

Sobre el efecto de la incidencia oblicua del oleaje en los diques rompeolas (*)

Por LUIS A. GIMENEZ-CURTO
MIGUEL A. LOSADA

Departamento de Ingeniería Oceanográfica y Portuaria
Universidad de Santander

Se presenta la función de estabilidad y las características del flujo en un dique rompeolas bajo la acción de ondas con incidencia oblicua. La función de estabilidad depende del número de Iribarren, tipo de cantos, talud y ángulo de incidencia para un criterio de daño establecido. Las características del flujo dependen del número de Iribarren, tipo de cantos, y ángulo de incidencia.

La comparación de estas funciones con los datos disponibles indica un ajuste razonable.

INTRODUCCION

Las últimas investigaciones sobre las características del flujo sobre diques rompeolas y la estabilidad estática de los sistemas granulares, están modificando los criterios de diseño de este tipo de obras.

Se ha investigado sobre estos aspectos tanto teórica como experimentalmente, pero los estudios se han centrado fundamentalmente en las condiciones originadas por olas incidiendo normalmente al talud; por lo cual prácticamente no existen datos sobre el flujo en el talud y la estabilidad del dique bajo la acción de oleaje oblicuo.

El objetivo de este trabajo es el análisis del comportamiento de los diques rompeolas bajo la acción de oleaje con incidencia oblicua. La consecución de este objetivo se facilita por los recientes avances producidos en el campo de los diques rompeolas, que se centran, fundamentalmente en la validez del número de Iribarren para describir las características del flujo sobre el talud y su respuesta dinámica, y en el análisis de la estabilidad estática de los taludes granulares.

El escaso contraste experimental de los conceptos que desarrollamos aquí, aconseja prudencia en su aplicación, y demanda la realización de ensayos que aprueben o rechacen definitivamente las hipótesis planteadas.

*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de Mayo de 1981.

TALUD DE MAXIMA ESTABILIDAD

De acuerdo con Price, 1979, las condiciones medias de estabilidad de un canto en un sistema granular pueden analizarse distinguiendo la contribución debida al peso propio y la debida a la trabazón. Una conclusión de este simple análisis teórico, corroborada por la experimentación, es la existencia de un talud óptimo para el cual el talud alcanza sus mejores condiciones de estabilidad. Para dolos el máximo es muy acusado, mientras que para stabits la curva de estabilidad es más redondeada, con el máximo en un talud más tendido que el de dolos.

Durante la realización de sus ensayos, con escolleras naturales, bloques paralelepípedicos y tetrápodos, Iribarren, 1965, apreció un cambio en la estabilidad de los cantos con pendientes más tendidas que un cierto talud crítico. Para taludes más tendidos que el crítico, los cantos perdían estabilidad. Este ángulo crítico era función del tipo de cantos, correspondiendo el valor más rígido para tetrápodos y el más tendido a escolleras. En los ensayos realizados por Ahrens y McCartney, 1975, con rip-rap no se aprecia el cambio de estabilidad en el talud, a pesar de haber ensayado con taludes muy tendidos, $\cotg \alpha = 5$.

Las características del flujo sobre un talud rugoso y permeable bajo la acción de una onda incidiendo normalmente, fijado el tipo de cantos, dependen exclusivamente del número de Iribarren, Giménez Curto, 1979. Por otra parte la función de estabilidad

del talud, establecido un criterio de daños, depende, además de las variables anteriores, del talud, Losada y Giménez Curto, 1979a. Por tanto, los cambios de estabilidad observados por Iribarren se producen exclusivamente por variaciones en el talud como consecuencia de haber superado el talud de máxima estabilidad estática y no por modificaciones en las condiciones del flujo.

A partir de los datos de Iribarren, 1965, Ahrens y McCartney, 1975 y Price, 1979, hemos construido la tabla 1 donde se da el intervalo donde se encuentra el talud de máxima estabilidad en función del tipo de cantos. La amplitud de cada intervalo es una función de lo marcado del máximo.

FLUJO SOBRE EL TALUD CON OLEAJE REGULAR INCIDIENDO OBLICUAMENTE

El Technical Advisory Committee, 1974, propone que el ascenso del agua sobre un talud liso e impermeable debido a ondas periódicas incidiendo oblicuamente se obtiene multiplicando el valor correspondiente a incidencia normal por el coseno del ángulo de incidencia.

Este criterio se basa en que la tangente del ángulo del talud con la horizontal en la dirección de ataque es $\tan \alpha \cdot \cos \theta$ y para taludes lisos e impermeables $Ir < 2.3$, $Ru/H = Ir$, Hunt, 1959, donde Ru es la máxima altura vertical sobre el N.M.M. que alcanza el agua en el talud, $Ir = \tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ el número de Iribarren, $L_0 = g T^2 / 2 \pi$ la longitud de onda en profundidades indefinidas, H la altura de onda incidente, T el periodo, g la aceleración de la gravedad, α el ángulo del talud con la horizontal y θ ángulo del frente de la onda con la alineación del talud.

Para $\theta < 50^\circ$ los datos experimentales de Hosoi y Shuto, 1964, proporcionan un ajuste razonable con la hipótesis anterior, Battjes, 1974, al menos para olas en rotura.

Giménez Curto, 1979, ha propuesto un modelo exponencial del número de Iribarren para representar los fenómenos asociados al flujo del oleaje incidiendo normalmente sobre un talud rugoso y permeable, ascenso-descenso, reflexión y transmisión. Este modelo es de la forma:

$$X = A [1 - \exp(B \cdot Ir)] \quad (1)$$

donde A y B son coeficientes dependientes del tipo de cantos y X representa el ascenso, Ru/H , el descenso, Rd/H , del agua por el talud, la reflexión, c_r , ó la transmisión, c_t .

Este modelo, es aplicable para describir las características del flujo bajo la acción de ondas incidiendo oblicuamente tomando el número de Iribarren en la dirección de propagación.

$$X = A [1 - \exp(B \cdot Ir \cos \theta)] \quad (2)$$

siendo A y B los valores de la ecuación (1) para oleaje con incidencia normal.

En las figuras 1, 2 y 3 representamos los datos de Hudson, 1962, (tomados de Günbak, 1979) relativos al ascenso-descenso del agua sobre talud de rip-rap con ángulos de incidencia $\theta = 0^\circ, 30^\circ$ y 60° .

En los tres casos hemos dibujado las curvas de mejor ajuste correspondientes al modelo (1). Los coeficientes A, B y ρ que resultan en este caso se dan en la tabla 2, siendo ρ un coeficiente de corrección generalizado, definido por:

$$\rho^2 = 1 - \sigma_c^2 / \sigma_v^2 \quad (3)$$

TABLA 1. Talud de máxima estabilidad según el tipo de cantos.

Tipo de cantos	$\cot \alpha_{opt}$
rip-rap	> 5.00
escollera natural uniforme	4.00 a 6.00
bloques paralelepípedicos	3.00 a 4.00
stabits	2.00 a 2.50
tetrápodos	2.00 a 2.50
dolos	1.75 a 2.00

TABLA 2. Coeficientes de ajuste en los ensayos de Hudson, 1962. Incidencia oblicua sobre talud de rip-rap.

θ		A	B	ρ
0°	Ru	1.3219	-0.9654	0.641
	Rd	1.7404	-0.1395	0.832
30°	Ru	1.2433	-0.8682	0.680
	Rd	1.4863	-0.1620	0.905
60°	Ru	0.9084	-0.8824	0.686
	Rd	0.7738	-0.3245	0.781

SOBRE EL EFECTO DE LA INCIDENCIA OBLICUA DEL OLAJE EN LOS DIQUES ROMPEOLAS

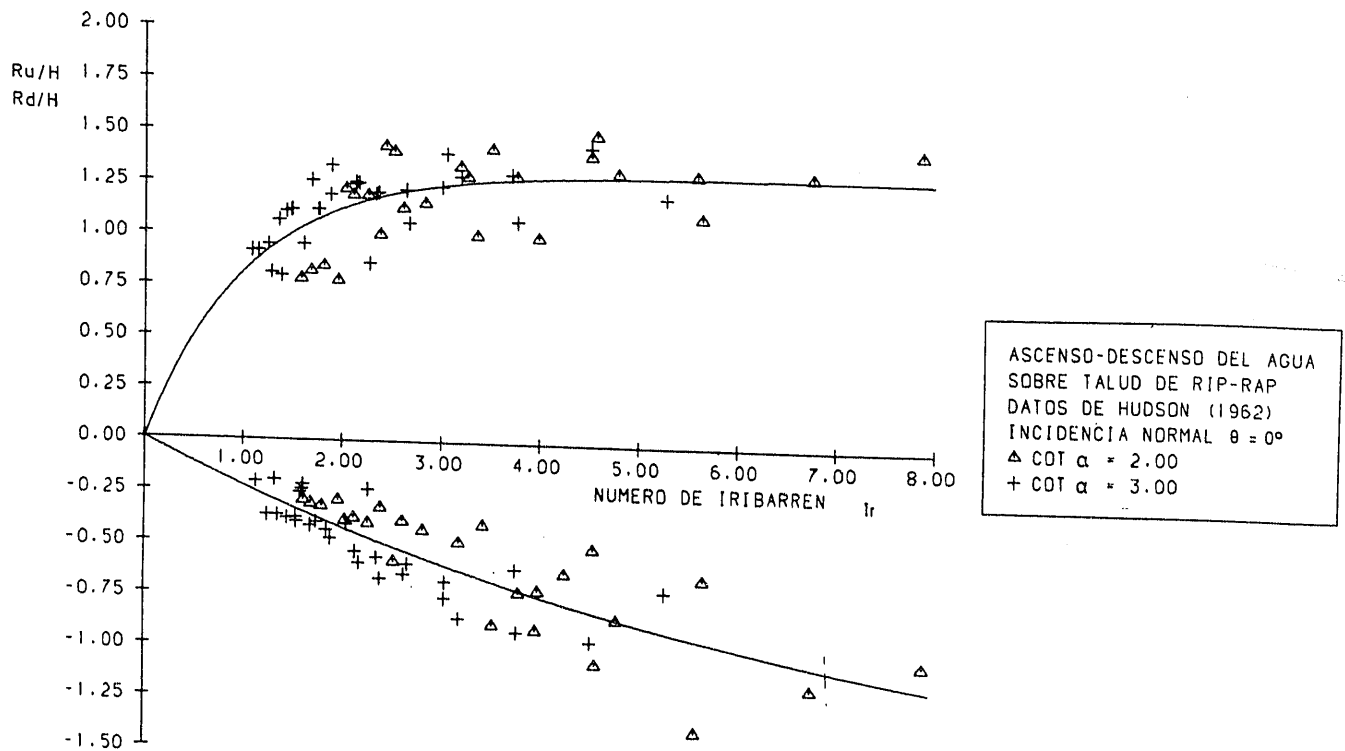


Fig. 1.- Ascenso - descenso del agua sobre talud de rip-rap. Incidencia normal

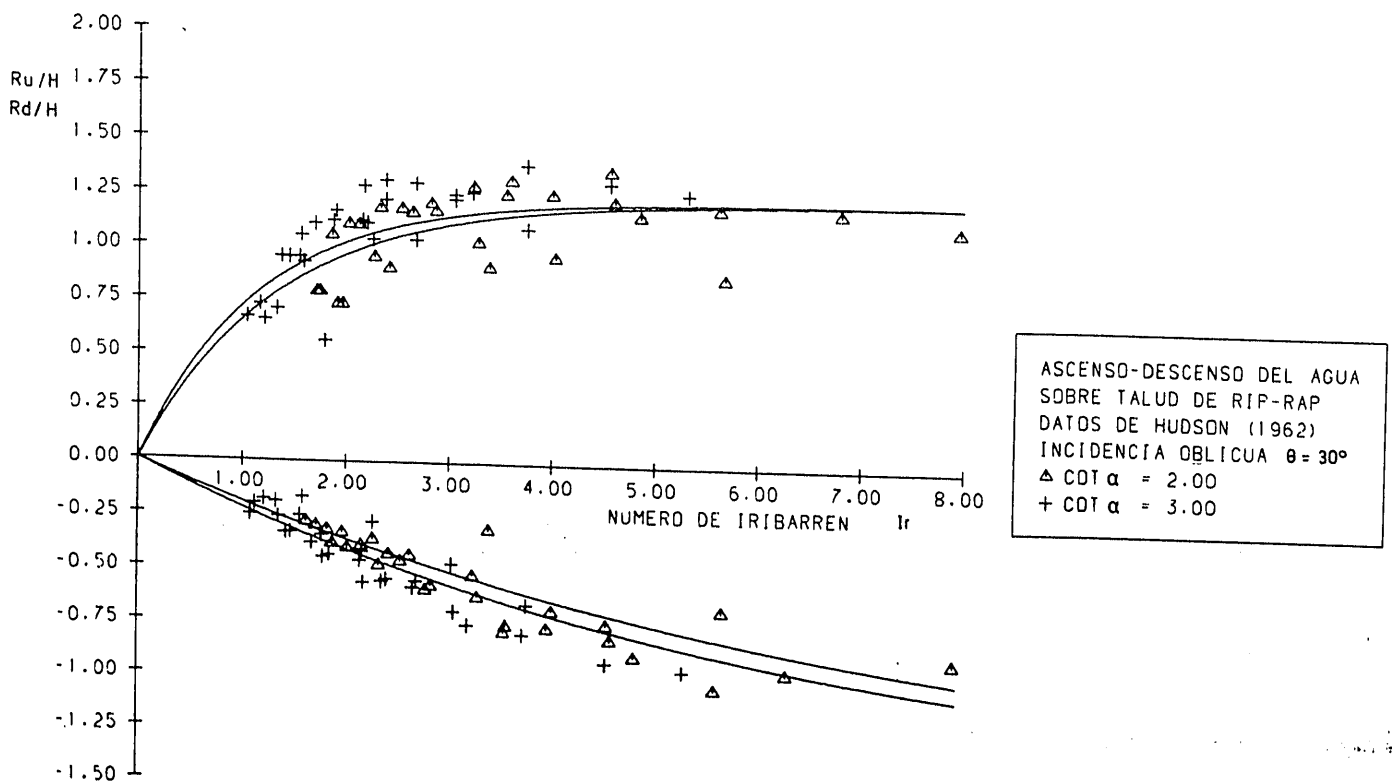


Fig. 2.- Ascenso - descenso del agua sobre talud de rip-rap. $\theta = 30^\circ$

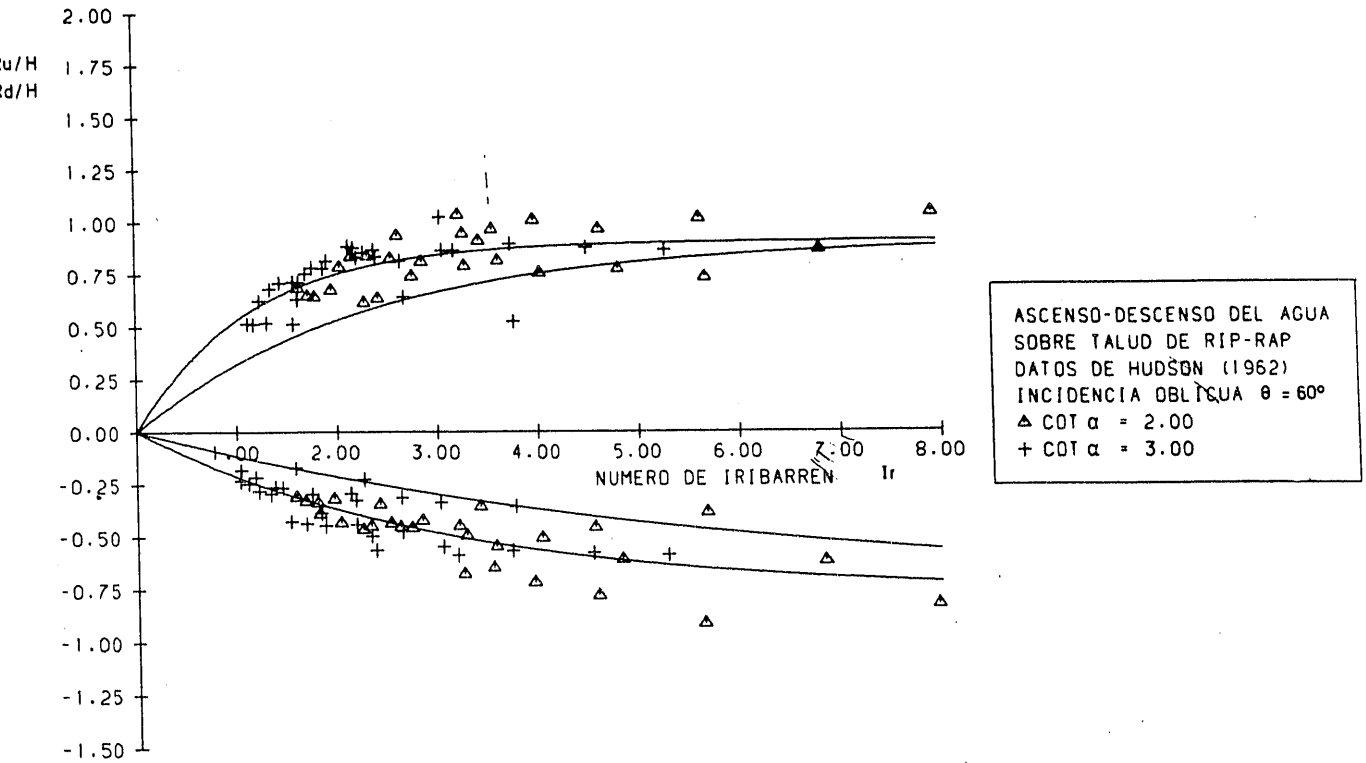


Fig. 3.- Ascenso - descenso del agua sobre talud de rip-rap. $\theta = 60^\circ$

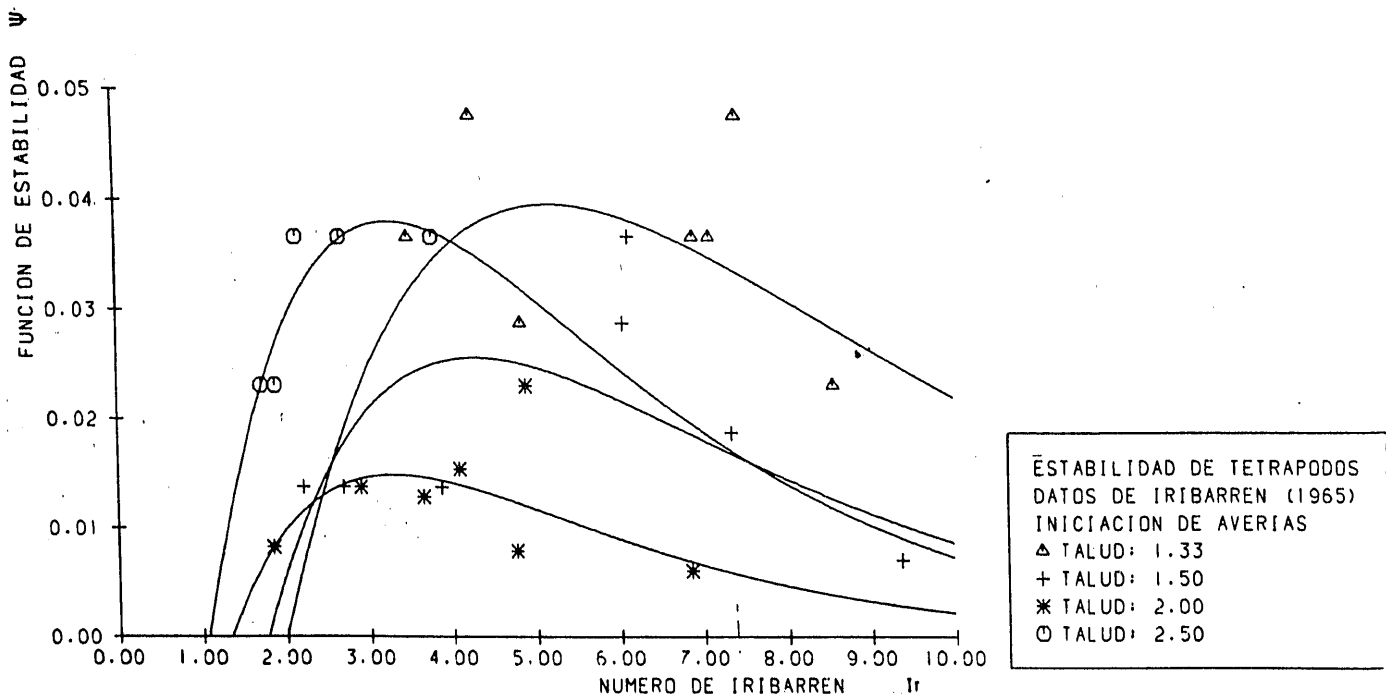


Fig. 4.- La función de estabilidad en tetrápodos. Curvas de mejor ajuste

SOBRE EL EFECTO DE LA INCIDENCIA OBLICUA DEL OLAJE EN LOS DIQUES ROMPEOLAS

donde σ_c^2 y σ_y^2 son las varianzas respecto a la curva y a la media respectivamente.

De estas figuras podemos concluir que para ángulos de incidencia inferiores a un cierto valor ($\theta < 45^\circ$) la ecuación (2) da una representación razonable de la realidad. Para ángulos mayores la ecuación (2) da valores muy pequeños del ascenso-descenso, poniendo de manifiesto la creciente importancia de la refracción de la onda por el talud.

ESTABILIDAD DE UN DIQUE DE ESCOLLERA BAJO LA ACCION DE OLAJE OBLICUO

El peso de los cantos del manto principal, W , que es necesario para que sean estables bajo la acción de ondas con incidencia normal se define por, Giménez Curto, 1979.

$$W = \gamma_w H^3 \frac{S_r}{(S_r - 1)^3} \psi \quad (4)$$

donde γ_w es el peso específico del agua, S_r el peso específico relativo de los cantos y ψ la función de estabilidad, la cual, definido un criterio de avería, depende del número de Iribarren, del tipo de cantos y del talud; es decir de las características del flujo sobre el talud y de la estabilidad estructural del sistema granular. En la figura 4 hemos representado las funciones de estabilidad de un talud de tetrápodos para $\cot \alpha = 1.33, 1.50, 2.00, 2.50$. La estabilidad de un dique de escollera bajo la acción de ondas con incidencia oblicua estaría definida si se conociera la correspondiente función de estabi-

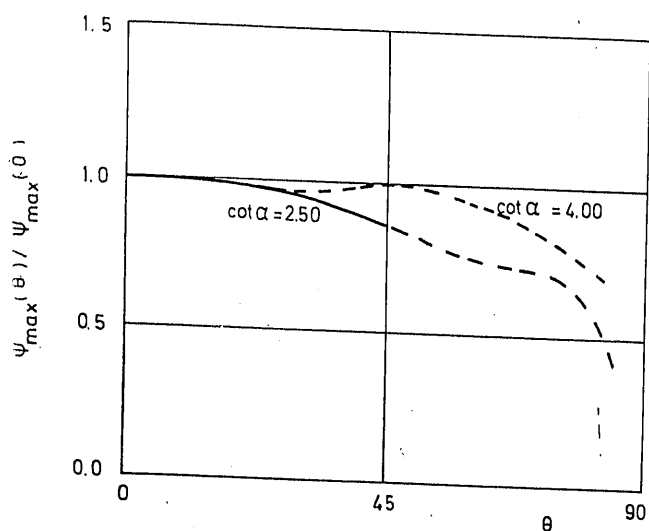


Fig. 5.- Efecto del ángulo de incidencia del oleaje sobre la estabilidad de rip-rap

lidad, la cual depende, además, del ángulo de incidencia.

En lo que sigue vamos a admitir que la incidencia oblicua del oleaje solamente afecta al ángulo del talud, despreciando fenómenos secundarios, tales como la refracción, corrientes longitudinales y otros; por tanto las conclusiones que se derivan de este análisis son de aplicación solamente, para pequeños ángulos de incidencia ($\theta < 45$).

La forma de rotura de una onda que incide oblicuamente al talud, se cambia en el sentido

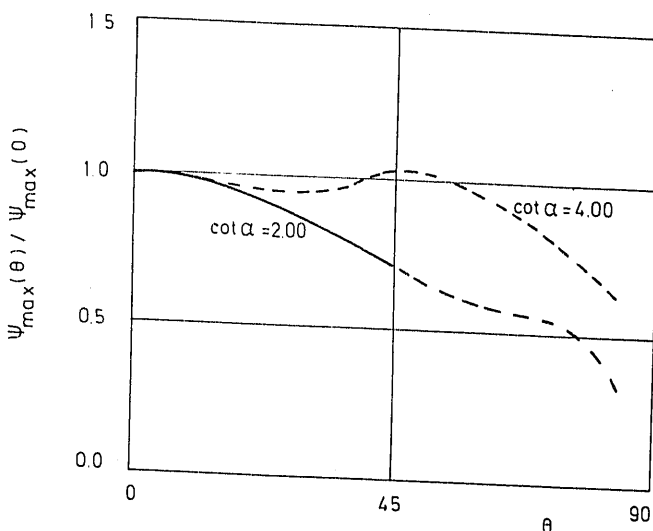


Fig. 6.- Efecto del ángulo de incidencia del oleaje sobre la estabilidad de escolleras naturales

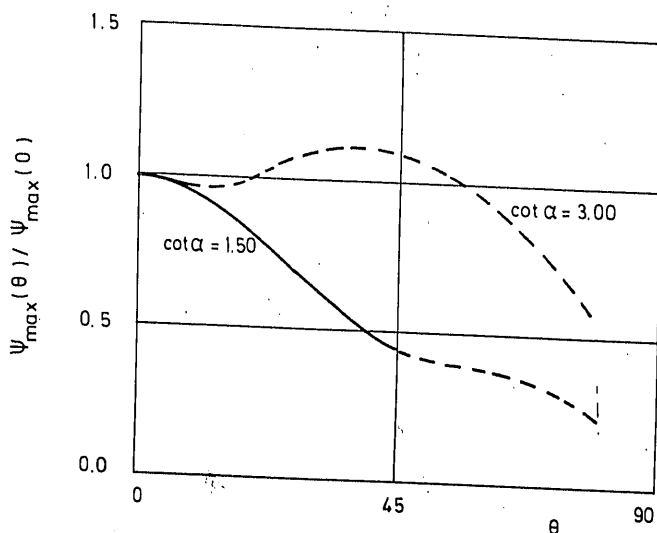


Fig. 7.- Efecto del ángulo de incidencia del oleaje sobre la estabilidad de bloques

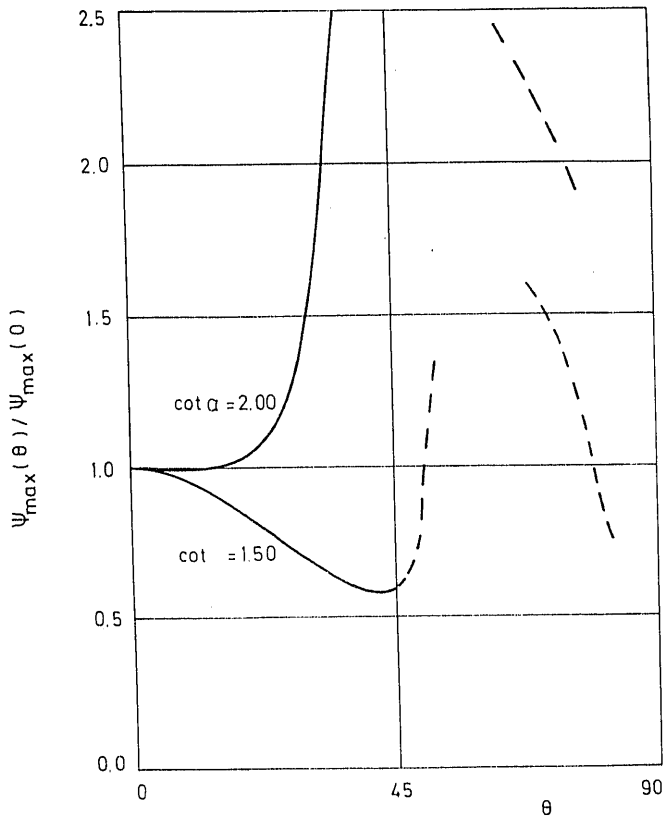


Fig. 8.- Efecto del ángulo de incidencia del oleaje sobre la estabilidad de tetrápodos

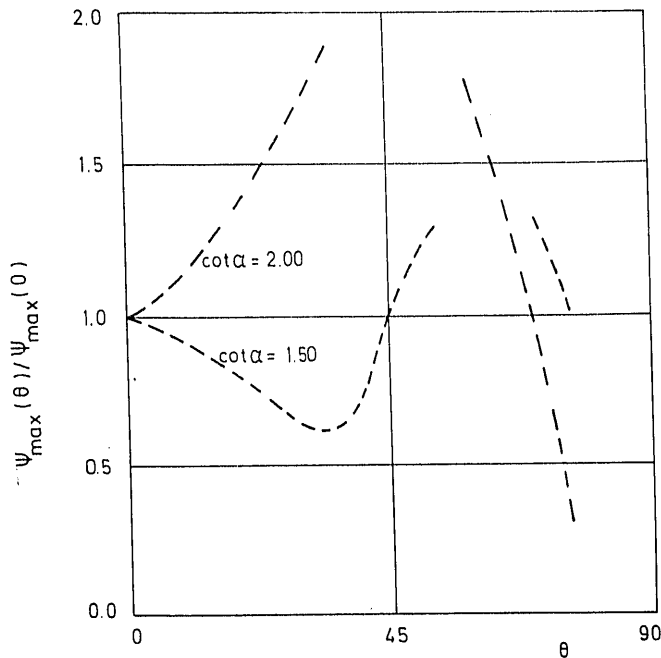


Fig. 9.- Efecto del ángulo de incidencia del oleaje sobre la estabilidad de dolos

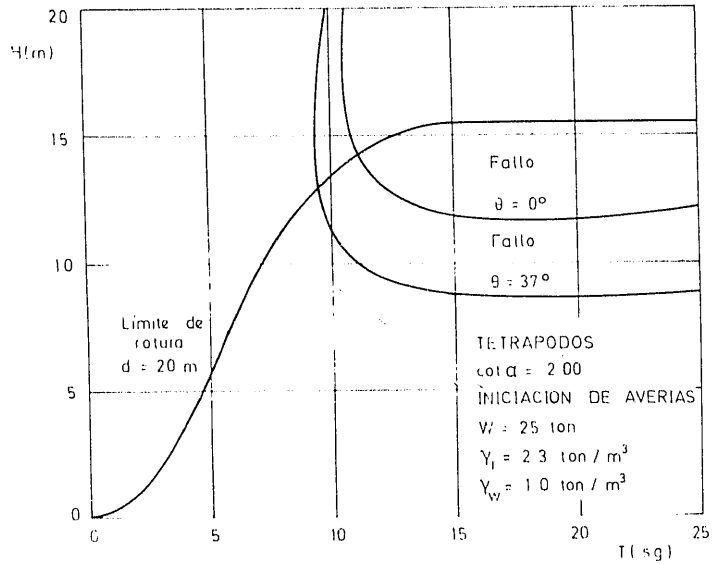


Fig. 10 - Variación del área de fallo con el ángulo de incidencia del oleaje

surging, collapsing, plunging con respecto a la misma onda incidiendo normalmente, debido a la suavización del talud, que conlleva una reducción del número de Iribarren, decreciendo el ascenso y descenso del agua sobre el talud.

La componente del talud en la dirección de propagación, es $\cot \alpha / \cos \theta$, en consecuencia, y admitiendo que estructuralmente el dique es isótropo, la incidencia oblicua del oleaje produce una pérdida de estabilidad estructural si el talud de diseño está cercano al talud de máxima estabilidad; Si el talud de diseño del dique es bastante más rígido que el talud de máxima estabilidad, aquél es más estable estructuralmente bajo incidencia oblicua que bajo incidencia normal.

Representando la estabilidad del dique bajo incidencia oblicua y normal por los máximos de sus respectivas funciones de estabilidad $\psi_{\max}(\theta)$ y $\psi_{\max}(0)$, en las figuras 5, 6, 7, 8 y 9 se ha dibujado la variación del cociente $\psi_{\max}(\theta) / \psi_{\max}(0)$ con el ángulo de incidencia, θ , para diferentes tipos de cantos y taludes de diseño. Las funciones de estabilidad para este cálculo han sido tomadas de Losada y Giménez Curto, 1979a. Las curvas de puntos son esquemáticas debido a la falta de datos.

La escasa información experimental de que se dispone parece estar razonablemente de acuerdo con los resultados aquí obtenidos. Van de Kreeke, 1969, concluye de una experimentación realizada con rip-rap a una escala muy reducida, que para ángulos de incidencia menores de 45° las condiciones de estabilidad de los cantos no son muy

SOBRE EL EFECTO DE LA INCIDENCIA OBLICUA DEL OLEAJE EN LOS DIQUES ROMPEOLAS

distintas del caso de incidencia normal. Whillock, 1977, presenta unos resultados de ensayos de estabilidad de dolos sobre un talud de cot $\alpha = 2.00$ bajo la acción de ondas incidiendo oblicuamente. Si bien el número de datos es exiguo, se puede apreciar en ellos que la estabilidad de los dolos empeora con el ángulo de incidencia hasta 60° .

LA ESTABILIDAD DE LOS DIQUES ROMPEOLAS BAJO UN ESTADO DE MAR INCIDIENDO OBLICUAMENTE

A partir de las funciones de estabilidad para ondas con incidencia oblicua estimamos las curvas de interacción de estabilidad, Losada y Giménez Curto, 1979a. El área definida por la curva de interacción y el límite de rotura, es el área de fallo. Podemos estimar la probabilidad fallo del dique bajo la acción de un estado de mar incidiendo oblicuamente, a partir de esta área y de una distribución conjunta de alturas de ola y períodos, Losada y Giménez Curto, 1979b.

En la figura 10 mostramos el área de fallo para el caso de tetrápodos y varios ángulos de incidencia del oleaje.

CONCLUSIONES

- 1) Existe una grave carencia de datos experimentales sobre estabilidad de diques de escollera bajo la acción de oleaje con incidencia oblicua.
- 2) Para ondas regulares incidiendo con ángulos relativamente pequeños ($\theta < 45^\circ$), el ascenso y el descenso del agua sobre el talud son función de $\text{Ir} \cdot \cos \theta$. Para ángulos de incidencia mayores el modelo no es fiable.
- 3) Los diques rompeolas construidos con rip-rap, escollera natural o bloques paralelepípedicos, y con taludes de $\text{Cot } \alpha \leq 3.00$, tienen unas condiciones medias de estabilidad bajo la acción de ondas regulares incidiendo oblicuamente, que no son muy distintas del caso de incidencia normal.
- 4) Los diques rompeolas construidos con cantos de elevada trabazón, dolos, tetrápodos, etc..., pueden tener unas condiciones de estabilidad mucho peores bajo incidencia oblicua que bajo incidencia normal.
- 5) La probabilidad de fallo de los diques de escollera bajo la acción de un estado de mar con inciden-

cia oblicua, se puede obtener a partir de las curvas de interacción, el límite de rotura y una distribución de alturas de ola y períodos.

- 6) Mientras no se disponga de una información experimental adecuada, no es recomendable utilizar cantos de elevada trabazón en la construcción de diques rompeolas cuando puedan presentarse oleajes con incidencia oblicua de nivel próximo al de cálculo.

REFERENCIAS

- (1) Ahrens, J.P. y Mc Cartney, B.L., 1975. Wave period effect on the stability of rip-rap. Proc. Civil Eng. in the Oceans/III, Vol. 2: 1019-1034.
- (2) Battjes, J.A., 1974. Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind generated waves. Communications on Hydraulics, Delft University of Technology, Rep. 74-2.
- (3) Giménez-Curto, L.A., 1979. Comportamiento de los diques rompeolas bajo la acción del oleaje. Tesis doctoral, Universidad de Santander.
- (4) Günbak, A.R., 1979. Rubble mound breakwaters. Div. Port and Ocean Eng., The Norwegian Institute Of Technology, Trondheim, Norway, Rep. 1-1979.
- (5) Hunt, I.A., 1959. Design of seawalls and breakwaters. J. Waterw. Harb. Div., ASCE, 85 (WW3): 123-152.
- (6) Iribarren, R., 1965. Formule pour le calcul des diques en enrochements naturels ou éléments artificiels. XXI International Navigation Congress, Stockholm, Section II-1.
- (7) Losada, M.A. y Giménez-Curto, L.A., 1979a. The joint influence of the wave height and period on the stability of rubble mound breakwaters in relation to Iribarren's number. Coastal Eng. 3 (Pendiente de publicación).
- (8) Losada, M.A. y Giménez-Curto, L.A., 1979 b. An approximation to the failure probability of maritime structures under a sea state. Proc. Int. Conf. on Port and Ocean Eng. under Artic Conditions. POAC, 5th., Trondheim, Norway: 1269-1281.
- (9) Price, W.A., 1979. Static stability of rubble mound breakwaters. The Dock & Harbour Authority, Vol. LX, No. 702, May 1979.
- (10) Technical Advisory Committee on Protection against Inundation, 1974. Wave run-up and overtopping. Government Publishing Office, The Hague.
- (11) Van de Kreeke, J., 1969. Damage function of rubble mound breakwaters, J. Waterw. and Harb. Div., ASCE, 95 (WW3): 345-354.
- (12) Whillock, A.R., 1977. Stability of dolos blocks under oblique wave attack. Hydraulics Research Station, Wallingford, Rep. IT-159.