

OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN PORTUARIA MEDIANTE MODELACIÓN HIDRÁULICA

°M. en I. Dora Luz Ávila Arzani, ° M. en C. Adriana Gpe Porres López, °M. en C. Rodolfo Ramírez Xicoténcatl
Instituto Mexicano del Transporte, Km 12+000 Carr. Estatal 431 El Colorado-Galindo, Pedro Escobedo, Qro.

davila@imt.mx, aporres@imt.mx, rramírez@imt.mx

RESUMEN

Entre las funciones principales de un profesionista de la ingeniería civil se encuentra el brindar soluciones factibles técnica y económicamente, para resolver los problemas del comportamiento hidráulico de una estructura de protección portuaria, en cuyo caso se seleccionará la técnica física o matemática conveniente para estudiar el problema, proceso al que se le conoce como modelación. La modelación implica simular un fenómeno real, conceptualizarlo y simplificarlo en mayor o menor medida para describirlo y cuantificarlo.

A través del presente artículo, se muestra a los lectores la importancia de los modelos hidráulicos cuando se pretende optimizar costos y beneficios en la construcción de una estructura de protección portuaria. En éste artículo se describe el proceso para realizar un estudio en modelo hidráulico y como los resultados de dicha modelación permiten definir el diseño más factible para estructura de protección portuaria, así como hacer más eficiente la construcción, la vida útil de una estructura de protección portuaria e incluso eficientar costos.

ANTECEDENTES

La modelación hidráulica se realiza mediante la representación de estructuras de obras de protección a escala reducida, mediante la cual es posible predecir el comportamiento de una estructura o prototipo de tamaño real. La aplicación del modelo hidráulico de las secciones transversales de una estructura de protección, permitirá determinar la funcionalidad de la misma. Esto se deben de realizar tomando como referencia las características de oleaje de la zona de estudio, el diseño y la conformación de la sección transversal; ancho de corona, las condiciones del oleaje extremal, de acuerdo con lo cual se puede determinar la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta bajo las cuales estará trabajando la estructura portuaria.

Para llevar a cabo ensayos, se requiere de la infraestructura de un Laboratorio que cuente con canal de olas, ver Figura 1, en cual se coloca la sección transversal en el extremo del canal, a una distancia aproximada de 25 metros del generador de oleaje. En éste caso, la infraestructura se encuentra en el Laboratorio de Hidráulica Marítima en las Instalaciones del Instituto Mexicano del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes establecido ubicado en Sanfandila, municipio de Pedro Escobedo, Querétaro.



Figura 1. Vista de canal de olas (IMT,2020)

La infraestructura de éste Laboratorio de Ingeniería Hidráulica, permite realizar análisis en planta de obras de protección portuaria, ya que se cuenta con dos tanques de olas, ver Figura 2. Los ensayos se pueden realizar utilizando fondo fijo, es decir con una losa de fondo a base de concreto, o bien con fondo móvil, el cual se constituye de una losa de fondo a base de arena de mar. En cualquier caso, para amortiguar el efecto de la reflexión del oleaje se colocan taludes absorbentes en los extremos del canal y/o tanque de olas.

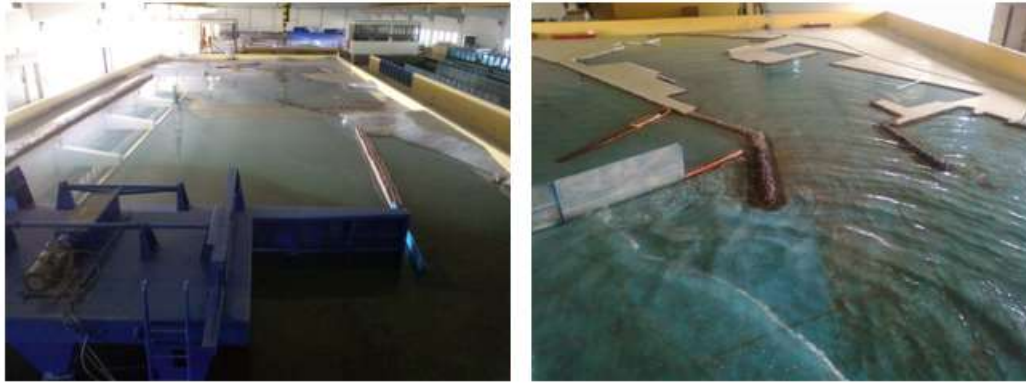


Figura 2. Vista de tanques de olas (IMT,2020)

METODOLOGÍA PARA LA MODELACIÓN HIDRÁULICA

I) Selección de escalas

Es propicio, inicialmente, seleccionar la escala para la construcción del modelo hidráulico a escala a la cual se va a trabajar; en el caso de ensayos de estabilidad se recomienda que estos se realicen a una escala de líneas menor o igual a 1:50. Las escalas de líneas que sean representadas en el modelo hidráulico, deben conservar las condiciones geométricas, cinemáticas y dinámicas del fenómeno hidráulico en el prototipo, por lo que la Ley de Similitud a utilizar será la de Froude. Esta Ley de Similitud establece que los números de Froude en prototipo y modelo deberán ser iguales. El número de Froude F^2 se define en la Ecuación 1.

$$F^2 = \frac{V^2}{gL} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

- V: Es la velocidad,
- g: La aceleración de la gravedad.
- L: La longitud característica,

La condición que deberá cumplirse es la que se presenta en la Ecuación 2.

$$F_m^2 = F_p^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde los subíndices m y p indican modelo y prototipo, respectivamente.

II) Programación de los ensayos

Una vez definidas las secciones transversales o la obra de protección en planta que se pretende analizar en modelo hidráulico, se deberá realizar la programación de ensayos, por lo que se recomienda realizarlo considerando lo siguiente:

- a) Definir el tipo de análisis que se realizará de la obra de protección; estabilidad estructural, duración de la sección, overtopping (rebase del oleaje), run up (ascenso del oleaje), o bien en planta agitación de oleaje o estabilidad estructural, esto tomando en cuenta el tipo de modelo que se va pretenda construir.
- b) Las condiciones de oleaje que se pretenden analizar; los periodos y alturas de ola de incidencia.
- c) Los niveles de referencia con que se pretenden realizar los ensayos, nivel de bajamar media o media inferior, según sea el caso, y el nivel de sobre elevación del nivel del mar por marea de tormenta.

III) Adecuación del canal o tanque de olas

La adecuación del canal o tanque de olas para la realización de los ensayos de las secciones transversales o de la obra de protección en planta se realiza mediante la siguiente metodología;

- a) Se selecciona el material con el que se constituirá la losa de fondo (arena de mar o concreto).
- b) Se traza y nivela la pendiente para el fondo marino de acuerdo a la pendiente de la zona de estudio referenciada a la batimetría con que se cuente.
- c) Se construye o se vierte, según sea el caso, el material al interior del canal o tanque de olas, ver Figura 3.



Figura 3. Vertimiento de la arena al interior de un canal de olas. (IMT, 2020)

- d) Se realiza la nivelación de losa de fondo en cuadrícula a cada 20 cm aproximadamente. Esto se ajusta de acuerdo a la escala en que se está construyendo, ver Figura 4.
- e) Se colocan taludes absorbentes para amortiguar el efecto de la reflexión del oleaje.



Figura 4. Nivelación de losa de fondo (IMT, 2020)

IV) Proceso constructivo del modelo hidráulico

Para la construcción del modelo hidráulico, ya sea en secciones transversales o en planta, se debe llevar a cabo mediante la siguiente metodología:

- a) Se selecciona el material con que se va a construir la estructura de protección, ya sea roca natural o algún elemento artificial de concreto, ver Figura 5. Este material conformará las capas de núcleo, capa secundaria, coraza, y en su caso la berma de la estructura a analizar, conforme a los pesos a la escala del modelo para cribarlos y pesarlos, posteriormente se pintan para poder diferenciarlos y que durante los ensayos facilite la identificación del comportamiento de los mismos.
- b) Mientras tanto se realiza el trazo de la estructura o sección transversal a representar conforme a las condiciones geométricas definidas por la escala del modelo.
- c) Una vez terminado el trazo, se construyen las capas de núcleo, capa secundaria y coraza, ver Figura 6.
- d) Se realiza una nivelación de la estructura de tal manera que se garantice la igualdad al prototipo de la configuración de la losa de fondo y de las elevaciones de la estructura de protección a analizar.



Figura 5. Selección del material para la conformación de las capas de estructura de protección.



Figura 6. Colocación de materiales de las capas de núcleo, capa secundaria y coraza.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA OBRA DE PROTECCIÓN PORTUARIA

Una vez que se conformó la estructura de protección a la escala definida, podemos empezar a realizar ensayos para analizar el comportamiento de la estructura de protección portuaria, ver Figura 7.



Figura 7. Modelo hidráulico con fondo fijo y fondo móvil (IMT, 2020)

Dicho análisis se realiza con equipos de generación y medición de oleaje a través de sensores que permiten medir las alturas de la ola incidente y reflejada, y cuantificar la estabilidad estructural, la agitación de oleaje, el rebase del oleaje, entre otros fenómenos que se evidencian durante los ensayos.

OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN PORTUARIA

Una vez que se realiza el análisis en modelo hidráulico de una estructura portuaria en dos o tres dimensiones, podemos obtener resultados que nos indiquen el comportamiento de dicha estructura en diferentes condiciones de oleaje, con diferentes composiciones estructurales (elementos artificiales o roca natural) e identificar la estructura más eficiente y económica.

En un caso estudio, podemos conocer el porcentaje de daño que presenta una estructura para diferentes condiciones de oleaje y definir si es funcional o no, y optimizar el diseño mediante la modelación hidráulica hasta mejorarlo. En la Figura 8, se muestra una sección transversal de una obra portuaria, para la cual su análisis estructural demuestra que para alturas de ola de 4 m su porcentaje de daño es del 1.4% por lo que la sección funciona adecuadamente, sin embargo para una condición de oleaje en la que la altura de ola de diseño del puerto sea del orden de 8 m o mayor, la sección estaría trabajando muy forzada, con porcentajes de daños cercanos al 5%, por lo que, lo recomendable es optimizarla. Esta capacidad de visualizar físicamente el comportamiento de la estructura nos ayuda a optimizar costos y tiempo, en el redimensionamiento de la estructura para llegar a un diseño que sea eficiente en todo sentido.

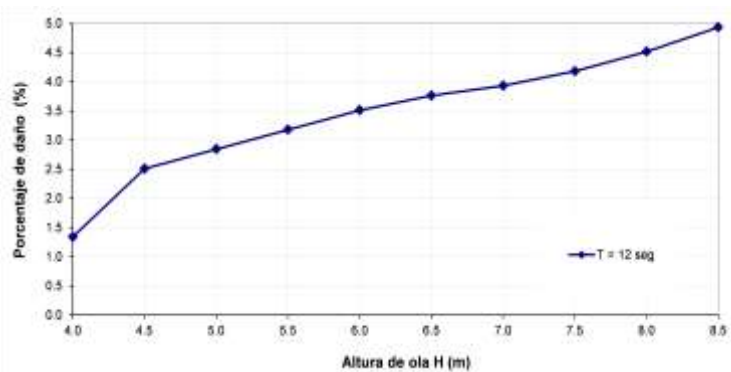


Figura 8. Resultados de un ensayo de Estabilidad y el gráfico de daños que se obtiene del análisis de la estructura (IMT, 2020)

El modelo hidráulico, entre otros comportamientos, permite determinar el porcentaje de agua que pasa a través de la estructura (overtopping), para condiciones normales y extrémas de oleaje, y revisar si cumple con los factores de seguridad al ser sometida a algún evento de ésta índole, ver Figura 9.

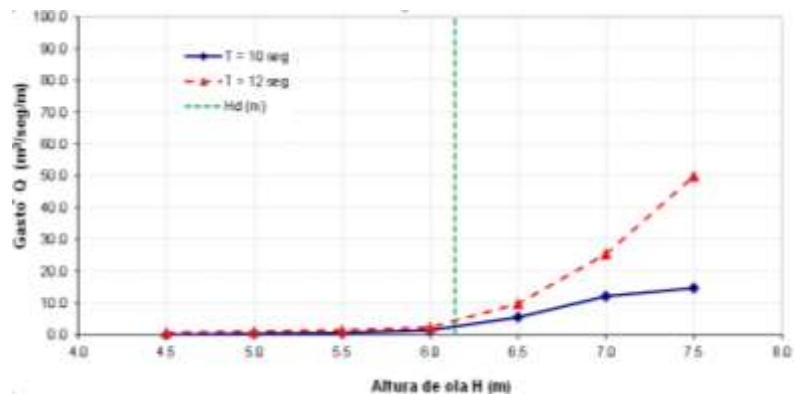
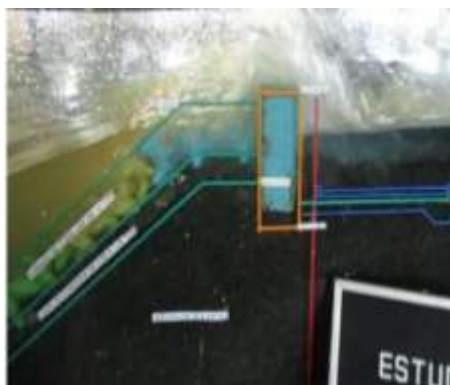


Figura 9. Resultados de un ensayo de overtopping y el gráfico del gasto que pasa obtenido del análisis de la estructura (IMT, 2020)

Al final de los ensayos en modelo hidráulico, se puede definir el proyecto ejecutivo de la obra de protección portuaria que resulte más eficaz, el cual se integra en la planta y las secciones transversales resultantes, como se muestra en la Figura 10. Entre los proyectos ejecutivos que pueden analizarse y ser entregables destacan los proyectos ejecutivos de áreas de agua en puertos, de canales de acceso y de navegación en zonas portuarias y costeras, de estructuras de protección de playas, de rompeolas y escolleras.

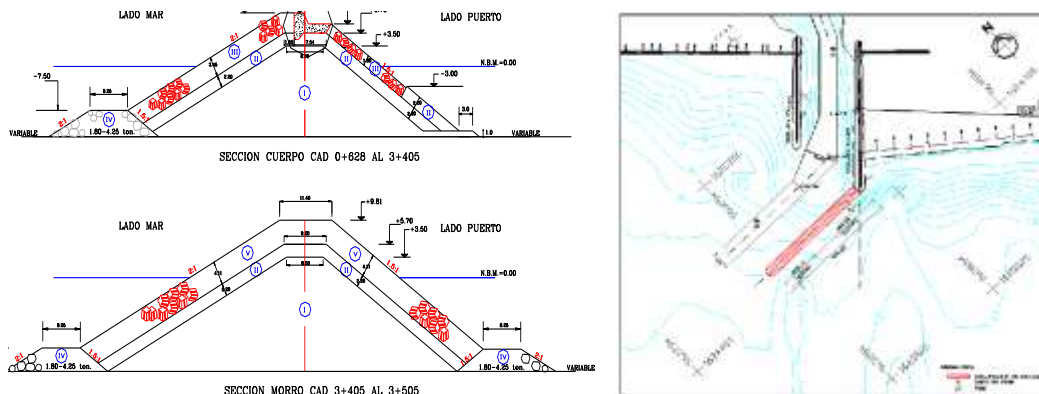


Figura 10. Entregables de un proyecto ejecutivo (IMT, 2020)

CONCLUSIONES

Los modelos hidráulicos nos permiten visualizar los diversos fenómenos hidráulicos, morfológicos y su relación con las obras en proyecto, siendo ésta la condición más importante para obtener una respuesta inmediata. Tomando en cuenta que en la Ingeniería de Costas, los fenómenos que más interesa representar en los modelos hidráulicos son los oleajes, las mareas, las corrientes y el movimiento de los sedimentos, en la Figura 11 se muestran algunos de los estudios que se pueden representar en modelo hidráulico.



Figura 11. Estudios de estabilidad y rebase del oleaje en dos y tres dimensiones.

La realización del modelo hidráulico nos permitirá Identificar el comportamiento de la estructura de protección mediante el análisis de la estabilidad, duración, overtopping, agitación de oleaje para analizar su funcionalidad.

A través del modelo hidráulico podemos determinar si el diseño de la estructura de protección es el más eficiente y conveniente, permite definir a partir del análisis de diferentes alternativas, para optimizar constructiva y económicamente el proyecto antes de su construcción en la realidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. R. Springall, Manual elemental de Hidráulica Marítima, Facultad de Ingeniería de la UNAM, 1970.
2. P. Duarte, J. M. Montoya R., et al., Atlas de Oleaje Oceánico Mexicano (ATLOOM), División de Puertos y Costas, 2004.
3. V. L. Streeter, Mecánica de Fluidos, McGraw-Hill. 9ª. Edición. México, 1996.
4. U.S. Army Corps of Engineers (1984). Shore Protection Manual. Vols. 1, 2 and 3. Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineer, Washington, D.C.; 633 pp.