

DIQUES DE ABRIGO.--ROMPEOLAS

XIV Congreso de Navegación

III

Según se indicaba en el artículo anterior, se dejaba para éste el exponer el método propuesto por el ingeniero de Puertos de Chile Sr. Lira, para el cálculo de los diques de paramento vertical sometidos al esfuerzo de las olas, método descrito en su Memoria presentada en este XIV Congreso.

Considera este ingeniero que estos diques verticales sufren esfuerzos, en parte estáticos y en parte dinámicos, debidos, los primeros, al aumento de presión estática soportado por las moléculas líquidas y transmitida al muro, y los segundos, al choque de esas moléculas que en su movimiento orbitario se precipitan sobre ese muro-dique.

Bastará, pues, para determinar el primer esfuerzo, conocer la altura suplementada que tomará la cresta de la ola sobre el plano de tranquilidad o reposo, y conocida esa presión estática, añadir el segundo esfuerzo o presión dinámica determinada en cada punto, conociendo las velocidades orbitarias de esas moléculas.

Expondremos primero cómo razona o justifica ese procedimiento de cálculo, para después dar la norma práctica de llevarlo a cabo.

Considera primero el caso de *profundidad ilimitada*.

Recordando la conocida teoría trocoidal, así denominada por presentar en cada instante la situación de todas las moléculas cuyo centro de oscilación se halle sobre una horizontal la forma de una *trocoide*, se sabe que en una ilimitada profundidad las órbitas descritas por las moléculas son *cir-*

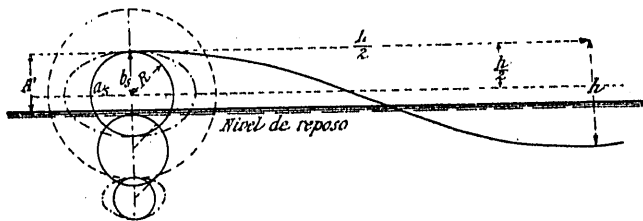


Fig. 1.º

conferencias, disminuyendo sus radios con la profundidad según una ley *exponencial*, y siendo los radios de las moléculas de la superficie *la mitad de la altura h de la ola*, representándose todos los elementos de esa ola como se indica en la figura 1.º. La elevación de la cresta al llegar al muro sobre el nivel de tranquilidad o reposo, se expresará por

$$A = R + \frac{\pi R^2}{L}$$

o bien

$$A = \frac{h}{2} + 0,785 \frac{h^2}{L}$$

En este movimiento ondulatorio, de acuerdo con lo demostrado por Rankine, las presiones a lo largo de una vertical son constantemente variables, oscilando entre un máximo al paso de la cresta de la ola, y un mínimo al paso de la depresión, indicando la curva logarítmica $A'mB$; esa ley de variación curva, como se indicó en el artículo anterior, Benzeit la sustituía por la recta $A'B$ (fig. 2.º) dando presiones por exceso. Los suplementos de presión hidrostática serán

los representados por las magnitudes horizontales comprendidas entre $A'AB$ y $A'CB$, o bien entre $A'O$ y $A'CO$. Análogamente puede verse que estando la depresión de

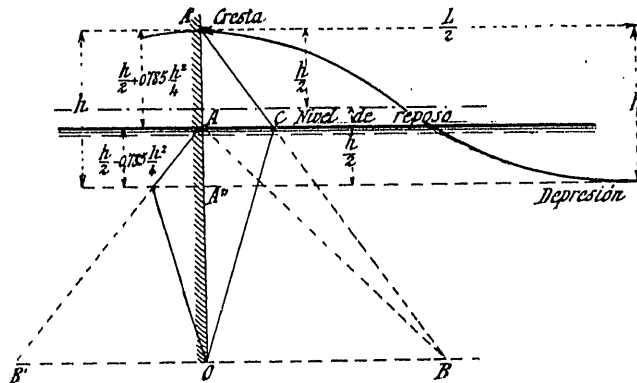


Fig. 2.º

la onda a una profundidad debajo del nivel de reposo representada por

$$AA'' = \frac{h}{2} - 0,785 \frac{h^2}{L}$$

las líneas que, aproximadamente, representarían la disminución de presiones estáticas serían las comprendidas entre AO y $A'CO$.

Con esto ya tiene Lira determinado el primer término de la presión total, el de la presión estática. Para determinar el segundo, se vale de la relación entre el período t , o sea el tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas de ola, consecutivas, y la velocidad v orbitaria, constante en toda esta órbita circular, o sea

$$\frac{2\pi R}{t} = v = R \sqrt{\frac{2\pi g}{L}}$$

al ser

$$t = \sqrt{\frac{2\pi L}{g}}$$

según la hidráulica, y considerando el agua como un líquido perfecto; pero al no ser así, y dando en la experiencia resultados diferentes de los obtenidos por la teoría, aconseja tomar prácticamente el período, cosa fácil de hacer, y llamando T a este período práctico, obtener

$$v = \frac{2\pi R}{T} = \frac{\pi h}{T}$$

y con esta velocidad v ya se puede obtener la presión producida por el choque de las moléculas según la expresión que se indicará después para el caso práctico de la profundidad limitada.

Así, ya tenida la presión estática y la dinámica, se tiene la total.

Caso de la «profundidad limitada», más de acuerdo con la situación de los diques.

En este caso se sabe que las órbitas descritas por las moléculas son elipses de semieje a horizontal mayor que el vertical b . Semiejes que en las moléculas de la superficie se de-

1 Véase el número de 1.º de febrero, pág. 38,

signarán por a_s y b_s , siendo éste $b_s = \frac{h}{2}$, o sea la semialtura de la ola.

Hay que determinar, como en el caso anterior de profundidad ilimitada, la presión estática y la del choque de las moléculas, la dinámica; para la primera se ha de hallar la altura a que llega la cresta de la ola al contacto con el muro, y en este caso de profundidad limitada o reducida se observa que al disminuir la profundidad aumenta la altura de la cresta y dice Lira que, de hechos observados, se puede deducir que esa elevación varía en razón inversa de la profundidad H y probablemente de lo que se denomina *profundidad relativa* $\frac{H}{L}$, y considera bastante aceptable determinar esa altura de la cresta de la ola por la expresión

$$A' = \frac{h}{2} + \frac{\pi \cdot a_s^2}{L}$$

que se adapta más a la realidad (aunque son pocas las observaciones hechas) que la teórica

$$A = \frac{h}{2} + \frac{\pi a_s b_s}{L}$$

Pone la expresión de A' bajo la forma más sencilla

$$A' = \frac{h}{2} + \frac{\pi}{4} K^2 \frac{b_s^2}{L} \quad [1]$$

sustituyendo, en lugar de a_s su igual $K b_s$. Se ha de ver el valor de ese coeficiente K que relaciona los dos semiejes de la órbita elíptica de la superficie, y claro es que cuando ese coeficiente se aproxima a la unidad, se podrá considerar la profundidad como prácticamente ilimitada.

Ese valor de K es

$$\frac{c^m + 1}{c^m - 1}$$

o sea

$$a_s = \frac{c^m + 1}{c^m - 1} b_s$$

siendo $m = 4 \pi \frac{H}{L}$; es decir, que ese coeficiente K es función de la que se ha llamado *profundidad relativa* $\frac{H}{L}$.

Lira da una tabla para obtenerlo, llegando hasta la profundidad relativa de 0,30, en que prácticamente las órbitas son circulares, y podría adoptarse éste como el límite para considerar las olas propagadas en profundidad reducida.

Adopta también como criterio para esta consideración de profundidad reducida, por considerarlo más lógico, el que las *presiones máximas* ejercidas por la ola, correspondientes a las velocidades orbitarias máximas y proporcionales al cuadrado de a_s , o sea a K^2 , sean un 30 por 100 superiores a la presión dinámica, cuando la ola se propaga en profundidad indefinida, y observa que corresponde (según se ve en la tabla) a un valor de $\frac{H}{L} = 0,22$.

Aun así se comprende que las olas que se propagan en profundidad reducida son las verdaderamente interesantes, por ser las profundidades relativas en las cuales se encuentran los diques casi siempre menores de 0,20.

Con lo expuesto ya se tienen los elementos todos que entran en la fórmula práctica [1], que da la altura del agua en la cresta de la ola al apoyarse en el muro-dique y, por tanto, ya se puede determinar bien la presión hidrostática.

Para simplificar la aplicación de esa fórmula da Lira la tabla antes indicada, y que a continuación se inserta, en la cual,

entrando con la profundidad relativa $\frac{H}{L}$ se obtienen los valores de K y del término $\frac{\pi}{4} K^2$ además de $\sqrt{K^2 - 1}$ y \sqrt{K} que se verá después son necesarios. También da el gráfico (figu-

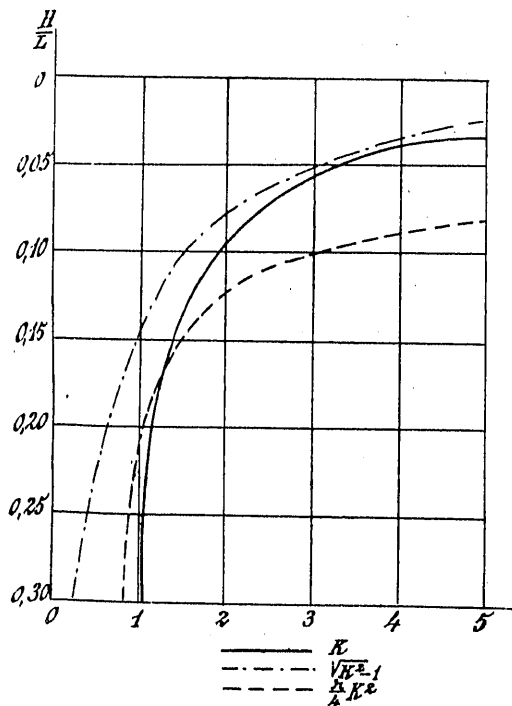


Fig. 3.^a

ra 3.^a) para poder hacer la interpolación de los valores de $\frac{H}{L}$ no comprendidos en la tabla.

La construcción del gráfico de esta presión estática se hace tomando OM igual al valor A' de la expresión [1] y $OC = OM$ (fig. 4.^a), y sumando c con B , da el gráfico de estas presiones MCB .

Tabla I

$\frac{H}{L}$	K	$\frac{\pi}{4} K^2$	$\sqrt{K^2 - 1}$	\sqrt{K}
0,05	3,29	8,49	3,13	1,81
0,10	1,80	3,15	1,49	1,34
0,15	1,36	1,41	0,92	1,16
0,20	1,18	1,09	0,62	1,09
0,25	1,09	0,95	0,44	1,04
0,30	1,05	0,86	0,22	»

Ahora determina el segundo término del esfuerzo total, el dinámico, o sea debido al *choque de las moléculas* contra el muro-dique.

Para esto precisa conocer, como se indicó en el caso de profundidad indefinida, la velocidad orbitaria v ; pero en este caso de profundidad reducida esta velocidad será constantemente variable (pues los que son iguales en tiempos iguales son los ángulos en el centro); pero lo que interesa conocer son los máximos, y este máximo positivo, o sea en el sentido de propagación de la ola, será cuando la molécula esté en la cresta y el máximo negativo al estar en la depresión, iguales en valor absoluto y expresados por

$$v' = \frac{2\pi a_s}{T} = \frac{2\pi K b_s}{T} = \frac{\pi K h}{T} \quad [2]$$

que vienen en función del período T . Este período teórico es

$$t' = \sqrt{\frac{a_s}{b_s}} \sqrt{\frac{2\pi L}{g}} = \sqrt{K} \sqrt{\frac{2\pi L}{g}}$$

que se puede hallar por la tabla I, que da el valor de \sqrt{K} .

Pero como ese período, según ya se ha dicho, difiere del obtenido por la observación, y aun más en este caso de profundidad reducida, conviene más emplear en la fórmula [2] el período observado prácticamente.

Se ve que tomando el período y el semieje a de la órbita se tiene la velocidad orbitaria, que variará según la profundidad de la molécula. Así que, para tener el gráfico de esta presión dinámica habremos de conocer esos semiejes en la superficie a_s , que ya conocemos en función de $b_s = \frac{h}{2}$, pues era $a_s = Kb_s$, el semieje en cualquier profundidad, y en el fondo.

La expresión de los semiejes a una profundidad d se da por las fórmulas

$$a = b_s \frac{e^n + e^{-n}}{e^p - e^{-p}}$$

y

$$b = b_s \frac{e^n - e^{-n}}{e^p - e^{-p}}$$

en las que

$$n = 2\pi \frac{H-d}{L}$$

y

$$p = 2\pi \frac{H}{L}$$

es decir, que están en función del semieje vertical en la superficie (semialtura h de la ola) y de la profundidad relativa $\frac{H}{L}$.

Lira da también una tabla para facilitar el cálculo de esas expresiones.

Los semiejes del fondo, que son los que generalmente se hallan en la práctica de estos cálculos, son: el vertical c_0 y el mayor a_f , la mitad de la longitud focal de la elipse de la superficie, o sea

$$2a_f = 2c_0 = 2\sqrt{a_s^2 - b_s^2}$$

o sea

$$2c_0 = 2\sqrt{b_s^2(K^2 - 1)}$$

o lo que es igual

$$2c_0 = h\sqrt{K^2 - 1}$$

expresión calculable muy sencillamente con la tabla I; y así será

$$v_f = \frac{2\pi a_f}{T} = \frac{\pi h \sqrt{K^2 - 1}}{T} \quad [3]$$

Ya se puede conocer muy fácilmente la velocidad orbitaria en la superficie y el fondo, y, si se desea, en cualquier otra profundidad; con esto se tendrán las presiones en cada uno de esos puntos por la fórmula hidráulica

$$P = f\rho \frac{v^2}{2g} \quad [4]$$

en la cual f es un coeficiente que da la hidráulica, variable según la dirección que toma el líquido después del choque, siendo 4 su máximo, el más interesante para este asunto; ρ es la densidad del agua del mar; sustituyendo en [4] los valores aproximados de estas letras, en metros y kilogramos,

indica Lira la sencilla expresión de ese esfuerzo dinámico

$$P = 200 v^2 \quad [5]$$

muy suficiente para estos cálculos de muros-diques, en que tan poca precisión hay en los datos.

Se tenía el gráfico de distribución de presiones estáticas

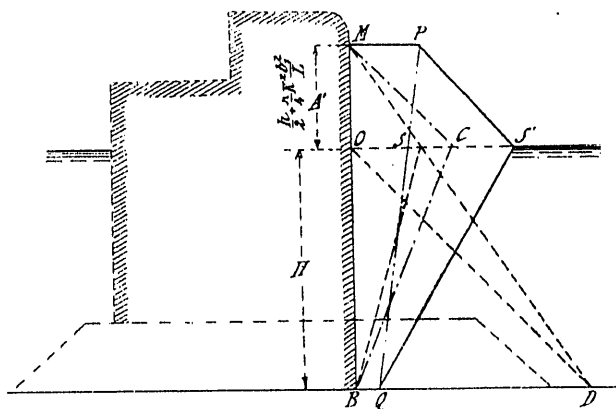


Fig. 4.º

MCB (fig. 4.º) y ahora se tiene el de las dinámicas, bien uniendo por una curva los puntos que se tengan en varias profundidades, o bien, como generalmente se practica, uniendo por una recta la presión máxima MP en la superficie y BQ en el fondo, y sumando las ordenadas de estos gráficos estático y dinámico, se tiene el gráfico de las presiones totales $MPS'QB$.

En el gráfico de las presiones estáticas determina Lira el punto C , tomando, como se dijo, $OC = OM = A''$, y, como se ve, hay un exceso representado por $C'C$ que en el caso de profundidad indefinida no era apreciable.

Después de representar estos gráficos, considera Lira que, al no ser cerradas las órbitas en las pequeñas profundidades, son mayores que las teóricamente calculadas y serán algo mayores las presiones y el agua alcanzará mayor altura contra el muro; para prevenirse contra esto, distribuye la presión estática según la línea MCB' (fig. 5.º), equivalente al supuesto de que el agua se detiene al llegar a la altura M , y,

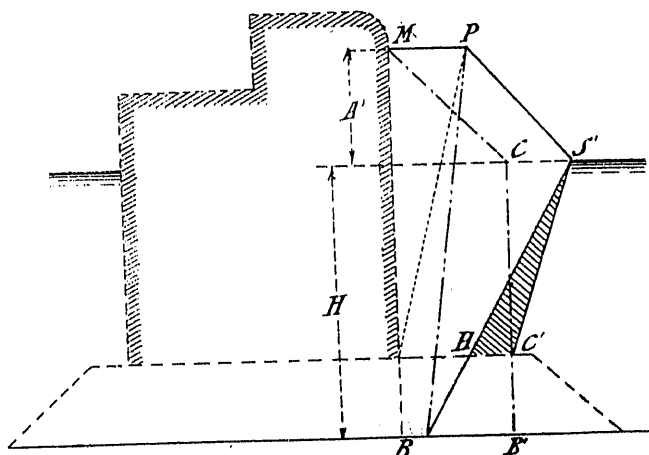


Fig. 5.º

en cambio, supone, para contrarrestar este exceso de presión en la base del muro y simplificar la construcción del diagrama, que es nula la presión dinámica en esa base del muro, y con esto, las presiones a que el muro estaría sometido vendrán representadas por las ordenadas comprendidas entre la vertical MB y la quebrada $PS'C'$. El exceso de presiones por este sistema estaría representado por las ordenadas com-

prendidas entre $S'H$ y $S'C'$, cometiéndose el error por exceso.

Norma práctica de llevar a cabo este cálculo

Como resumen de la exposición que se ha hecho de este cálculo se indicará la práctica de él, dejando para el artículo siguiente la aplicación a algún caso particular de dique español—hecho por los alumnos de la clase de Puertos y algunas observaciones y comparaciones de diversos casos, y con el método de Gaillard.

Se pueden tomar los siguientes datos:

Altura de las mayores olas, h ; período, T ; longitud de las olas, L , y conociendo la profundidad H , en donde el dique se ha de situar, se tendrá la profundidad relativa $\frac{H}{L}$.

Se sabe el nivel de tranquilidad o reposo: en mares sin marea, será fijo; en los de marea, puede tomarse uno o varios de los que comprendan la carrera máxima y ver cuál pone al dique en condiciones más desfavorables.

Con estos datos, por la fórmula [1], con la tabla I y tomando sobre el nivel de reposo el valor dado por esa fórmula, tendremos el punto M (fig. 4.^a), adonde llega la cresta de la ola contra el muro-dique. Tomando en el nivel

de reposo $OC = OM$, ya podremos trazar el diagrama de las presiones estáticas, que será el MCB (fig. 4.^a), o por el método aproximado propuesto por Lira, el MCC' (figura 5.^a).

Por la fórmula [2] y la misma tabla I se obtendrá el valor de v , que sustituido en la fórmula [5] nos dará el valor de la presión dinámica en la superficie que se representa en las figuras 4.^a y 5.^a por MP .

La fórmula [3], con auxilio de la citada tabla I, dará el valor de v_f , y sustituido en la [5] el valor de la presión dinámica en el fondo, representado por BQ (fig. 4.^a). En el caso simplificado ya se vió la suponía Lira de un valor igual a cero.

La línea PQ (fig. 4.^a) da la repartición de las presiones dinámicas.

Sumando las ordenadas de los dos diagramas estático y dinámico se tendrá la línea de repartición de las presiones totales dada por $PS'Q$ (fig. 4.^a) y $PS'C'$ (fig. 5.^a).

Conocidos estos empujes, nada hemos de decir del cálculo de estabilidad del muro-dique, pues ya es sabido se efectuará componiendo el peso del muro, disminuído por la subpresión de su parte sumergida, con la resultante del empuje dado por los gráficos antes indicados.

Ramón HERNÁNDEZ MATEOS
Profesor de la Escuela de C., C. y P.

La antigüedad de la construcción de puentes con bóvedas gemelas

El puente Adolfo, en Luxemburgo, comenzado en 1899 y terminado en 1903, inauguró el siglo XX, con la disposición originalísima del eminente Sejourné, sustituyendo las bóvedas continuas en todo el ancho del puente, tradicionalmente construídas, durante más de veinte siglos, por arcos paralelos en los frentes, unidos por tableros de hormigón armado.

Pero esta genial modificación en los puentes de fábrica exige aún mayor perfección en la mano de obra y tímpanos y una piedra excelente, cuya adquisición y labra no encarezca sensiblemente el coste de la mano de obra.

Los anteriores párrafos del capítulo IV, «Reseña histórica», de la obra *Puentes de fábrica y hormigón armado*, de D. J. Eugenio Ribera, no pueden, en rigor, ser objeto de contradicción, puesto que, en realidad, al ilustre ingeniero francés se ha de atribuir el acabado estudio científico de esta disposición con los más modernos sistemas constructivos; pero, a leerlos, recordé haber visto un antiguo puente construído con arcos gemelos, y, en aras de la rigurosa verdad histórica, me pareció interesante comunicarlo al distinguido profesor de nuestra Escuela. Por su consejo e indicación se redactan estas notas, que, sin merniar un ápice la gloria del insigne Sejourné—para la que bastaría, a nuestro juicio, la inspiración del arco apuntado con el que salvó la profunda cortadura del barranco en el viaducto de Fontpédrouse—, recaban para un modesto e ignorado antecesor de los ingenieros españoles el chispazo del genio que engendró la sustitución de la bóveda de todo el ancho por los arcos independientes.

Del puente en cuestión dan perfecta idea las fotografías que entre estas líneas se intercalan. Su luz es de 10,80 metros y de 2,75 metros la flecha, y, como en la mayoría de los antiguos puentes, se anula o reduce la altura de los tímpanos, ajustando las rasantas de la vía para que sirven, a la curvatura de la bóveda. El irregular espesor de los arcos es, como pro-

medio, de 0,40 m y de 0,70 su ancho, distando entre medios de los mismos 1,50 m.

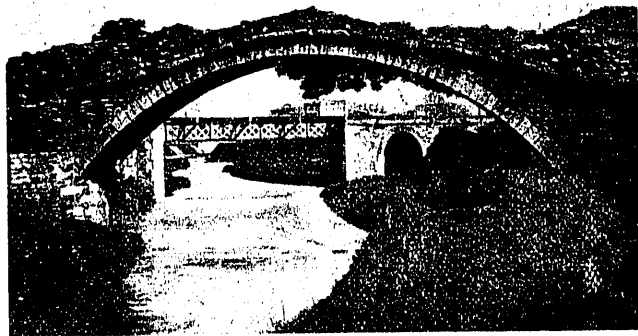


Fig. 1.^a Puente sobre el río Güell. Vista general.

Los arcos son de sillarejo basto sin aplantillar, y rellena las juntas, algo más pronunciadas en el trasdós, mortero de cal hidráulica con más o menos perfección fabricada con las calizas de la comarca. Las dovelas o piezas abarcan todo el ancho del arco. Estos se apoyan por la margen izquierda en un estribo de mayor anchura que la distancia entre paramentos exteriores de la obra, prolongado por muros de revestimiento del cauce. En la margen derecha, un pequeño estribo queda empotrado en el terreno.

El piso descansa directamente sobre la bóveda en la clave, y por intermedio de tímpanos de escasa altura en el resto; sin que sean en exceso pronunciadas las rampas de una y otra parte. El ancho total del puente, de 2,50 m, se alcanza con grandes losas de caliza que vuelan 0,20 m del paramento exterior de