TERCERA CONFERENCIA DE INGENIERIA DE COSTAS

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

(BOSTON-OCTUBBE 1952)

NUEVA CONFIRMACION DE LA FORMULA PARA EL CALCULO DE LOS DIQUES DE ESCOLLERA

Por RAMON IRIBARREN CAVANILLES,

con la colaboración de

CASTO NOGALES Y OLANO,

Ingenieros de Caminos.

En el número anterior publicamos la ponencia titulada "Aportación Española a la Técnica de Puertos", cuyo honroso tema fué propuesto a sus autores por el Comité organizador de la III Conferencia de Ingeniería de Costas, celebrada en Boston. Además de la recopilación de la extensa labor nacional referente al tema, ya publicada anteriormente, se completaba dicha ponencia con el nuevo estudio que reproducimos a continuación.

En el folleto titulado "Una fórmula para el cálculo de los diques de escollera", publicado en julio de 1938 (*), se determinó la expresión:

$$P = \frac{N A^3 d}{(\cos \alpha - \operatorname{sen} \alpha)^3 . (d-1)^3}.$$

En dicho folleto textualmente se especificaba:

"P = peso de los cantos o bloques, en Kg.
N = 15 en los diques de escollera natural.
N = 19 en los diques de escollera de bloques artificiales.
$A = 2h$ = altura total de la ola que revienta sobre el dique, medida en metros.
d = peso específico del material de los cantos, en toneladas por metro cúbico.
α = ángulo con la horizontal del talud del dique."

En relación con los coeficientes N, y antes de determinarlos, sólo a título provisional y mediante un único caso de observación para cada uno de ellos, el del dique de Orio para las escolleras naturales y el de San Juan de Luz para las artificiales, textualmente se indicaba en dicho folleto:

"Sólo resta ahora determinar el coeficiente N y comprobar si, como parece deducirse de todo lo expuesto, es sensiblemente constante, o varía con los demás elementos de la fórmula.

En el peor de los casos, se tratará de un coeficiente similar al clásico y variable coeficiente C de la fórmula del movimiento uniforme $V = C\sqrt{Ri}$."

A pesar de los catorce años transcurridos, durante los cuales solamente se ha afinado el razonamiento seguido para la deducción de la fórmula, en forma que hubiera convenido ser tenida en cuenta por los traductores del folleto, siguen en pie dichos coeficientes 15 y 19, debido a los satisfactorios resultados siempre obtenidos en numerosos casos de aplicación práctica.

La fórmula está deducida realmente para el talud superficial de los diques, y también solamente a título provisional, se indicó al final del folleto una generalización para todas las profundidades de la obra, y en relación con la cual textualmente se decía:

"Esta generalización de la fórmula supone un cierto margen de seguridad, pero no es lógico aplicar en el mar los resultados estrictos, obtenidos mediante la aplicación de las fórmulas teóricas, cuando en tierra es norma general multiplicarlos por amplios coeficientes de seguridad.

De todos modos mucho agradeceré a mis compañeros, que conozcan detalladamente casos concretos, tengan la amabilidad de hacérmelos llegar para afinar los coeficientes."

Aunque es posible que, de acuerdo con las ideas transcritas del primitivo folleto del año 1938, los coeficientes puedan afinarse algo, en el artículo denominado "Generalización de la fórmula para el cálculo de los diques de escollera y comprobación de sus coeficientes", publicado en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS en mayo de 1950 (*) se comprobó fehacientemente su suficiente grado de aproximación prác-

(*) Este folleto ha sido traducido y publicado en el número de enero de 1949 del *Bulletin of the Beach Erosion Board*, Office chief of Engineers — Washington D. C. del Department of the Army — U. S. El coeficiente K de dicho folleto lo denominaremos aquí N, para evitar confusiones, con $K = \operatorname{Cth} \pi \frac{H}{L}$, y por razones similares al ángulo a, lo denominaremos aquí α.

(*) Este artículo fué traducido y publicado en el número de enero de 1951 del *Bulletin of the Beach Erosion Board* — Office Chief of Engineers — Department of the Army U. S., y por el Waterways Experiment Station, Translation núm. 51-52.

tica al aplicarlos, con resultados plenamente satisfactorios, a la experiencia, más que secular, de los diques de Argel.

Además de esta comprobación práctica de los coeficientes, se confirmaba, en el mismo artículo de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, la estructura de la fórmula, indicándose textualmente:

"Como se hizo constar en el XVII Congreso Internacional de Navegación celebrado en Lisboa, es también altamente satisfactorio que la fórmula deducida en la ponencia norteamericana de Epstein y Tyrrel para los diques reflejantes de escollera, partiendo de nuestra expresión de las presiones de reflexión $P_r = \frac{C \cdot V}{g}$ (*), es similar a la que obtuvimos el año 1938 para diques rompeolas.

En efecto: la fórmula americana es:

$$P_t = R_t \frac{S H^3}{(S-1)^3 (\mu - r)^3};$$

y la nuestra:

$$P = \frac{N A^3 d}{(\cos \alpha - \operatorname{sen} \alpha)^3 (d-1)^3};$$

en las que:

$P_t = P =$ peso de los cantos.
$H = A = 2h =$ altura de la ola.
$S = d =$ densidad relativa del material.
$\mu =$ talud natural de la escollera $\simeq 1$.
$r = \operatorname{tg} \alpha =$ pendiente de la escollera.

siendo P_t y N los coeficientes.

Pasando la fórmula americana a nuestras notaciones se transforma en:

$$P = R_t \cos^3 \alpha \frac{N A^3 d}{(\cos \alpha - \operatorname{sen} \alpha)^3 (d-1)^3},$$

que es la nuestra, con la única diferencia de incluir el $\cos^3 \alpha$ en el coeficiente.

Al establecer nuestra fórmula se indicó ya, como se ha recordado, que el coeficiente pudiera variar en función de los propios datos del problema.

Prácticamente, el ángulo α en la superficie, que es donde más puede diferir, no variará mucho, pues desde $\operatorname{ctg} \alpha_1 \simeq 3$, correspondiente a los diques corrientes de escollera, no puede empinarse más que $\operatorname{ctg} \alpha_2 \simeq 2$, aun en los diques reflejantes, por el enorme peso de los cantos que requiere. Entre estos límites máximos la relación es:

$$\frac{\cos^3 \alpha_1}{\cos^3 \alpha_2} \simeq 1.2,$$

lo que solamente representaría una pequeña diferencia en el peso de los cantos, y aún menor en su tamaño, cuya relación sería $\sqrt[3]{1.2} = 1{,}06$. Solamente la observación directa puede determinar debidamente N o R_t en taludes muy fuertes."

Otra interesante confirmación de nuestra fórmula nos la proporciona ahora el artículo denominado "Notas referentes a la determinación de los taludes sumergidos estables de los rompeolas", publicado por Kenneth Kaplan en el *Bulletin of the Beach Erosion Board*, de julio del año 1952.

En este artículo se parte de la fórmula de Blanchet referente a la destrucción de macizos o montones de piedras por una corriente (*).

$$V = K_1 \sqrt{2g \frac{\omega_1}{\omega}} \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{\operatorname{sen} (\alpha_0 - \alpha)},$$

en la que:

$v =$ velocidad límite para la desintegración del montón.
$K_1 =$ coeficiente adimensional que debería ser constante para cantos de determinada forma.
$D =$ dimensión lineal escalar de los cantos.
$\omega =$ peso específico del líquido.
$\omega_1 =$ peso específico de los cantos.
$\alpha =$ ángulo del talud con la horizontal.
$\alpha_0 =$ ángulo con la horizontal del talud natural de los cantos.

Denominando W al peso límite de los cantos; a al eje mayor de la elipse orbitaria correspondiente, y T, al período del oleaje, llega Kenneth Kaplan a la expresión:

$$\operatorname{sen} (\alpha - \alpha_0) = \frac{K a}{W^{1/6} T},$$

determinando, además, el valor del coeficiente K en función de la aceleración de la gravedad, g, y de los pesos específicos del líquido y de los cantos

En realidad y tratándose en el caso que nos ocupa de cantos sumergidos o totalmente envueltos por el líquido, en los que, además del empuje hidrodinámico, hay que tener debidamente en cuenta el hidrostático vertical, procede sustituir el peso específico ω_1 de los cantos sin sumergir de la fórmula de Blanchet, por $\omega_1 - \omega$, correspondiente a los mismos cantos sumergidos, con lo que dicha expresión se transforma en:

$$V = K_1 \sqrt{2g \frac{\omega_1 - \omega}{\omega}} \sqrt{D} \sqrt{\operatorname{sen} (\alpha_0 - \alpha)}. \qquad [1]$$

Siguiendo un procedimiento similar al de nues-

(*) Véase el folleto "Cálculo de diques verticales", publicado el año 1938, y traducido y publicado en francés e inglés en el *Bulletin de l'Association Internationale Permanente des Congrès de Navigation*, núm. 28, julio 1939.

(*) Ch. Blanchet: "Formation et destruction par un courant d'eau des massifs en pierres". *La Houille Blanche*, marzo de 1946.

tros estudios de 1938 y 1950, se define, en dicho artículo, el peso de los cantos:

$$W = K_2\, \omega_1\, D^3, \qquad [2]$$

así como la máxima velocidad orbitaria del líquido:

$$V' = \frac{\pi a}{T};$$

lo que, implícitamente, supone admitir también aquí que, con aceptable grado de aproximación práctica para estos complejos problemas, puede aplicarse, aun sobre estos fuertes taludes, la teoría trocoidal.

Conviene recordar que en nuestro primitivo estudio del año 1938, además de deducir la fórmula por la acción directa de la ola al romper sobre el dique, se deducía también la misma fórmula, comprobando así su generalidad, a base del descenso del agua por el talud, con velocidad reducida principalmente por la rugosidad y permeabilidad de la escollera, por lo que, siguiendo nuestro mismo razonamiento de entonces, se admite también ahora, en el estudio que comentamos, que

$$V = K_3 \cdot V' = K_3 \cdot \frac{\pi a}{T}. \qquad [3]$$

De las ecuaciones [1], [2] y [3] inmediatamente se obtiene la fórmula, debidamente corregida:

$$\sqrt{\operatorname{sen}(\alpha_0 - \alpha)} = \frac{K a}{W^{1/6} \cdot T}, \qquad [4]$$

en la que el coeficiente K, también debidamente corregido, vale:

$$K = K' \left(\frac{\omega}{g\,(\omega_1 - \omega)}\right)^{1/2} \cdot \omega_1^{1/6}, \qquad [5]$$

en la que K' es adimensional.

Siendo teóricamente, como se dedujo de nuestro estudio de 1938, la máxima velocidad superficial de rotura de las olas sobre fuertes taludes, igual a su celeridad, se obtiene:

$$C = V' = \sqrt{g \cdot \frac{A}{2}} = \frac{\pi a}{T}(*). \qquad [6]$$

De las expresiones [4], [5] y [6] fácilmente se deduce, pasando a nuestras notaciones $W = P$, $\omega_1 = d$, $\omega = d_1$, y siendo, con suficiente aproximación, el ángulo del talud natural de los cantos $\alpha_0 = \frac{\pi}{4}$, la expresión

$$P = K'' \frac{A^3}{(\cos\alpha - \operatorname{sen}\alpha)^3} \cdot d \cdot \left(\frac{d_1}{d - d_1}\right)^3, \qquad [7]$$

que es, en definitiva, nuestra fórmula, pues a ella se llega también, fácilmente y sin introducir simplificaciones previas, por cualquiera de los dos procedimientos seguidos en nuestro estudio de 1938, y en la que K'' es también adimensional.

Si, para mayor comodidad en las aplicaciones, definimos los pesos específicos en toneladas por metro cúbico, con lo que se reducen a las densidades relativas, y siendo la del agua, aun salada, prácticamente $d_1 \simeq 1$, la fórmula se reduce a:

$$P = \frac{N A^3 d}{(\cos\alpha - \operatorname{sen}\alpha)^3 (d - 1)^3},$$

que es nuestra sencilla y cómoda fórmula práctica que queda así, una vez más, confirmada en interesante forma, y cuyo grado de aproximación es más que suficiente en estos complejos temas, en los que solamente una ligerísima variación en la altura del oleaje puede originar mayores variaciones que las debidas a dicho grado de aproximación, que podrá incluso aumentarse mediante el simple afino del coeficiente, en la forma ya indicada en el primitivo estudio original del año 1938.

(*) En realidad, este resultado deja de aplicarse al hacer los cálculos, en sentido contrario, para la generalización de la fórmula a los taludes sumergidos.