

EVOLUCIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y DE LA GEOMETRÍA DE DIQUES HOMOGÉNEOS AL SER DEFORMADOS POR EL OLEAJE

• Edgar Mendoza-Baldwin • Rodolfo Silva-Casarín •
Universidad Nacional Autónoma de México

• María Clavero-Gilabert • Miguel Ángel Losada-Rodríguez •
Universidad de Granada, España

Resumen

Los diques en talud (rompeolas de piezas sueltas) son las estructuras de protección costera más ampliamente utilizadas en el mundo. Al deformarse por la extracción de piezas del manto principal, estos diques adquieren una forma particular conocida como perfil en "S", que permite a la estructura no sólo seguir funcionando sino adquirir mayor estabilidad. El estudio de la evolución de un dique desde su forma en talud recto hasta alcanzar el nuevo perfil estable es el objeto principal de este artículo. Se analiza a detalle el cambio de forma desde la óptica del desplazamiento de las piezas y se da seguimiento a las variaciones que se generan en la interacción del oleaje con la estructura, a medida que ésta se deforma. A través de dos fases de experimentación se verifica la reproducibilidad de los resultados y se presenta una comparación entre cuatro distintos escenarios de modelación física. Como resultados se obtienen las variaciones en las características geométricas de los modelos ensayados, la tendencia de los coeficientes de reflexión y los perfiles estables obtenidos al final de cada prueba. Al hallar resultados similares y compatibles luego del proceso experimental, se realiza una idealización del perfil estable que servirá como punto de partida para la elaboración de metodologías de diseño de estructuras con máxima estabilidad. El trabajo concluye con una serie de guías simples para el diseño de una sección en "S" estáticamente estable.

Palabras clave: estructuras costeras, estabilidad de rompeolas, reflexión del oleaje, perfil "S", falla de diques, diseño geométrico de diques, ensayos de rompeolas en laboratorio.

Introducción

El extenso uso que histórica y mundialmente se ha dado a los diques en talud radica en factores como la facilidad tanto de su proceso constructivo como del eventual mantenimiento y/o reparación, que presentan falla de tipo dúctil y que aún a pesar de su gran tamaño y el elevado volumen de material que suelen requerir, su costo es ostensiblemente menor que el de otro tipo de soluciones. En el caso específico del manto principal, el cual está formado por piezas de gran tamaño que por peso propio, trabazón y fricción han de resistir la acción del oleaje, este tipo de diques presentan

la ventaja de que pueden ser construidos con elementos naturales o artificiales, en función de la disponibilidad de los mismos. Más aún, algunos materiales permiten la construcción de diques homogéneos, práctica que dependiendo de las características propias de cada proyecto podría abatir los costos; sin embargo, tiene un alto impacto en la porosidad de la estructura, lo que limita los usos de la misma (*i.e.* el exceso de agitación en la zona protegida no permitiría el desarrollo de muchas actividades portuarias).

Como consecuencia de la demanda mundial de este tipo de estructuras, numerosos autores y grupos de investigación han desarrollado

trabajos teóricos y experimentales tratando de explicar el funcionamiento mecánico e hidráulico de los diques, y así lograr diseños más eficientes. Existen, entonces, trabajos como el de Hudson (1959), que es ampliamente utilizado hasta el día de hoy y que presenta la conveniencia de depender de un solo parámetro, K_{st} , o coeficiente de estabilidad; el de Iribarren (1965), quien comprobó la importancia del espesor del manto principal; Losada *et al.* (1986), quienes estudiaron las características del flujo alrededor de las piezas que conforman el manto; Van der Meer (1987), que propuso una serie de fórmulas basadas en ensayos de laboratorio; Allsop (1990), quien estudió la estabilidad de taludes fabricados con material bien graduado, y muchos más que fácilmente se pueden consultar en la literatura especializada. La validez y eficacia de todos estos esfuerzos se evidencian en el adecuado funcionamiento de una enorme variedad de estructuras alrededor del planeta.

Con el fin de mejorar la estabilidad de las estructuras de protección costera, se desarrolló el concepto de dique berma (Bruun y Johannesson, 1974), el cual consiste en una sección a la que se permite adaptarse a los climas de oleaje que la solicitan, con el consecuente aumento en el volumen de material de construcción que esto supone. Una gran variedad de autores han estudiado y caracterizado el dique berma, entre los que destacan los trabajos de Van der Meer (1988), quien se enfoca en la estabilidad del dique y presenta una serie de relaciones empíricas para su diseño; Van Gent (1995), quien estudió la interacción entre el oleaje y el dique berma, y Tørum *et al.* (2003), quienes realizaron un trabajo experimental en diques berma multicapa. Más recientemente, Zanuttigh y Van der Meer (2008) publicaron un trabajo en el que incorporan las formulaciones de varios autores y una propia, a fin de estudiar la reflexión generada por algunas tipologías de diques, incluido el dique berma.

No obstante toda la información con que hoy se cuenta, quedan tópicos pendientes en los que es necesario profundizar y que

seguramente impactarán en el futuro de las obras de protección costera. Entre los temas que mayor interés han generado en los años recientes se encuentra la descripción y comprensión del carácter dinámico del perfil transversal de los diques en talud; es decir, un análisis de las condiciones marítimas que superan la capacidad estable del talud recto y cómo se comporta éste una vez que inicia el proceso de avería. Si bien la forma final de perfil en "S" es conocida, pocos trabajos se han enfocado en cómo es la evolución desde el talud recto hasta alcanzar dicha forma, así como en la interacción entre la estructura y el oleaje durante el proceso, y en la estabilidad del dique una vez adquirida la nueva forma. La principal motivación para el estudio de esta evolución y de la forma final es que tradicionalmente se considera que un talud recto que ha sido modificado por ciertas condiciones de oleaje (*e.g.* un temporal) ha fallado y requiere reparación, cuando en realidad el talud deformado resulta ser menos reflejante y más estable para el estado de mar que lo generó (Clavero *et al.*, 2006). En este sentido, el entendimiento de los procesos hidráulicos y mecánicos que derivan en la construcción natural de una geometría estable es el primer paso para definir el perfil de diseño de diques con menores factores de seguridad, sin comprometer su funcionalidad.

Aportar un avance en el entendimiento del problema citado es el objetivo principal del presente artículo, en el que a través de un extenso programa experimental se ha llegado a una serie de análisis que conforman la primera fase de una investigación, que tiene por meta última la consecución de un diseño audaz, muy estable y de menor costo respecto de los que actualmente se pueden hallar en la literatura. Adicionalmente es importante señalar que, a diferencia de los trabajos enfocados en el dique berma (sección adaptable), la sección última que se desea obtener en este trabajo es un perfil diseñado como "S" desde su concepción y a la que no se le permite deformación en condiciones iguales o menores a la de diseño.

Hipótesis de trabajo

Las hipótesis bajo las cuales se desarrolló el trabajo experimental, cuyos resultados se presentan en este artículo, se resumen a continuación:

- Dada la tipología del dique que se utilizó en este estudio, a saber, dique en talud emergido sin espaldón y no rebasable, los fenómenos de transformación del oleaje que gobiernan el proceso son reflexión, rotura, disipación de energía en el medio granular y transmisión.
- Como resultado del uso de la escala de Froude, la permeabilidad del modelo difiere de la del prototipo; es decir, se tiene un efecto escala que impacta en el rebase, el ascenso y descenso del flujo sobre el talud, la transmisión y la estabilidad de las piezas del manto principal.
- En un sistema granular construido con un único tipo de pieza, si el número de olas de la misma altura que actúa sobre el sistema es lo suficientemente elevado, cada altura de ola da lugar a un perfil del sistema que es estable para ella y para las alturas de ola inferiores. El perfil estable sólo se modifica si se aumenta la altura de ola (Benedicto, 2004).
- El modelo de dique homogéneo representa adecuadamente las características de un dique convencional.

Descripción de los experimentos

El rompeolas seleccionado para el estudio experimental consiste en un dique homogéneo fabricado de cubos de concreto de 3 cm de lado. Para la construcción del modelo se requirió colar alrededor de 32 000 cubos de concreto, trabajo que se realizó en los talleres del Instituto de Ingeniería de la UNAM. La mezcla que se utilizó tuvo por proporciones 61% en peso de arena, 24% en peso de cemento y 15% en peso de agua. La arena empleada se tamizó con la malla número 4 (tamaño máximo de grano menor de

4.75 mm). El colado de las piezas se llevó a cabo en una cimbra de acrílico y, luego de un proceso de curado de dos a tres días, el concreto alcanzó una resistencia aproximada de 110 kg/cm² con un peso volumétrico de 1.9-2.0 ton/m³.

Con las piezas descritas se ensayaron dos modelos: uno con pendiente inicial de 1.5:1 en el lado expuesto y 1.25:1 en el lado protegido, y el segundo con pendiente inicial de 2.0:1 en el lado expuesto y 1:1 en el lado protegido. Ambos modelos se construyeron de 84 cm de alto y con un ancho de corona de 16.5 cm. Se ejecutaron dos experimentos con cada uno de ellos, de manera que en total se modelaron los siguientes cuatro escenarios:

- I – Modelo 1 con oleaje regular.
- II – Modelo 2 con oleaje regular.
- III – Modelo 1 con oleaje irregular.
- IV – Modelo 2 con oleaje irregular.

Cada uno de los escenarios constó de dos fases:

- Fase 1. La prueba inició con una altura de ola que no generó daño al talud (9, 10, 7 y 12 cm para los escenarios I, II, III y IV, respectivamente), a fin de verificar la estabilidad inicial. Se ejecutaron tandas (trenes de olas) de diez minutos para oleaje regular y de media hora para oleaje irregular. Durante cada tanda se contó el número de piezas que fueron removidas de su lugar, al menos una vez su diámetro equivalente. La altura de ola de los trenes se incrementó siempre en un centímetro cuando luego de dos tandas consecutivas no se movió ninguna pieza. Cuando el perfil de la estructura cambió de forma notoriamente, se detuvo el proceso y se midió la nueva forma. Después de medir el perfil se ejecutaron tandas con alturas de ola menores a la que generó la última forma para verificar la estabilidad y se continuó con el proceso. La fase terminó cuando se alcanzó la altura de ola máxima que se pudo generar en la instalación experimental, esto

es, la mayor altura de ola que no rompía antes de llegar a la estructura.

- Fase 2. A partir del talud recto se ejecutaron trenes de media hora, tanto en oleaje regular como irregular, con la altura de ola máxima alcanzada en la fase 1. Estos trenes se repitieron hasta que el perfil logró el equilibrio (nulo movimiento de piezas) y se midió la forma final.

Las características de los ensayos fueron las siguientes: incidencia de oleaje normal al dique y profundidad constante de agua en reposo de 45 cm. En el caso de oleaje regular, el periodo fue de 1.315 s y en los escenarios de oleaje irregular se designó el valor de 1.577 s como periodo pico de un espectro tipo *JONSWAP*, con parámetros $\gamma=3.3$, $\sigma_{low}=0.07$ y $\sigma_{high}=0.09$.

Los experimentos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Puertos y Costas del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. En él se cuenta con un canal de oleaje con fondo plano de 37 m de largo por 0.8 m de ancho y 1.3 m de alto. De los 37 m de largo, sólo 34 m son útiles para el modelado físico. Esta instalación está equipada con un generador de oleaje de tipo pistón, conformado por un motor eléctrico y una pala de acero inoxidable, que es controlado desde una computadora personal. El generador es capaz de producir oleaje regular, irregular y de reproducir estados de mar definidos por el usuario. Este canal tiene instalado un sistema de absorción dinámica del oleaje, con el cual se eliminan las ondas re-reflejadas, manteniendo así una señal limpia y

constante de oleaje incidente. En la parte final del canal se cuenta con un sistema de absorción pasivo. La figura 1 muestra un esquema del arreglo experimental.

Como se puede observar en la figura 1, se utilizaron tres grupos de sensores de nivel para medir las características del flujo durante los ensayos. El primer grupo (el más cercano al generador) se utilizó como testigo del funcionamiento del sistema de absorción, el segundo grupo (colocado a pie de estructura) se utilizó para medir las condiciones de oleaje que directamente solicitaron al rompeolas y el tercer grupo (zona protegida) se utilizó para obtener información de la transmisión del oleaje a través del dique.

La información del segundo grupo de sensores se procesó según el método de separación de ondas incidente y reflejada presentado por Baquerizo (1995).

Los perfiles estables en cada experimento se midieron con una estación total láser y se registró la forma con fotografía estática. Adicionalmente se grabó el proceso con video digital, en donde quedaron registrados el tipo de rotura y la deformación progresiva del perfil de la estructura.

Resultados

Los resultados del trabajo experimental que se presentan en esta sección están enfocados principalmente a mostrar las similitudes y diferencias entre el comportamiento hidráulico y la estabilidad de los perfiles correspondientes

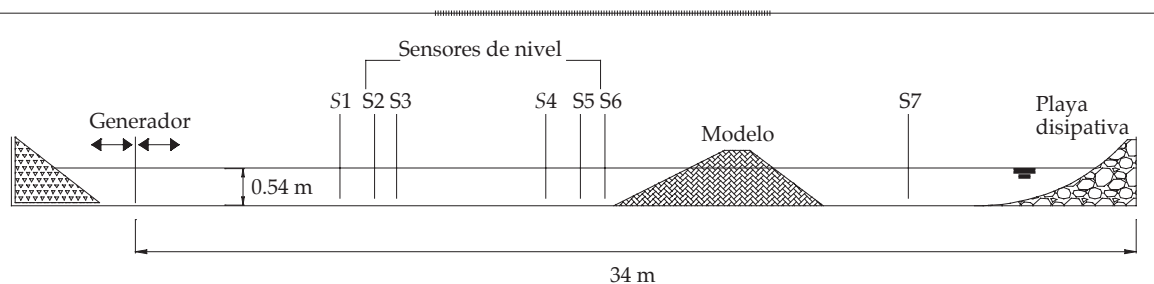


Figura 1. Arreglo experimental utilizado en el estudio.

a las fases 1 y 2 de experimentación. Aspectos complementarios al análisis que se realiza en este trabajo, como las variaciones del flujo de energía y la evolución del parámetro de estabilidad, se pueden consultar en Clavero *et al.* (2006) y Mendoza *et al.* (2007).

Durante la fase 1, la deformación del perfil transversal del dique y la eventual consecución de la estabilidad en su nueva forma siguen un proceso claramente observado y totalmente reproducible en los dos modelos y en los cuatro escenarios simulados. Dicho proceso inicia con un tren de olas rompiendo en voluta-colapso sobre el talud, cuya acción es el motor de la extracción de piezas del manto de la estructura. Las piezas originalmente colocadas en las inmediaciones del nivel de agua en reposo son llevadas por el mismo oleaje (corrientes de retorno) muy lentamente hacia la parte inferior de la estructura, de tal suerte que la evolución del perfil a medida que aumenta la altura de ola presenta abultamientos que van viajando hacia el pie del dique. Con el paso del tiempo, el oleaje sigue extrayendo piezas formando una berma casi horizontal. La deformación continúa con las piezas de la parte superior del perfil, cayendo por gravedad hacia la berma, mismas

que también son llevadas por el oleaje hacia la parte inferior del perfil. El proceso termina cuando la berma es suficientemente larga como para disipar la energía del oleaje en cantidad tal que ya no es capaz de extraer piezas y la parte superior del perfil se mantiene estable. Esta deformación, que al paso del tiempo genera un rompeolas con la forma de perfil en "S", es responsable de las variaciones en el comportamiento disipativo del talud y, a la vez, al interactuar con el oleaje incidente, del cambio en el tipo de rotura que se presenta sobre la estructura, la cual, al final de los experimentos, es de tipo voluta-colapso. Tal como se supuso en las hipótesis de trabajo, cada altura de ola genera su propio perfil estable.

El conteo de las piezas removidas durante cada tanda de oleaje ofrece un panorama de la deformación del perfil a lo largo de la prueba y permite, al mismo tiempo, observar la historia de la deformación para cada altura de ola. Si, por otro lado, se realiza un acumulado del número de piezas que se desplazaron en cada tanda, se puede obtener información referente a la variación de la estabilidad del dique en el transcurso de los experimentos, así como de su capacidad de recuperación luego de lapsos de

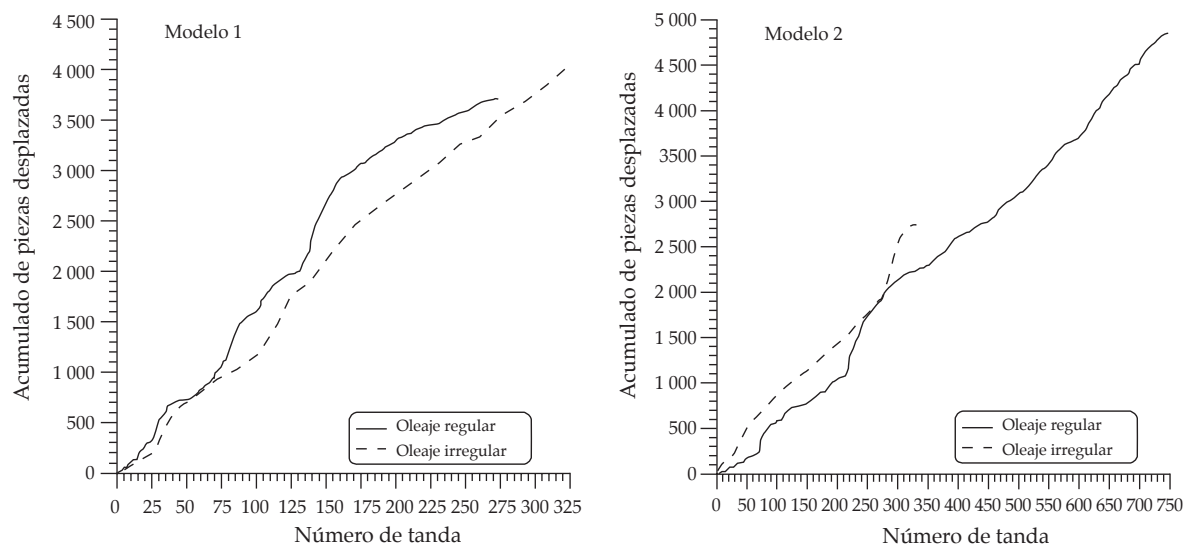


Figura 2. Curvas acumuladas de número de piezas desplazadas para los escenarios I a IV.

fragilidad. Las curvas acumuladas de número de piezas desplazadas se presentan en la figura 2, en la que el panel derecho corresponde al modelo 1 y el izquierdo, al modelo 2.

En dicha figura se puede observar que, en todos los casos, la función acumulada tiene una pendiente media relativamente constante con una serie de variaciones, indicando las distintas etapas de estabilidad y fragilidad del sistema. En el caso del modelo 1, llama la atención que el escenario con oleaje regular muestra la mayor cantidad de movimiento cerca de la tanda 150 (alturas de ola más grandes), para dar lugar a un comportamiento muy regular hasta el final del ensayo. Por su parte, la pendiente de la curva correspondiente al escenario con oleaje irregular muestra menos variación durante toda la prueba. Esta diferencia en la curva acumulada puede deberse a la distribución energética de los trenes de olas, es decir, el oleaje irregular definido por un espectro teórico es tal que el incremento en la altura de ola es menos sensible. Por la misma razón, el número total de piezas desplazadas en el escenario con oleaje irregular es mayor que en el regular, en el que las olas rompen antes de llegar a la estructura, obligando a detener la prueba. Vale la pena apuntar que

esta comparación es válida, ya que las tandas de oleaje irregular fueron de mayor duración, buscando que la energía total de las tandas con cada tipo de oleaje fuera similar.

El análisis del modelo 2 es muy interesante, puesto que la tendencia de las curvas acumuladas es contraria a la observada para el modelo 1. En este caso, el escenario con oleaje regular es el que presenta una pendiente con menos variación, mientras que el oleaje irregular presenta gran cantidad de movimiento cerca del final de la prueba. La respuesta a estas diferencias de comportamiento radica en la pendiente con que se construyó el modelo 2, que al ser más horizontal requiere de mayor energía para que las piezas salgan de su lugar y al ser de mayor longitud ofrece más superficie de fricción al oleaje. Lo anterior bajo el conocimiento de que en ambos modelos la evolución de la rotura es similar: inicia en oscilación-colapso y evoluciona hacia voluta-colapso o voluta. En este sentido, resulta lógico que el oleaje regular, aunque muy lentamente, alcance a deformar el perfil mucho más que el oleaje irregular. De la gráfica en el panel derecho de la figura 2, se puede deducir que el escenario IV no alcanzó sus últimas consecuencias, ya que

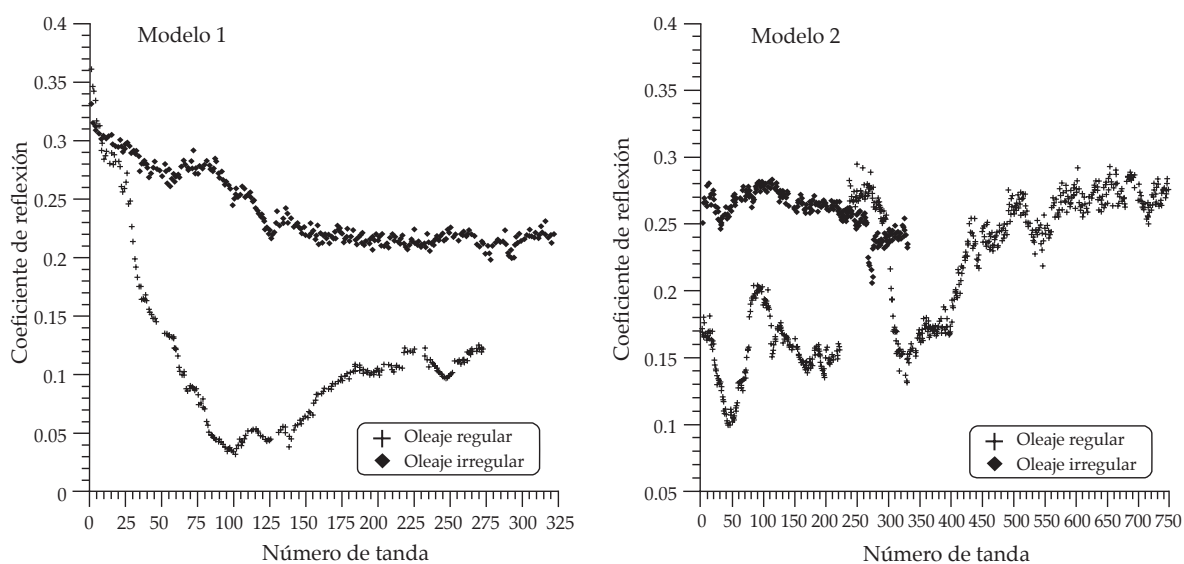


Figura 3. Variación del coeficiente de reflexión para los escenarios I a IV.

las limitaciones geométricas de la instalación experimental no permitieron la generación de espectros con altura de ola significativa más grande (aumento de energía), que provocarían una mayor deformación del dique.

En la figura 3 se muestra la variación del coeficiente de reflexión para los cuatro escenarios modelados.

En el panel izquierdo de la figura 3 se puede comparar fácilmente la evolución de la energía reflejada a medida que el dique se deforma. La primera característica que salta a la vista (y que además es común a los dos modelos) es que la magnitud del coeficiente de reflexión es mayor cuando el oleaje es irregular. Una explicación de este fenómeno es que el oleaje regular tiene, en general, mayor capacidad de deformación del dique y, por tanto, éste adquiere formas con mayor capacidad de disipación de energía tanto por fricción como por rotura. Esta explicación se verifica al seguir la evolución de la reflexión con oleaje regular, en la que se puede distinguir un valor mínimo del coeficiente y después una recuperación del mismo en la medida que el perfil continúa deformándose. La tendencia de las curvas de coeficiente de reflexión para el modelo 1 indica que, de haberse podido generar olas de mayor tamaño con oleaje regular, el valor final para ambos escenarios sería muy cercano. Por lo que toca a la reflexión generada por el modelo 2 (panel derecho de la figura 3), la aparición de una serie de máximos y mínimos en el valor del coeficiente responde a la deformación del perfil, la cual, según lo observado en el desarrollo de la modelación de este escenario, presenta mayores variaciones que el resto. Es interesante señalar que aun cuando la tasa de desplazamiento de las piezas (pendiente media de la curva acumulada, figura 2) es casi constante, no significa que el perfil tienda a ser más o menos disipativo; esto es, el comportamiento hidráulico del dique muestra poca dependencia de la cantidad de piezas extraídas por unidad de tiempo. Es notoria, en el caso del escenario III, la tendencia a una estabilidad en el valor del coeficiente de reflexión una vez que se ha

alcanzado la máxima capacidad de generación de la instalación experimental. Por lo que toca al escenario IV, la evolución de la reflexión acusa poca variación, pero su tendencia es similar a la del escenario II, de manera que lo antes señalado respecto de falta de energía para deformar el modelo 2 con oleaje irregular se confirma.

Buscando caracterizar matemáticamente los coeficientes de reflexión de la fase 1, se emplearon las expresiones propuestas por Zanuttigh y Van der Meer (2008) (en adelante Z&vdM, 2008) para estimar la reflexión en función del número de Iribarren. Estos autores proponen diferentes formulaciones para evaluar dicho parámetro, dada una sección transversal de dique (*i.e.* talud recto o dique berma). Los resultados de la comparación de los valores medidos con los estimados con las relaciones de Z&vdM, 2008, para los cuatro escenarios de la fase 1, se presentan en la figura 4. Es notorio que el número de Iribarren definido como talud recto sólo es capaz de representar adecuadamente la reflexión del escenario I antes de que la deformación sea considerable. Por lo que toca a los escenarios III y IV, es claro que un factor de amplificación mejoraría los resultados; sin embargo, en el escenario II no hay correlación posible. Algo similar sucede cuando el número de Iribarren se estima como dique berma (Z&vdM, 2008); ahora el escenario IV es el único que se representa en forma aceptable cuando el dique ya tiene la forma "S". El coeficiente de reflexión contra el número de Iribarren para dique berma se estimó sólo para las tandas de olas en que se midió el perfil. Tanto la consecución de un mejor ajuste como un análisis a detalle de estos resultados representan una línea de trabajo distinta de los objetivos de este artículo; sin embargo, vale la pena hacer hincapié en que, como se señaló antes, la sección que se busca obtener en este trabajo no es estrictamente un dique berma, ya que, a diferencia de aquel, en estos ensayos se parte de un talud recto y la sección final está concebida como estáticamente estable.

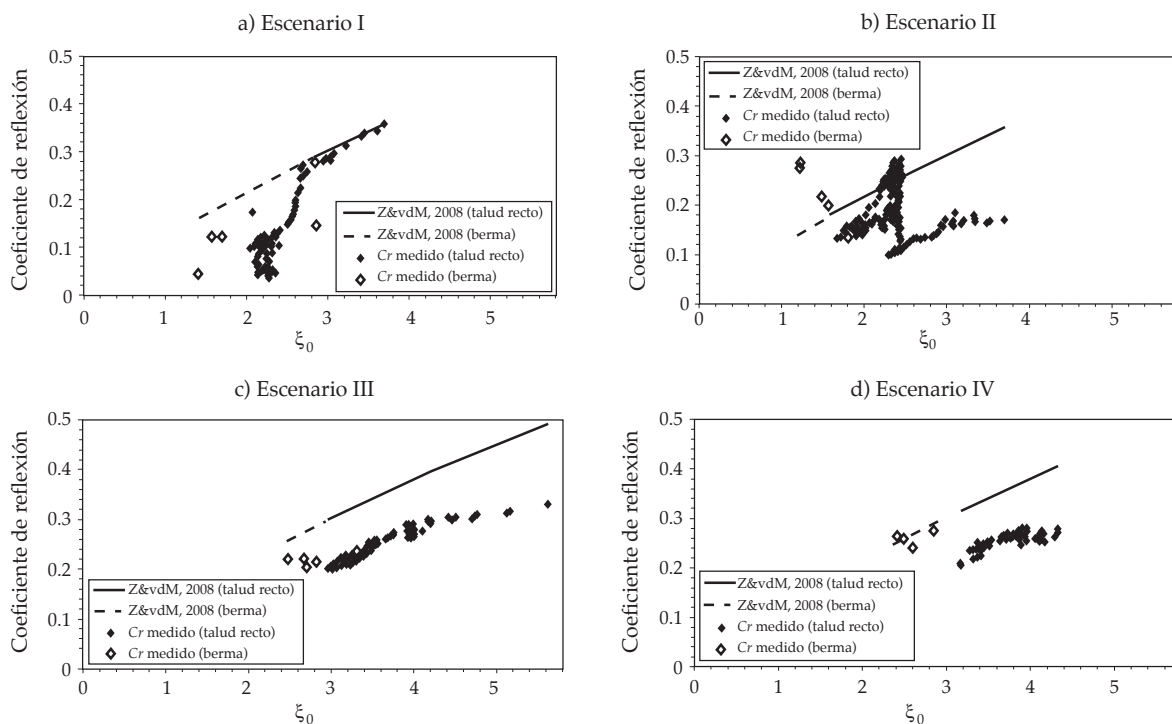


Figura 4. Comparación entre los coeficientes de reflexión medidos y los estimados con las expresiones propuestas por Zanuttigh y Van der Meer, 2008.

La comparación entre el comportamiento del dique ensayado en la fase 1, con lo obtenido en la fase 2, se puede hacer con ayuda de las figuras 5 y 6. En ellas se presenta la variación del coeficiente de reflexión desde el talud recto hasta que el dique alcanzó su forma estable con la máxima altura de ola que se generó en la fase 1; a saber, 22 cm para el escenario I, 18 cm de altura significativa para el escenario II, 25 cm para el escenario III y 18 cm para el IV. La figura 5 muestra, entonces, la variación de la reflexión para el modelo 1 con oleaje regular (izquierda) e irregular (derecha); mientras que la figura 6 presenta la misma información para el modelo 2 con oleaje regular. Los datos del coeficiente de reflexión para el escenario IV no se pudieron recuperar por problemas técnicos en el laboratorio y por ello no se presentan.

Como se puede observar en la figura 5, la variación del coeficiente de reflexión a medida

que el perfil se deforma con una sola altura de ola es muy poca; de hecho, después de unas cuantas tandas, es propiamente nula, lo cual es más notorio en el caso del escenario II (lado derecho). Evidentemente, la razón de esta escasez de variación es que la deformación se presenta con los primeros trenes de oleaje y en lo sucesivo muy pocas piezas salen de su lugar. La rapidez con que se deforma el perfil cuando es solicitado por la altura de ola que lo llevará a una determinada forma estable definitivamente impactará en el desarrollo de metodologías de diseño de las estructuras con perfil "S", puesto que pueden ser muy sensibles a variaciones en la altura de ola y se deformarán rápidamente en caso de ocurrir alturas mayores a la de diseño.

La figura 6 muestra una tendencia similar en la variación del coeficiente de reflexión para el modelo 2, con la diferencia, como era de esperarse, de que requirió más tiempo alcanzar la estabilidad. La parte final de la curva no es

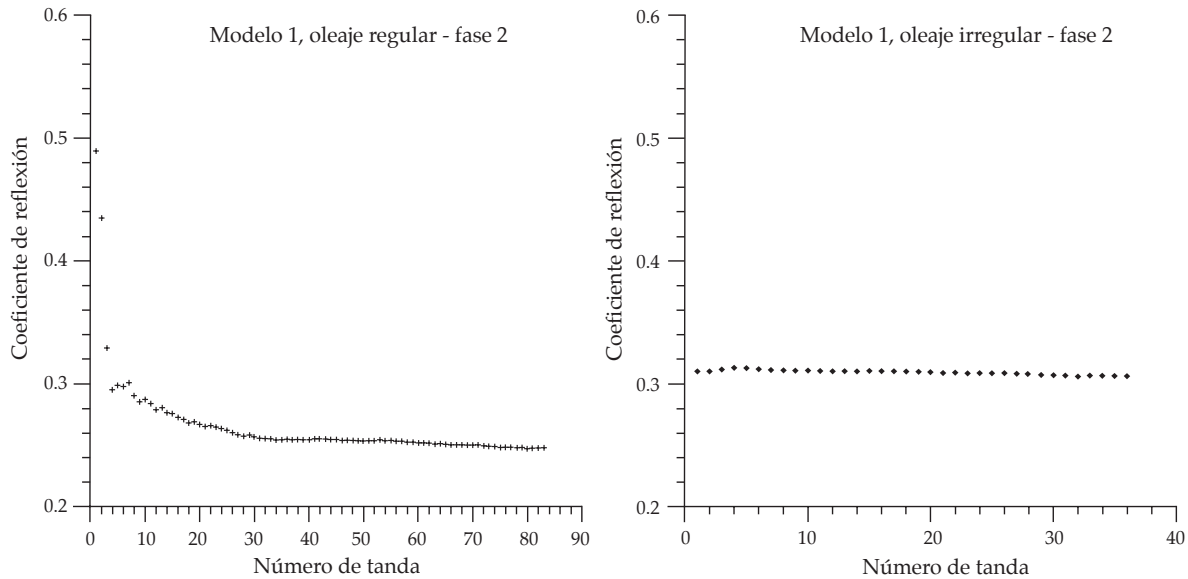


Figura 5. Coeficiente de reflexión para el modelo 1 en la fase dos de experimentación.

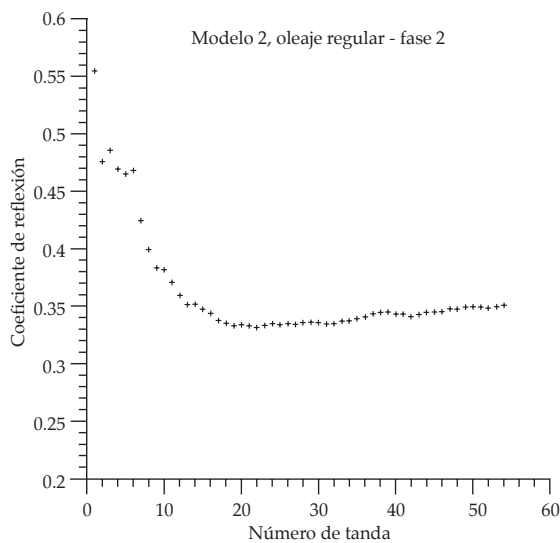


Figura 6. Coeficiente de reflexión para el modelo 2 en la fase dos de experimentación.

tan horizontal como en el modelo 1 debido a que algunas piezas siguen siendo extraídas. La misma figura evidencia que una vez que se ha formado el perfil estable no hay más movimiento de piezas.

Aunque se cuenta con los datos de toda la evolución de los perfiles (ver Mendoza *et al.*, 2007), la forma estable de mayor interés para los objetivos de este trabajo es la que se generó con la altura de ola más grande. El perfil al que se llega con esta condición es el que representa la deformación máxima que puede tener el dique para las condiciones geométricas de la instalación experimental. El desarrollo de la fase 1 de experimentación permite llevar a cabo una comparación entre el perfil estable para oleaje regular y el generado con oleaje irregular. La figura 7 presenta, en su parte izquierda, los perfiles obtenidos para el modelo 1 (escenarios I y II) y en su parte derecha los correspondientes al modelo 2 (escenarios III y IV). Cabe señalar que para obtener los perfiles que se muestran en la figura 7, se midieron cinco líneas en sentido longitudinal separadas 15 cm entre sí y el promedio de todas es el valor que se muestra como resultado.

La superposición de los perfiles estables que se ha dibujado en la figura 7 permite detectar diferencias entre la forma a que se llega con los dos tipos de oleaje generado. En el caso del modelo 1, los perfiles son prácticamente

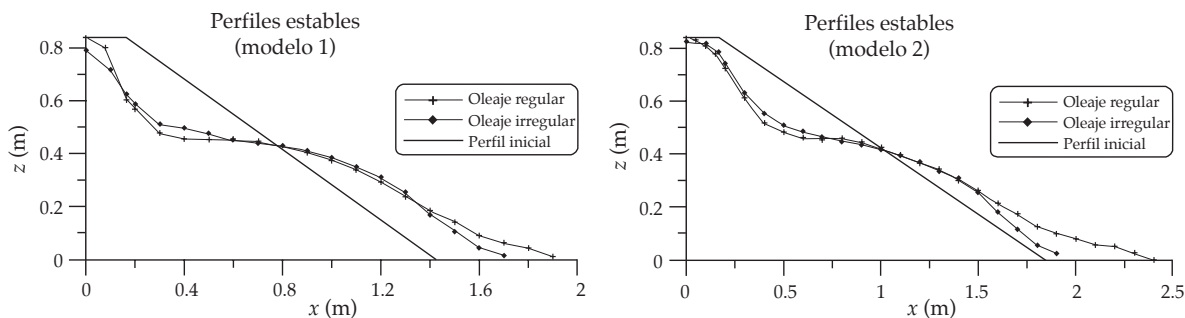


Figura 7. Comparación de los perfiles estables obtenidos en los escenarios I a IV.

el mismo, salvo por diferencias que no van más allá de unos cuantos centímetros, lo que equivale a uno o dos cubos en diferente posición (se recuerda al lector que los perfiles dibujados son promediados). Es de notar, sin embargo, que el oleaje regular tiende a generar una pendiente un poco más vertical en la parte superior del perfil, lo cual se debe a que la rotura sobre el talud es la misma y aproximadamente en el mismo lugar cuando se tiene oleaje regular; mientras que con oleaje generado a través de un espectro, la zona de rompientes es más extensa y la pendiente en la zona superior del perfil es más tendida. El resto del perfil es muy similar para ambas condiciones de oleaje. El modelo 2 presenta también esta pequeña diferencia en la inclinación de la parte superior del perfil estable, aunque menos marcada que en el modelo 1. La parte inferior del perfil en el escenario IV no alcanzó a desarrollar una pendiente similar a la que desarrolló el perfil del escenario III debido, como se ha explicado ya, a que la energía del oleaje espectral generado no fue suficiente para deformar la estructura a su máxima expresión (lo cual no quiere decir que no se haya alcanzado la estabilidad). Al comparar los perfiles de ambos modelos, se observa que para el número 1, la corona del dique resultó ligeramente dañada, mientras que en el segundo modelo se mantuvo intacta; por otro lado, la parte superior presenta una pendiente un poco más alta en el modelo 1, lo cual puede ser consecuencia de que en

este talud las olas alcanzan una mayor cota de ascenso y logran extraer piezas de zonas más elevadas. Otra diferencia que llama la atención es que para el modelo 1, la zona media del perfil es más larga que la que se genera en el modelo 2 (aproximadamente 80 cm del primero contra 75 cm del segundo). Las coincidencias entre los perfiles de ambos modelos son la inclinación de la parte media del perfil y el punto en que intersectan el talud recto y el perfil estable, el cual se ubica aproximadamente a 40 cm del fondo; es decir, un poco por debajo de nivel de agua en reposo (54 cm).

A continuación se presenta la comparación entre los perfiles obtenidos de la fase 1 con los de la fase 2. En la figura 8 se muestran los resultados para el escenario I; es evidente que ambos perfiles son prácticamente el mismo, de donde se puede decir que el proceso de deformación para una altura de ola dada es reproducible y se corrobora que existe una relación biunívoca entre la altura de ola y el perfil estable que adquiere la estructura cuando ésta ocurre. En esta figura se puede observar también que la forma estable o "S" está compuesta por tres curvas: una superior y una inferior, cóncavas hacia arriba, y una intermedia con la concavidad hacia abajo; la repetición de este patrón en el resto de los escenarios es deseable, ya que consolidaría la fiabilidad de una forma estable generalizada. Como ejemplo se muestran, en la figura 9, imágenes de fotografía estática de

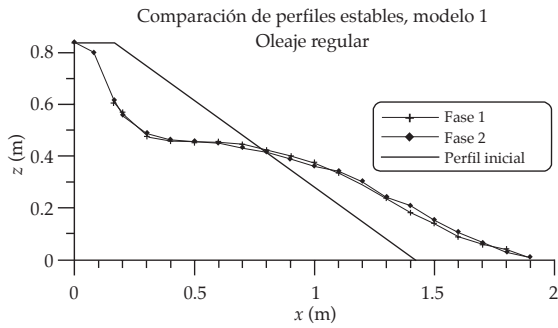


Figura 8. Comparación de los perfiles estables para el escenario I.

los perfiles obtenidos al término del escenario I para las fases 1 y 2 de experimentación.

La figura 10 muestra la comparación de los perfiles de cada fase para el escenario II, en ella se distinguen características coincidentes con las descritas para el caso anterior, como son la gran similitud entre los perfiles de ambas etapas de experimentación y la formación de un perfil compuesto por tres curvas. La longitud y pendiente de la parte intermedia del perfil son también muy similares en estos dos primeros escenarios. En resumen, se puede afirmar que el perfil alcanzado por el modelo 1 para los dos tipos de oleaje y para las dos fases de experimentación es el mismo.

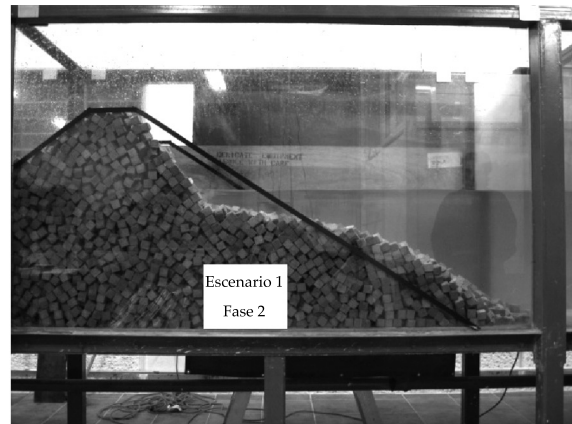


Figura 9. Imágenes de los perfiles estables para el escenario I en las fases uno y dos.

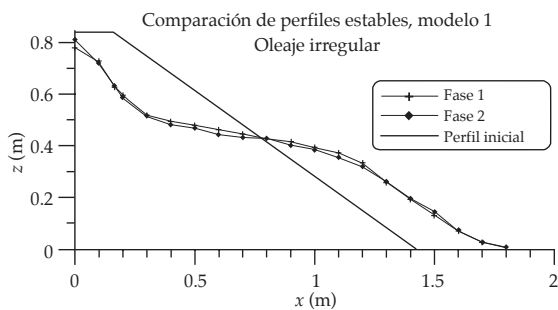


Figura 10. Comparación de los perfiles estables para el escenario II.

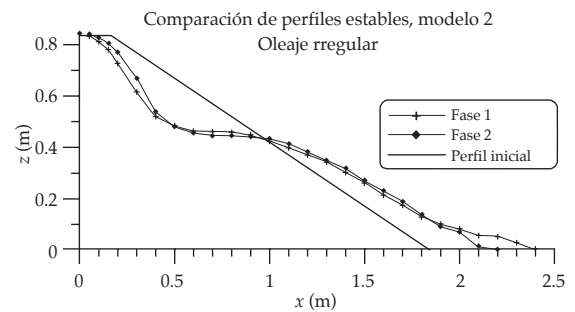


Figura 11. Comparación de los perfiles estables para el escenario III.

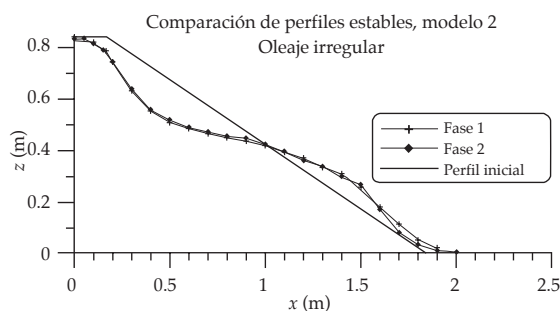


Figura 12. Comparación de los perfiles estables para el escenario IV.

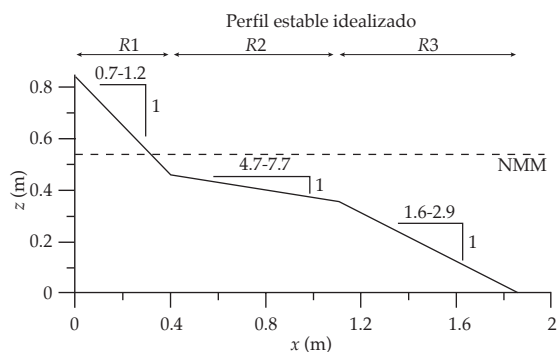


Figura 13. Esquema del perfil estable idealizado.

Las figuras 11 y 12 presentan los resultados de los ensayos del modelo 2. En la primera de ellas se observa una gran similitud entre los perfiles obtenidos al final de cada fase. Llama la atención que estos perfiles también están conformados por tres regiones de diferente curvatura y sentido de la concavidad, por lo que el perfil corresponde, al menos en forma, al obtenido para el modelo 1. Por su parte, la figura 12 muestra dos perfiles que si bien son prácticamente idénticos, difieren un poco del resto de los resultados. Esta diferencia radica en que en la pendiente de la parte inferior del perfil es un poco menor.

El resultado obtenido en los escenarios III y IV no es tan sorprendente si se toma en cuenta, como ya se ha explicado, que la forma que se reporta, aunque estable, no está totalmente deformada. Aún, así, en sentido práctico, la forma estable de los cuatro escenarios puede aceptarse como la misma.

A partir de los resultados obtenidos se buscó idealizar la forma estable de la estructura. Como primer razonamiento se decidió dividir el perfil en tres regiones para eliminar las curvaturas, puesto que constituirían un grave problema durante el proceso constructivo que derivaría en un incremento en los costos, de tal suerte que la forma idealizada consta de tres regiones con diferente pendiente cada una. En virtud de la variación que mostraron los resultados, se seleccionó un rango de pendientes para cada

una de las regiones y con ellos se definió de una manera amplia la sección de dique que resultó de los experimentos aquí descritos. La sección idealizada se muestra en la figura 13.

Como recomendación inicial de diseño, propuesta a partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se puede seguir la siguiente metodología:

- Conocida la altura de ola de diseño, se determina el punto más bajo de la región dos (ver figura 13), cuya profundidad será igual a dicha altura de ola. Se eligen la pendiente de esta región y su longitud, considerando que $R2/H$ debe tener un valor entre dos y cinco, y que la región dos no debe cruzar el nivel de agua en reposo. $R2$ es la longitud de la región dos y H , la altura de ola de diseño.
- Desde el punto más alto de la región dos se traza la región uno, $R1$, cuya pendiente se elegirá según lo recomendado en la figura 13, y su cota máxima deberá asegurar que el dique no sea rebasable ($R1/H$ tomará valores entre dos y cuatro, siendo $R1$ la longitud de la región uno).
- Desde el punto más bajo de la región dos se traza la región 3, $R3$, considerando la recomendación de pendiente mostrada en la figura 13. Esta región terminará al intersectar con el fondo; los valores obtenidos en este trabajo para $R3/H$ están entre cuatro y cinco.

Cabe señalar que esta metodología obedece y reproducirá los perfiles que se midieron durante los experimentos aquí presentados; la generalización de la metodología requiere la ejecución de más experiencias de modelado físico, que permitan la identificación de parámetros y un mejor entendimiento de la interacción entre la geometría de dique en "S" y diversas condiciones de oleaje, lo cual se concibe como las futuras líneas de trabajo en este tema.

Al respecto, ya se ha comprendido que el funcionamiento hidráulico de este perfil consiste en ofrecer una zona de fricción cerca del pie del dique (región inferior); después, por efectos de fricción y someramiento, el oleaje rompe sobre la región intermedia del perfil, para finalmente alcanzar la parte superior sólo en proceso de ascenso y descenso.

Siempre que el estado de mar que solicite al dique siga dicho funcionamiento y que la altura de ola no sobrepase aquella que generó el perfil (o, en su caso, para la que fue diseñado), la estructura no fallará y trabajará eficientemente como disipadora de energía.

Conclusiones

Si bien el diseño de diques en talud recto tiene la ventaja de ser de fácil construcción, representa la forma que más energía refleja de regreso al mar. Esta condición necesariamente tiene implicaciones en las solicitaciones que debe resistir la estructura; en otras palabras, el talud recto es un tipo de perfil en el cual se autoincrementan las cargas debidas a oleaje.

De los resultados de la experimentación realizada en este trabajo, se observa que el oleaje regular incidiendo sobre un talud recto homogéneo y sus deformaciones hasta alcanzar la forma estable en "S" genera menores coeficientes de reflexión que el oleaje irregular, por lo que en ambos tipos de perfiles resulta cuestionable el uso de metodologías de diseño fundamentadas en oleaje regular, puesto que se puede caer en una subestimación de la energía total.

Entre las diferencias que destacan de la comparación entre el comportamiento de la estructura al estar sometida a oleaje regular e irregular, se tiene que la parte superior del perfil tiende a ser más vertical con oleaje regular; mientras que la parte media del perfil es un poco más larga para oleaje irregular, dada la mayor amplitud de la zona de rompientes con esta última condición.

A pesar de la ocurrencia de algunas diferencias ente los resultados obtenidos para los escenarios de modelación física, se puede concluir que la forma estable que adquiere un dique en talud al ser deformado libremente por el oleaje es la misma. Esta conclusión permite idealizar el perfil y es la base de futura experimentación y análisis, que ha de derivar en el desarrollo de metodologías de diseño de estructuras con este tipo de perfiles.

La construcción de formulaciones de diseño para diques con perfil "S" debe tomar en cuenta que la deformación de los perfiles ocurre con gran rapidez y aún cuando la estructura pueda seguir ofreciendo seguridad, las ventajas del diseño inicial se pueden perder en poco tiempo (un temporal de unas cuantas horas).

En el caso de que llegue a ocurrir una altura de ola mayor a la considerada en el diseño, los experimentos que se presentaron en este trabajo muestran que este tipo de estructuras tiene la capacidad de adquirir una nueva forma estable, que permanecerá así hasta que la altura de ola que la generó sea superada de nuevo.

Se verificó que los diques con una forma transversal en "S" son mucho más estables mecánicamente que las estructuras con un talud recto.

Recibido: 26/06/2008

Aprobado: 02/09/2009

Referencias

- ALLSOP, N. *Rock armoring for coastal and shoreline structures: Hydraulic model studies on the effects of armor grading. Hydraulics Research*. Wallingford, U.K.:Report EX 1989, 1990.

- BRUUN, P. and JOHANNESSON, P. *A critical review of the hydraulics of rubble mound structures*. Tech. Rept. R3. Division of Port and Ocean Engineering. Trondheim, Norway: Universidad de Trondheim, 1974.
- BAQUERIZO, A. *Reflexión del oleaje en playas. Métodos de evaluación y predicción*. Tesis doctoral. Cantabria, España: Universidad de Cantabria, 1995.
- BENEDICTO, I. *Comportamiento y evolución de la avería de los diques de abrigo frente a la acción del oleaje*. Tesis doctoral. Granada, España: Universidad De Granada, 2004.
- CLAVERO, M., MENDOZA, E., BENEDICTO, I., SILVA, R., RAMOS, V. and LOSADA, M. *Experimental verification of mound breakwater built with an S-profile*. 30th International Conference on Coastal Engineering. Vol. 5, 2006, pp. 5059-5066.
- HUDSON, R.Y. Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters. *Journal of the Waterway and Harbors Division*. Vol. 85, 1959, pp. 93-121.
- IRIBARREN, R. *Formulae pour le calcul des diques en enrochements naturels ou éléments artificiels*. Chap. Sec. II. Theme 1 of XXI International Navigation Congress, Estocolomo, 1965.
- LOSADA, M.A., DESIRÉ, J.M. and ALEJO, L.M. Stability of blocks as breakwater armor units. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. Vol. 112, no. 11, 1986, pp. 2392-2401.
- MENDOZA, E., SILVA, R., CLAVERO, M. and LOSADA, M. Wave reflection and stability evolution of S-profile breakwaters. *Coastal Structures 2007. World Scientific*. Vol. 2, 2007, pp. 1013-1022.
- TØRUM, A., KUHNEN, F. and MENZE, A. On berm breakwaters. Stability, scour, overtopping. *Coastal Engineering*. Vol. 49, no. 3, 2003, pp. 209-238.
- VAN DER MEER, J. Stability of breakwater armor layers. Design formulas. *Coastal Engineering*. Vol. 11, no. 3, 1987, pp. 219-239.
- VAN DER MEER, J. *Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack*. Tesis doctoral. Delft: Universidad de Delft, 1988, 214 pp.
- VAN GENT, M. Wave interactions with berm breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. Vol. 121, no. 5, 1995, pp. 229-238.
- ZANUTTIGH, B. and VAN DER MEER, J. Wave reflection from coastal structures in design conditions. *Coastal Engineering*. Vol. 55, 2008, pp. 771-779.

Abstract

MENDOZA-BALDWIN, E., SILVA-CASARÍN, R., CLAVERO-GILABERT, M. & LOSADA-RODRÍGUEZ, M.A. *Evolution of the hydraulic behavior and of the geometry of homogeneous dikes deformed by waves. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering en Mexico (in Spanish). Vol. I, no. 2, April-June, 2010, pp. 21-35.*

Throughout the world, the most commonly used structure for coastal protection is the mound breakwater. These structures are said to fail when units of the armor are moved, resulting in the formation of a very peculiar S-shaped profile. This new profile allows the structure to continue working and analysis has shown that the new "S" form is, in fact, very stable. The main objective of this paper is the study of the evolution of a straight slope into a new, stable, "S" profile. The change of the shape is analyzed as pieces of the armor are displaced and the wave-structure interaction is inspected at every stage of the deformation of the breakwater. Two experimental phases were developed to verify the repeatability of the results and the comparison between four modeling scenarios is presented. The results include the variations in the geometric properties of the models tested, the tendency of the reflection coefficients and the stable profiles reached at the end of every test. Having found similar and compatible results in all the tests, an idealization of the stable shape has been made in order to provide initial values for the development of design methodologies for structures of maximum stability.

Keywords: *coastal structures, breakwater stability, wave reflection, "S" profile, dike failure, geometric design of dikes, laboratory tests of breakwaters.*

Dirección institucional de los autores

Dr. Edgar Mendoza-Baldwin

Técnico Académica Titular
Coordinación de Hidráulica
Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Edificio 5, 4° piso, cubículo 408
Circuito Escolar, Ciudad Universitaria
04510 México, D.F.
teléfono: + (52) (55) 5623 3600, extensión 8632
fax: + (52) (55) 5623 3600, extensión 8057
emendozab@ii.unam.mx

Dr. Rodolfo Silva-Casarín

Investigador Titular
Coordinación de Hidráulica
Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Edificio 5, 4° piso, cubículo 414b
Circuito Escolar, Ciudad Universitaria
04510 México, D.F.
teléfono: + (52) (55) 5623 3668
fax: + (52) (55) 5623 3600, extensión 8057
rsilvac@ii.unam.mx

Dra. María Clavero-Gilabert

Grupo de Investigación de Dinámica de Flujos Ambientales
Centro Andaluz de Medio Ambiente
Universidad de Granada
Avenida del Mediterráneo s/n
18006 Granada, España
teléfono: + (34) (958) 241 000
fax: + (34) (958) 132 479
mclavero@ugr.es

Dr. Miguel Ángel Losada-Rodríguez

Grupo de Investigación de Dinámica de Flujos Ambientales
Centro Andaluz de Medio Ambiente
Universidad de Granada
Avenida del Mediterráneo s/n
18006 Granada, España
teléfono: + (34) (958) 241 000, extensión 31156
fax: + (34) (958) 132 479
mlosada@ugr.es