

# FORMULAS PARA EL CALCULO DE LOS DIQUES DE ESCOLLERAS NATURALES O ARTIFICIALES

Por RAMON IRIBARREN CAVANILLES

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.  
Director del Laboratorio de Puertos del Centro de Estudios  
y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, España.

*Con este artículo se termina la publicación de la ponencia presentada por el autor el Tema 1 de la Sección II del XXI Congreso Internacional de Navegación. Su resonancia ha sido considerable y el éxito alcanzado por tan ilustre Ingeniero de Caminos, defintivo, no sólo en relación con esta interesante ponencia, sino por toda su labor en la técnica marítima, de la que ha sido calificado como pionero mundial.*

## CAPITULO III

### Ensayos efectuados. Incidencia normal.

#### a) DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS.

##### *Dispositivo de ensayo.*

La experimentación sobre rotura de diques de escollera en incidencia normal fué realizada en el canal de ensayos del Laboratorio de Puertos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de Madrid.

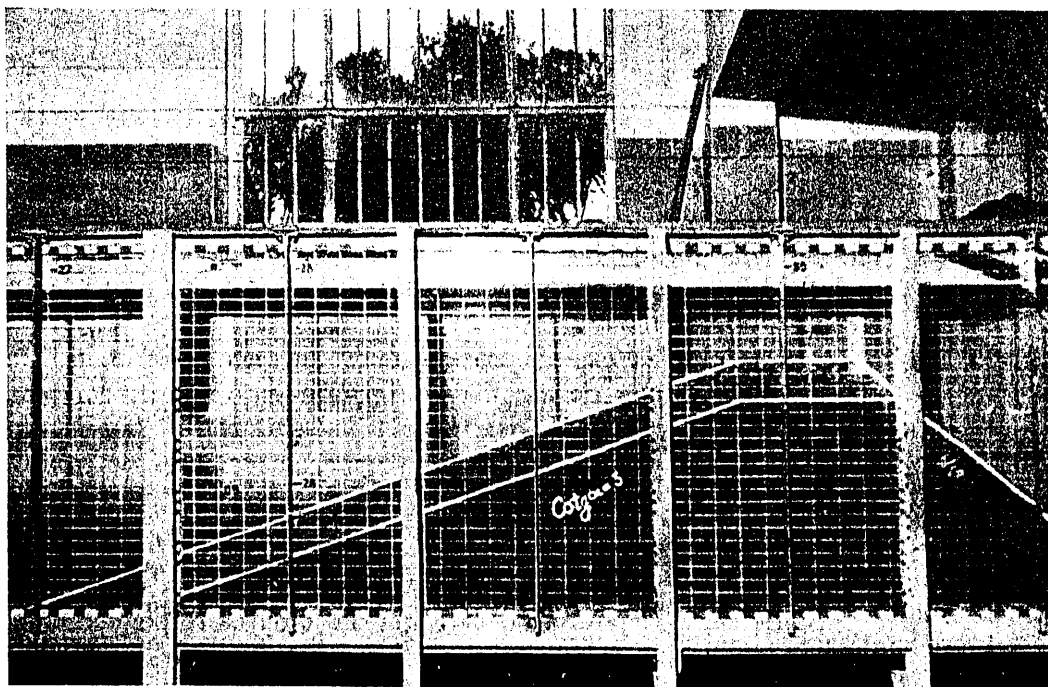


Fig. 5.<sup>a</sup> — Dique de escollera. Estado inicial.

Este canal, que ya ha sido descrito en anteriores publicaciones (\*), tiene una longitud de 31,5 m., 1 m. de anchura y 1,5 m. de altura. Su aparato productor de oleaje está constituido por una paleta plana, movida en sus extremos superior e inferior por sendos mecanismos de botón y ranura de radio variable, lo que permite ajustar los recorridos de fondo y superficie  $2r_f$   $2r_s$  a los del oleaje que se desea generar.

Se han ensayado (figs. 5.<sup>a</sup> y 6.<sup>a</sup>) en este canal diversos tipos de diques de escollera con una amplia gama de taludes y de mantos principales constituidos por algunas de las formas más frecuentes en las aplicaciones prácticas: escolleras naturales de esfericidad media, tal como generalmente se obtienen en las canteras, blo-

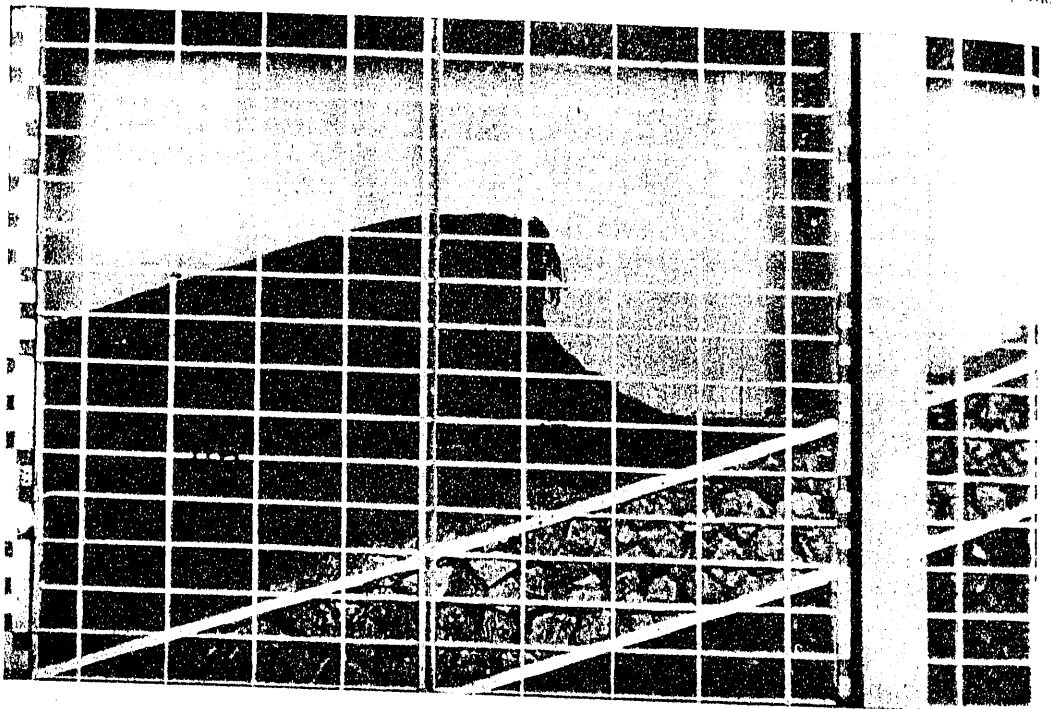


Fig. 6.<sup>a</sup> — Rotura de la ola sobre el dique.

ques artificiales paralelepípedicos con lados de relación 1 : 1 : 1,5 y tetrápodos. Cada una de estas formas fué ensayada con distintos pesos y densidades de cantos, con ondas de variados peraltes y profundidades relativas, tanto con fondo horizontal como en pendiente.

Los resultados experimentales muestran que la estructura de la fórmula para el cálculo de diques de escollera, propuesta en 1938, es correcta, determinándose por medio de la presente investigación los parámetros  $f$  y  $N$ , correspondientes a cada una de las formas ensayadas y para ambos casos de equilibrio hacia abajo y hacia arriba.

#### *Forma operativa.*

Es de suma importancia, para que los ensayos respondan a su finalidad, asegurarse de que la ola que llega al pie del dique es la de cálculo sin interferencia de las que reflejadas primeramente en el dique, aunque sólo sea parcialmente, y nue-

(\*) REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, mayo 1952.

vamente reflejadas en la paleta, se compongan con las que se originan en ésta y lleguen a aquél con altura distinta de la de cálculo.

No consideramos de suficiente eficacia el empleo de filtros de ola, y por consiguiente se ha utilizado el procedimiento que estimamos ofrece verdadera garantía,

## PERFILES DE ROTURA DE LOS DIQUES

Figura 7.<sup>a</sup>

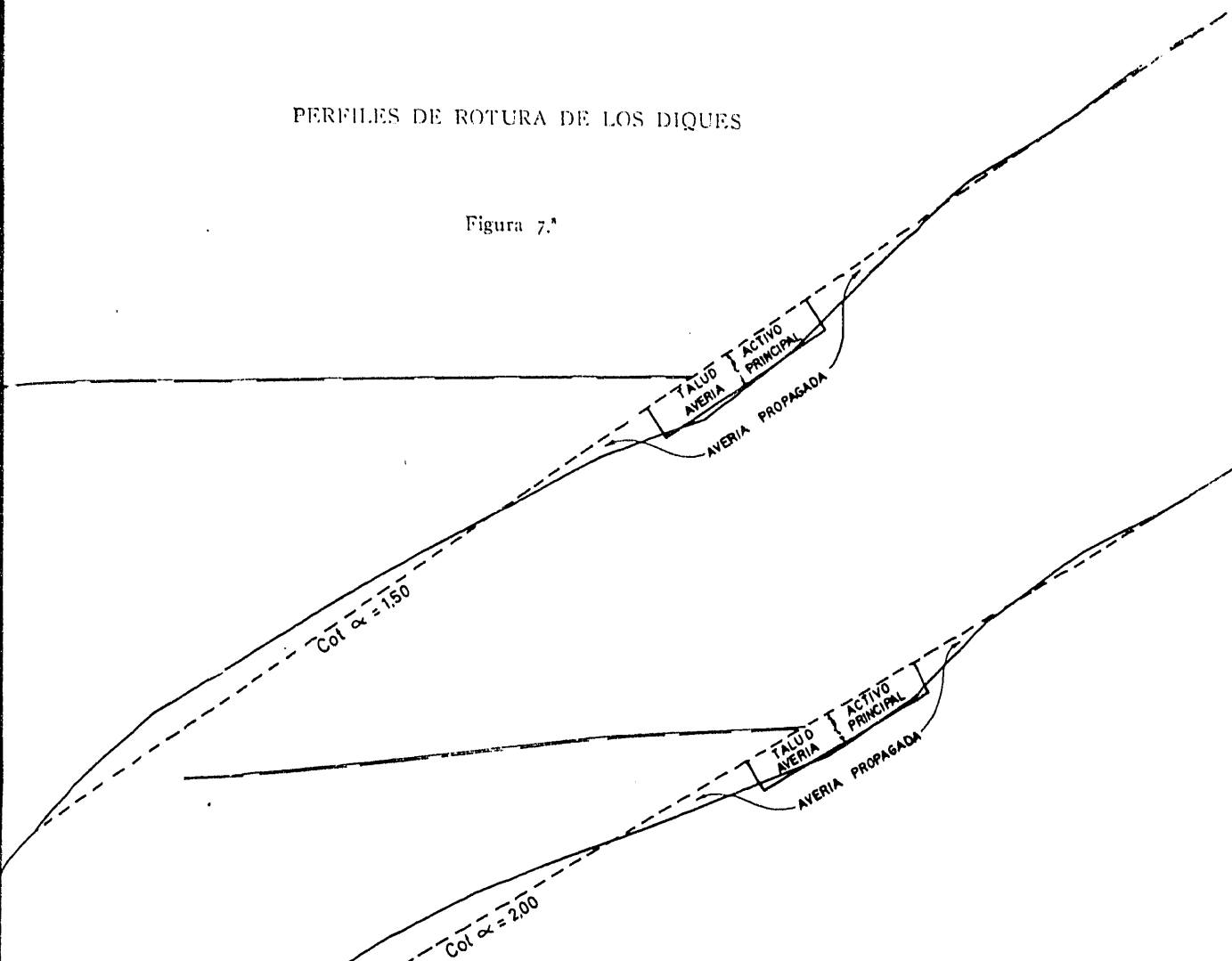


Figura 8.<sup>a</sup>

que consiste en operar por tandas de olas, parando el aparato productor de oleaje antes de que llegue al dique la ola doblemente reflejada, e interrumpir, además, su propagación mediante el cierre de una compuerta de guillotina situada en las proximidades del dique; así se evita también que lleguen al mismo las olas de mayor altura que siempre se originan por la parada de la paleta, y que, de otro modo, falsearían totalmente los resultados obtenidos.

Para la determinación de la altura de onda incidente, previa a la instalación del modelo, se instaló en el final del canal una rampa totalmente rompeolas, con el 10 por 100 de pendiente, realizándose un tarado en el punto exacto de futura ubicación del dique, de las alturas de ola correspondientes a todos los ensayos a realizar.

Este procedimiento ofrece más garantía que la determinación de la altura de onda incidente a partir de la expresión:

$$2h_t = \frac{2h_v + 2h_n}{2};$$

en la que  $2h_v$  y  $2h_n$  son, respectivamente, la amplitud en el vientre y en el nodo del movimiento parcialmente estacionario originado por la reflexión, también parcial en el dique, y que generalmente da resultados falseados y excesivos.

#### *Lado del cubo equivalente y espesor del manto principal.*

Los mismos cantos usados en los ensayos con el Taludómetro (véase capítulo II) fueron empleados en el canal, aunque en este caso la investigación se realizó únicamente con los cantos de peso medio:

- 102 gr. y 13,1, para escolleras naturales;
- 96 gr. y 12,5, para bloques paralelepípedicos;
- 98 gr. y 12,3, para tetrápodos;

que son los que dentro de los límites de confianza al nivel de probabilidad 0,95, corresponden a dos tamaños, mitad el uno del otro.

Siendo los pesos específicos de las escolleras naturales  $\gamma_{nat} = 2,53 \text{ gr./cm.}^3$  y de las artificiales  $\gamma_{art} = 2,1 \text{ gr./cm.}^3$  el espesor del manto principal se determinó adoptando, según las normas generalmente empleadas, tres lados del cubo equivalente para escolleras naturales y dos para bloques artificiales y tetrápodos.

#### *Campo de experimentación.*

Las alturas de ola se hicieron variar, después de las tandas necesarias, con incrementos de un centímetro en el tamaño grande y medio en el tamaño mitad, desde un mínimo que no afectase en absoluto al dique hasta alcanzar la altura de onda precisa para la rotura de éste. Cada uno de los taludes y formas fué ensayado con profundidades relativas al pie del dique,  $H_p/L_p$ , variable desde 0,1 a 0,7 y tanto con fondo horizontal como en pendiente del 1 por 100. En algunos de estos ensayos con pendientes se ha llegado a producir la rotura de la ola por la acción del fondo, en la situación futura del dique y antes de su instalación.

El campo de experimentación de los taludes abarca la mayor parte de las aplicaciones prácticas y se extendió, para las tres formas ensayadas, desde un mínimo de  $\cot \alpha = 1$ , para el cual el núcleo ya se encuentra cercano a la inestabilidad, hasta un máximo de  $\cot \alpha = 5$ . Ensayándose asimismo los taludes intermedios,  $\cot \alpha = 1,25, 1,50, 2, 3$  y 4. En el cuadro adjunto se relacionan los ensayos efectuados.

#### *Rotura del dique y criterios para determinarla.*

Los ensayos muestran que al ir aumentando la altura de las tandas de ondas, a partir de ondas bajas, los modelos permanecen al principio prácticamente inalterados, salvo la caída, o simple limpieza de algunos cantos o elementos sueltos.

Después de varias tandas con alturas crecientes sin caída de canto alguno, y a partir de una cierta altura de onda, que denominamos de "iniciación de rotura", la curva acumulada del número de cantos desprendidos del manto se hace creciente con la altura de onda, estabilizándose el talud al cabo de un cierto número de tandas de ondas de la altura ensayada, de lo que se deduce que generalmente las olas que no rompen el dique lo consolidan. La curva acumulada media de cantos desprendidos en esta zona de "estabilidad parcial" resulta prácticamente la misma para las tres formas ensayadas, y es la que se representa en la figura 9.<sup>a</sup>.

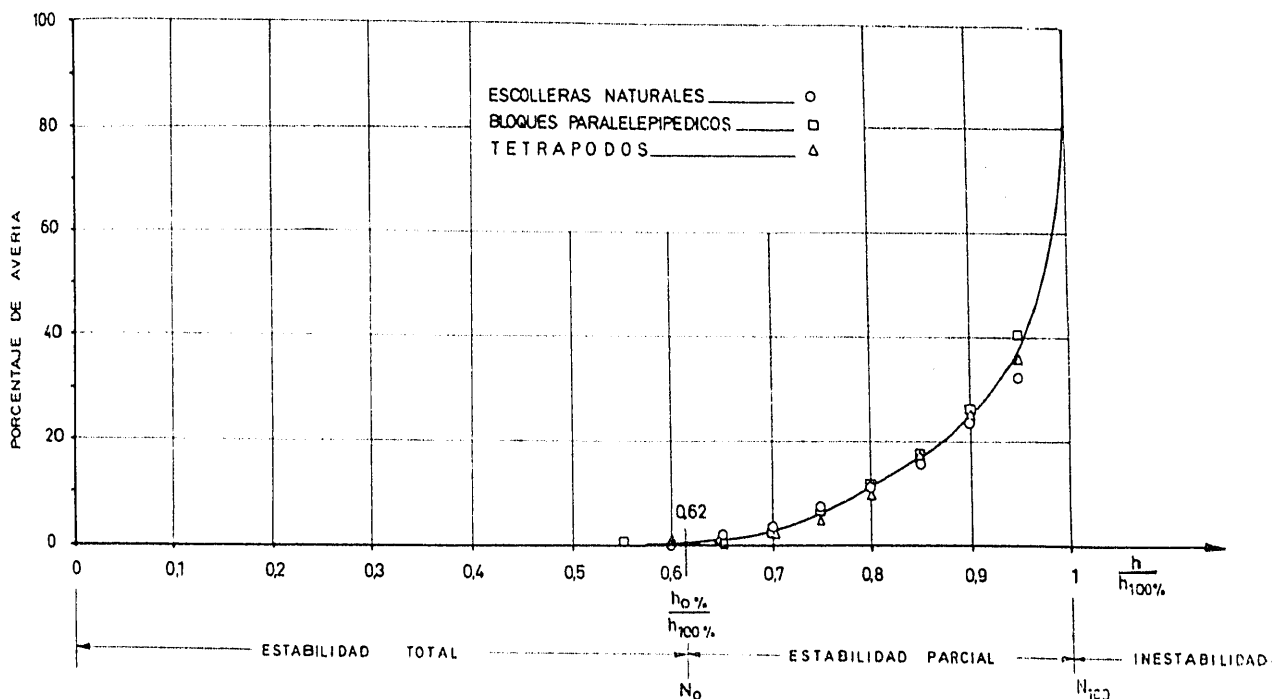


Fig. 9.<sup>a</sup> — Curva de estabilidad.

Al alcanzar la altura de onda un cierto valor, que denominamos "rotura total", la avería se hace precipitada y creciente y al cabo de cierto tiempo llega a afectar al manto hasta la profundidad de un canto o, más concretamente, del lado del cubo equivalente, con lo que la primera capa del mismo queda totalmente rota, y la estabilidad del dique gravemente comprometida.

Los siguientes convenios fueron establecidos para precisar las sucesivas fases de avería:

- Cada ensayo habría de iniciarse con una altura de onda sensiblemente inferior a la de "iniciación de rotura", para así poder localizar debidamente la situación de ésta.
- Los incrementos en la altura de onda entre las sucesivas etapas de ataque al dique fueron los mínimos posibles, cuyos diferentes efectos son prácticamente apreciables, es decir un centímetro en la escala principal y medio en la escala mitad.
- En cada etapa antes de alcanzarse la "iniciación de rotura" se atacó el dique con diez tandas de olas.

Como hemos indicado que las ondas que no rompen consolidan el dique, este ataque por tandas de pequeña altura proporciona al dique una mayor estabilidad, siendo esto lo que ocurre en la Naturaleza, donde los diques se consolidan generalmente por la acción de las marejadas antes de que se produzcan los fuertes temporales.

Por esta razón, en la fase de "estabilidad parcial" o de averías, se mantiene el número de diez tandas, y en el caso de que haya desprendimiento de cantos, se repiten las diez tandas sin incrementar la altura de onda, y esto tantas veces como fuera necesario, para que cese el desprendimiento de cantos, que es cuando el dique está estabilizado, y se aumenta la altura de ola.

Al acercarse a la altura de onda de "rotura total", el número de cantos desprendidos en cada tanda se hace muy grande. En tal caso se prolonga el ensayo con esta altura de onda hasta 50 tandas, comprobándose mediante perfiles tomados directamente en el dique si la avería alcanza la profundidad del lado del cubo equivalente. En caso afirmativo, esta altura de onda se considera como de "rotura total" de la primera capa.

En caso contrario se incrementa de nuevo la altura de onda en un centímetro o medio, según el tamaño de los elementos, y se somete el dique a un nuevo ataque por otras 50 tandas, comprobándose, como en el caso anterior, si la profundidad de la avería es la correspondiente a "rotura total", y así se continúa hasta alcanzar ésta.

#### b) RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.

Los resultados de los ensayos sobre diques de escollera realizados en el Laboratorio de Puertos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas para escolleras naturales de esfericidad media, bloques paralelepípedicos y tetraédricos, aparecen en las figuras 10, 11 y 12 junto con los obtenidos en el Waterways Experiment Station.

Es interesante hacer observar la aproximación entre ambas experimentaciones a pesar de haberse empleado en dichos Laboratorios distintos criterios de estabilidad, por lo que la comparación entre los dos grupos de resultados experimentales habrá de hacerse, según veremos más adelante, mediante la relación existente entre la altura de onda de "iniciación de rotura" y la de "rotura total".

Ya que la fórmula para el cálculo de los diques de escollera es:

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

y puede escribirse en la forma:

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

se han adoptado en dichas figuras como coordenadas el talud  $\cot \alpha$  y:

$$\frac{P^{1/3}}{A} \frac{(d - 1)}{d^{1/3}} = \frac{1}{A} \sqrt[3]{\frac{N}{P} \frac{(d - 1)^3}{d}};$$

con lo cual esta ordenada resulta inversamente proporcional a la altura de onda  $A$ , que ha sido la variable determinada en los ensayos.

*Equilibrios hacia arriba y hacia abajo.*

La situación de los cantos desprendidos de la zona de avería con respecto a ésta, confirma la existencia de dos tipos de equilibrio, hacia abajo y hacia arriba. En efecto, para las tres formas ensayadas y para taludes no excesivamente suaves, el depósito forma en los ensayos realizados un cordón por bajo de la zona de avería. Lo contrario sucede para taludes muy suaves, en los que el cordón se forma por encima.

Del estudio de los perfiles de los taludes en "rotura total" se deduce la situación aproximada del punto de transición entre ambos tipos de equilibrio, que queda comprendida entre  $\cot \alpha = 3$  y  $\cot \alpha = 4$  para escolleras naturales; entre  $\cot \alpha = 2$  y  $\cot \alpha = 4$ , probablemente próxima a  $\cot \alpha = 3$ , para bloques paralelepípedicos, y entre  $\cot \alpha = 1$  y  $\cot \alpha = 2$  y próxima a esta última para tetrápodos.

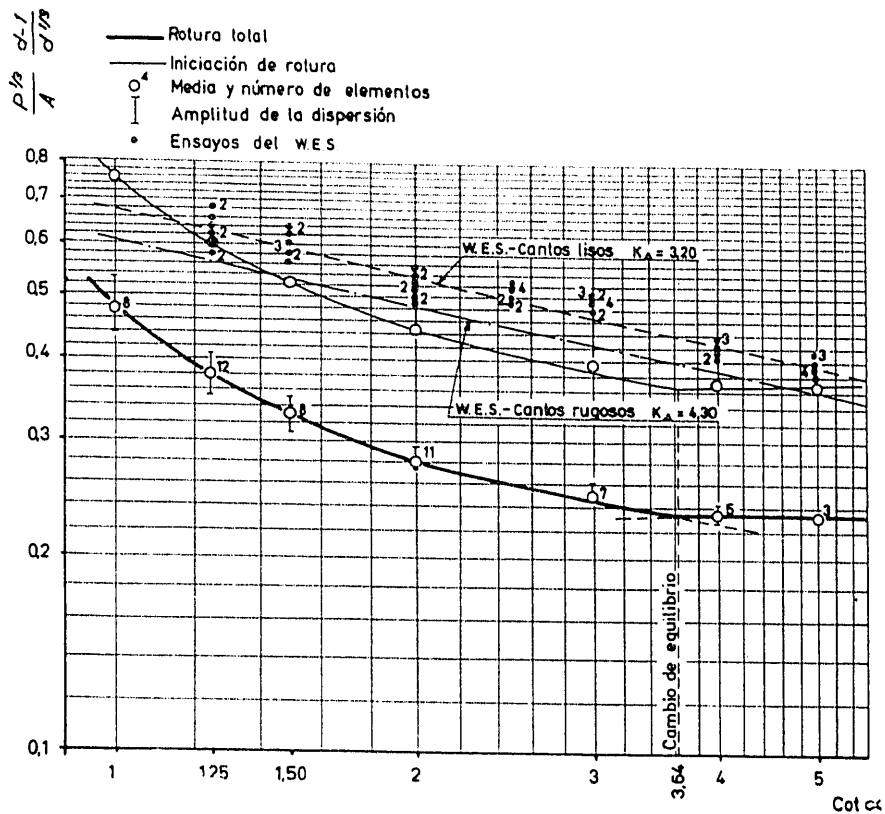


Fig. 10. — Escolleras naturales.

Conocida la situación aproximada del punto de transición, se separan las experimentaciones correspondientes a cada una de las formas empleadas en dos grupos que comprendan los ensayos del mismo tipo de equilibrio, hacia abajo o hacia arriba, y se determinan, para cada uno de ellos, los parámetros  $N$  y  $f$  de primer ajuste de las curvas correspondientes a las averías totales  $h_{100\%}$  con los puntos experimentales.

Los respectivos valores del coeficiente de rozamiento  $f$  resultan en todos los casos muy próximos a los correspondientes a seis lados del cubo equivalente en las curvas del Taludómetro de la figura 4.<sup>a</sup>

Esto indica que la longitud del "talud activo", o aquella que se rompe realmente bajo la acción más intensa de la ola, se aproxima a los dichos seis lados del cubo equivalente. Lógicamente la longitud total de la avería, que se propaga con espesores decrecientes, es mayor (figs. 7.<sup>a</sup> y 8.<sup>a</sup>).

Aunque este número de lados del cubo equivalente se eleve a siete u ocho, disminuyendo algo las  $f$ , la disminución de las  $N$  correspondientes permiten que las curvas sigan aproximándose a los puntos experimentales, sin variación sensible en los resultados obtenidos. No resulta admisible un mayor número de elementos.

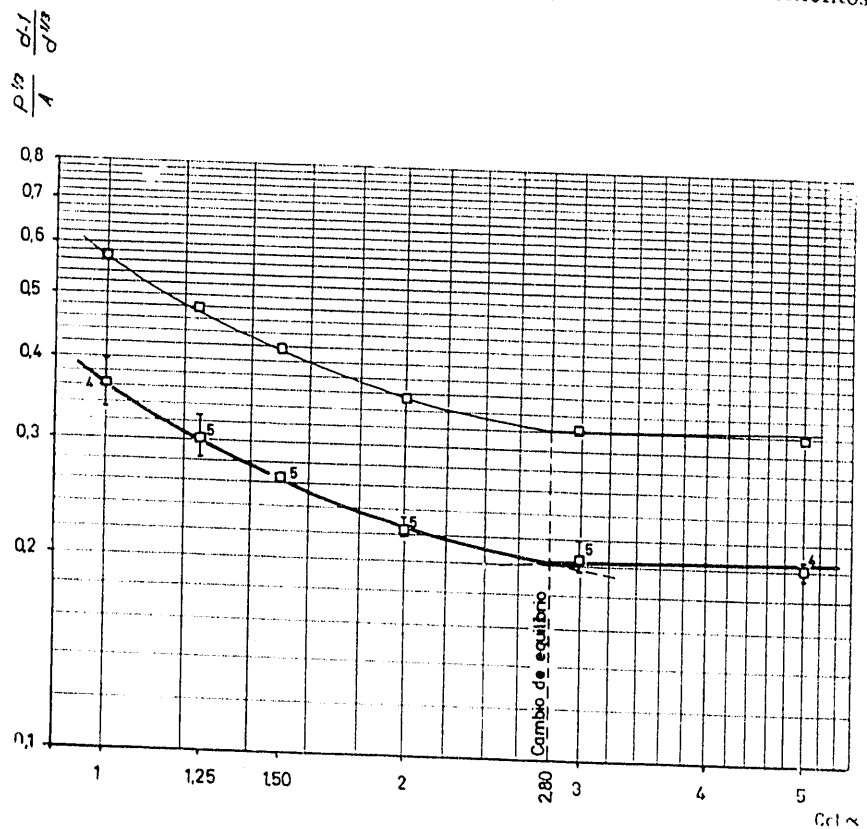


Fig. 11. — Bloques paralelepípedicos.

Admitiendo, pues, con aceptable aproximación, la longitud característica de la "zona activa" del dique correspondiente a dichos seis lados del cubo equivalente, se obtienen en las curvas del Taludómetro de la figura 4.<sup>a</sup> los más afinados valores de los coeficientes de rozamiento de las escolleras naturales,  $f_c = 2,38$ , de los bloques paralelepípedicos,  $f_b = 2,84$ , y de los tetrápodos  $f_t = 3,47$ . A base de ellos se determinaron por mínimos cuadrados los coeficientes de empuje correspondientes en "rotura total", o sea, para una avería del 100 por 100,  $N_{100\%}$ , y  $N'_{100\%}$  referentes a cada una de las formas, resultando  $N_{c\ 100\%} = 0,105$ ,  $N_{b\ 100\%} = 0,105$  y  $N_{t\ 100\%} = 0,15$  para el caso de equilibrio hacia abajo, y  $N'_{c\ 100\%} = 0,207$ ,  $N'_{b\ 100\%} = 0,224$  y  $N'_{t\ 100\%} = 0,425$  para equilibrio hacia arriba, respectivamente, con las que se han representado las curvas de las figuras 10, 11 y 12.

Los puntos de transición resultan así más precisamente situados en  $\cot \alpha = 3,64$  para escolleras naturales,  $\cot \alpha = 2,80$  para bloques paralelepípedicos y  $\cot \alpha = 1,77$  para tetrápodos. Únicamente son de aplicación real para el cálculo de los diques de escollera, las partes de las curvas de equilibrio hacia abajo, situadas sobre estos



puntos de transición, pues como ya se ha indicado, las de equilibrio hacia arriba requieren mayor volumen de obra y mayor peso de cantos o elementos, por ser crecientes con el talud  $\cot \alpha$ .

El grado de aproximación de las curvas correspondientes con los puntos experimentales de dichas figuras, comprueba fehacientemente que nuestra fórmula general del año 1938:

$$P = \frac{NA^3 d}{(f \cos \alpha - \operatorname{sen} \alpha)^3 (d-1)^3}$$

correspondiente al equilibrio hacia abajo, es la realmente aplicable, sin la modificación propuesta por el WES, para el cálculo de los diques de escollera.

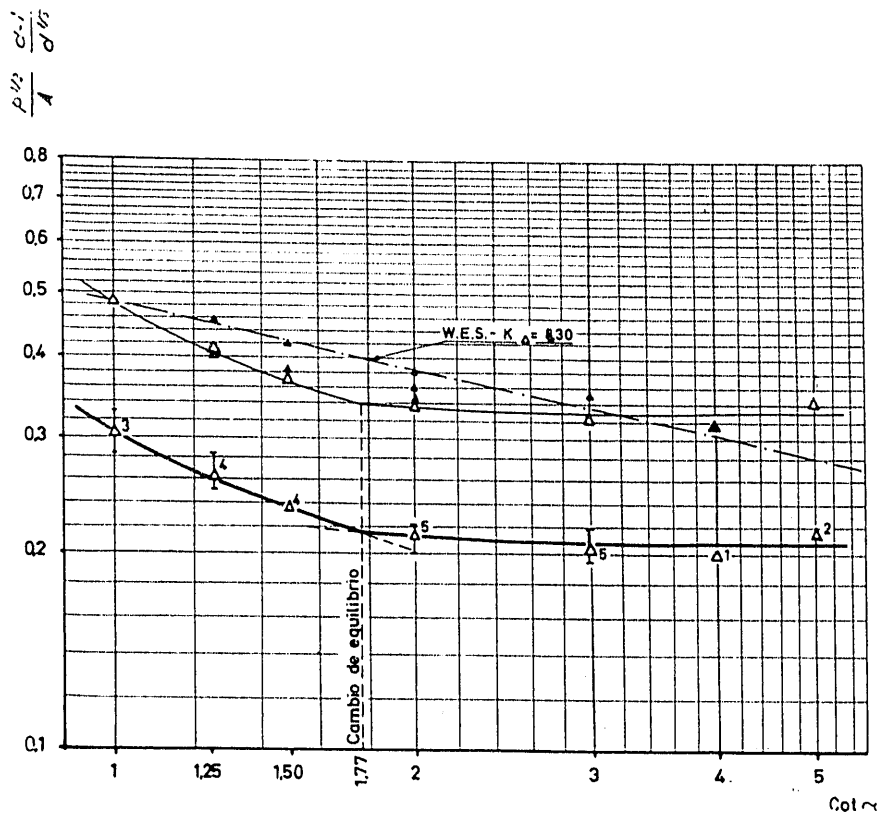


Fig. 12. -- Tetrapodos.

Aunque sin aplicación práctica directa para éstos, también queda confirmada la fórmula:

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

que no es más que la generalización de la anterior para equilibrio hacia arriba.

Las ventajas de nuestra fórmula, sin su modificación propuesta por el WES, han quedado también expuestas en el Capítulo I, y se concretan aún más en la parte del apartado: "Curvas de aplicación", referente a las figuras 10, 11 y 12.

### *Campo de aplicación de la fórmula.*

Para determinar el campo de aplicación de la fórmula y por las razones aducidas en el Capítulo I, que sería ocioso repetir aquí, se establecen las figuras 13, 14 y 15, referentes a la familiar de curvas  $\operatorname{tg} \alpha = n \sqrt{\frac{h}{L_0}}$ .

Estas figuras tienen lógicamente por abscisas  $\operatorname{tg} \alpha$  (o  $\cot \alpha$ ) y por ordenadas los peraltes relativos  $\frac{h}{L_0}$ . Además, se establece otra escala complementaria de abscisas correspondientes a las alturas de olas de rotura total del dique, determinada mediante la aplicación de la fórmula en dicha rotura total:

$$A = \sqrt[3]{\frac{P (f \cos \alpha - \operatorname{sen} \alpha)^2 (d - l)^3}{N_{100\%} d}}$$

En estas condiciones la zona de aplicación de la fórmula es indudablemente aquélla en la que los puntos experimentales se sitúan en la vertical de la altura correspondiente a cada talud o, teniendo en cuenta la dispersión debida a los incrementos de altura de ola en los ensayos, de 1 cm. en el tamaño grande y de 0,5 en el tamaño mitad, en las zonas verticales rayadas en las figuras.

Se comprueba así que la fórmula es de aplicación general y que solamente en la parte inferior de cada figura, o sea, en la correspondiente a peraltes relativos  $\frac{h}{L_0}$  muy pequeños, para los cuales las olas no rompen sobre el talud, los puntos experimentales salen acentuadamente de dichas zonas rayadas verticales. Únicamente los taludes muy rígidos, y debido a la forma especial de actuar la masa de agua descendente, pueden ser rotos aún por la acción de olas no rompientes, en la forma que se expone a continuación.

Los puntos límites de aplicación de la fórmula, correspondientes a cada talud  $\cot \alpha$ , quedan determinados en su vertical, pues están comprendidos entre los puntos más bajos situados en la zona rayada correspondiente y los desplazados de ella, y deben situarse próximos a los valores de  $\frac{h}{L_0}$  de acentuado desplazamiento, para garantizar la seguridad de la obra.

Estos puntos definen, en cada una de las figuras 13, 14 y 15, dos ramas de curvas límites: la correspondiente a taludes normales y la referente a taludes muy rígidos.

En relación con estas dos ramas de la curva, procede aclarar que, como la observación de la experimentación efectuada comprueba, para que el fundamental régimen de equilibrio hacia abajo que estamos estudiando, originado por el descenso de la masa de agua por el talud, se produzca en las peores condiciones, que son a las que se refiere la fórmula, es preciso que este descenso, o caída, sea libre y no frenado por la bajada del nivel en contacto con el talud originada por el propio movimiento ondulatorio, que en algunos casos límites puede ser más lenta que dicha caída.

Siempre que la ola rompe se produce la caída libre de la masa de agua, pero únicamente en los taludes muy rígidos puede seguirse produciendo la caída libre en alguna zona de olas no rotas, debido a la relativa rapidez del movimiento ondulatorio correspondiente. Aún sobre estos taludes rígidos, cuando el movimiento ondulatorio se hace suficientemente lento, o sea, para períodos  $2T$  grandes y peraltes

# ZONA DE APLICACION DE LA FORMULA

## ESCOLLERAS NATURALES

Cot  $\alpha$  10 125 15 2 3

- PUNTOS DE ROTURA DEL DIQUE \_\_\_\_\_ ○ ● ○ ○ ●
- PUNTOS DE ROTURA DEL DIQUE POR LA OLA ROTADA POR EL FONDO \_\_\_\_\_ ♂ ♀ ♂ ♀ ♂
- PENDIENTE LIMITE ENTRE REFLEXION Y ROTURA MEDIAS-(TALUDES LISOS Y CONTINUOS) \_\_\_\_\_ - - - - -
- PENDIENTE LIMITE DE ROTURA DE LA OLA SOBRE ESCOLLERAS NATURALES O ARTIFICIALES \_\_\_\_\_ - - - - -
- PUNTOS LIMITES NO DESPLAZADOS \_\_\_\_\_ x x x
- LUGAR GEOMETRICO DE LOS PUNTOS LIMITES NO DESPLAZADOS \_\_\_\_\_ - - - - -
- LIMITE DE APLICACION DE LA FORMULA \_\_\_\_\_ - - - - -

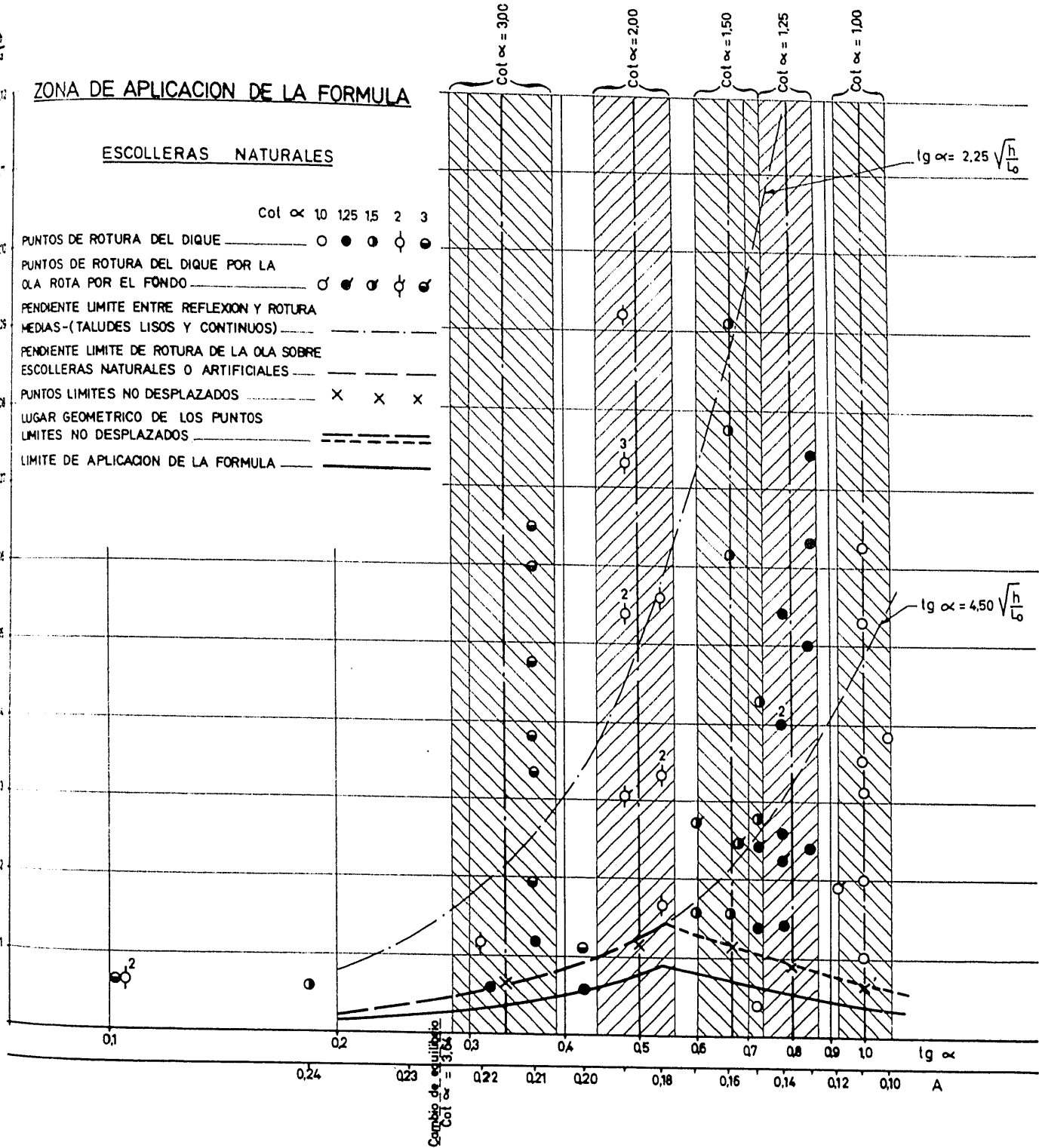


Figura 13.

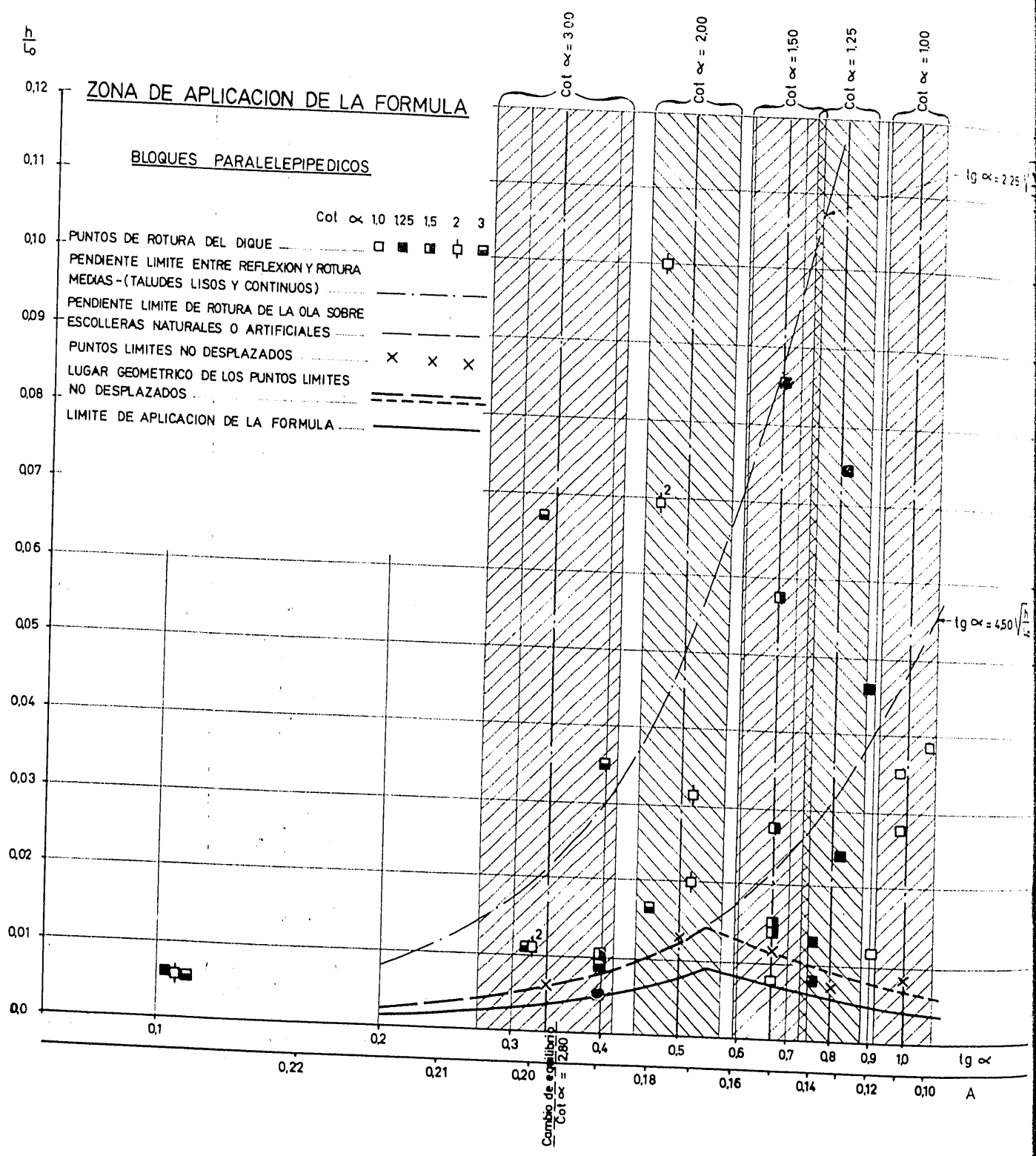


Figura 14.

5.12

# ZONA DE APLICACION DE LA FORMULA

## TETRAPODOS

Col  $\alpha$  10 125 15

- PUNTOS DE ROTURA DEL DIQUE △ ▲ ▲
- PENDIENTE LIMITE ENTRE REFLEXION Y ROTURA MEDIAS-(TALUDES LISOS Y CONTINUOS) ---
- PENDIENTE LIMITE DE ROTURA DE LA OLA SOBRE ESCOLLERAS NATURALES O ARTIFICIALES ---
- PUNTOS LIMITES NO DESPLAZADOS x x x
- LUGAR GEOMETRICO DE LOS PUNTOS LIMITES NO DESPLAZADOS ---
- LIMITE DE APLICACION DE LA FORMULA ---

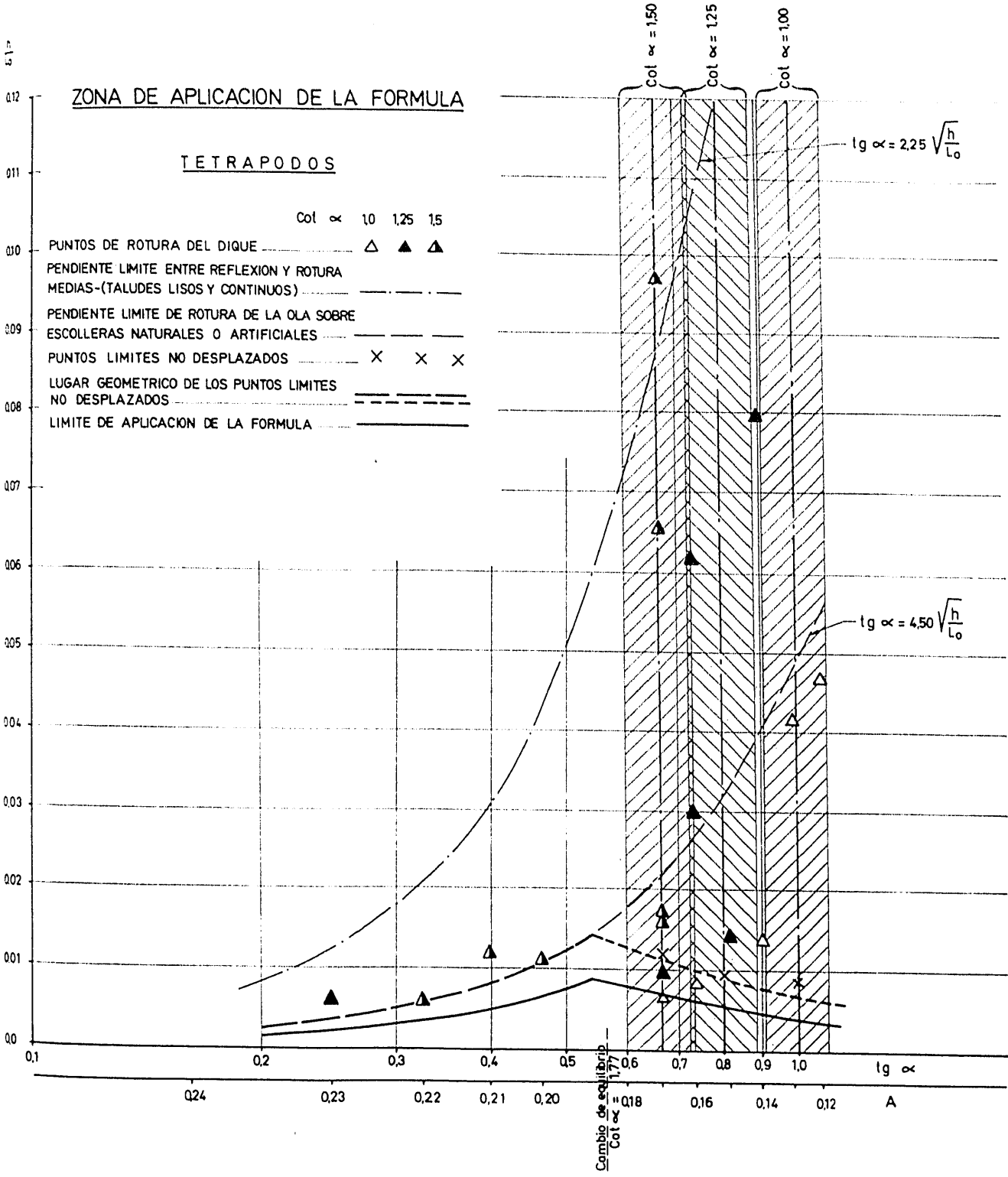


Figura 15.

relativos  $\frac{h}{L_0}$  pequeños, la caída deja de ser libre. Únicamente en estas condiciones excepcionales la fórmula no sería aplicable.

Como consecuencia de ésto la curva  $\tan \alpha = 4,5 \sqrt{\frac{h}{L_0}}$ , que limita la franca rotura de las olas sobre las escolleras, limita a su vez la zona de aplicación de la fórmula, excepto en los taludes muy rígidos en los que, por las razones expuestas, queda limitada por las otras ramas de curvas determinadas por los puntos límites experimentales.

Son estos puntos límites experimentales los que, en definitiva o indudablemente limitan la zona de aplicación de la fórmula.

Aplicando el coeficiente de seguridad adoptado en altura de ola,  $\frac{1}{1,6} = 0,6$ , las curvas límites de aplicación de la fórmula bajan en esta relación, por tener que disminuir proporcionalmente los peraltes relativos correspondientes a cada talud.

Ni aun por bajo de estas últimas curvas límites es prudente calcular los diques de escollera, naturales o artificiales, utilizando para ello los puntos desplazados, pues además de por otras razones, si en la compleja ola natural correspondiente disminuye el peralte relativo de algunas de ellas, averiarían al dique, así imprudentemente calculado.

Como consecuencia de todo esto la fórmula resulta de aplicación para la generalidad de los diques de abrigo de escollera.

#### *Curvas de aplicación.*

Debido a que, según se deduce de las curvas de estabilidad, figura 9.<sup>a</sup>, la relación media entre la altura de onda de "iniciación de rotura" y la de "rotura total" es prácticamente igual para escolleras naturales, bloques paralelepípedicos y tetrápodos, a  $h_0/h_{100\%} = 0,62$ , si admitimos que los diques de escollera han de proyectarse en forma que, para la altura de ola de cálculo, no se origine avería alguna, la relación entre los pesos de los elementos, o de los coeficientes  $N_{100\%}$  y  $N_{0\%}$  de la fórmula habrá de ser:

$$\frac{N_{0\%}}{N_{100\%}} = \left( \frac{A_{100\%}}{A_{0\%}} \right)^3 = \left( \frac{1}{0,62} \right)^3 = 1,6^3 = 4,1.$$

La fórmula de diques de escollera, para "iniciación estricta de rotura", o sea, prácticamente sin averías para el equilibrio hacia abajo y sin rebase de la coronación, puede así expresarse en la forma:

$$P = \frac{N A^3 d}{(f \cos \alpha - \sin \alpha)^3 (d - 1)^3}$$

donde  $A$  es la amplitud de ola de cálculo al pie del dique,  $f$  el coeficiente de rozamiento antes determinado y  $N = N_{0\%} = 4,1 N_{100\%}$  el coeficiente de aplicación. Estos coeficientes tienen los siguientes valores:

$$\begin{aligned} f_r &= 2,38, N_r = 4,1, N_{r 100\%} = 0,430 \text{ para escolleras naturales;} \\ f_b &= 2,84, N_b = 4,1, N_{b 100\%} = 0,430 \text{ para bloques paralelepípedicos;} \\ f_t &= 3,47, N_t = 4,1, N_{t 100\%} = 0,656 \text{ para tetrápodos.} \end{aligned}$$

Estos valores de las  $N$  suponen un coeficiente de seguridad de solamente 1 en iniciación de rotura, y de 1,6 representado en altura de ola o de 4,1 en peso de cantos para la rotura total.

Para equilibrio hacia arriba, "iniciación de rotura" y también sin rebase:

$$P = \frac{N' A^3 d}{(f \cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha^2 (d-1))^2}$$

FÓRMULA

$$P = Q \times R \times A^3$$

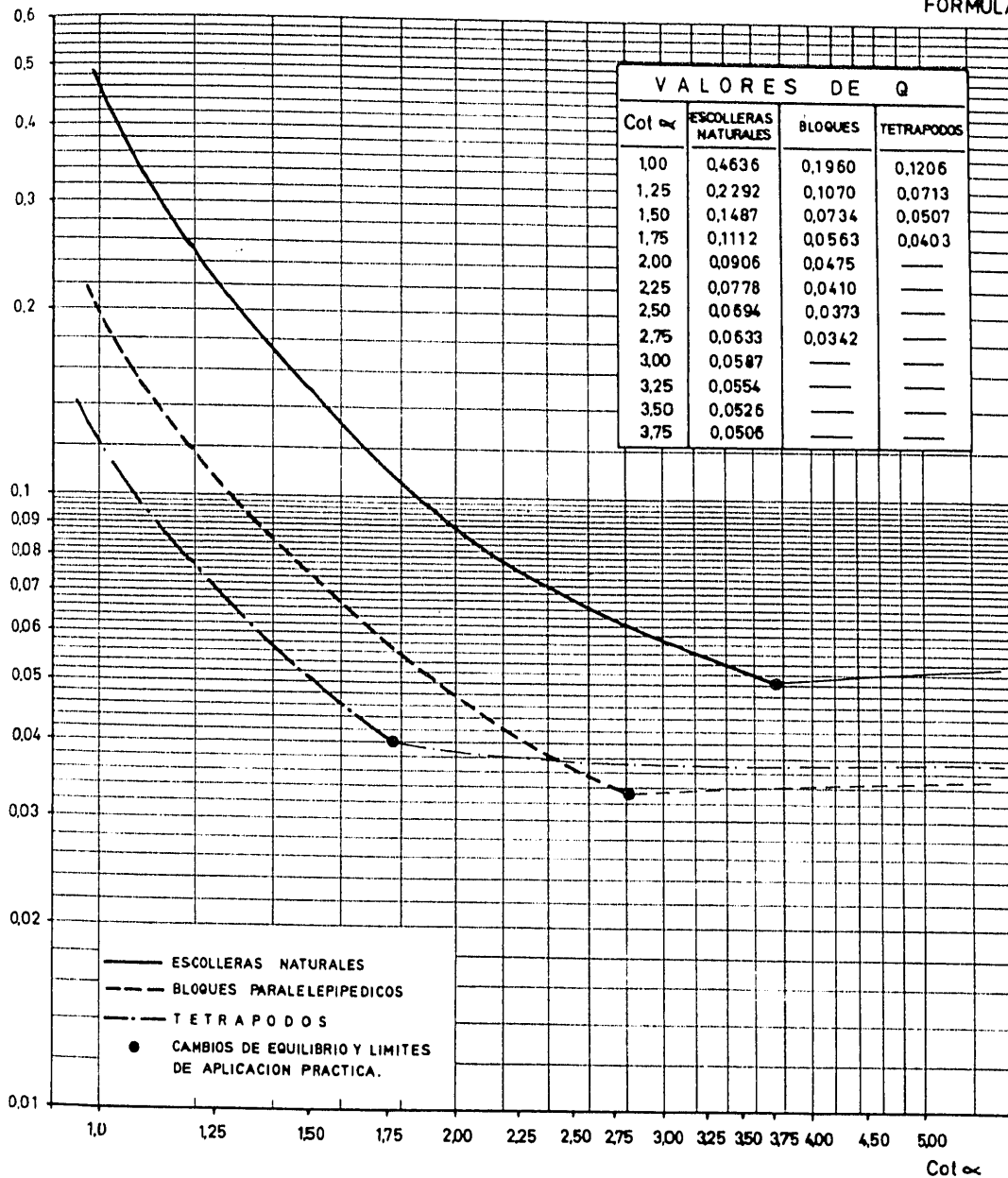


Fig. 16. — Cálculo de los diques de escolleras naturales y artificiales. Curvas de aplicación en incidencia normal.

donde, como en el caso anterior, A es la amplitud de la ola de cálculo al pie del dique y:

$$f_c = 2,38, N'_c = 4,1, N'_{c 100 \%} = 0,849 \text{ para escolleras naturales;}$$

$$f_b = 2,84, N'_b = 4,1, N'_{b 100 \%} = 0,918 \text{ para bloques paralelepípedicos;}$$

$$f_t = 3,47, N'_t = 4,1, N'_{t 100 \%} = 1,743 \text{ para tetrapodos.}$$

En las figuras 10, 11 y 12 aparecen las curvas en "iniciación de rotura" correspondientes a las tres formas ensayadas. Nuestros puntos experimentales de tetrápodos, figura 12, no están lejos de los obtenidos en la experimentación del Waterways Experiment Station, y se adaptan mucho mejor a nuestras curvas.

Las diferencias entre nuestros resultados experimentales que se observan en la figura 10 correspondientes a escolleras naturales, proviene de que la experimentación del WES corresponde a escolleras lisas (smooth querrystone), mientras que nuestros

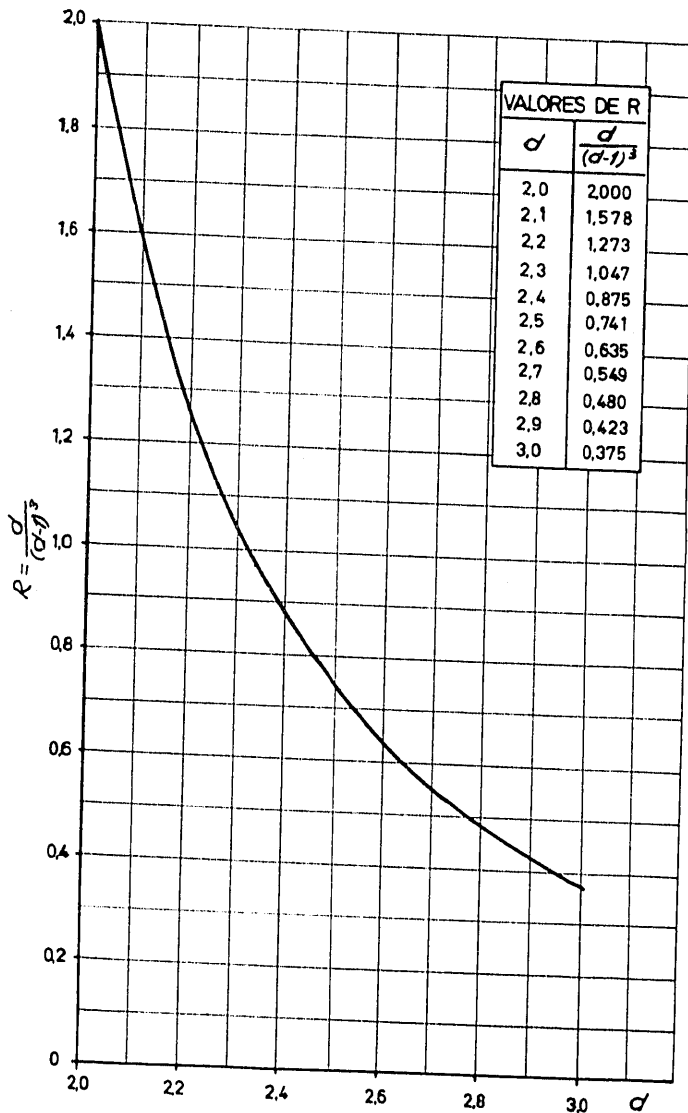


Fig. 17.—Influencia de la densidad.

ensayos fueron realizados con escolleras naturales, que según la denominación del WES podrían incluirse entre las escolleras rugosas (rougt querrystone). El trazado de la curva del WES correspondiente a este tipo de escolleras naturales, cuyo parámetro  $K$  es igual a 4,3, muestra también que nuestras curvas se adaptan mejor a nuestros puntos experimentales.

En la figura 11 no aparece la curva del WES, pues este laboratorio no ha efectuado ensayos de bloques paralelepípedicos.



Con el objeto de facilitar la aplicación de nuestra fórmula para el cálculo de los diques de escollera, en las figuras 16 y 17 se representan las funciones:

$$Q = \frac{N}{(f \cos \alpha - \text{sen } \alpha)^3} \quad \text{ó} \quad Q' = \frac{N'}{(f \cos \alpha - \text{sen } \alpha)^3}$$

y

$$R = \frac{d}{(d - l)^3}$$

con lo que el peso,  $P$ , en toneladas, de los cantos del manto es:

$$P = Q R A^3$$

siendo  $A$  la altura de la ola de cálculo, en metros.

### Observación final.

Como ya se ha indicado anteriormente, se están realizando los ensayos relativos a incidencias oblicuas del oleaje y a los morros de los diques. Los resultados de estos ensayos afectan a los valores de los coeficientes y a las curvas de aplicación, por lo que unos y otras no deberán utilizarse hasta que se publiquen dichos resultados, ya que el efecto de la oblicuidad tiene influencia desde ángulos muy pequeños.

### Lista de símbolos.

$P$	== peso de los cantos.
$\gamma_1, (\gamma_f)$	== peso específico del agua.
$\gamma_r, (\gamma_r)$	== peso específico de los cantos.
$\gamma_n$	== peso específico de los cantos naturales.
$\gamma_a$	== peso específico de los cantos artificiales.
$d (S, S_r)$	== densidad relativa de los cantos == $\frac{\gamma_r}{\gamma_1} = \frac{(\gamma_r)}{(\gamma_f)}$
$f$	== coeficientes de rozamiento.
$f_e$	== coeficiente de rozamiento escollera natural.
$f_b$	== coeficiente de rozamiento bloques paralelepípedicos.
$f_t$	== coeficiente de rozamiento tetrápodos.
$\alpha$	== ángulo del talud del dique.
$\alpha_n$	== ángulo del talud natural $f = \text{tg } \alpha_n = \text{tg } (\varphi)$ .
$N$	== coeficiente práctico dimensional, equilibrio hacia abajo.
$N'$	== coeficiente práctico dimensional, equilibrio hacia arriba.
$N_{0\%}, N'_{0\%}$	== coeficientes prácticos, en iniciación de rotura.
$N_{100\%}, N'_{100\%}$	== coeficientes prácticos, en rotura total.
$N_e, N_{e0\%}, N_{e100\%}$	} == coeficientes prácticos para escolleras naturales.
$N'_e, N'_{e0\%}, N'_{e100\%}$	
$N_b, N_{b0\%}, N_{b100\%}$	} == coeficientes prácticos para bloques.
$N'_b, N'_{b0\%}, N'_{b100\%}$	
$N_t, N_{t0\%}, N_{t100\%}$	} == coeficientes prácticos para tetrápodos.
$N'_t, N'_{t0\%}, N'_{t100\%}$	

$N_a$	= coeficiente adimensional = $\frac{N}{T_1}$ .
$(K)$	= coeficiente adimensional.
$(K_D)$ $(K_\Delta)$	= coeficiente adimensional.
$A$	= amplitud de onda de cálculo.
$A_0$	= amplitud de onda en profundidades indefinidas.
$A_p$	= amplitud de onda en el pie del dique.
$A_0 \%$	= amplitud de la ola de cálculo para iniciación ó 0% de avería.
$A_{100 \%}$	= amplitud de la ola de cálculo para rotura total 100% de avería.
$(H)$	= amplitud de onda.
$h$	= semialtura de onda.
$h_0 \%$	= semialtura de onda, iniciación de rotura ( $2 h_0 \% = A_0 \%$ ).
$h_{100 \%}$	= semialtura de onda, rotura total ( $2 h_{100 \%} = A_{100 \%}$ ).
$h_i$	= semialtura de onda, incidente sobre el dique.
$2 h_v$	= amplitud del vientre del movimiento estacionario originado por la reflexión.
$2 h_n$	= amplitud del nodo del movimiento estacionario originado por la reflexión.
$T$	= semiperíodo.
$L$	= semilongitud de onda.
$L_0$	= semilongitud de onda en profundidad indefinida.
$L_p$	= semilongitud de onda en el pie del dique.
$H$	= profundidad.
$H_p$	= profundidad en el pie del dique.
$\frac{h}{L}$	= peralte unitario o simplemente peralte.
$\frac{h}{L_0}$	= peralte relativo.
$n$	= coeficiente adimensional.
$Q, R$	= funciones.
$l$	= lado del cubo equivalente.

NOTA: Para las aplicaciones prácticas en la naturaleza se emplea el sistema ton. m. sg. En los ensayos de Laboratorio se ha empleado el sistema c. g. s.

Los símbolos sin paréntesis son los correspondientes a esta ponencia. Los comprendidos entre paréntesis corresponden a otros estudios citados en ella.

# RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

## ESCOLLERA NATURAL

Características del dique			Características de la ola					$\frac{P}{A} \frac{d-1}{d^2}$	$\frac{P}{A^2} \frac{(d-1)^2}{d} = Q$	Observaciones	
H	L	d	2T	H	$\frac{H}{L}$	A = 2h	$\frac{h}{L_s}$	A	d		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)		
1.00	0.102	2.53	5.02	0.60	0.10	0.150	0.0038	0.350	0.0428	Descenso no libre.	
		»	2.62	»	0.20	0.110	0.0103	0.476	0.1084		
		»	1.86	»	0.30	0.110	0.0204	0.476	0.1084		
		»	1.50	»	0.40	0.110	0.0313	0.476	0.1084		
		»	1.29	»	0.50	0.100	0.0385	0.524	0.1443		
		»	1.15	»	0.60	0.110	0.0533	0.476	0.1084		
		»	1.06	»	0.70	0.110	0.0627	0.476	0.1084		
		»	2.00	0.11	0.108	0.120	0.0192	0.437	0.0835		
	0.0131	»	1.00	0.22	0.35	0.055	0.0352	0.481	0.1114		Rotura por el fondo. Fondo canal en pendiente 1 %.
1.25	0.102	2.53	5.02	0.60	0.10	0.220	0.0056	0.238	0.0135		Descenso no libre. Descenso no libre.
		»	3.41	»	0.15	0.210	0.0116	0.250	0.0156		
		»	2.62	»	0.20	0.150	0.0140	0.350	0.0427		
		»	1.86	»	0.30	0.140	0.0259	0.375	0.0526		
		»	1.50	»	0.40	0.140	0.0398	0.375	0.0526		
		»	1.29	»	0.50	0.140	0.0539	0.375	0.0526		
		»	1.15	»	0.60	0.130	0.0630	0.403	0.0656		
		»	1.06	»	0.70	0.130	0.0741	0.403	0.0656		
		»	2.00	0.13	0.117	0.150	0.0240	0.350	0.0427	Rotura por el fondo.	
		»	2.00	0.18	0.14	0.140	0.0224	0.375	0.0526	Rotura por el fondo.	
	0.0131	»	3.55	0.30	0.10	0.100	0.0051	0.264	0.0185	Descenso no libre.	
		»	1.85	»	0.20	0.070	0.0141	0.378	0.0540		
		»	1.32	»	0.30	0.065	0.0239	0.407	0.0675		
		»	1.06	»	0.40	0.070	0.0399	0.378	0.0540		
		»	0.91	»	0.50	0.065	0.0503	0.407	0.0675		
1.50	0.102	2.53	5.02	0.60	0.10	0.240	0.0061	0.218	0.0101	Descenso no libre. Descenso no libre.	
		»	2.62	»	0.20	0.170	0.0159	0.309	0.0294		
		»	1.86	»	0.30	0.150	0.0278	0.350	0.0427		
		»	1.50	»	0.40	0.150	0.0427	0.350	0.0427		
		»	1.29	»	0.50	0.160	0.0616	0.328	0.0352		
		»	1.15	»	0.60	0.160	0.0775	0.328	0.0352		
		»	1.06	»	0.70	0.160	0.0912	0.328	0.0352		
		»	2.00	0.15	0.127	0.170	0.0272	0.309	0.0294		Rotura por el fondo.
		»	2.00	0.20	0.148	0.150	0.0248	0.338	0.0388		Rotura por el fondo.
	0.0131	»	1.80	0.21	0.17	0.080	0.0158	0.331	0.0362		Fondo canal en pendiente 1 %.
2.00	0.102	2.53	5.02	0.60	0.10	0.250	0.0064	0.210	0.0092	Descenso no libre. Descenso no libre.	
		»	3.41	»	0.15	0.220	0.0121	0.239	0.0136		
		»	2.62	»	0.20	0.180	0.0168	0.292	0.0248		
		»	1.86	0.40	0.235	0.180	0.0333	0.292	0.0248		
		»	1.86	0.60	0.30	0.180	0.0333	0.292	0.0248		
		»	1.50	»	0.40	0.190	0.0541	0.276	0.0210		
		»	1.29	»	0.50	0.190	0.0732	0.276	0.0210		
		»	1.29	»	0.50	0.190	0.0732	0.276	0.0210		
		»	1.15	»	0.60	0.190	0.0920	0.276	0.0210		
		»	2.00	0.19	0.144	0.190	0.0304	0.276	0.0210		Rotura por el fondo.
	0.0131	»	3.55	0.30	0.10	0.125	0.0064	0.212	0.0095	Descenso no libre.	
		»	1.85	»	0.20	0.090	0.0568	0.294	0.0254		
		»	1.06	»	0.40	0.095	0.0542	0.278	0.0216		
		»	0.91	»	0.50	0.095	0.0735	0.278	0.0216		
3.00	0.102	2.53	5.02	0.60	0.10	0.250	0.0064	0.210	0.0092	Descenso no libre.	
		»	3.41	»	0.15	0.200	0.0110	0.262	0.0180		
		»	2.62	»	0.20	0.210	0.0196	0.259	0.0156		
		»	1.86	»	0.30	0.210	0.0389	0.250	0.0156		
		»	1.50	»	0.40	0.210	0.0598	0.250	0.0156		
		»	1.68	0.75	0.40	0.210	0.0477	0.250	0.0156		
		»	1.44	0.75	0.50	0.210	0.0649	0.250	0.0156		
		»	2.00	0.21	0.152	0.210	0.0336	0.250	0.0156		Rotura por el fondo.
4.00	0.102	2.53	5.02	0.60	0.10	0.230	0.0058	0.228	0.0119		Descenso no libre.
		»	2.62	»	0.20	0.220	0.0205	0.239	0.0136		
		»	1.86	»	0.30	0.230	0.0426	0.228	0.0119		
		»	1.50	»	0.40	0.230	0.0655	0.228	0.0119		
	0.0131	»	3.55	0.30	0.10	0.130	0.0066	0.203	0.0084	Descenso no libre.	
		»	1.85	»	0.20	0.110	0.0206	0.241	0.0139		
		»	1.06	»	0.40	0.110	0.0627	0.241	0.0139		
5.00	0.102	2.53	2.62	0.60	0.20	0.220	0.0205	0.239	0.0136	Descenso no libre.	
		»	1.86	»	0.30	0.230	0.0426	0.228	0.0119		
		»	1.50	»	0.40	0.230	0.0655	0.228	0.0119		

# RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

## BLOQUES PARALELEPIPEDICOS

Características del dique			Características de la ola					$\frac{P^{1/2}}{A}$	$\frac{d-1}{d^{1/2}}$	$\frac{P}{A^2} \frac{(d-1)^2}{d} = Q$	Observaciones
Cota	P	d	2T	H	$\frac{H}{L}$	A = 2h	$\frac{h}{L_0}$				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)		
1,00	0,0125	2,10	2,46	0,22	0,125	0,075	0,0079	0,262	0,0180	Descenso no libre. Fondo canal en pendiente 1:3 Fondo canal en pendiente 1:3 Fondo canal en pendiente 1:3 Fondo canal en pendiente 1:3	
»	»	»	1,80	0,21	0,17	0,060	0,0118	0,333	0,0367		
»	»	»	1,11	0,22	0,30	0,055	0,0276	0,362	0,0476		
»	»	»	1,00	0,22	0,35	0,055	0,0352	0,362	0,0476		
»	»	»	0,91	0,22	0,40	0,050	0,0385	0,399	0,0634		
1,25	0,096	2,10	5,02	0,60	0,10	0,190	0,0048	0,206	0,0088	Descenso no libre.	
»	»	»	3,41	»	0,15	0,140	0,0077	0,281	0,0222		
»	»	»	2,62	»	0,20	0,140	0,0131	0,281	0,0222		
»	»	»	1,86	»	0,30	0,130	0,0241	0,302	0,0276		
»	»	»	1,29	»	0,50	0,120	0,0462	0,328	0,0352		
»	»	»	1,06	»	0,70	0,130	0,0741	0,302	0,0276		
1,50	0,096	2,10	5,02	0,60	0,10	0,240	0,0061	0,164	0,0044	Descenso no libre. Descenso no libre.  Fondo canal en pendiente 1:3	
»	»	»	3,41	»	0,15	0,190	0,0105	0,206	0,0088		
»	»	»	2,62	»	0,20	0,150	0,0140	0,262	0,0180		
»	»	»	1,86	»	0,30	0,150	0,0278	0,262	0,0180		
»	»	»	1,29	»	0,50	0,150	0,0576	0,262	0,0180		
»	»	»	1,06	»	0,70	0,150	0,0855	0,262	0,0180		
»	0,0125	»	1,80	0,21	0,17	0,075	0,0148	0,266	0,0188		
»	»	»	1,80	0,21	0,17	0,075	0,0148	0,266	0,0188		
2,00	0,096	2,10	5,02	0,60	0,10	0,230	0,0058	0,171	0,0050	Descenso no libre. Descenso no libre. Descenso no libre. Descenso no libre.	
»	»	»	3,41	»	0,15	0,200	0,0110	0,196	0,0076		
»	»	»	3,41	»	0,15	0,200	0,0110	0,196	0,0076		
»	»	»	2,34	»	0,228	0,170	0,0199	0,231	0,0124		
»	»	»	1,86	»	0,30	0,170	0,0315	0,231	0,0124		
»	»	»	1,29	»	0,50	0,180	0,0693	0,219	0,0105		
»	»	»	1,29	»	0,50	0,180	0,0693	0,219	0,0105		
»	»	»	1,06	»	0,70	0,180	0,1026	0,219	0,0105		
»	»	»	1,06	»	0,70	0,180	0,1026	0,219	0,0105		
»	»	»	1,06	»	0,70	0,180	0,1026	0,219	0,0105		
3,00	0,096	2,10	5,02	0,60	0,10	0,230	0,0058	0,171	0,0050	Descenso no libre.	
»	»	»	3,60	»	0,14	0,190	0,0094	0,206	0,0088		
»	»	»	3,41	»	0,15	0,200	0,0110	0,196	0,0076		
»	»	»	2,62	»	0,20	0,180	0,0168	0,219	0,0105		
»	»	»	1,86	»	0,30	0,190	0,0352	0,206	0,0088		
»	»	»	1,29	»	0,50	0,200	0,0670	0,196	0,0076		
»	»	»	1,29	»	0,50	0,200	0,0670	0,196	0,0076		
5,00	0,096	2,10	2,62	0,60	0,20	0,200	0,0187	0,196	0,0076		
»	»	»	1,86	»	0,30	0,190	0,0352	0,206	0,0088		
»	»	»	1,50	»	0,40	0,200	0,0569	0,196	0,0076		
»	»	»	1,50	»	0,40	0,190	0,0541	0,206	0,0088		

# RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

## TETRAPODOS

Características del dique			Características de la ola					$\frac{P^2}{A} \frac{d-1}{a^{1/3}}$	$\frac{P}{A^2} \frac{(d-1)^2}{d} = Q$	Observaciones
Profundidad	P	d	2T	H	$\frac{H}{L}$	$A = \frac{1}{2} h$	$\frac{h}{L_s}$	(9)	(10)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	
1.00	0,123	2,10	2,92	0,22	0,105	0,085	0,0065	0,233	0,0127	Descenso no libre.
>	>	>	2,46	>	0,125	0,080	0,0085	0,248	0,0152	Descenso no libre.
>	>	>	1,80	0,21	0,17	0,070	0,0138	0,283	0,0227	Fondo canal en pendiente 1 %.
>	>	>	1,00	0,22	0,35	0,065	0,0416	0,296	0,0260	Fondo canal en pendiente 1 %.
>	>	>	0,91	>	0,40	0,060	0,0464	0,331	0,0361	Fondo canal en pendiente 1 %.
1.25	0,098	2,10	5,02	0,60	0,10	0,230	0,0058	0,172	0,0051	Descenso no libre.
>	>	>	3,41	>	0,15	0,170	0,0094	0,233	0,0126	Descenso no libre.
>	>	>	2,62	>	0,20	0,150	0,0140	0,264	0,0184	
>	>	>	1,86	>	0,30	0,160	0,0296	0,245	0,0152	
>	>	>	1,29	>	0,50	0,160	0,0616	0,248	0,0152	
>	>	>	1,06	>	0,70	0,140	0,0798	0,283	0,0226	
1.50	0,098	2,10	5,02	0,60	0,10	0,220	0,0056	0,180	0,0058	Descenso no libre.
>	>	>	3,41	>	0,15	0,200	0,0110	0,198	0,0077	Descenso no libre.
>	>	>	3,41	>	0,15	0,210	0,0116	0,188	0,0067	Descenso no libre.
>	>	>	2,62	>	0,20	0,170	0,0159	0,233	0,0126	
>	>	>	1,29	>	0,50	0,170	0,0654	0,233	0,0126	
>	>	>	1,06	>	0,70	0,170	0,0969	0,233	0,0126	
>	0,0123	>	1,80	0,21	0,17	0,085	0,0168	0,233	0,0127	Fondo canal en pendiente 1 %.
2.00	0,098	2,10	5,02	0,60	0,10	0,220	0,0056	0,180	0,0058	Descenso no libre.
>	>	>	3,41	>	0,15	0,220	0,0121	0,180	0,0058	Descenso no libre.
>	>	>	2,62	>	0,20	0,180	0,0168	0,220	0,0107	Descenso no libre.
>	>	>	2,10	>	0,213	0,180	0,0261	0,220	0,0107	
>	>	>	1,86	>	0,30	0,180	0,0332	0,220	0,0107	
>	>	>	1,86	>	0,30	0,180	0,0332	0,220	0,0107	
>	>	>	1,29	>	0,50	0,200	0,0770	0,198	0,0077	
>	>	>	1,06	>	0,70	0,200	0,1140	0,198	0,0077	
3.00	0,098	2,10	5,02	0,60	0,10	0,200	0,0051	0,198	0,0077	Descenso no libre.
>	>	>	3,60	>	0,142	0,190	0,0094	0,209	0,0091	
>	>	>	3,41	>	0,15	0,200	0,0110	0,198	0,0077	
>	>	>	2,62	>	0,20	0,180	0,0168	0,220	0,0107	
>	>	>	1,86	>	0,30	0,200	0,0370	0,198	0,0077	
>	>	>	1,29	>	0,50	0,210	0,0808	0,188	0,0067	
4.00	0,0123	2,10	1,00	0,22	0,35	0,100	0,0640	0,199	0,0078	Fondo canal en pendiente 1 %.
5.00	0,098	2,10	1,86	0,60	0,30	0,180	0,0332	0,220	0,0107	
>	>	>	1,50	>	0,40	0,190	0,0540	0,200	0,0091	