IAHR AIIH
XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010

MORFOLOGÍA DE RIZOS EN FLUJO OSCILATORIO

Francisco Pedocchi[1] y Marcelo H. García[2]
(1) Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay, kiko@fing.edu.uy
(2) Ven Te Chow Hydrosystems Laboratory, University of Illinois, EEUU, mhgarcia@illinois.edu

RESUMEN:

En este trabajo se estudia la configuración de rizos formados en un lecho arenoso bajo flujo oscilatorio. Para ello una extensa base de datos, conformada por datos obtenidos en el laboratorio por los autores y datos recopilados de la literatura, es estudiada utilizando análisis dimensional y gráficos tridimensionales. Los resultados muestran que la longitud de los rizos es proporcional a la excursión del agua en la cercanía del lecho y que depende del cociente entre la máxima velocidad de oscilación y la velocidad de sedimentación. Por otro lado se encuentra que el índice de rizado, cociente entre la altura y longitud de los rizos, tiende crecer con el cociente entre la excursión del agua y el diámetro del sedimento.

ABSTRACT:

In this work the configuration of sand ripples under oscillatory flow is studied. A large database with experimental data obtained by the authors and data compiled from the literature is studied using dimensional analysis and three-dimensional plots. The analysis shows that the ripple wavelength is proportional to the near-bed water excursion and a function of the ratio between the maximum orbital velocity and the sediment settling velocity. In addition it is found that the ripple index, ratio between the ripple height and wavelength, tends to grow as the ratio between the water excursion and the sediment diameter grows.

PALABRAS CLAVES:

Formas de Fondo, Flujo Oscilatorio, Rizos.

INTRODUCCIÓN

El movimiento oscilatorio inducido por el oleaje en la cercanía de un lecho arenoso es capaz de movilizar el sedimento formando diferentes formas de fondo. Entre las formas de fondo más pequeñas se ubican los rizos. La presencia de rizos cambia la rugosidad del fondo marino afectando la propagación del oleaje y los niveles de turbulencia en la cercanía del lecho. A pesar que el proceso de formación y configuración final de los rizos han sido estudiados por más de un siglo, varios aspectos del mismo no son comprendidos completamente aún, principalmente para las condiciones de flujo que se observan en campo durante eventos de gran oleaje.

Los rizos son usualmente clasificados en orbitales, suborbitales o anorbitales [Clifton y Dingler 1984]. Los rizos orbitales escalan con la excursión del agua, mientras que los rizos anorbitales no escalan con ella. Los rizos suborbitales son una categoría intermedia. Pedocchi y García [2009a] encontraron que los rizos anorbitales son solamente observados en arenas finas. Esto limita la aplicación de los predictores existentes que no distinguen entre los distintos tamaños de sedimento. Para el caso de las arenas gruesas los autores presentaron predictores para el tamaño de rizo, longitud de onda $?N$ y altura $?N$ como función del cociente entre la velocidad máxima de oscilación U_{max} y la velocidad de caída del sedimento w_s, utilizando la excursión del agua d como escala de longitudes para adimensionalizar las geometría de los rizos.

Por otro lado en el trabajo citado se observó que existe una fuerte correlación entre la velocidad máxima de oscilación y la excursión del agua para movimientos cercanos al fondo generados por ondas en la superficie del mar. Esto viene dado por la hidrodinámica del movimiento ondulatorio del agua que se manifiesta en las expresiones estadísticas que relacionan la altura con el periodo del oleaje [Kamphuis 2000, Goda 2003]. En el presente trabajo se busca estudiar la dependencia explícita del tamaño de rizo con la excursión del agua y el cociente entre velocidad máxima de oscilación y la velocidad de sedimentación. La excursión del agua es adimensionalizada con el tamaño medio del sedimento D_{50} para obtener la variable adimensional d/D_{50}.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para estudiar la configuración que toma el lecho de arena sometido a un flujo oscilatorio similar al que puede observarse en la zona costera y la plataforma continental se realizaron experimentos en un túnel de flujo oscilatorio de gran tamaño, el LOWST (Large Oscillatory Water Sediment Tunnel) del Ven Te Chow Hydrosystems Laboratory de la University of Illinois at Urbana Champaign, EEUU. La zona de trabajo del túnel tiene 12.5 m de largo por 0.8 m de ancho por 1.2 m de alto. La mitad de la sección esta llena de arena de 250 μm, dejando 60 cm libres para el flujo de agua.

El movimiento del agua dentro del túnel es impartido por tres pistones que pueden desplazar hasta 0.8 m^3/s de agua. Esto permite la generación de flujos oscilatorios con velocidades de hasta 2 m/s y excursiones de más de 2 m. En el extremo opuesto un reservorio abierto a la atmósfera recibe el agua desplazada. Cabe destacar que los pistones tienen la capacidad de impulsar el agua en ambas direcciones, por lo que no existen limitaciones sobre los periodos que pueden ser generados dentro del LOWST. El túnel también está equipado dos bombas centrífugas con variadores de frecuencia que permiten superponer una corriente de hasta 0.5 m/s encima de la componente oscilatoria para el estudio de flujos combinados. La Figura 1 muestra una vista del LOWST desde uno de sus extremos. Una descripción completa del túnel y el equipamiento puede encontrarse en Pedocchi y García [2009b].

Los experimentos realizados en el LOWST tuvieron como objetivo estudiar la configuración 2D/3D de los rizos, e intentar comprender en qué forma el tamaño final de los rizos era afectado por la

velocidad de oscilación máxima para una determinada excursión del agua. Dado que los experimentos se realizaron utilizando un único sedimento se recurrió a la gran cantidad de experimentos reportados en la literatura para extender los resultados a otros sedimentos. Los datos recopilados de la literatura incluyen tanto mediciones de campo como experimentos de laboratorio en instalaciones de gran tamaño. Los sedimentos de estos experimentos incluyen arenas naturales y sedimentos artificiales. La base de datos utilizada en el análisis presentado a continuación es la misma utilizada por Pedocchi y García [2009a].

Figura 1.- Vista del LOWST desde el extremo opuesto a los pistones, los cuales pueden observarse al fondo. Parte del sistema de recirculación y una de las bombas pueden observarse en la parte inferior de la fotografía.

Para el diseño de los experimentos y el análisis de resultados se utilizaron herramientas de análisis dimensional, comenzando por identificar las variables que controlan el fenómeno a estudiar. Un fenómeno cualquiera del transporte de sedimentos (que ocurre bajo flujo oscilatorio puro, por ejemplo la longitud de onda del rizo, debe ser función de las propiedades del fluido (densidad ρ, viscosidad cinemática ν), las propiedades del sedimento (diámetro medio D_{50}, densidad ρ_s, ángulo de reposo ϕ), las fuerzas externas (aceleración de la gravedad g) y las condiciones de flujo (periodo de la oscilación T, velocidad orbital máxima U_{max} y rugosidad del fondo $k_s \approx 2.5\ D_{50}$).

Utilizando el teorema Pi se puede obtener la siguiente relación entre los números adimensionales que gobiernan el fenómeno

$$\Pi_\nu = f\left(\frac{T\nu}{D_{50}^2}, \frac{U_{max} D_{50}}{\nu}, \frac{\sqrt{gRD_{50}}}{\nu}, R, \phi\right) \qquad [1]$$

con $R = (\rho_s / \rho - 1)$, la gravedad específica sumergida del sedimento. Para arenas naturales R y ϕ pueden considerarse constantes ($R \approx 1.65$ y $\phi \approx 32^o$) y el número de variables adimensionales independientes se reduce a tres. Los dos primeros parámetros a la derecha de la Ecuación [1] describen las características hidráulicas del flujo. $T\nu/D_{50}^2$ puede ser considerado un periodo de oscilación adimensional y es el cuadrado del cociente entre la escala de longitud de Stokes y el tamaño de sedimento [Yalin y Karahan 1979]. Por su parte $U_{max} D_{50}/\nu$ es un número de Reynolds basado en la velocidad máxima y el diámetro de partícula, y puede ser considerado como la velocidad máxima adimensional. Nótese que el sedimento aparece en ellos solamente a través de tamaño D_{50}, el cual puede ser entendido como una medida de la rugosidad del lecho plano. Es importante destacar que la excursión del agua adimensional d/D_{50} puede ser calculada a partir de estos dos parámetros (para una oscilación sinusoidal se verifica que $d = U_{max} T/\pi$). El tamaño y peso del sedimento entran en juego a través del tercer parámetro $(gRD_{50})^{1/2}/\nu$, frecuentemente

denominado Re_p [García 2008], que puede ser interpretado como un tamaño de partícula adimensional.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Utilizando el análisis dimensional antes descrito se pueden realizar gráficos tridimensionales para observar las propiedades de los rizos en función de las tres variables independientes. Por ejemplo en la Figura 2 se representa con colores la configuración 2D/3D de los rizos, permitiendo observar qué condiciones están asociadas a la formación de distinto tipo de rizos. Una discusión detallada sobre la predicción de la configuración 2D/3D de los rizos puede encontrarse en Pedocchi y García [2009a].

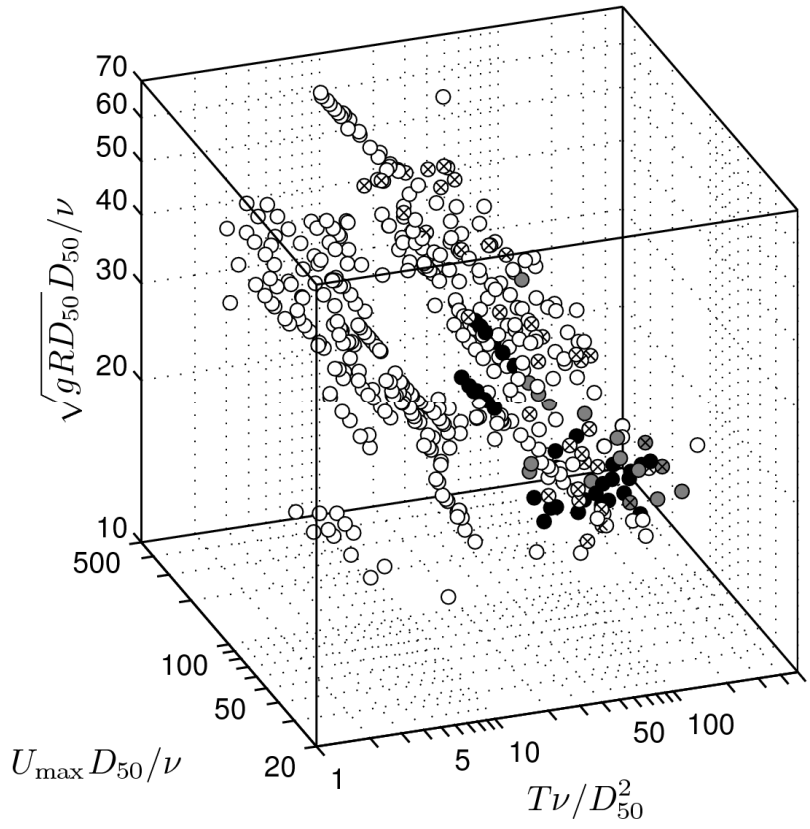

Figura 2.- Configuración de los rizos en arena gruesa. Blanco, rizos 2D; negro, rizos 3D; gris rizos cuasi-2D; X, canales angostos.

Los tres números adimensionados presentados en la Ecuación [1] pueden ser combinados para obtener cualquiera de las variable adimensionales utilizadas para el estudio del trasporte de sedimentos en flujo oscilatorio [Pedocchi y García 2009a]. Por ejemplo, Re_p puede ser sustituido por el número de Reynolds de sedimentación de la partícula $w_sD/?ý$ que puede obtenerse directamente a partir de Re_p utilizando la relación presentada por Dietrich [1982]. $T?/D_{50}^2$ y $U_{max}D_{50}/?Š$ pueden ser combinados para obtener el número de Reynolds de ola $Re_w = U_{max}A/?Š$ y la amplitud de excursión del agua adimensional A/D_{50}, utilizando que para una oscilación sinusoidal se verifica que $U_{max}=2pA/T$. Por tanto se puede obtener la terna equivalente de números adimensionales, d/D_{50}, U_{max}/w_s y Re_p, utilizando que $d = 2A$. Nótese también que el factor de fricción para flujo oscilatorio $f_w=2(u_{*max}/U_{max})$, que permite calcular el esfuerzo máximo de corte sobre el lecho de arena u_{*max}, es función de Re_w y A/D_{50}.

Mediante gráficos del tipo presentado en la Figura 2 se estudiaron el tamaño y la configuración de los rizos. En esta forma se determinó que se pueden definir tres rangos para los sedimentos: sedimentos finos Re_p <9, sedimentos medios 9=WRe_p <13 y sedimentos gruesos Re_p =13. Como fue mencionado en la introducción, la clasificación más común de los rizos en flujo oscilatorio distingue entre rizos orbitales, suborbitales y anorbitales. Pedocchi y García [2009a] mostraron que los rizos anorbitales solo se producen en arenas finas, mientras que en arenas gruesas los rizos son del tipo orbital y suborbital. Para los sedimentos finos se observa que la longitud de onda de los rizos presenta un comportamiento complejo donde para una misma condición de flujo, distintos autores reportan rizos orbitales y anorbitales. La discusión de este comportamiento escapa al alcance de este trabajo, pero se cree que está asociada al efecto de la asimetría de la oscilación la cual no es considerada en el presente análisis ya que son muy pocos los trabajos que la reportan.

El caso de los sedimentos gruesos Re_p=13 el comportamiento es mucho más claro ya que no se han observado rizos anorbitales para estos sedimentos. En Pedocchi y García [2009a] se obtuvo un buen colapso de los datos y se propusieron predictores para el tamaño de los rizos para este rango de sedimentos. La longitud de onda de los rizos ?» fue adimensionalizada con la excursión del agua d y se encontró que la longitud de onda adimensional ?/d podía ser expresada como una función de la variable U_{max}/w_s. En Pedocchi y García [2009a] solamente dos (U_{max}/w_s y Re_p), de las tres variables independientes (d/D_{50}, U_{max}/w_s y Re_p) fueron utilizadas para el ajuste de los datos. El presente trabajo explora la posible dependencia simultánea del tamaño del rizo de d/D_{50} y U_{max}/w_s para arenas gruesas.

El tamaño de rizo se caracteriza por la longitud de onda ?o y altura ?o y por ejemplo la dependencia de la longitud de rizo adimensional ?/d puede ser expresar de la siguiente manera

$$\frac{?“}{d} = f_{Re_p \geq 13}\left(\frac{d}{D_{50}}, \frac{U_{max}}{w_s}\right). \qquad [2]$$

Es posible graficar esta relación en gráficos tridimensionales [Figura 3], permitiendo observar las dependencias funcionales que presentan los datos. Como se muestra en la figura, los datos tienden a ubicarse sobre un plano en un gráfico con ejes en escala logarítmica. La ecuación del plano de mejor ajuste está dada por

$$\frac{?Ì}{d} = 1.22\left(\frac{d}{D_{50}}\right)^{-0.01}\left(\frac{U_{max}}{w_s}\right)^{-0.37} \qquad [3]$$

y se presenta junto a los datos en la Figura 3. Tanto la representación gráfica como el pequeño valor absoluto del exponente (0.01) para el termino d/D_{50} son clara indicación de que no existe una dependencia relevante de la longitud de rizo adimensional ?/d con este parámetro. Mostrando que la longitud característica del fenómeno que controla la longitud de onda de los rizos es d solamente.

En forma análoga a la longitud de onda del rizo, puede estudiarse la dependencia del índice de rizado ?/?. con d/D_{50} y U_{max}/w_s para Re_p=13. En este caso la ecuación para el plano de mejor ajuste esta dada por

$$\frac{?.}{?:} = 4.16 \cdot 10^5\left(\frac{d}{D_{50}}\right)^{-1.10}\left(\frac{U_{max}}{w_s}\right)^{1.26}. \qquad [4]$$

y se presenta junto a los datos en la Figura 4.

En este caso los exponentes asociados a d/D_{50} y tienen un valor absoluto alto (1.10 y 1.26), mostrando en principio una fuerte dependencia de ?/? tanto con d/D_{50} como con U_{max}/w_s. Sin embargo la observación detallada de los datos muestra que la mayoría de los mismos se agrupan en torno a ?(?=0.17 y solamente algunos datos dispersos son los que condicionan la pendiente del plano. Mostrando que con los datos disponibles es todavía difícil estimar la relevancia de la dependencia del índice de rizado con el parámetro d/D_{50}.

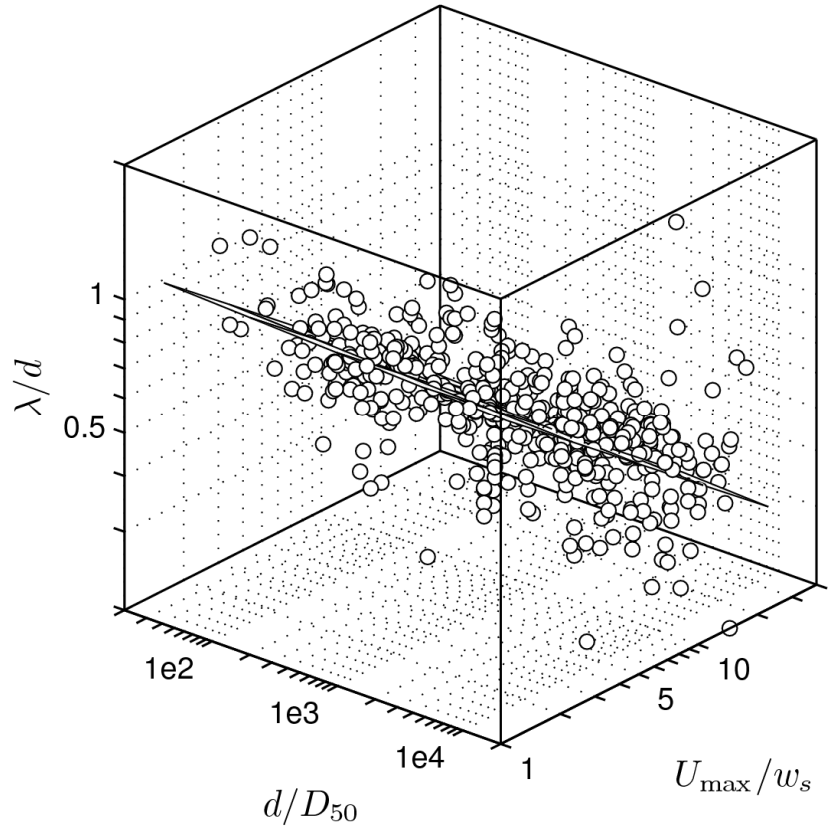

Figura 3.- Dependencia de λ/d con los parámetros d/D_{50} y U_{max}/w_s en arena gruesa. Datos y plano de mejor ajuste.

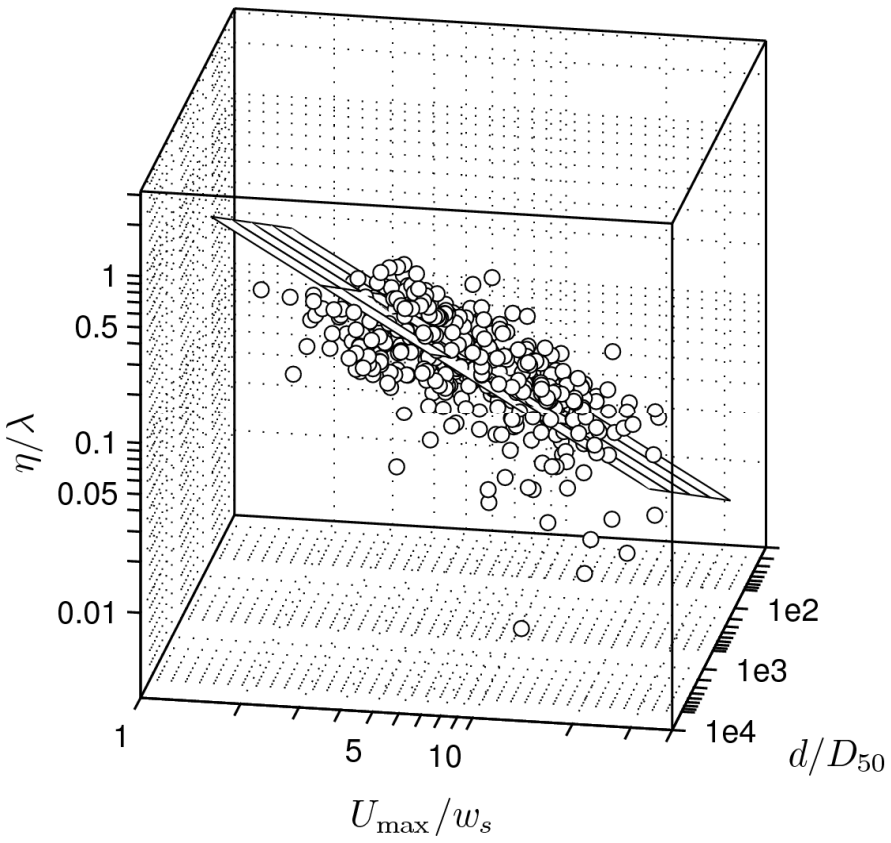

Figura 4.- Dependencia de η/λ con los parámetros d/D_{50} y U_{max}/w_s en arena gruesa. Datos y plano de mejor ajuste.

Si de todas formas se intenta hacer una interpretación del exponente de d/D_{50}, el valor -1.10 estaría indicando que para una velocidad de oscilación y sedimento dados los rizos se vuelven más empinados a medida que la excursión del agua aumenta. Nótese que el aumento de la excursión implica un aumento de d/D_{50} que para condiciones de flujo hidráulicamente rugoso, como es de esperar para materiales gruesos está asociado a una disminución del factor de fricción y por tanto una disminución de la tensión de corte sobre las partículas de sedimento que conforman el lecho. Esto explicaría que para excursiones y periodos mayores, a una velocidad de oscilación dada, los rizos sean más empinados ya que los esfuerzos sobre los granos de sedimento más expuestos que se encuentran en la cresta del rizo son menores.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Queda claro que el uso de gráficos tridimensionales es de gran utilidad para la exploración y análisis de datos en casos donde hay dependencia de varios parámetros. Analizando la dependencia con d/D_{50} y U_{max}/w_s simultáneamente se evita la introducción de la correlación que existe entre d y U_{max} en el ajuste. Esta correlación viene dada por la hidrodinámica del oleaje que hace que en general mayores velocidades máximas de oscilación tiendan a estar asociadas a excursiones más largas.

Para la longitud de onda del rizo se encontró una dependencia muy débil de $?(d$ con d/D_{50}, confirmando que la longitud de rizo escala fuertemente con la excursión del agua para arenas gruesas.

En el caso del índice de rizado $?B?B$ se encontró que el plano de mejor ajuste muestra una dependencia clara tanto con d/D_{50} como con U_{max}/w_s. Esta doble dependencia muestra la complejidad del fenómeno que se estudia y las limitaciones de los datos disponibles. La dependencia del índice de rizado con la excursión no debe ser sobreestimada ya que la mayoría de los datos presentan un índice muy cercano 0.17 y unos pocos datos terminan controlando el ajuste.

REFERENCIAS

Clifton, H. E. y Dingler, J. R. [1984]. “Wave-formed structures and paleoenvironmental reconstruction”. Mar. Geol., 60(1–4), 165–198.

Dietrich, W. E. [1982]. “Settling velocity of natural particles”. Water Resour. Res., 18(6), 1615–1626.

García, M. H. [2008]. “Sediment transport and morphodynamics”, in Sedimentation Engineering: Process, Measurements, Modeling and Practice, ASCE Manual Rep. Eng. Pract., vol. 110, edited by M. H. García, pp. 21– 164, Am. Soc. of Civ. Eng., Reston, Va.

Goda, Y. [2003]. “Revisiting Wilson’s formulas for simplified wind-wave prediction”. J. Waterw. Port Coastal Ocean Eng., 129, 93–95.

Kamphuis, J. W. [2000]. “Introduction to Coastal Engineering and Management”. World Sci., Singapore.

Pedocchi, F. y García, M. H. [2009a]. “Ripple Morphology under Oscillatory Flow. Part I: Prediction”. J. Geophys. Res., 114 C12014, 1-16.

Pedocchi, F. y García, M. H. [2009b]. “Ripple Morphology under Oscillatory Flow. Part II: Experiments”. J. Geophys. Res, 114 C12015, 1-17.

Yalin, M. y Karahan, E. [1979]. “On the geometry of ripples due to waves”. Proc. Coastal Eng. Conf., 2, 1776–1786.