

Técnica de imágenes digitales como herramienta de medición de daño en rompeolas

Jaime Roberto Ruiz y Zurvia Flores

Profesor e Investigador de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Adolfo López Mateos (Zacatenco)
Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.

Email: jaruizz@ipn.mx

Lucio Fragoso Sandoval

Profesor e Investigador de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Adolfo López Mateos (Zacatenco)
Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.

Email: lfragoso@ipn.mx

RESUMEN

La relación entre los desplazamientos de los elementos de coraza en modelo y el daño en el prototipo son un factor importante cuando se modela la estabilidad de un rompeolas. El monitoreo del rompeolas prototipo ha mostrado que las unidades de concreto pueden romperse debido a los movimientos de balanceo sin desplazamiento significativo. El monitoreo del daño, en aplicaciones de campo y en modelo se han llevado a cabo comparando imágenes antes y después de un evento. Los daños son dados en porcentaje del número total de unidades de coraza sobre el talud, por unidad de área cubierta a través del monitoreo de levantamientos fotográficos. Es por lo tanto importante que los movimientos de los elementos de coraza sean determinados lo más adecuada y eficientemente posible.

Palabras clave: daño, digitales, imágenes, medición, técnicas.

Digital images technique as a measurement tool of breakwater damage

ABSTRACT

The relation between model armour elements unit displacement and prototype damage are an important factor when modeling breakwater stability. Prototype breakwater monitoring has shown that concrete units can break due to rocking motions without being significantly displaced. The monitoring of damage, in both model and field applications, has been carried out by comparing images before and after the storm event. The damage is given as a percentage of the total number of armour units on the slope, per unit covered area, by means of the monitoring of the photographic survey. So it is very important that armour elements movement is obtained in an accurate and efficient way.

Keywords: damage, digital, images, measurement, techniques.

INTRODUCCION

Generalmente en la modelación física de estabilidad de rompeolas, el daño se determina al final de cada ensayo, contabilizando solo los elementos de la coraza que se desplazaron fuera de su franja correspondiente (se divide el talud lado mar del rompeolas en tres o cuatro franjas de diferentes colores), ver figura 6; no así con la técnica de imágenes digitales que se sustenta en el proceso espacial y temporal de daño de la estructura, es decir, desde el movimiento inicial de los elementos de la coraza, hasta llegar a la posible falla de la estructura.

Con la aplicación de la técnica de imágenes digitales será más sencillo determinar los desplazamientos de los elementos de la coraza, esto hará que las pruebas desarrolladas en modelos físicos tengan resultados más apegados a los que se presentarán en el prototipo.

Mediante esta técnica y con la aplicación de fórmulas desarrolladas por los investigadores David Phelp y Kishan Tulsi (Phelp and Tulsi 2006), se podrá interpretar el daño ocurrido en la modelación de rompeolas y de esta manera pronosticar el daño que se pueda generar en el prototipo.

La aplicación de esta técnica se efectuó a cuatro secciones de rompeolas con coraza de dolos que se probaron en el canal de olas angosto con generador hidráulico de oleaje irregular controlado por computadora; para la medición y proceso de los datos de oleaje se utilizó un ológrafo con sensores de oleaje resistivos controlado por computadora, con los que se cuenta en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional de México; con las secciones de rompeolas se realizaron series de ensayos para medir el efecto de la incidencia de trenes de oleaje sobre las mismas, por medio de la toma y análisis de imágenes digitales (fotografías) y su procesamiento posterior por medio de un programa de cómputo denominado Armour Tracking (Phelpand Tulsi 2006).

Oleaje incidente

Con base en los datos de oleaje normal y de tormenta que corresponden a olas generadas en mar abierto, se realizó una propagación del oleaje hacia las profundidades a reproducir en el modelo. De acuerdo con lo anterior, se calcularon las características del oleaje a una profundidad de 12 m, condición de profundidad de desplante de las secciones de rompeolas en el modelo.

Niveles del mar

El estudio considera condiciones de oleaje normal y de tormenta, el plano de referencia es el Nivel de Bajamar Media Inferior (N.B.M.I).

Batimetría frente al rompeolas

Debido a las características experimentales del estudio y tomando en cuenta las pendientes de las playas en los litorales mexicanos, se representa un perfil playero con pendiente 1:50 donde se desplantaron las secciones de rompeolas a ensayar.

Secciones de rompeolas

Se contó con cuatro secciones de rompeolas superficiales de sección trapezoidal con taludes 1,5:1 (lado mar y lado puerto), constituidas por enrocamiento (núcleo y capa secundaria) y elementos de concreto denominados dolos (coraza).

ANALISIS TEORICO

Definición de daño

Debido a que los elementos artificiales (dolos) no presentan el rompimiento de sus brazos en los modelos físicos, lo que si pasa en el prototipo; es necesario estimar el número de unidades que podrían romperse por medio del monitoreo de las unidades que se balancean en los ensayos en modelos físicos reducidos. La definición de daño para el modelo de una estructura, se define como el número de unidades que se han desplazado más de una unidad de altura del elemento (H), anotando el número de unidades que se han balanceado por un tiempo mayor de las dos terceras partes de la duración del ensayo (CSIR 1989). El balanceo fue originalmente monitoreado por observaciones visuales o por cámara de cine.

De las extensas pruebas realizadas con dolos, el CSIR (Consejo de Investigación para la Ciencia e Industria de Sudáfrica), encontró que el porcentaje de unidades balanceándose fue más o menos igual al porcentaje de unidades desplazadas una distancia igual a una altura del dolo (Phelp et al. 1994). Esto implica que el daño en el prototipo puede ser superior a dos o más veces el número de unidades desplazadas sobre la característica de longitud (asumiendo que el balanceo de las unidades podrá romperlas). Sin embargo, esto es un problema complejo, y depende de otras variables.

Basados en la interpretación de que la estructura de los dolos en el prototipo, es ampliamente aceptado que la mayoría de los dolos rotos es cuando tienden a moverse una distancia mayor que H. La interpretación de los movimientos mayores que H es por lo tanto sencilla. Para movimientos menores, éste no sería el caso. Hay necesidad de entender la implicación de los movimientos más pequeños que H en el prototipo. Considerando que la relación entre los pequeños movimientos y el balanceo, fue el resultado de estudios de investigación en pruebas en canal de olas conducidas por el CSIR por varios años, en las cuales los movimientos de balanceo fueron registrados. Por lo anterior la tecnología de imágenes digitales hace que el registro, análisis y entendimiento de los pequeños movimientos sea fácil y rápida.

El registro inicial de la muestra de unidades del modelo, el cual ocurre solo después que se han generado las olas, es normalmente pequeño, y contribuye poco al daño total; pero es fácilmente detectado por el análisis digital. Aunque la condición de pre prueba de la estructura es siempre registrada, por facilidad de análisis, la imagen base para la cual los grandes movimientos son registrados (por la técnica de parpadeo digital), es tomada después que el registro inicial de la muestra es completado. En el prototipo, los pequeños desplazamientos registrados sobre un rompeolas nuevo en construcción pueden resultar en grandes esfuerzos y rotura de las unidades, lo cual se adiciona al daño total. Esto fue observado en el Cabo Town(Phelp et al. 1994).y en la bahía de Richards (CSIR 1988), ambos en Sudáfrica.

Técnica de parpadeo

La técnica del parpadeo, es un procesamiento de imágenes digitales, la cual es usada de interface, en tiempo real, con la imagen de una prevista, de una zona del rompeolas antes de que ocurra el daño. Cualquier cambio es detectado entonces como un flacheo estroboscópico justo de una porción de la pantalla donde los cambios han tomado lugar.

Ésta provee un método práctico de bajo costo económico usando equipo personal, tal como una cámara digital u otro dispositivo fijo en una posición perpendicular a la cara del talud de la coraza, que puede ser controlado remotamente. El control remoto permite la toma de imágenes sucesivas sin tocar la cámara. Esto permite una perfecta superposición de imágenes. La figura 1 muestra el arreglo de la cámara, conectada directamente a una computadora portátil sobre un canal de olas angosto.

Las fotografías son tomadas antes y después de una condición de prueba y preparadas para su análisis (figura 2). Dos imágenes son analizadas usando el programa de cómputo Armour Tracking para evaluar los desplazamientos que ha ocurrido durante el ensayo. Los rangos de los movimientos son indicados por diferentes colores para diferentes desplazamientos.



Figura 1. Cámara de video digital controlada remotamente acoplada a una Laptop para captura de datos (Phelp and Tulsı 2006)

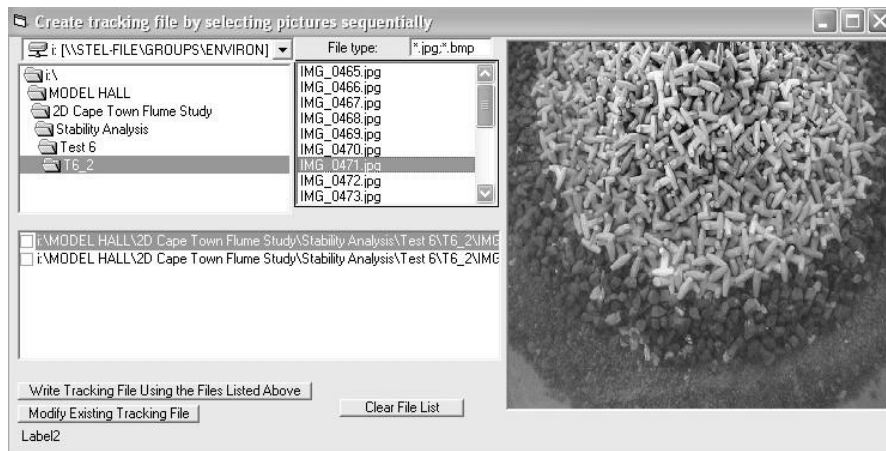


Figura 2. Captura de imagen y nombrado de archivo(Phelp and Tulsı 2006)

Calibración del daño

El uso de calibración de imágenes por captura, es una referencia de forma de una dimensión conocida como se ilustra en la figura 3. Este proceso necesita hacerse solo una vez durante el estudio. Para insertar la imagen de referencia dentro del programa Armour Tracking, uno puede determinar el factor para convertir pixeles a metros dibujando una línea usando el ratón sobre la pantalla. Esta línea da una coordenada de la pantalla relativa a la forma de referencia. Estas coordenadas son usadas para determinar la longitud de la línea en pixeles. El pixel para conocer el factor de escala dimensional es usado para convertir los desplazamientos de las unidades de coraza de pixeles a dimensiones reales.

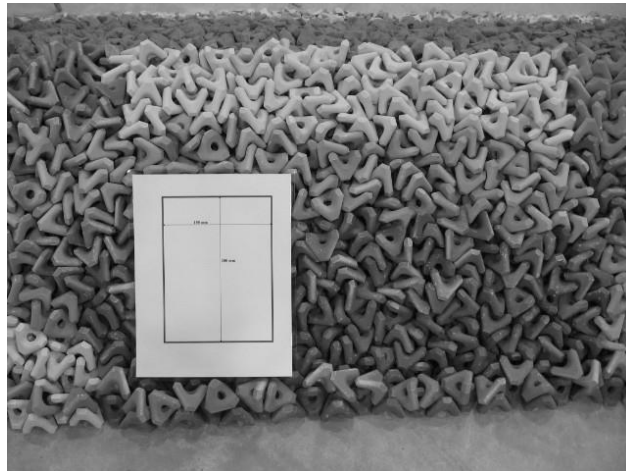


Figura 3. Calibración de imagen conforma de referencia conocida(Phelp and Tulsi 2006)

Una vez que las líneas son dibujadas sobre la imagen, son importadas a una hoja de cálculo y convertidas de pixeles a unidades prototipo, después estos desplazamientos son sustituidos en la fórmula de daño (ecuación 1). Los desplazamientos de las unidades de coraza son entonces escalados a mediciones en prototipo (figura 4) y convertidas a porcentaje de daño (Phelp and Zwamborn 2000).

Después los resultados pueden ser tabulados en una hoja de cálculo y los movimientos serán visualizados a través del programa Armour Tracking. Estos movimientos son aplicados en la ecuación 1, para la medición del daño por movimientos parciales.

MODELO FISICO HIDRAULICO

Escala del modelo

En el estudio las fuerzas más importantes resultan ser las gravitacionales; por lo tanto, el criterio de similitud entre prototipo y modelo es el que relaciona las fuerzas de inercia y gravitacionales (número de Froude).

En función de la ley de similitud de Froude, de la geometría del canal y los requerimientos del generador de oleaje, se propuso una escala de líneas 1:40 para un modelo de fondo fijo sin distorsión, obteniéndose las siguientes escalas de interés (Hughes 1995):

Escala de líneas horizontales y verticales	$E_L = 40,00$	
Escala de longitudes de ola		$E_L = 40,00$
Escala de alturas de ola		$E_L = 40,00$
Escala de periodos de ola		$E_T = 6,32$
Escala de celeridades de ola		$E_C = 6,32$
Escala de fuerzas		$E_F = 64\ 000,00$
Escala de pesos		$E_W = 64\ 000,00$

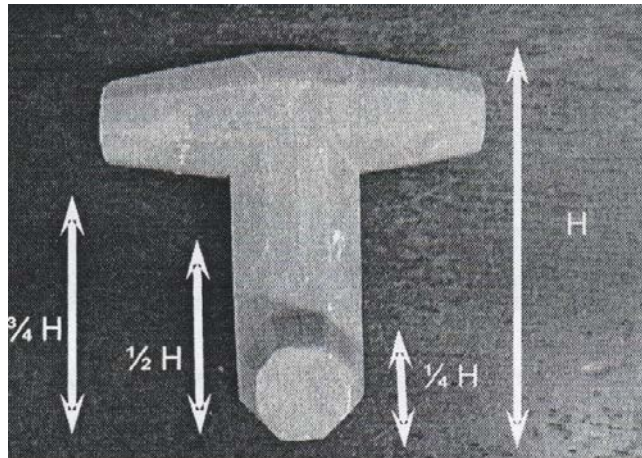


Figura 4. Dolo y sus equivalentes en función de su altura (H) (Phelp et al. 2006)

$$\text{Daño en Dolos} = 0,5 \left(\frac{1}{2} * H < \text{desplazamiento} < H \right) + > H \quad (1)$$

Instalación

Los ensayos se llevaron a cabo en el canal de olas angosto del Laboratorio de Ingeniería de Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional de México, con dimensiones de 24,50 m. longitud, 0,90 m. de altura y 0,66 m. de ancho, ver figura 5; el cual cuenta con un generador de oleaje irregular en uno de sus extremos, mismo que está dotado de una paleta generadora de oleaje de movimiento traslacional accionada mediante un gato hidráulico, cuyo control se efectúa por procedimientos electrónicos controlados por computadora. En el extremo opuesto se cuenta con un amortiguador para absorber la energía del oleaje reflejado.

En el interior del canal se implementó un perfil del fondo marino frente al rompeolas en una longitud de 6,00 m. (pendiente de 1:50) y un tramo de 9,00 m. de transición (pendiente 1:100), para ligar el fondo del canal con el perfil del fondo marino.

Instrumentación

Para la medición del oleaje reproducido en los ensayos, se utilizaron sensores de oleaje de tipo resistivo. Las señales analógicas recabadas por los sensores se amplifican a través de un ológrafo, que a su vez las envió a un convertidor de señales (analógico/digital) con el que cuenta el equipo de cómputo; una vez digitalizadas fueron analizadas por el programa de cómputo HR WAVES, subrutina WARP (Beresford1994a).

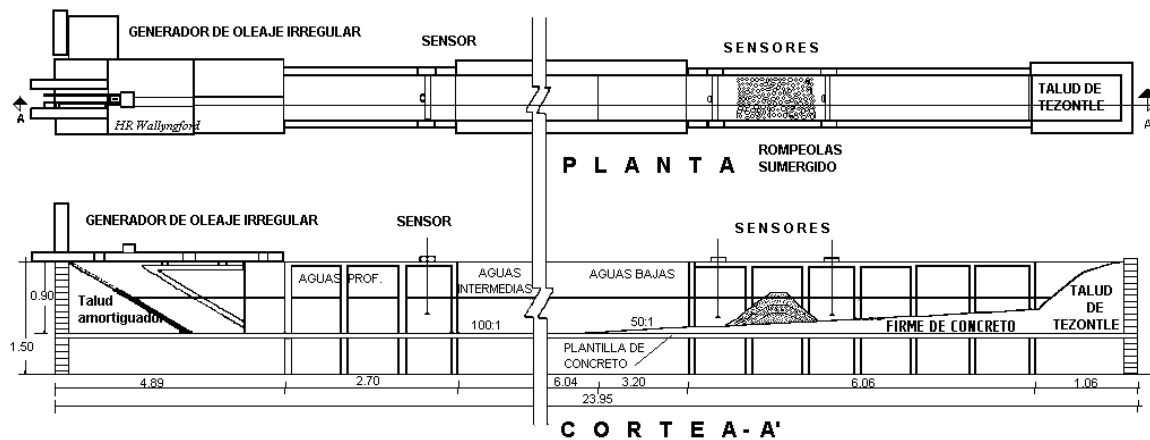


Figura 5. Canal angosto y generador de oleaje irregular

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Calibración

En esta fase se llevaron a cabo una serie de ensayos de prueba, para validar las señales de oleaje a reproducir en cada uno de los ensayos (trece señales), así como la calibración de los sensores de oleaje de tipo resistivo a utilizarse en los ensayos. Este paso se realizó con el programa de cómputo HR WAVES, subrutina CAL (Beresford1994b).

Programa de ensayos

Para la realización de la fase experimental, se contó con 13 señales de oleaje irregular a reproducirse en los ensayos (generadas con el espectro de Pierson–Moskowitz en el programa HR WAVEGEN, subrutina SEASTATE) (Beresford1994a); éstas se muestran en la tabla 1:

Tabla 1. Señales de oleaje

Número de señal.	T _{Prototipo} (seg.)	T _{modelo} (seg.)	H _{Prototipo} (m.)	H _{modelo} (cm.)
1	6,32	1,00	1,59	3,97
2	6,96	1,10	1,92	4,79
3	7,59	1,20	2,29	5,72
4	8,22	1,30	2,68	6,70
5	8,85	1,40	3,11	7,78
6	9,49	1,50	3,57	8,93
7	10,12	1,60	4,06	10,15
8	10,75	1,70	4,59	11,48
9	11,38	1,80	5,14	12,85
10	12,02	1,90	5,76	14,40
11	12,65	2,00	6,36	15,90
12	13,28	2,10	6,96	17,40
13	13,91	2,20	7,57	18,93

Nota: las alturas y periodos del oleaje presentados son para condiciones de oleaje irregular.

Condiciones de los ensayos

- En los ensayos se usó el espectro de frecuencia de Pierson-Moskowitz para calcular las señales de oleaje a reproducir.
- En todos los ensayos se midió la reflexión del oleaje producto de los rompeolas.
- En todos los ensayos el oleaje se midió en dos puntos.

PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS

Ensayos para obtener el coeficiente de reflexión

- Se colocan tres sensores de oleaje a una distancia mayor de una longitud de ola, tanto del generador como de la estructura y separados entre sí de acuerdo con el periodo del oleaje.
- Se reproduce oleaje y se mide la energía de ola incidente y la reflejada en la estructura por cada uno de los sensores de oleaje (Mansard and Funke 1980).
- Se calcula el coeficiente de reflexión, promediando las energías del oleaje incidente y reflejado (programa HR WAVES, subrutina REFLECTION) (Beresford 1994b).

Ensayos para medir el daño en la coraza del rompeolas (dolos) vs. oleaje incidente

- Se genera oleaje para cada uno de los ensayos, en tiempo suficiente para tener una incidencia de 1000 olas sobre la sección del rompeolas en prueba.
- Con base en los datos de oleaje transmitidos por los sensores al equipo de cómputo, se calculan las alturas y periodos de ola significativa para cada ensayo.
- Se mide el daño dinámico presentado en la estructura cada 1000 olas, por medio de la toma de fotografías digitales.
- Se analizaron las imágenes digitales producto de cada una de las series de ensayos por medio del programa Armour Tracking.

Aplicación de la técnica de imágenes digitales

- Se colocó una cámara sobre un tripie, haciendo que el ángulo de enfoque fuera perpendicular al talud del rompeolas lado mar (ver figura 6).
- Se realizó la toma de las fotografías antes y después de cada ensayo (al finalizar cada ensayo se debe esperar hasta que la superficie del agua no presente movimiento), generando de ésta manera pares de fotografías por analizar.
- Cada par de imágenes se analizó con el programa Armour Tracking, con el cual se detectaron los movimientos de los elementos.
- Identificados los movimientos de los elementos, se procedió a medir la magnitud de dichos movimientos con el programa de cómputo Armour Tracking.
- Los desplazamientos obtenidos en modelo se convirtieron a desplazamientos en prototipo.

PROGRAMA PARA MANEJO DE IMÁGENES

Dentro de la revisión de diferentes artículos relativos al tema de estabilidad de dolos utilizados en rompeolas superficiales a talud en modelos físicos reducidos, se pudo apreciar la aplicación de una técnica de manejo de imágenes fotográficas digitales a través del programa de cómputo Armour Tracking, desarrollado por investigadores sudafricanos (Phelp et al. 1999) para detectar pequeños movimientos de los elementos que no son apreciables a simple

vista. A continuación se presentan dos fotografías digitales de uno de los ensayos y que procesadas en el programa antes citado, permitieron la visualización del movimiento de 14 elementos, los cuales pueden presentar a largo plazo posibles fracturas y rompimiento de sus brazos en el prototipo, generando con esto la posterior falla de la estructura, ver figuras 7 y 8.



Figura 6. Colocación de la cámara frente a la estructura.



Figura 7. Programa para manejo de imágenes digitales

PRESENTACION DE LA INFORMACION EXPERIMENTAL

Coefficientes de reflexión

Los coeficientes de reflexión obtenidos en los ensayos son aceptables, tal y como lo marca la bibliografía especializada para éste tipo de estructuras, la cual establece una reflexión no mayor del 13%.

Análisis del efecto del oleaje incidiendo sobre los rompeolas de dolos

En las tablas 2, 3, 4 y 5, se muestran las cuatro series de ensayos que se realizaron durante la fase experimental; en las cuales se reprodujeron 13 señales de oleaje. En seguida se muestra el número de elementos artificiales que fueron colocados por cada serie, los movimientos detectados y el daño total en la estructura.



Figura 8. Medición de desplazamientos con el programa Armour Tracking

Tabla 2. Daños en la estructura para la serie No.2

Periodo de ola (seg)	Altura de ola (m)	No. de olas	No. de dolos	Dolos desplazados	% de daño	Mov. < 1/4 H	Mov. < 1/2 H	Mov. < 3/4 H	Mov. < H	% de daño	% de daño total
6,32	1,59	1000	217	0	0	0	0	0	0	0	0
6,96	1,92	1000	217	0	0	0	0	0	0	0	0
7,59	2,29	1000	217	0	0	0	0	0	0	0	0
8,22	2,68	1000	217	0	0	0	0	0	0	0	0
8,85	3,11	1000	217	0	0	0	0	0	0	0	0
9,49	3,57	1000	217	0	0	0	0	0	0	0	0
10,12	4,06	1000	217	0	0	0	0	0	0	0	0
10,75	4,59	1000	217	0	0	0	0	0	0	0	0
11,38	5,14	1000	217	0	0	0	0	0	0	0	0
12,02	5,76	1000	217	0	0	0	0	0	0	0	0
12,65	6,36	1000	217	0	0	0	0	0	0	0	0
13,28	6,96	1000	217	2	0,922	0	0	0	0	0	0,922
13,91	7,57	1000	217	4	1,843	2	0	0	0	0,500	3,265

Tabla 3. Daños en la estructura para la serie No.3

Periodo de ola (seg)	Altura de ola (m)	No. de olas	No. de dolos	Dolos desplazados	% de daño	Mov. < ¼ H	Mov. < ½ H	Mov. < ¾ H	Mov. < H	% de daño	% de daño total
6,32	1,59	1000	222	0	0	0	0	0	0	0	0
6,96	1,92	1000	222	0	0	0	0	0	0	0	0
7,59	2,29	1000	222	0	0	0	0	0	0	0	0
8,22	2,68	1000	222	0	0	0	0	0	0	0	0
8,85	3,11	1000	222	0	0	0	0	0	0	0	0
9,49	3,57	1000	222	0	0	0	0	0	0	0	0
10,12	4,06	1000	222	0	0	0	0	0	0	0	0
10,75	4,59	1000	222	0	0	0	0	0	0	0	0
11,38	5,14	1000	222	0	0	0	0	0	0	0	0
12,02	5,76	1000	222	0	0	0	0	0	0	0	0
12,65	6,36	1000	222	2	0,901	1	0	0	0	0	0,901
13,28	6,96	1000	222	5	2,252	2	0	0	0	0,500	3,653
13,91	7,57	1000	222	6	2,703	2	1	0	0	1,000	7,356

Tabla 4. Daño en la estructura para la serie No. 4

Periodo de ola (seg)	Altura de ola (m)	No. de olas	No. de dolos	Dolos desplazados	% de daño	Mov. < ¼ H	Mov. < ½ H	Mov. < ¾ H	Mov. < H	% de daño	% de daño total
6,32	1,59	1000	218	0	0	0	0	0	0	0	0
6,96	1,92	1000	218	0	0	0	0	0	0	0	0
7,59	2,29	1000	218	0	0	0	0	0	0	0	0
8,22	2,68	1000	218	0	0	0	0	0	0	0	0
8,85	3,11	1000	218	0	0	0	0	0	0	0	0
9,49	3,57	1000	218	0	0	0	0	0	0	0	0
10,12	4,06	1000	218	0	0	0	0	0	0	0	0
10,75	4,59	1000	218	0	0	0	0	0	0	0	0
11,38	5,14	1000	218	0	0	0	0	0	0	0	0
12,02	5,76	1000	218	0	0	0	0	0	0	0	0
12,65	6,36	1000	218	0	0	0	0	0	0	0	0
13,28	6,96	1000	218	1	0,459	2	0	0	0	0,500	0,959
13,91	7,57	1000	218	2	0,917	4	1	0	0	1,000	2,876

Al finalizar cada ensayo, se cuantificó el número de elementos que fueron desplazados completamente de su sitio (posición original), permitiendo así calcular el porcentaje de daño que típicamente es evaluado y comparado en la modelación física. En seguida del primer porcentaje de daño calculado, se muestran los movimientos que se obtuvieron mediante el análisis de las imágenes digitales; marcando el número de desplazamientos correspondientes a las magnitudes proporcionales de H (dimensiones del dolo) (Burcharth et al. 1991).

Para un desplazamiento $< \frac{1}{4}H$ se consideraron en modelo desplazamientos menores que 2,5 centímetros, lo que en prototipo equivale a 1 metro. Para desplazamientos comprendidos entre $\frac{1}{4}H$ y $\frac{1}{2}H$ se tomaron de 2,5 a 5 centímetros o bien de 1 a 2 metros en prototipo.

Los desplazamientos mayores que $\frac{1}{2}H$ pero menores que $\frac{3}{4}H$, equivalían en modelo a los comprendidos entre 5 y 7,5 centímetros, y en prototipo a 2 y 3 metros. Por último los valores mayores que H , fueron medidos a partir de 7,5 hasta 10 centímetros, que en prototipo equivalían a desplazamientos de 3 a 4 metros.

Tabla 5. Daños en la estructura para la serie No. 5

Periodo de ola (seg)	Altura de ola (m)	No. de olas	No. de dolos	Dolos desplazados	% de daño	Mov. < $\frac{1}{4}H$	Mov. < $\frac{1}{2}H$	Mov. < $\frac{3}{4}H$	Mov. < H	% de daño	% de daño total
6,32	1,59	1000	216	0	0	0	0	0	0	0	0
6,96	1,92	1000	216	0	0	0	0	0	0	0	0
7,59	2,29	1000	216	0	0	0	0	0	0	0	0
8,22	2,68	1000	216	0	0	0	0	0	0	0	0
8,85	3,11	1000	216	0	0	0	0	0	0	0	0
9,49	3,57	1000	216	0	0	0	0	0	0	0	0
10,12	4,06	1000	216	0	0	0	0	0	0	0	0
10,75	4,59	1000	216	0	0	0	0	0	0	0	0
11,38	5,14	1000	216	0	0	0	0	0	0	0	0
12,02	5,76	1000	216	1	0,463	2	0	0	0	0,500	0,963
12,65	6,36	1000	216	3	1,389	3	0	0	0	0,500	2,852
13,28	6,96	1000	216	4	1,852	3	1	0	0	1,000	5,704
13,91	7,57	1000	216	6	2,778	7	0	1	1	2,500	10,982

RESULTADOS

Con respecto a la serie 2, los resultados procesados se presentan en la Tabla 2; se obtuvo de manera tradicional un daño de 0,922% y de 1,843% en los ensayos 12 y 13 respectivamente. Mediante la aplicación de la técnica de imágenes digitales se detectó el movimiento de dos elementos con desplazamientos menores a $\frac{1}{4}H$, por lo que adicionalmente se tiene un daño de 0,5%, por tanto se tiene un daño total acumulado de 3,265%, el cual aún se encuentra dentro del porcentaje permitido (5% según normas).

En la tabla 3 se presentan los resultados de la serie 3, donde se presentó un daño máximo de 2,703% con un total de seis elementos desplazados de su posición original, este porcentaje de daño es contabilizado de forma tradicional y corresponde al ensayo número 13; añadiendo el daño obtenido por el movimiento de los elementos, detectado por la aplicación de la técnica de imágenes digitales se obtiene un total acumulado de 7,356%, lo cual rebasa al porcentaje de daño permitido y se considera que la estructura fallará. Los ensayos 12 y 13 de la serie 4 (tabla 4), presentaron daños de 0,459% y 0,917% con un número de dos y cuatro elementos desplazados respectivamente; tomando el daño correspondiente a los movimientos detectados mediante la técnica de imágenes digitales, se obtiene un total acumulado de 2,876%, por tanto en esta serie 4, la estructura no fallará.

La serie 5 (tabla 5), fue en la que se presentaron mayor número de desplazamientos totales y movimientos parciales de los elementos, obteniendo así en el ensayo número 13 un desplazamiento total de seis elementos, dando un daño de 2,778% de forma convencional. Los movimientos detectados con ayuda de las imágenes digitales fueron de siete menores que $\frac{1}{4}H$,

uno entre $\frac{1}{2}H$ y $\frac{3}{4}H$ y finalmente uno mayor que $\frac{3}{4}H$, calculando un daño adicional del 2,5%, alcanzando un daño total acumulado del 10,982%, lo que significa poco más del doble del permitido, por tanto la estructura se considera que fallará en un cierto plazo de tiempo.

CONCLUSIONES

En lo que concierne a la aplicación de la técnica de imágenes digitales por medio del programa Armour Tracking, se concluye lo siguiente:

- Comparando los resultados obtenidos de daño en la coraza del rompeolas mediante el cálculo tradicional y el daño que se obtuvo con la aplicación de la técnica de imágenes digitales, se nota un incremento considerable en el porcentaje de daño en cada ensayo, sobre todo al final de cada serie; a pesar de que sólo en dos series (3 y 5) se sobrepasa el límite del 5% de daño permitido, en los casos de las series 2 y 4 se tiene un incremento significativo, aunque no el suficiente para asegurar la falla en las estructuras.
- Se pudo observar que, con la aplicación de cuatro secciones de rompeolas de dolos diferentes en los ensayos, es de gran importancia el acomodo de los elementos de la coraza, lo que involucró diferentes niveles de trabazón, y por lo tanto diferente cantidad de elementos contenidos en el talud lado mar de cada una de estas estructuras.
- Al final de los ensayos y después de haber analizado los resultados obtenidos en el estudio experimental, se concluye que la aplicación la técnica de imágenes digitales en los modelos físicos como herramienta de detección de daño, es de gran ayuda para determinar el daño real que se producirá debido al movimiento de los elementos en la capa coraza de la estructura.

RECOMENDACIONES

- Si bien los resultados obtenidos son los esperados al inicio de este estudio experimental, aún hace falta ampliarlo para tener una mayor certeza de los límites que tiene la aplicación de la técnica, esto es, experimentar con elementos de diferentes pesos y formas.
- Se recomienda el uso de iluminación artificial, para mantener una luz constante durante los ensayos y de esta forma evitar sombras o reflejos producidos por la luz natural del día en las tomas de fotografías.
- En cuanto a la colocación de la cámara, a pesar de estar empotrada en un trípode, éste no estaba fijo a una base, por lo que al menor movimiento se podía producir una variación en cuanto al enfoque de la cámara, lo que haría que el par de imágenes no concordaran exactamente y hubiera una variación de milímetros en su posición.
- Por otra parte, la cámara que fue utilizada para el desarrollo de este trabajo cumplía con las características básicas y necesarias para la implementación de la técnica de imágenes digitales, pero a partir de los resultados de las imágenes se considera que sería apropiado el uso de una cámara profesional, es decir, que cuente con una mayor resolución, mayor rango de exposición y de velocidad de obturador.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, financiado por la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto

Politécnico Nacional, bajo el registro SIP-20082306 “Validación experimental de fórmula de diseño de rompeolas de dolos bajo el concepto de oleaje irregular”.

REFERENCIAS

Beresford P. J. (1994a).”Operation WAVEGEN–wave generator control software program”. User Manual. Report IT 411.HR Wallingford, England.

Beresford P. J. (1994b).“Wave reflection and transfer functions. The theory of data analysis routines”. User Manual. Report IT 410. HR Wallingford, England.

Burcharth H. F., Howell G. L. and Liu Z. (1991).“On the determination of concrete armour unit stresses including specific results related to Dolosse”. Journal of Coastal Engineering, Vol. 15, Issue 1-2, pp. 107-165, Ed. Elsevier, ISSN: 0378-3839, Auckland, New Zeland.

CSIR (1988).“Richards bay south breakwater, evaluation of damage and proposals for repair”. Council for Scientific and Industrial Research (CSIR).Report EMAS-C88114, Stellenbosch, South Africa.

CSIR (1989).“Effect of waist thickness on stability of dolosse for irregular waves”. Council for Scientific and Industrial Research (CSIR). Research Report 681, Stellenbosch, South Africa.

Hughes S.A. (1995).“Physical models and laboratory techniques in coastal engineering”. Ed. World Scientific, ISBN 0 981-02-1540-1, pp. 131-220.New Jersey, USA.

Mansard E. P. and Funke E.R. (1980).“The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method”. Proceedings of Seventeenth Coastal Engineering Conference. pp. 154-172. Sydney, Australia.

Phelp D., Luger S., van Tonder A. and Holtzhausen A. (1994). “Results of extensive field monitoring of dolos breakwaters”. Proceedings of the 24th International Conference on Coastal Engineerings (ICCE), pp. 1511-1525, ISBN 0-7844-0089-x, Kobe, Japan.

Phelp D., Holtzhausen A., Hough G. and Bartels A.(1999).“Digital image techniques to quantify structure damage in physical models”. Proccedings of the 5th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC), Ed. Gary P. Mocke, COPEDEWEC, Cape Town, South Africa.

Phelp D. and Zwamborn J. A.(2000). “Correlation between model and prototype damage in physical models”. Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering (ICCE),pp. 1550-1562, ISBN 0-7844-0549-2, Sydney, Australia,

Phelp D. and Tulsi K. (2006).“Digital image technology as a measurement tool in physical models”. Proceedings of the First International Conference on the Application of Physical Modeling to Port and Coastal Protection: Costalab’06, pp. 1-10, Ed. IAHR, ISBN 978-907-804-604-2, Porto, Portugal.