EL CÁLCULO DE OBTURADORES HIDRÁULICOS.—Cuando se calculan una tubería y sus llaves de paso para dar es la resistencia debida frente á los golpes de ariete, consideramos que en la unidad de tiempo toda la masa líquida encerrada en la conducción se halla animada de la misma velocidad; velocidad que extinguida, por ejemplo, en el cierre súbito del paso, afecta á toda la columna líquida. Toda la masa encerrada en el tubo influye, pues, en las consecuencias del fenómeno.

¿Es que al estudiar las compuertas de un pantano, habríamos de contar con la masa correspondiente á los millones de metros cúbicos que encierre el embalse? No, como tampoco en el estudio de las tuberías forzadas llevamos las consecuencias hasta el depósito de cabeza.

El problema hay que plantearlo allí donde el régimen está establecido ó se establecerá al originarse el movimiento. Lo que no quita para que si tuviéramos medios de apreciarlo, viéramos desplazarse la molécula extrema de la cola del embalse, cuando sale la primera gota de agua bajo el borde de la compuerta que se levanta.

Aquí han de entrar en juego los enlaces exteriores y los mecánicos.

Los enlaces exteriores son: forma y dimensiones del orificio abierto en el paramento de la presa y forma y condiciones de la galería ó tubo adicional. El enlace mecánico se establece por el potencial correspondiente á la altura de agua en el embalse.

Ambos géneros de enlaces se condicionan para determinar y producir el gasto por segundo.

Todo lo que alcanza realidad en energía cinética y fuerza viva ha existido antes en potencial. Mediante este concepto podremos presumir qué masas entrarán en juego al maniobrar para levantar la compuerta del pantano si medimos las que actúan cuando queda franco por completo el desagüe de la galería.

La energía cinética, la fuerza viva que en el desagüe á boca llena apreciaremos, será la correspondiente á la masa del volumen desaguado.

Cuando la compuerta está cerrada esas cantidades se hallan en potencial en la masa líquida inerte del embalse.

Al producirse la aceleración inicial en el trabajo de arranque en elevación de la compuerta, entrará en movimiento aquella masa, ó una fracción de ella, y no otra mayor, porque en la unidad de tiempo los enlaces conocidos, carga hidrotática, dimensiones del orificio en el embalse y forma y condiciones de la galería no permiten que se engendre un volumen mayor que el del gasto, una vez establecido el régimen.

Tenemos, pues, para el momento de apertura de compuertas un máximo á considerar para la masa que podrá ponerse en movimiento, que es el del volumen que da el gasto por segundo de tiempo. Bien entendido que partimos de la quietud absoluta en el fluido.

Y para el caso en que cerremos la compuerta, tendremos otro máximo en la masa del volumen de agua contenido en la galería, entre la compuerta y el paramento de la presa de embalse.

Hechas las apreciaciones precedentes, queda por dilucidar hasta qué punto son realizables en la práctica, según los casos.

El embalse es una reserva de energía en potencial, que se transformará en energía actual paulatinamente. Del mismo modo la manifestación elemental de esa energía, por medio del gasto líquido en la unidad de tiempo, puede no ser realizable en el primer momento, y ello depende de los enlaces exteriores.

Debemos considerar tres casos: a) que el volumen de agua encerrado en la galería de desagüe sea igual al que el potencial de velocidad (carga hidrostática) puede engendrar en el orificio; b) que sea menor, y c) que sea mayor.

Hagamos la crítica de cada caso frente al problema de los esfuerzos que se producen en la maniobra de abrir una compuerta. En el primer caso, es realizable la transformación en energía cinética de la masa de todo el volumen que la galería es potencialmente capaz de desaguar. En el segundo, como el origen de velocidades está en el orificio abierto en el paramento de la presa, y como en la superficie del mismo no se ha establecido régimen todavía, la masa que durante la aceleración del movimiento de la compuerta ha de salir de la inercia, será solamente la del volumen contenido en la galería, inferior al del gasto de que potencialmente es capaz ésta. Por último, si el volumen contenido en la galería, desde la compuerta al embalse, es mayor que el que se produce en el gasto, la masa que a nuestro modo de ver hay que introducir en los cálculos, es la de ese gasto porque no es transformable hidrodinámicamente una mayor; la diferencia de volumen en más, la consideramos en esta nueva orientación de los cálculos incorporada al depósito del embalse.

Aclaremos este último concepto; porque parece que no satisface a la lógica que habiendo admitido primeramente que en el caso de cierre de una galería toda el agua encerrada en ella dé el máximo de masa afectada por los movimientos futuros, descartemos ahora una parte de ella, ante el caso de apertura.

Para ello, reproduzcamos aquí cuál es la energía actual de una corriente. Su expresión es, llamando Q al gasto,

$$E = 2 \cdot H \cdot 1.000 \times Q$$

y se deriva de la suma de la energía potencial

$$e = Q \cdot H \cdot 1.000$$

y la cinética

$$e' = Q \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot 1.000 = Q \cdot \frac{mv^2}{2}$$

dando

$$E = e + e' = Q \cdot \left(H + \frac{v^2}{2g} \right) \cdot 1.000.$$

Sea ahora $Q' + Q$ el volumen encerrado en la galería; siendo Q el que corresponde al gasto de que aquella es capaz en la unidad de tiempo. Es evidente que al estimar la energía actual de la corriente, nunca sumaríamos el producto $2 \cdot H \cdot Q' \cdot 1.000$. Consecuencia: tampoco al iniciarse el movimiento, cuyas condiciones tratamos de sorprender, debemos sumarlo.

Pero por otra parte, ese volumen Q' comprendido entre el Q adosado a la compuerta (si vale la expresión), y el orificio en el paramento de la presa, está en condiciones especiales en relación al régimen futuro. No necesita que el vector velocidad actuando sobre aquel orificio, tome del embalse los volúmenes elementales para formar $\Sigma q = Q$, sino que está ya dispuesto para entrar en régimen. Tomada bajo este aspecto la cuestión, Q' podrá entrar en juego por su energía potencial $Q' \cdot H \cdot 1.000$; y a lo sumo, cuando se produzca movimiento en la masa líquida, podrá incrementar su intervención con la acción refleja de los movimientos

ondulatorios y vibratorios que el volumen Q le transmita, y de los que hoy por hoy no sabemos más que eso; que se los transmite.

¿Y si el valor de Q' fuera $Q' = n \cdot Q$? Entendemos que cuanto mayor sea n más justificación existe para considerar el volumen plenamente incorporado al embalse, para el cual mecánicamente no podemos estimar otro potencial que H .

De lo dicho se desprende la necesidad de considerar particularmente en cada proyecto las condiciones que se den a las galerías, y la situación que en ellas se señale a las compuertas. No están en iguales condiciones todas las que sufran iguales presiones hidrostáticas.

Las compuertas colocadas en los paramentos de las presas de embalse se verán sometidas a menores presiones dinámicas durante las maniobras. Las compuertas alejadas del paramento sufrirán mayores sobrepresiones en los momentos de cierre, cuanto más lejanas se coloquen del orificio de entrada de la galería.

Es un hecho observable y observado que las compuertas de pantanos colocadas en los paramentos de las presas se manejan con menor esfuerzo.

CUANTÍA DE LOS ESFUERZOS QUE HAY QUE DESARROLLAR AL INICIAR EL MOVIMIENTO DE ELEVACIÓN DE UN OBTURADOR. — Apuntemos antes de explanar este punto dos consideraciones. Es la una: que las grandes presiones existentes en muchos pantanos y conducciones forzadas producen en los volúmenes líquidos en contacto con el obturador un acortamiento de las distancias intermoleculares, que en cierto modo podría decirse, que acerca a la masa líquida a las características de una masa sólida. La otra consideración es: que no debe ni puede olvidarse que el concepto de incompresibilidad física de los líquidos es sólo relativo; está medido el coeficiente de compresibilidad del agua, y los físicos nos han dicho cuál es su valor.

El acortamiento de una columna de agua, de longitud igual a la unidad, bajo la acción de una fuerza igual a su propio peso, es $L = 0,0000048$, y será, por consiguiente, para una presión de 45 metros de agua $L = 0,000216$.

En cuanto a la asimilación al tránsito a masa sólida, que nos hemos permitido hacer en primer término, no parece sea recusable. Pero aparte ello; cuando por sí mismo (el autor de estas líneas lo ha hecho), se cierra una compuerta de un embalse, no ya de 45 metros de carga sino de 27 ó 30, el efecto sensible experimentado próximo ya al cierre, es el de que no se atraviesa agua, sino un cuerpo pastoso, algo así como si se cortara una colada de metal fundido cuando empieza su enfriamiento. No olvidemos que entonces sí que se ejerce la subpresión.

Y aún una tercera indicación de orden sensorial. Es la vista órgano que no puede apreciar debidamente fenómenos que se ofrezcan rapidísimamente; no obstante, al autor el hecho de ver salir el primer volumen de agua «a boca llena» por el orificio de una tubería de toma de aguas en un pantano ó en una conducción forzada, después del período de régimen perturbado y profundas inversiones de la vena, consiguientes al hecho de ser la abertura parcial, le causa la «impresión» de la salida de un proyectil.

Aplique cada cual la medida que le plazca a esas observaciones, nos permitimos creer que pueden llegar a tener valor. Al plantear problemas mecánicos prácticos no pueden olvidarse manifestaciones físicas de la materia.

Sintéticamente estudiamos poco ha qué masas habríamos de considerar cuando la maniobra del obturador inicia la corriente ó la suspende.

En uno y otro caso, el «enlace», compuerta ó válvula limita

los desplazamientos del sistema. Si nos referimos á la iniciación del movimiento, al momento de tratar de abrir el paso al agua, el criterio hasta ahora seguido puede condensarse del modo siguiente:

El obturador soporta al líquido; éste no tiene velocidad; no habiendo desplazamiento no hay trabajo, y la compuerta ó válvula es una como continuación de las paredes del depósito, sometida solamente á la presión hidrostática y no á presiones vivas de ningún género.

Al llegar aquí es donde el autor de la Nota, en virtud de todas las consideraciones que ha expuesto, se aparta del criterio que en otros tiempos siguió. Y abordando una primera aproximación se permite indicar una medida, que probablemente será máxima, del esfuerzo á realizar.

Se ha visto que hasta este lugar hemos cuidado de no valorar por nuestra cuenta ninguna variable de la cuestión. Nos hemos limitado á proponer razones para justificar que se lleve al campo de la dinámica y no al de la estática el estudio de aquélla. Y nada más.

En este problema del movimiento de los obturadores, concretándonos al estudio del momento de arranque, no pasa ni más ni menos, en el concepto general del asunto, que lo que ocurre en cualquier otro caso de puesta en movimiento. Hay que vencer un rozamiento.... pero éste no da señales de vida hasta que hay movimiento; para iniciar el movimiento hay que vencer otra fuerza resistente, que es la de la inercia de la masa que se ha de mover.

Cuando se trata de poner en marcha un tren, el esfuerzo no depende de que haya mayor adherencia con los carriles, sino de que se pretenda producir una aceleración mayor ó menor.

Pero la inercia no se vence en tanto que no se imprima á la masa una aceleración igual á la acción de la gravedad. ¿A qué masas, cuando la cuestión es abrir un obturador? Provisionalmente, á nuestro juicio, á la que definimos en la parte correspondiente, cuando se trata de la galería de desagüe de un pantano. ¿A cuáles si se trata de una tubería forzada? A la del volumen que por segundo es capaz de dar salida.

Tal es el incremento que por hoy parécenos debe sumarse á la presión hidrostática, de la que no sabemos en qué grado dejará de actuar al producirse la aceleración $J = 9,81 = g$. Quizá deba menguarse, en el equivalente á esta aceleración, considerada como velocidad de régimen de un gasto hidráulico.

Del modo dicho vemos el planteamiento del problema. En tanto que la compuerta no reaccione sobre la masa líquida comprimiéndola, es decir, empleando un símil vulgarísimo; en tanto que no se abra paso, como nosotros nos lo abrimos, entre una multitud «á codazos», no se moverá. Pero en el mismo momento la multitud de moléculas líquidas, como la multitud humana de nuestro ejemplo, volverá sobre ella. El movimiento está establecido; hay una aceleración equivalente á la gravedad, y ya no es sólo que la oprima la masa líquida, como á nosotros nos oprimía la gente; es que las moléculas líquidas se rebelan y devuelven el esfuerzo, como á nosotros nos devuelven los codazos.

«*E pur si muove*», dijo Galileo. Las compuertas y las válvulas, á pesar de la deficiencia de cálculo de esfuerzos á vencer que nosotros creemos hay, se mueven. Es cierto. Y se explica perfectamente, porque es frecuente considerar un coeficiente de rozamiento doble y aun triple para el arranque, lo que equivale á duplicar ó triplicar el valor de la presión hidrostática.

Pero esa supervaloración dada al coeficiente de rozamiento

es arbitraria, y según sean las características de las conducciones, dará lugar á cálculos por exceso ó por defecto.

Y si pasamos á considerar los esfuerzos que se producen en los momentos del cierre, esa previsión de doblar ó triplicar el valor del coeficiente de rozamiento en la arrancada, como que sólo se ha llevado al cálculo de los mecanismos de maniobra, no salva la debilidad relativa de la estructura metálica de los obturadores frente á las presiones vivas por choques debidos á la vena líquida.

Y, sin embargo, se objetará de nuevo: no se habla de roturas de compuertas en los pantanos, luego.... No, no hay la consecuencia que puede seguirse para terminar el silogismo suspendido.

Lo que pasa es que la prudencia en la fijación de los coeficientes de trabajo admisibles iguala ó excede á la posibilidad de daños tan graves; pero no evita el que parcialmente se puedan producir deformaciones enojosas, que ya dejamos apuntadas.

En el lapso de tiempo que media desde que se establece un gasto bajo el borde del obturador, hasta que el vano ó sección de la conducción queda completamente libre, hay un decrecimiento continuo de las presiones sobre la compuerta, correspondiendo al cambio completo de la energía potencial en energía cinética. Lo inverso ocurre desde que empieza á moverse el obturador hasta que cierra por completo el paso. Y en todo ese tiempo la idea de choques, más ó menos intensos, debe seguirnos, como compañera de la de movimiento de la compuerta.

Terminamos aquí entregándonos, de buena voluntad y modestamente, al juicio de aquellos que escucharen ó leyeren los conceptos que nuestro trabajo aventura, como contribución al progreso de las ciencias.

Semilla fructífera ó estéril, la labor futura de los cultivadores de esas ciencias, que sois vosotros, dará vida á esas orientaciones, ó desde luego, las echará en el saco del olvido, por inútiles. Y ello será justo en cualquier caso.

Sevilla, Mayo de 1917.

Sobre nuevas fuentes de energía ⁽¹⁾

Mientras que en Alemania se trabaja incesantemente para encontrar productos sustitutivos que hagan olvidar los productos que faltan para la alimentación ó para satisfacer sus necesidades inmediatas, los aliados (téngase en cuenta que habla un periodista francés) buscan cada día con más actividad las fuentes de energía que pudieran con ventaja reemplazar al carbón demasiado caro.

Es muy interesante dar á conocer algunas de las investigaciones hechas, sin pecar de indiscretos, en Italia, donde el problema de la carestía del carbón reviste caracteres más graves que en Francia y en algún otro país.

Respecto á los progresos en vías de realización al otro lado de los Alpes, el profesor Luigi ha dado algunas noticias en un reciente artículo publicado en *Engineering* y analizado en el *Electrician*, de Londres.

Señala que en Toscana, región volcánica, el suelo presenta en muchos sitios hendiduras por las que se elevan á gran altura

(1) Notas tomadas de *L'Industrie Electrique* por *La Energia Elettrica*.