COMENTARIO al artículo «Comparación funcional de diques rompeolas de bloques», de M. A. Losada y J. M. Desire, publicado en el número de septiembre de 1984, páginas 707 a 714.

Por M. A. HACAR BENITEZ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Unicamente deseo confirmar que a los resultados de los ensayos expuestos en el citado artículo se puede llegar también aplicando fórmulas clásicas de Hidrodinámica.

Consideremos dos tipos de bloques. Los cúbicos, de arista *a,* y los paralelepipédicos prismáticos de base cuadrada de aristas $a' \cdot a' \cdot b$ siendo $b = Ka'$ y K mayor que la unidad.

Si estando formados por el mismo material, tienen además el mismo peso W, se verificará que $a^3 = b \cdot a'^2$ y por tanto, $a' = K^{1/3} \cdot a$; $b = K \cdot a'$. Para $K = 2a' = 0{,}794a$; $b = 1{,}59a$.

El movimiento de los bloques lo podemos suponer motivado por dos acciones principalmente:

I. La *hidrodinámica* o de empuje del agua (en sentido más o menos próximo al *horizontal,* según el talud del dique, inclinación de la cara que sufre el principal empuje, modo de actuar la corriente del oleaje, etc.), y

II. La acción *hidrostática,* que no es sólo el aligeramiento que experimenta por estar sumergido, sino por la presión que por su parte inferior y en sentido más o menos *vertical* y ascendente ejercen sobre él el agua o el aire comprimido por el impacto del oleaje al chocar contra el dique.

Vamos a analizar brevemente estas dos acciones, que pueden actuar de modo consecutivo o simultáneo, y a estimar de modo muy grosero, su orden de magnitud.

Sabido es que el empuje o fuerza F, que ejerce una corriente fluida de velocidad *V* sobre un sólido en reposo, en ella sumergido, puede expresarse por:

$$F = \zeta \gamma_w \, S \, \frac{V^2}{2g}$$

siendo S la sección normal a la corriente, γ_w el peso específico del agua en nuestro caso y ζ un parámetro de forma (adimensional).

Es evidente que los primeros bloques que se moverán por la acción del oleaje serán los que estén con la orientación más desfavorables con respecto al mismo. En los bloques paralelepipédicos ésta tiene lugar cuando su mayor dimensión (aristas de prisma) es perpendicular a la dirección de la velocidad del agua.

Como caso más sencillo consideremos que los dos bloques, del mismo peso W, citados anteriormente están apoyados en una cara horizontal, como se indica en las figuras 1 y 2.

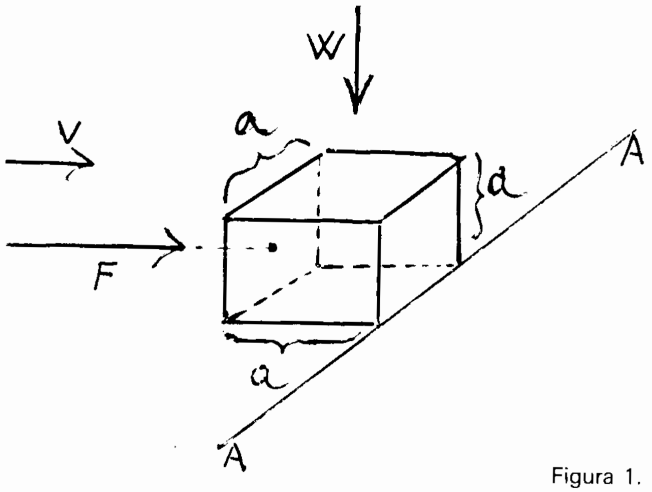

Figura 1.

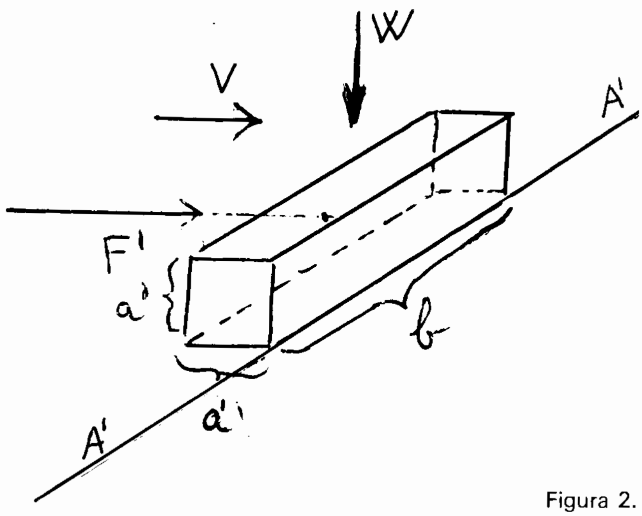

Figura 2.

Las fuerzas F y F' de empuje del agua en cada uno de ellos serán, de acuerdo con la fórmula anterior, por ser $S = a^2$ en el cúbico, y $S' = a'b = a^{-1/3} \cdot Ka = K2/3 \cdot a^2$ en el otro (para $K = 2$, $S' = 1{,}5874\ S$)

$$F = \left(\zeta \gamma_w \frac{V^2}{2g}\right) a^2 \text{ y } F' = \left(\zeta \gamma_w \frac{V^2}{2g}\right) K^{2/3} a^2$$

respectivamente. Por resultar F' mayor que F el empuje (más o menos horizontal) sería un 58,7 por 100 mayor en el bloque prismático, es decir, que la fuerza del agua tenderá a mover éste con mayor facilidad. (Bien es verdad que su base de apoyo $b \cdot a' = Ka \cdot aK^{-1/3} = K^{2/3} a^2$ es mayor que la a^2 del bloque cúbico, lo que le da mayor superficie de rozamiento.) Pero veamos los momentos volcadores M_v y M'_v y estabilizadores M_e y M'_e para cada tipo de bloques, suponiendo que basculan girando alrededor de sus aristas AA y A'A'. Sus diferencias son:

$$M_v - M_e = F \cdot \frac{a}{2} - W\frac{a}{2} = \left(\zeta \gamma_w \frac{V^2}{2g} a^2\right)\frac{a}{2} - a^3\frac{a}{2} = \left(\zeta \gamma_w \frac{V^2}{4g}\right) a^4 - \frac{\gamma}{2} a^4$$

$$M'_v - M'_e = F'\frac{a'}{2} - W\frac{a'}{2} =$$

$$\left(\zeta \gamma_w \frac{V^2}{2g} K^{1/3} a^2\right)\frac{a}{3} K^{-1/3} - a^3 \frac{\gamma}{2} aK^{-1/3} = \left(\zeta \gamma_w \frac{V^2}{4g}\right) a^4 - \frac{\gamma}{2} a^4 K^{-1/3}$$

Es decir, que los momentos volcadores son iguales $M_v = M'_v$ pero el estabilizador M'_e del bloque prismático es $K^{-1/3}$ del cúbico. Si $K = 2$, es el 79,3 por 100 del mismo, lo que contribuirá a su mayor facilidad para ser removido.

Examinemos con más detalle la situación. No es del todo correcto lo que hemos expuesto ya que ni los bloques están libres en una corriente, ni ésta es de velocidad constante ni uniforme. Pero, es evidente, que lo indicado nos sirve de orientación en nuestro análisis.

Por otra parte, examinemos el «parámetro de forma» ζ en función de las dimensiones relativas del bloque y de su orientación con respecto a la velocidad V del agua.

Ensayos y estudios, hechos algunos desde hace más de siglo y medio (Du Buat, Duchemin, Poncelet, Rubach, Wieselberger, etc.), vienen a dar, con ligeras variaciones, como valores de ζ para cuerpos prismáticos rectos en reposo, los siguientes en función de $l \cdot S^{-1/2} = 0$, siendo l la arista del prisma (paralelo a la corriente) y S el área de su sección recta (Figura 3.ª).

Para $l \cdot S^{-1/2} = 0$, que viene a ser una placa, $\zeta = 1{,}856$; para $l \cdot S^{-1/2} = 1$ (que incluirá el caso del bloque cúbico), $\zeta = 1{,}457$, y para $lS^{-1/2} = 3$, $\zeta = 1{,}339$.

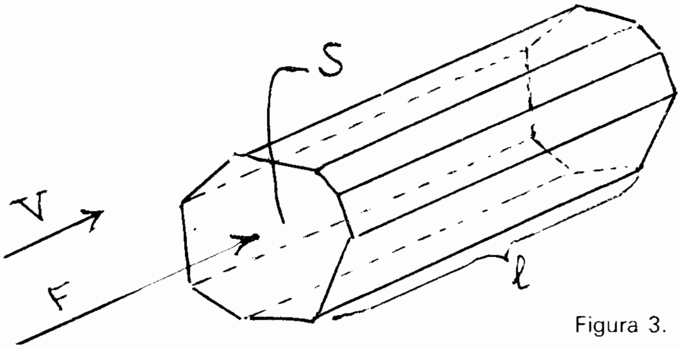

Figura 3.

En el caso de nuestros bloques prismáticos en que

$$l \cdot S^{-1/2} = a'(a'b)^{1/2} = \left(\frac{a'}{b}\right)^{1/2} = K^{-1/2} = 2^{-1/2} = 0{,}707,$$

el valor de ζ resultará comprendido entre 1,457 y 1,856, es decir, *mayor* que 1,457 que corresponde al bloque cúbico.

En resumen, ha resultado que el empuje del agua, a causa de su forma y orientación («atravesado» diríamos) es superior en el bloque prismático que en el cúbico.

(Cierto que este empuje, en cambio, sería menor para un bloque orientado en la dirección, o «al hilo» de corriente. Pero ya dijimos que considerábamos la posición más favorable, como más posible para moverse.)

Examinemos la acción que llamamos II, de empuje de presión de abajo hacia arriba.

Una cualquiera de las caras del bloque prismático tiene de área $a' \times b = (a \cdot K^{-1/3})$. $(KaK^{-1/3}) = K^{1/3} \cdot a^2$, es decir, $1{,}26\ a^2$, o sea, 26 por 100 más de la del bloque cúbico. Por tanto, para bloques del mismo peso W, la misma presión hacia arriba moverá con más facilidad los bloques prismáticos cuando sus caras —de área mayor de las de los cúbicos— estén bajo la acción de dicha presión.

Las conclusiones 2a, 2b y 2c del artículo que comentamos se explicarían en gran parte por lo que hemos expuesto.

Aprovechamos este escrito para exponer algunas sugerencias por si pueden tener cierta utilidad o servir de orientación.

a) Deben y pueden aplicarse a los estudios e investigaciones de diques rompeolas y en general a los de Hidráulica Marítima gran parte de lo hecho en los de Hidráulica Fluvial, pues ambos tienen como base los fundamentos de la Mecánica de fluidos. Aunque la experimentación con modelos matemáticos y físicos es valiosísima y las distribuciones probabilísticas son muy útiles, la aplicación correcta de la única Mecánica existente a la realidad objetiva resulta esencial.

b) Estimo, puedo estar equivocado, que *poco* se ha considerado como causas de averías de los diques y del movimiento de los bloques, la acción de las presiones del agua de abajo arriba. Se estudia más la acción dinámica de la ola, su impacto directo y su fuerza *sobre* el dique que las subpresiones diríamos, que pueden aligerarlos notablemente e incluso levantarlos.

Recordemos que el principio de Pascal, fundamento del clásico gato hidráulico, hace posible el movimiento de grandes pesos con relativamente pequeñas presiones. Así, un bloque de $3 \times 3 \times 3$ m de hormigón, que viene a pesar unas 62 toneladas si no está sumergido, y unas 35 si lo está, puede levantarse con sólo una presión de $\frac{62}{3 \times 3} \simeq 7$ t/m^2 = 0,7 Kg/cm^2 equivalente a una columna de agua de 7 m de altura en el primer caso, o de $\frac{35}{3 \times 3} \simeq 4$ m en el segundo, si actúa íntegramente sobre una de las caras del bloque de 3×3 m.

Esta presión puede ser transmitida por pequeños conductos o huecos entre los bloques. Ni siquiera hace falta para ello el agua; basta que ésta presione el aire que hay entre dichos huecos y alcance 0,7 ó 0,4 Kg/cm^2 para que el bloque se mueva.

A esta presión estática se le puede sumar la dinámica, debida al agua en movimiento. Si ésta es V m/seg, dicha presión será

$$\frac{V^2}{2g} = 0{,}05\ V^2 \text{t/m}^2.$$

Parece como si a la acción del aire a presión no se le diese importancia; como si la presión no actuase y se transmitiese tanto por el agua como por el aire.

En construcciones de edificios ya se ha proyectado alguna vez hacerlos de cimentación corrida, en placa, susceptible de ser trasladados. Por ejemplo, un edificio de 10 plantas que pesase (peso propio más sobrecarga) a razón de 1 ton/m^2/planta, cargaría sobre el terreno de modo uniforme 10 t/m^2, o sea, 1 Kg/cm^2. Por tanto, con sólo la presión de 1 atmósfera bajo su base podría levantarse, y levitando, se empujaría horizontalmente apenas sin esfuerzo y se llevaría a su nuevo emplazamiento. El único problema es que lateralmente, por su contorno, no se salga demasiado aire, lo que compensaría dando más presión y dificultando con pantallas dicha salida.

Esto es análogo a lo que puede ocurrir y ocurre a veces con los bloques de los diques de escollera en los grandes temporales.

Cuando una ola actúa con la mayor parte de su altura y con velocidad considerable, puede producir importantes presiones y transmitirlas a las bases de algunos bloques por cerrarse en cierto modo y en gran parte el paso del agua y del aire. Observando detenidamente un rompeolas, resulta que no siempre es la ola más alta la que produce mayores efectos, sino alguna otra en que, al combinarse con las anteriores reflejadas y con el vaciado o salida del agua del escollerado, produce al acercarse al mismo una presión total (estática más dinámica) que se transmite por el interior del mismo hasta las bases de algunos de los bloques. Se observan alturas del roción de 10, 20 y más metros. Son masas de agua que para elevarse a dicha altura han exigido presiones, por lo menos, de uno, dos o más Kg/cm^2.

Por lo tanto, no debemos extrañarnos que el agua y el aire, en cuanto no tengan fácil salida entre los bloques, los mueva sin dificultad.

Como situación límite, un poco teórica, podríamos llegar a decir que un bloque podría moverse siempre que su espesor fuese inferior a la altura del roción dividida por 2,3 (peso específico del hormigón).

Esto exigiría que tuviesen dimensiones fabulosas. Además no es del todo cierto, pues los bloques sometidos a más presión estarían en la parte baja del dique y a su propio peso se le suma el de los que tiene encima y cargan sobre él.

También es evidente que al actuar la presión del agua sobre una de las caras mayores de un bloque paralelepipédico lo moverá más fácilmente que actuando sobre otra de las caras o sobre la de un bloque cúbico del mismo peso, pues la misma presión actúa sobre mayor superficie dando mayor empuje vertical total.

Se indica en el artículo que comentamos que las principales averías ocurridas en diques rompeolas en los últimos años fueron cuando éstos eran de piezas especiales (dolos y tetrápodos).

Sobre esto hay que observar que parte de las averías de los mismos, más que por la acción directa del mar sobre ellos, es por el choque de unos contra otros. Hay que estudiar mejor su colocación y sus interacciones.

Los modelos a escala que se hagan con material análogo (hormigón), no reflejan bien la realidad de estos choques. Los estudios de impacto de elementos estructurales semejantes dan concentraciones de esfuerzos (ocasionantes de roturas) que varían mucho con la escala.

Hay que aplicar de modo correcto para el estudio de los puntos de contacto el análisis dimensional, según las rigideces del prototipo y del modelo (módulos de YOUNG y de POISSON) y las fórmulas de HERZ, considerando los efectos dinámicos. Se tendrían que utilizar métodos de cálculo especiales (elementos finitos o mejor elementos de contorno), y hacer bastante hipótesis diferentes según la geometría de los bloques y los diversos contactos posibles entre ellos.

También ha habido que aumentar el peso de grandes bloques clásicos pensando en evitar nuevas averías en algún puerto. Es de esperar que eso tenga éxito a un plazo más o menos alejado en el tiempo, pero no olvidemos que los fenómenos naturales a veces cambiar de modo desproporcionado sus órdenes de magnitud o más bien cambian por completo en su manera de actuar con respecto a las hipótesis que hacemos los humanos extrapolando las escalas.

Un ejemplo conocido y comprobado se presenta en los arrastres de materiales del cauce de un río. Cuando son arrastradas piedras de distintos tamaños, las grandes *adelantan* a las pequeñas, mientras que al descender el caudal o cesar el arrastre por cualquier causa, son aquéllas las primeras que quedan en reposo. Aquel avance se explica por la mayor probabilidad que tienen las piedras gruesas de no quedar empotradas en los hoyos y grietas de la solera y por su mayor fuerza viva para vencer y saltar sobre los obstáculos.