

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL OLEAJE PORTUARIO GENERADO POR EL PASAJE DE BUQUES

Pablo A. Tarela y Angel N. Menéndez
Instituto Nacional del Agua y del Ambiente
Casilla de Correo 21, 1802 Aeropuerto de Ezeiza, Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

Se presenta una metodología de simulación numérica para determinar la agitación en el interior de un puerto provocada por el pasaje de embarcaciones. La misma está basada en la descomposición espectral de la onda solitaria incidente. Cada componente es luego propagada utilizando el modelo de pendiente suave de Berkhoff. La superposición de las distintas soluciones obtenidas permite, como resultado adicional, reconstruir la historia temporal de la ola.

ABSTRACT

A numerical simulation methodology to predict the wave pattern within a harbour due to ship waves is presented. It is based on the spectral decomposition of the solitary incident wave. Each component is propagated using Berkhoff's mild slope model. Superposition of the different solutions allows reconstruction of the wave temporal history.

INTRODUCCIÓN

Los puertos están sometidos a la agitación proveniente de dos fuentes principales:

- Las olas de viento que penetran en el recinto portuario
- Las olas producidas por el propio tráfico de las embarcaciones

La agitación provocada por las primeras es controlada a través de un diseño efectivo de las obras de abrigo principales del puerto. La debida a las segundas es diferente, tanto en amplitud como en permanencia, y en general puede producir inconvenientes sobre el tránsito y amarre de las embarcaciones de menor porte y las de tipo deportivo.

Para controlar la agitación originada en el pasaje de buques de mediano o gran porte, además de aplicarse normas de tránsito portuario, se suelen emplear subestructuras de protección en el interior del puerto. Las más comunes se basan en principios de deflexión (intentan evitar el paso de las olas, reflejándolas) y/o absorción (permiten el paso parcial, absorbiendo parte de la energía incidente) [1].

Sin embargo, el diseño óptimo de cualquiera de los tipos de subestructura requiere una predicción acertada del clima de olas que se producirá frente al pasaje de algún buque. A continuación se describe una metodología de simulación numérica que permite reproducir la evolución temporal del tren de olas

generado por el movimiento de un buque y cuantificar la agitación en la zona protegida por las subestructuras.

METODOLOGÍA

La simulación numérica de la agitación en un recinto portuario requiere de un modelo matemático que contemple los mecanismos dominantes de transformación de las olas, es decir, la difracción, la reflexión y la refracción. De ellos, el último juega un rol secundario debido a la topografía relativamente plana del fondo (a excepción de la zona de los eventuales canales de navegación). Esto conduce a un problema diferencial de tipo elíptico, es decir, produce un acoplamiento de la solución en todo el dominio y, en consecuencia, a la necesidad de resolver grandes sistemas de ecuaciones algebraicas.

El modelo matemático básico de agitación en recintos portuarios fue desarrollado por Berkhoff [2]. Combinando su "ecuación para los taludes suaves" con apropiadas condiciones de borde, es posible simular adecuadamente una gran variedad de problemas prácticos, una vez definida la ola incidente.

La solución del problema matemático planteado se encara, en general, por el método de los elementos finitos, especialmente apto para problemas diferenciales elípticos. La red de cálculo se genera de modo de, por un lado, ajustarse al contorno portuario y, por el otro, tener un paso suficientemente pequeño respecto de la longitud de onda de la ola más corta, de modo de representarla adecuadamente.

Como solución, el modelo de Berkhoff provee la distribución espacial de alturas (y fases) de ola, que es el resultado buscado ingenierilmente. Además, permite reconstruir el campo de direcciones de propagación. Tal modelo ha sido implementado en el programa *DIFRAC* [3,4].

Ahora bien, el modelo de Berkhoff está planteado para un frente de ola monocromático y en una dirección definida. Sin embargo, en la práctica los frentes de olas (generados por vientos o por embarcaciones) se presentan con un espectro de frecuencias y/o uno de direcciones. La ventaja del modelo de Berkhoff reside en que puede resolver estas situaciones apelando al principio de superposición, dado el carácter lineal de las ecuaciones. En otras palabras, los espectros se discretizan adecuadamente [5] y se efectúan los ensayos para todas las combinaciones de frecuencias y direcciones, obteniendo luego el resultado final mediante la suma de las soluciones particulares. Obviamente, esto hace crecer fuertemente el tiempo de cálculo necesario para simular un escenario. La desventaja de la metodología subyace en que la interacción no lineal de las componentes no está contemplada.

En el caso de olas inducidas por viento, existen una serie de espectros analíticos de frecuencias y direcciones que permiten reconstruir el patrón aleatorio para diferentes situaciones prácticas [5,6].

Para el caso de la ola solitaria producida por el paso de una embarcación, se propone aquí emplear su representación temporal (ya sea medida o simulada) para obtener el espectro de amplitudes y fases en el dominio de las frecuencias, a través de una descomposición de Fourier, es decir:

$$\eta(r_0, t) = \sum_n a_n(r_0) \cos\{\omega_n t + \phi_n(r_0)\} \quad (1)$$

donde $\eta(r_0, t)$ es la perturbación de la superficie libre, respecto del nivel medio del mar, debida a la ola incidente; r_0 la posición del borde, en el plano horizontal, por donde ingresa la ola a la zona de interés; t el tiempo y $a_n(r_0)$ la amplitud de la n -ésima componente de ola, cuya frecuencia es $f_n = \omega_n / 2\pi$ y su fase inicial $\phi_n(r_0)$.

Luego, cada componente del espectro se propaga en forma independiente (utilizando el modelo de Berkhoff), y finalmente se reconstruye la historia temporal de la perturbación:

$$\eta(r, t) = \sum_n a_n(r) \cos\{\omega_n t + \phi_n(r) + \phi_n(r_0)\} \quad (2)$$

donde $\eta(r, t)$ representa la perturbación de la superficie libre en el punto r del puerto y

$$a_n(r) = a_n(r_0) H_n(r) \quad (3)$$

siendo $H_n(r)$ y $\phi_n(r)$ las soluciones del modelo de Berkhoff para la altura y la fase de la n -ésima componente de ola en el punto r , considerando $H_n(r_0) = 1$ para todo n . La agitación en la zona de estudio, $H_{max}(r)$, se determina fácilmente calculando la envolvente de (2), es decir:

$$H_{max}(r) = \max_{t \geq 0} \eta(r, t) \quad (4)$$

CASO DE ESTUDIO

Para ejemplificar la metodología se presenta un caso de estudio. El fondeadero del Yacht Club Argentino (YCA), ubicado en el Antepuerto Norte del puerto de Buenos Aires (figura 1), está sujeto a una agitación significativa proveniente, sobre todo, de la acción del pasaje de buques de pasajeros. Esto provoca daños a las embarcaciones amarradas.

Históricamente, el fondeadero estaba protegido por una subestructura consistente en un escollero semipermeable, donde las pantallas verticales se extendían sólo hasta media profundidad. Se ejecutó un proyecto de mejora de las condiciones de tranquilidad, consistente en convertir esa protección en una escollera impermeable y reducir el ancho de la boca de entrada desde 30 m a 19 m. Además, se planteó una variante consistente en conservar el tramo de escollero oblicuo ("deflector"), luego de la entrada, que tiene una extensión de alrededor de 26 m (ver figura 1) y que estaba previsto desmontarse originalmente.

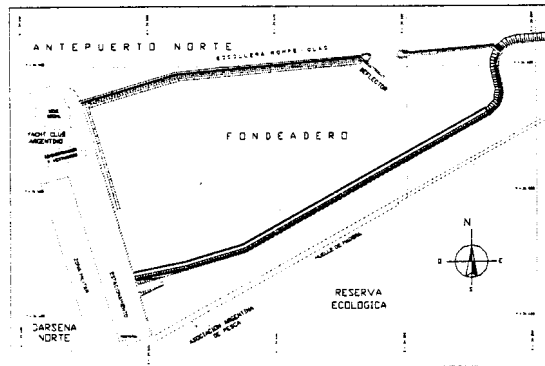


Figura 1 – Planta del fondeadero del YCA en el puerto de Buenos Aires.

Se planteó entonces la necesidad de efectuar un estudio de verificación de las mejoras a lograrse en el patrón de agitación, por la ejecución del proyecto, y para definir la conveniencia o no de la variante propuesta [7].

Los datos de base necesarios para proceder a la simulación numérica del fenómeno de agitación son la planimetría y batimetría del puerto, las características reflexivas de los contornos físicos del puerto y las características de las olas incidentes.

En este caso la mayoría de las profundidades se encuentra entre 3,5 y 4 metros por debajo del plano de referencia (cero MOP). Por su parte, los muelles y la escollera sobreelevada son contornos impermeables que, en consecuencia, actúan como totalmente reflejantes frente a la incidencia de olas. Sólo en el extremo E del puerto existe un talud que provoca una absorción de energía mecánica de la ola. No obstante, dado lo tendido del talud (pendiente de 0,18), el coeficiente de absorción resultante es relativamente bajo (0,15). Además, la boca del puerto se comporta como un contorno transparente para las olas entrantes y de radiación para las olas salientes.

El programa *DIFRAC* trabaja sobre una red de elementos finitos triangulares de 3 nodos. Para este caso el espaciamiento medio entre nodos se tomó del orden de los 3 m, que resulta suficiente para representar las oscilaciones más significativas. De esta manera, las distintas variantes estudiadas produjeron mallas con alrededor de 9000 elementos y 4700 nodos.

Estudios previos determinaron que la sollicitación responsable de los eventuales daños dentro del puerto del YCA es la ola solitaria asociada al pasaje de los buques de pasajeros que operan en la Dársena N, ya que el resto no tienen entidad suficiente [7]. Esta onda se representa esquemáticamente en la figura 2 [7]. La amplitud del primer pico ha sido exagerada a 0,84 m, suponiéndose que ésta es la onda generada por un buque que se desplaza a 12 nudos.

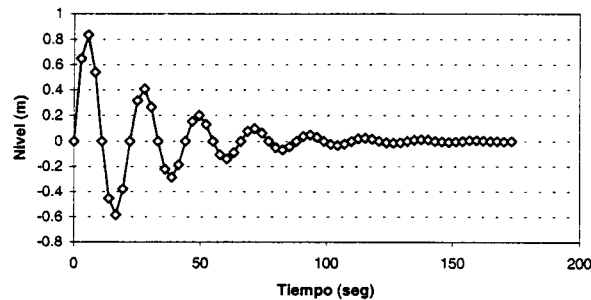


Figura 2 – Ola solitaria debida al pasaje de un buque de pasajeros.

Se aplicó FFT a la ola solitaria de la figura 2, con un intervalo de muestreo $\Delta t = 2,75$ segundos. Se tomaron 64 intervalos, lo que significa una duración de registro de 176 segundos, suficiente para abarcar todo el lapso de desarrollo relevante de la oscilación. Con estas condiciones, resulta un intervalo de frecuencias $\Delta f = 0,00568$ Hz, abarcando el rango $\pm 0,1818$ Hz (períodos desde infinito hasta 5,5 segundos).

La figura 3 se muestra el espectro, simétrico, de amplitudes. El pico, bastante agudo, se produce en $\pm 0,0455$ Hz (período de 22 segundos). El espectro de fases se presenta en la figura 4. Resulta antisimétrico, de acuerdo a lo esperado. Las fases asociadas a los picos resultan cercanas a $\pm 90^\circ$. Estos resultados muestran que la componente principal es una función seno con un período de 22 segundos.

En base a este espectro, resultan 32 ensayos monocromáticos con el modelo para generar la ola solitaria, ya que sólo es necesario considerar las frecuencias positivas (con una amplitud del doble). Se consideró que el buque pasa paralelo al escollerao, de modo que la ola solitaria tendría un ángulo de incidencia de 20° respecto de la línea imaginaria que constituye la boca del puerto del YCA [7].

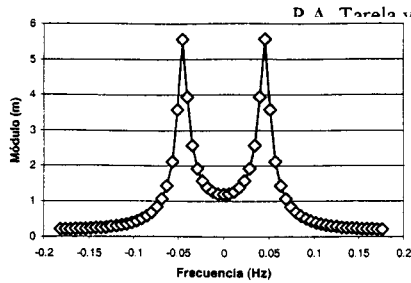


Figura 3 – Módulo del espectro de frecuencias.

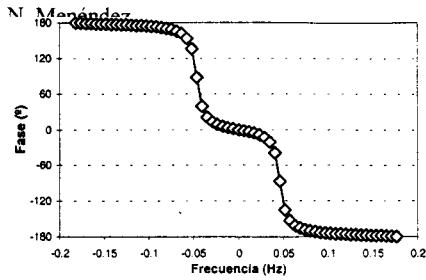


Figura 4 – Fase del espectro de frecuencias.

En primer lugar, como referencia, se efectuó la simulación del pasaje de la ola solitaria por el puerto histórico, es decir, con las pantallas protectoras a media profundidad. En base a los resultados previos se consideró que la transmisión a través de esa defensa es prácticamente total para olas de tan baja frecuencia [7]. En la figura 5 se muestra la distribución envolvente de las máximas amplitudes alcanzadas, $H_{max}(r)$, con un intervalo de 0,15 m. Se observa la disminución de la amplitud desde la pantalla hacia la línea media longitudinal del puerto, donde cae a valores de alrededor de 0,30 m, desde los 0,84 m de la entrada, lo cual significa una atenuación del 65%. Le sigue una recuperación e, incluso, una amplificación cerca de los muelles debido a la reflexión, llegando a amplitudes bastante superiores a 1 m.

Los resultados para el puerto proyectado se muestran en la figura 6, con un espaciamiento entre curvas de 0,05 m. Comparando con la figura 5, se observa una atenuación general apreciable respecto de la situación actual. En la zona media del puerto la amplitud media es ahora de 0,175 m, es decir, el 20% de la amplitud de entrada, y significa una atenuación del 40% respecto de la situación actual.

La figura 7 presenta las envolventes de la amplitud máxima para la variante con deflector. Esta subestructura provoca una disminución de la agitación en la zona media del puerto, donde cae a alrededor de 0,10 m, o el 12% de la amplitud de entrada, que significa un 40% de atenuación respecto del puerto proyectado. La contrapartida es un leve incremento de la agitación en el extremo E del puerto, producto de la deflexión inicial de la ola incidente hacia ese sector. También se observa un corrimiento hacia el N de la zona de máxima agitación sobre el muelle W.

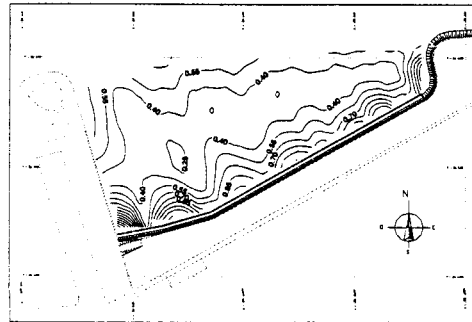


Figura 5 – Agitación con escollera histórica (semipermeable).

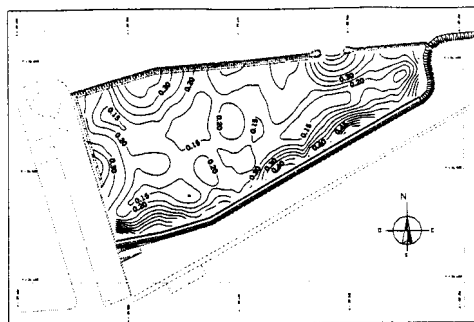


Figura 6 - Agitación con escollera proyectada (impermeable).

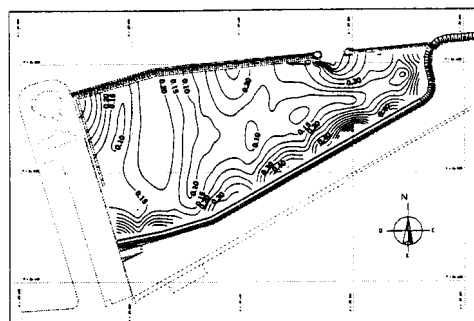


Figura 7 - Agitación con escollera proyectada y variante con deflector.

CONCLUSIONES

Se presentó una metodología de cálculo que permite determinar la agitación en el interior de un recinto portuario debida al paso de buques. La misma surge de propagar las componentes espectrales del patrón de olas incidente mediante un modelo de difracción-reflexión-refracción desarrollado para el caso de olas monocromáticas, y superponer las soluciones en el dominio del tiempo. De esta forma, se extiende la metodología empleada para espectros de olas aleatorias al caso de una ola solitaria.

REFERENCIAS

- [1] Dalrymple R.A., Losada M.A. and Martín P.A. (1991), *Reflection and transmission from porous structures under oblique wave attack*, Journal of Fluid Mechanics 224 pp.625-644.
- [2] Berkhoff, J.C.W. (1976), *Mathematical models for simple armonic linear water waves. Wave diffraction and refraction*, Delft Hydraulic Laboratory Report No. 163.
- [3] Vionnet, C., Menéndez, A.N. (1986), Simulación numérica de olas para el diseño de puertos, XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San Pablo, Brasil.
- [4] Cavaliere, M.A., Menéndez, A.N. y Castellano, R.D. (1992), *Estudio de las condiciones de agitación por oleaje en un puerto mediante simulación numérica*, Rev. Int. Mét. Num. en Ing. 8, 4.
- [5] Castellano, R.D. (1998), *Experiencias sobre propagación de olas aleatorias mediante simulación numérica*, Informe INA LHA S4-040-98.
- [6] Herbich, J.B. (Ed.) (1991), *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, vol. 2, Gulf Pub. Co. Houston
- [7] Hopwood J.H, Menéndez A.N. y Tarela P.A. (1999), *Estudio de la agitación por oleaje y paso de buques en el fondeadero del Yacht Club Argentino*, informe técnico para YCA.