

XLI SESIONES TÉCNICAS DE INGENIERÍA NAVAL
"Transportes e Industrias Marítimas Especiales y de Dragado"

“ESTUDIO DE GENERACIÓN DE OLAJE POR EL BUQUE EN LA RÍA DE SEVILLA.”

D. Ignacio Berenguer¹
D. José Ramón Iribarren²
D. Carlos López Pavón.³
D. Miguel Ángel Herreros.⁴
D. Antonio Souto⁵

Resumen.

Dentro de las actuaciones de mejora en accesos marítimos al Puerto de Sevilla previstas por la Autoridad Portuaria de Sevilla se encuentra el dragado del río Guadalquivir. Este dragado tiene como objetivo ampliar la anchura del mismo y aumentar el calado. Aunque la anchura del río es importante, la escasa profundidad hace que las olas generadas sean de mayor amplitud que en aguas profundas.

Para minimizar la erosión de las olas sobre las márgenes del río se construirán protecciones que amortigüen los efectos de dichas olas. A efectos de dimensionar estas protecciones se ha realizado un cálculo de generación y propagación de olas para la sección específica del río Guadalquivir cuyos resultados se presentan en este artículo. El cálculo de estos efectos consta de dos partes fundamentales. La primera se refiere a la generación del oleaje por parte del buque y de ella se ha encargado el grupo de Hidrodinámica Numérica del Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid. La segunda parte consiste en el estudio de la propagación de estas olas generadas por el buque hasta las márgenes del canal de navegación. De ella se ha encargado HDTMA S.L., y para ello ha utilizado el modelo MIKE 21 NSW. En el artículo se presentarán detalles sobre todos estos cálculos así como las conclusiones correspondientes.

Abstract

Among the actions planned by the " Autoridad Portuaria de Sevilla" in order to improve the marine access to the harbour of Seville is the dredging of the Guadalquivir river. The main aims of this dredging are to extend its width and to increase the draft. Although the width of the river is important because of limited depth, the ship waves are of greater amplitude than those generated in deep waters.

In order to minimise the erosion of the banks due to the waves, protection against this effect will be constructed. The purpose of this article is to present the results of the calculation of generation and propagation of waves for the specific section of the Guadalquivir river that has been made to design those protections. The calculation of these effects falls into two main parts. The first one deals with the ship wave generation and was carried out by the group of numerical hydrodynamics of the Universidad Politécnica of Madrid Naval Architecture Department Model Basin. The second consists in the study of the propagation of the waves until reaching the banks. This part was in charge of HDTMA Ltd, that has used the MIKE 21 NSW model. In the article details are presented on all these calculations as well as the corresponding conclusions.

¹ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. HDTMA S.L.

² Ingeniero Naval y Oceánico. SIPORT XXI.

³ Estudiante de Ingeniería Naval. Canal de Ensayos Hidrodinámicos. E.T.S.I. Navales (UPM)

⁴ Ingeniero Naval. Canal de Ensayos Hidrodinámicos. E.T.S.I. Navales (UPM)

⁵ Doctor Ingeniero Naval. Canal de Ensayos Hidrodinámicos. E.T.S.I. Navales (UPM).

Indice.

1	Introducción.	2
2	Generación y propagación de olas en aguas poco profundas.	3
2.1	El tren de olas de un buque.	3
2.2	Definición del fenómeno squat	4
2.3	Propagación de olas en aguas poco profundas.	5
3	Descripción del canal de la ría de Sevilla.	6
4	Método de cálculo y resultados.	6
4.1	Cálculo del oleaje de diseño.	6
4.2	Propagación del oleaje.	12
5	Conclusiones.	13
6	Referencias.	15

1 Introducción.

En los ríos y canales navegables, en los que el viento no tiene una longitud de actuación suficiente como para producir olas de importancia, son las generadas por los buques las que definen el oleaje dominante a efectos de diseño de las protecciones de las márgenes. En la literatura existen referencias de estudios de medidas de olas correspondientes a diferentes tipos de buques y secciones de canales. Sin embargo el rango de validez de estas medidas es pequeño y no permiten obtener estimaciones ajustadas de las olas de diseño para buques que no estén entre los estudiados o para secciones de canal no estándar.

Dentro de las actuaciones de mejora en accesos marítimos al Puerto de Sevilla previstas por la Autoridad Portuaria de Sevilla se encuentra el dragado del río Guadalquivir. Este dragado tiene como objetivo ampliar la anchura del mismo, modificar el trazado y aumentar el calado 1 metro. El volumen total de movimiento de tierra asciende a 9.500.000 m³. Con estas actuaciones, se prevé un aumento del tráfico de 4.000.000 toneladas en 1997 hasta 6.300.000 toneladas en 2010. Aunque la anchura del río es importante, llegando en algunas zonas a los 800 metros, la escasa profundidad hace que las olas generadas sean de mayor amplitud que en aguas profundas.

Para minimizar la erosión de las olas sobre las márgenes del río se construirán protecciones que amortigüen los efectos de dichas olas. A efectos de dimensionar estas protecciones se ha realizado un cálculo de generación y propagación de olas para la sección específica del río Guadalquivir cuyos resultados se presentan en este artículo. Del estudio realizado se obtendrá información sobre las alturas a considerar por los proyectistas de la protección de márgenes en el entorno de Doñana y para valorar la incidencia que las obras de dragado, previstas por la Autoridad Portuaria, van a tener. Se han elegido dos buques tipo sobre los cuales se ha trabajado y que se corresponden con los más críticos que navegarán por el río.

El cálculo de estos efectos consta de dos partes fundamentales. La primera se refiere a la generación del oleaje por parte del buque y de ella se ha encargado el grupo de Hidrodinámica Numérica del Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales. Para ello han modificado los programas de cálculo de flujo en torno al buque con superficie libre para contemplar el hecho de que la

navegación se produce en aguas de profundidad restringida, y se han tenido en cuenta los efectos dinámicos de pérdida de empuje debidos al "squat".

La segunda parte consiste en el estudio de la propagación de estas olas generadas por el buque hasta las márgenes del canal de navegación. De ella se ha encargado HIDTMA S.L., y para ello ha utilizado el modelo MIKE 21 NSW, desarrollado por el Danish Hydraulic Institute, que considera la acción de la refracción, el "shoaling", la fricción del fondo y la rotura del oleaje en la propagación de un espectro de oleaje. Como resultados ofrece información sobre alturas significantes y períodos de pico tras la propagación hasta tierra. Para las simulaciones se ha descompuesto el tramo del río en estudio en 13 subtramos, aproximadamente rectos, cuyo contorno coincide con la dirección de navegación del buque y en los cuales se introduce el oleaje con las alturas y períodos antes calculados y una dirección de propagación formando 35,27° con el eje de abscisas.

2 Generación y propagación de olas en aguas poco profundas.

2.1 El tren de olas de un buque.

Todos estamos familiarizados con el aspecto del tren de olas cuando el buque navega en aguas profundas[9]. Para las olas generadas por un buque, la mejor medida de la profundidad es el número de Froude basado en la profundidad:

$$F_{nh} = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$

donde V es la velocidad del buque, g es la gravedad, y h la profundidad del agua. Cuando el cociente entre la profundidad y la eslora en la flotación es mayor que uno, se puede considerar que la profundidad no afecta a la formación de olas. El número de Froude basado en la profundidad resulta crítico en la determinación de las características de las olas en aguas poco profundas, al igual que el número de Froude basado en la eslora (F_n) lo es en aguas profundas. Sin embargo, la influencia de F_{nh} es mucho más visible que la de F_n . El valor crítico de F_{nh} es uno. Los valores inferiores a uno se llaman subcríticos y los superiores a uno, supercríticos, ref. [6]. Para valores subcríticos de F_{nh} y para valores del número de Froude inferiores a 0.9, tenemos el patrón de olas de Kelvin clásico, como se muestra en la figura 1.

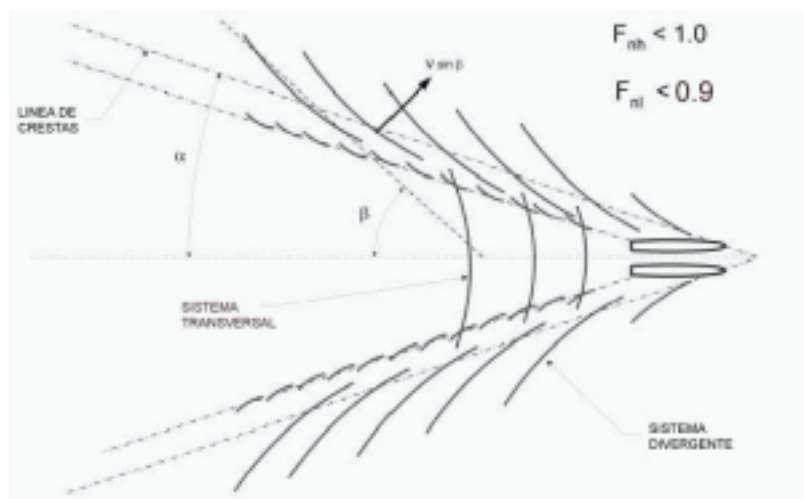


Figura 1. Tren de olas de Kelvin.

Si un buque pasa de aguas profundas a poco profundas navegando a velocidad constante, a F_n inferiores a 0.9, la dirección de propagación de olas cambia y se produce un bloqueo en la generación de olas que hace que la resistencia por formación de olas crezca de un modo importante. El fenómeno es similar al que se produce cuando un avión alcanza la velocidad del sonido. Además, caso de que la navegación se

produzca en un canal, con anchura restringida, éste fenómeno se ve aumentado. A estos efectos hay que añadir el squat del buque.

2.2 Definición del fenómeno squat

El fenómeno de incremento de calado y asiento en los buques que navegan por canales estrechos y aguas someras, y las olas generadas por estos es un hecho conocido, en especial en el caso de los buques rápidos. Una forma clara y sencilla de definir el "squat" es: cambio de calado y trimado de un buque que se produce como resultado de las variaciones de presión hidrodinámica sobre el casco, en su movimiento en aguas de cualquier profundidad[5].

El fenómeno inicialmente se justifica por el estrechamiento de la vena líquida en presencia de la carena, de acuerdo a la ley de Bernoulli. En otras palabras cuando un buque navega en aguas someras y/o restringidas los cambios de las fuerzas de presión sobre el casco provocan un incremento dinámico de calado y cambio de trimado en la carena, dependiendo de las características geométricas del buque y del perfil de la zona de navegación en profundidad y anchura y de la velocidad de tránsito.

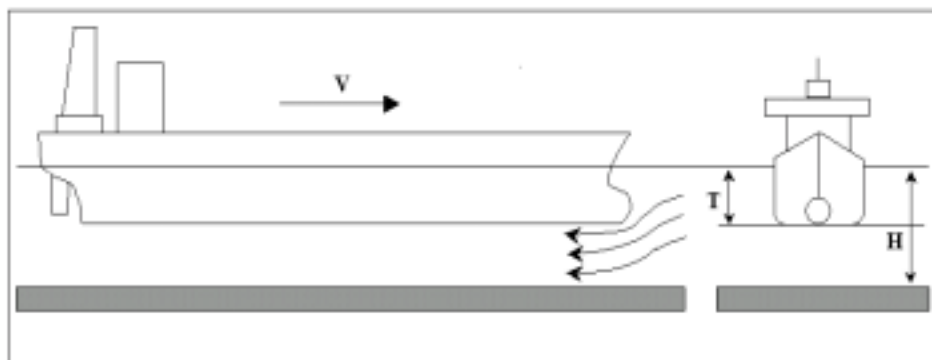


Figura 2 Constricción de la vena líquida

El límite entre aguas profundas y someras se sitúa en el intervalo [1.5;2] del cociente H/T , y el límite en restricción lateral se sitúa aproximadamente entre 7.5 y 12.5 para el cociente B_c/B dependiendo del tipo del buque, según propone Barrass[1], pero en cualquier caso para valores alrededor de 5 el canal debe considerarse estrecho y para valores aproximadamente de 3 se considerará como muy estrecho.

Con la puesta en práctica de la resolución A.601 de la I.M.O. la administración debe exigir que: los buques de nueva construcción con obligación de cumplir el convenio SOLAS'74, y que son todos los buques de mas de 100 m de eslora y todos los gaseros y quimiqueros incluso de menores dimensiones, lleven a bordo un manual de maniobra, que incluye las características de maniobra del buque en aguas someras, con determinación específica de las curvas de squat en aguas someras y en canales restringidos. Por todo ello tiene especial importancia una adecuada predicción de dichos valores que deben ser mantenidos al día si el buque sufre algún tipo de modificación que altere sus características de maniobra.

Haciendo mayor énfasis en la importancia del fenómeno, este ha sido factor clave en algunos accidentes, como el caso del hundimiento del ferry "Herald of Enterprise", en el que la aparición de squat facilitó la entrada de agua por los portalones mal cerrados, y en otros como el del Queen Elizabeth 2, Sea Empress, European Gateway y Diamond Grace, con considerables costes económicos y lo que resulta más grave, elevados costes humanos y ecológicos.

2.3 Propagación de olas en aguas poco profundas.

Las olas que se acercan a la costa experimentan cambios significativos al encontrar profundidades variables, estructuras artificiales, corrientes y cambios en las condiciones del viento. El comportamiento de las olas es muy importante para los responsables de costas, en lo que se refiere a asuntos tales como la erosión de las playas y de las márgenes de los ríos, el crecimiento de las barras y la construcción de rompeolas y de otras estructuras artificiales.

Nuestro enfoque en este tema se basa en considerar, dentro de todo el espectro de olas que genere nuestro barco, únicamente aquellas frecuencias a las que les corresponda una energía considerable y propagar esas frecuencias. Conviene recordar que normalmente la energía se concentrará en unas pocas frecuencias (según la aproximación de Kelvin en dos), que a su vez se corresponden con unas determinadas direcciones de ola. De hecho nos quedaremos con una ola significativa, correspondiente al tren divergente, a la cual podemos aplicar toda la teoría desarrollada sobre este tema para esta dirección-ola plana, obteniendo su solución. Así, hemos considerado los cambios que sufre esa ola según se acerca a la costa con diferentes condiciones de la batimetría y en diferentes partes del río.

Existen varios enfoques que se pueden agrupar en dos tipos de aproximaciones teóricas en el estudio de la propagación del oleaje regular:

- Teoría de ondas
 - Métodos ortogonales.
 - Ecuación de Berkhoff.
 - Ecuación parabólica.
- Ecuaciones de Boussinesq.

La teoría de ondas es más simple que las ecuaciones de Boussinesq y permite formulaciones más compactas y aplicables con bajo coste de cálculo. Sin embargo, requiere suposiciones a veces no muy realistas, como ondas periódicas (lo cual es razonable en aguas poco profundas al no existir ya dispersión al ser la velocidad de fase igual a la de grupo), ondas simétricas (válida mientras los efectos no lineales no sean muy perceptibles cuando las olas se acerquen a la costa), etc.

Dentro de la teoría de ondas, los métodos clásicos han sido los ortogonales, aplicables de forma gráfica antes de la aparición de los ordenadores y permitiendo estudiar la refracción en áreas extensas. La difracción se estudiaba con ábacos gráficos realizados para las soluciones analíticas de casos idealizados (dique semiinfinito en fondo de profundidad constante.....). Sin embargo, en 1972, Berkhoff dio un avance significativo a las posibilidades de estudio de la propagación de ondas, introduciendo la "mild slope" o ecuación de Berkhoff, que es la que gobierna la propagación de ondas, incluyendo fenómenos de refracción y difracción sobre fondos de pendiente suave en relación con la pendiente de la ola (nuestro caso). Con ella es posible resolver el problema completo de difracción-refracción, si bien existen dificultades prácticas para su aplicación.

En 1978 se publicó una primera aproximación parabólica a la ecuación de Berkhoff, con lo que queda abierta una tercera vía en la disyuntiva entre métodos ortogonales y la propia ecuación de Berkhoff, al permitir esta aproximación el estudio de la refracción-difracción en áreas extensas (lo que nos interesa) de forma aproximada. Esta aproximación parabólica ha sido mejorada a todo lo largo de la década de los 80.

La simulación numérica exacta de la perturbación de una ola dentro de puertos requiere la consideración de los procesos no lineales y dispersivos de la ola para capturar efectos tales como la

refracción y la difracción de las olas, e interacciones no lineales de la ola tales como la generación de ondas armónicas. Las ecuaciones de Boussinesq son el modelo matemático más sencillo que contiene todos estos efectos para pequeñas profundidades, y con batimetría cambiante. Existe una gran variedad de modelos matemáticos de tipo Boussinesq y es necesario compararlos y contrastar sus limitaciones con respecto a los parámetros físicos del problema y también para su viabilidad como parte de un modelo numérico. La potencia de cálculo que exige la resolución de las ecuaciones de Boussinesq hace que puedan ser aplicadas solamente a dominios muy restringidos.

Se dispone, por tanto, en la actualidad de las siguientes herramientas dentro de la teoría de ondas:

- Ortogonales. Refracción en áreas extensas.
- Ecuación parabólica. Refracción-difracción aproximada en áreas extensas.
- Ecuación de Berkhoff. Refracción-difracción en áreas reducidas.
- Ecuaciones de Boussinesq. Refracción-difracción en áreas muy reducidas.

3 Descripción del canal de la ría de Sevilla.

Hasta finales del Imperio Romano (siglo IV d.C.) el estuario del Guadalquivir consistía en una gran laguna de influencia marina, que llegaba hasta la Puebla del Río (Sevilla). Posteriormente esta laguna se colmató por los aportes aluviales, originando una amplia zona de marismas en la que el río se abría en tres grandes brazos. A partir del siglo XVIII, para favorecer la navegación hasta Sevilla, reduciendo los 127km que entonces la separaban del mar, se empezó la construcción de cortas, rectificaciones del cauce principal del río para eliminar meandros. Después de ocho cortas, terminadas entre 1795 y 1982, esta distancia es actualmente de 77km con un recorrido casi recto.

El dragado actual del canal de la ría de Sevilla tiene un calado de 8.5m. La Autoridad Portuaria de Sevilla tiene el proyecto de aumentar este calado a 10m considerando que la anchura de la zona dragada será de 80 metros, y se supone que en el caso de menor anchura del río, los taludes tendrán una pendiente 1:20. En otros casos, la anchura del río puede llegar a 800 metros, y la pendiente de los taludes será en este caso aproximadamente de 1:80. En nuestros estudios nos centraremos en el primer caso, por ser la hipótesis más pesimista.

4 Método de cálculo y resultados.

El proceso de cálculo pasa por la selección de dos buques patrón con los que obtener los límites a la generación de oleaje: uno de formas llenas, y otro de formas finas. Para cada uno de estos buques se estimará la posición de equilibrio por squat para posteriormente realizar el cálculo de las olas generadas, obteniendo las características necesarias para su propagación hasta la orilla, la cual se realiza mediante el modelo MIKE 21 NSW.

4.1 Cálculo del oleaje de diseño.

Se considera que desde un punto de vista ingenieril es aceptable como primera estimación la aproximación no viscosa al fenómeno de la formación de olas en aguas poco profundas. La resistencia sufre un aumento importante en su componente viscosa, pero se estima que ésta no afecta de modo significativo a la formación de olas, que se puede considerar no viscosa[9]. Por tanto, la formación de olas estará suficientemente bien modelada con métodos no viscosos, de los cuales el más importante es la familia de métodos de paneles con condición lineal o no lineal de superficie libre, uno de los cuales se utiliza en el

presente trabajo, modificándolo para contemplar el hecho de tener un fondo a una profundidad dada. Además, el buque sufre un efecto denominado squat[3], que ya hemos comentado.

Por tanto, el proceso de cálculo consistirá en estimar la posición de equilibrio por squat para cada una de las profundidades, calado y velocidades para posteriormente realizar el cálculo con el método potencial, y finalmente extraer los resultados en el formato solicitado que permita evaluar la propagación de los trenes de olas.

4.1.1 Definición de la geometría de dragado y estudio.

Para el nuevo dragado se tiene una profundidad de cálculo de 10 metros para un buque cuyo calado es de 7 metros. Debido al efecto squat, en el caso más desfavorable, un buque de alto coeficiente de bloque navegando a 12 nudos sufrirá un squat que hará incrementar su calado en aproximadamente un metro. Por tanto, el calado real será de 8 metros. Se supone que la anchura de la zona dragada es de 80 metros, y se supone que en el caso más pesimista los taludes tendrán una pendiente 1:20, como ya hemos comentado, con lo que el aspecto de la sección de cálculo será:

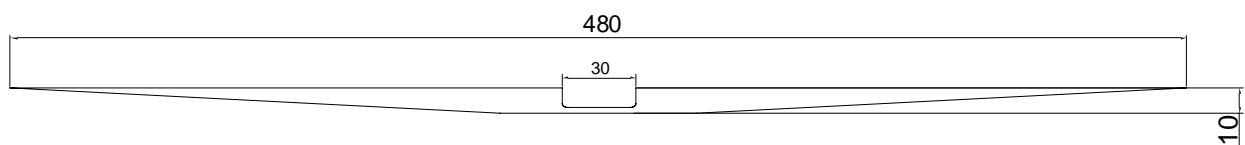


Figura 3. Sección de estudio.

A efectos de cálculo se define el coeficiente de bloqueo S como el cociente entre el área de la sección transversal del buque (estática) y el área de la sección transversal del canal. En este caso, el más pesimista,

$$S = \frac{29 \cdot 7 \cdot 0.98}{200 \cdot 10 \cdot 2 + 80 \cdot 10} = 0.071 \quad (2)$$

Su inversa, el coeficiente de la sección transversal del canal es un valor también muy interesante, pues se usa para métodos semiempíricos.

$$S_c = \frac{1}{S} = 14.1 \quad (3)$$

Como primera aproximación, entendemos que en la generación del oleaje se puede considerar que las aguas son de anchura ilimitada y así lo hemos implementado en nuestro modelo. Sin embargo será durante la propagación de ese oleaje, al reducir la profundidad, cuando se notarán los efectos del aumento de amplitud de las olas.

Además de hacer un estudio con la geometría correspondiente al nuevo dragado, se hará también este estudio con las profundidades y calados correspondientes al dragado actual, en el cual la profundidad es de 8.5 metros en la condición de marea estudiada, para buques de 6 metros de calado.

4.1.2 Método de paneles.

El código potencial desarrollado en la ETSIN se basa en el método de paneles con superficie libre que fue introducido inicialmente por Dawson[3]. El método de los paneles se puede aplicar a cualquier problema de dinámica de fluidos gobernado por la ecuación de Laplace y constituye el flujo más sencillo con sentido físico, el flujo potencial de un fluido incompresible y sin viscosidad.

El código de la ETSIN calcula el flujo potencial con superficie libre alrededor de un buque mediante el método de las fuentes de Rankine con una variante más general del método propuesto por Dawson[3]. La

generalización consiste en poder panelizar arbitrariamente la superficie libre, sin necesidad de que sean líneas de corriente del problema sin superficie libre (Bruzzone[2]). Otra generalización realizada es que se pueden hacer cálculos en buques con popa de espejo, cuyo tratamiento es sustancialmente diferente al de un buque con popa convencional (Raven [10]).

En una primera aproximación, el problema no considera la superficie libre. Para que ésta se mantenga plana, se coloca un reflejo de la obra viva por encima de la misma, de tal modo que la superficie libre se convierta en plano de simetría y no se deforme. El flujo así calculado se utiliza como base una vez que se considera la superficie libre. Se linealiza la condición dinámica, que es básicamente la ecuación de Bernouilli, que no es lineal en la velocidad, tomando como base de dicha linealización el primer flujo calculado. La condición de radiación se impone de modo numérico, a través del uso de operadores up-wind, de modo similar a Dawson[3].

Los programas tienen la mayor parte de su código escrito en lenguaje C. Para cálculos importantes, se ha compilado el programa para LINUX, y se ejecutan en un PC con procesador Pentium de última generación. En cuanto al preproceso y al postproceso, aunque inicialmente se desarrollaron códigos propios de mallado y visualización gráfica de resultados, se ha considerado oportuno el recurrir a un código comercial, usando pequeños interfaces para comunicar este programa con el módulo de cálculo. El programa elegido ha sido GiD, desarrollado por el CIMNE de la Universidad Politécnica de Cataluña. Todos los detalles tanto teóricos como numéricos y computacionales se encuentran explicados en la tesis doctoral [11]. El programa devuelve como salidas el campo de velocidades y presiones en el casco del buque, y también el campo de velocidades y elevaciones en el dominio computacional correspondiente a la superficie libre, que es un rectángulo que rodea a la flotación del buque, como se muestra en la figura 4. Este código ha sido sometido a un proceso de validación exhaustivo a través del proyecto Bajel[4].

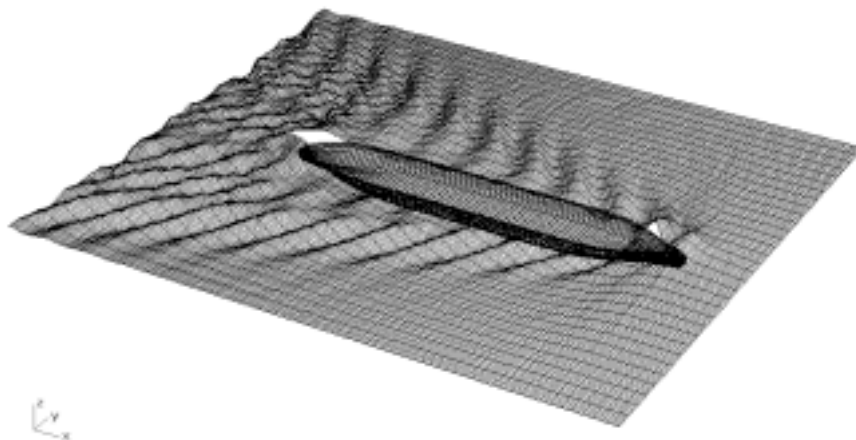


Figura 4. Visualización del tren de olas de uno de los casos de estudio. (Amplificación=10).

4.1.3 Modelización del efecto de fondo.

Para conseguir que el fondo sea línea de corriente, se coloca un reflejo del buque respecto al fondo. Esto multiplica por dos buena parte del tiempo computacional y afecta a otros requerimientos computacionales, aunque no significativamente a la memoria. Los cálculos se realizan a velocidades muy bajas (9 y 12 nudos), lo que sitúa el número de Froude en torno a 0.1. A un número de Froude tan bajo, el número de olas es muy grande, y por tanto este cálculo plantea problemas de resolución enormes que obliga a realizar cálculos con 8000 a 10000 paneles, muy por encima de la media habitual (en torno a 3000).

4.1.4 Cálculo del efecto squat.

Squat, como ya hemos explicado, es el cambio de calado y trimado de un buque que se produce como resultado de las variaciones de presión hidrodinámica sobre el casco, en su movimiento en aguas de cualquier profundidad. Para estimar el squat en cada uno de los buques, profundidades de dragado y velocidades, se utiliza la técnica de Millward[8]. Este criterio es válido bajo los siguientes condicionantes:

- Buques navegando en aguas someras con coeficiente de bloqueo⁶ $S \leq 0.08$ y cociente profundidad - calado en el intervalo $1.25 \leq H/T \leq 4$, y para todo tipo de buques con coeficientes de bloque en el intervalo $0.44 \leq C_B \leq 0.83$

Los dos buques de referencia en el presente estudio cumplen estos criterios.

4.1.5 Obtención de las características del tren de olas:

En cada uno de los casos (buques, profundidades de dragado, velocidades) se facilitan las magnitudes representativas del tren de oleaje a propagar. Estas magnitudes son la longitud de onda de la ola, su velocidad de propagación, su periodo y sobre todo su amplitud. Se calculan para cada uno de los casos diferentes cortes de ola a distintas distancias del casco. Con estos cortes visualizados con una hoja de cálculo se puede obtener el periodo de la ola midiendo la longitud de onda de la ola representativa y dividiendo por la velocidad de propagación que en este caso coincidirá con la velocidad ensayada en cada cálculo, corregida con el coseno del ángulo de propagación propuesto (35.27°). En teoría esta longitud de onda debería coincidir con la obtenida a través de la relación de dispersión en aguas poco profundas. Esta relación nos permite obtener la longitud de onda λ de una ola que viaja a velocidad C en aguas de profundidad h .

$$C^2 = \frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \quad (4)$$

Esta es la longitud de onda que consideraremos en el estudio de propagación, y el periodo de la ola se obtiene a partir de su velocidad y longitud de onda. La amplitud también se puede medir en la visualización de la ola característica dando para cada caso el valor pico a pico de esa ola.

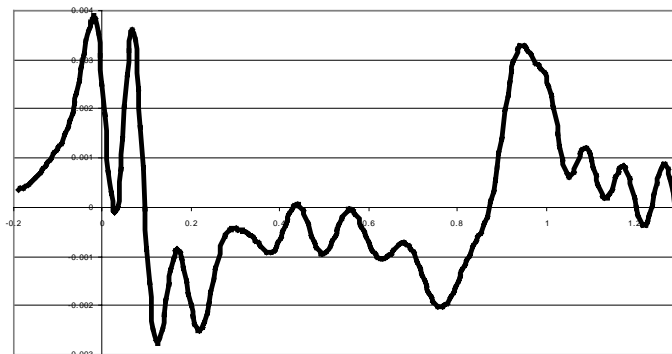


Figura 5. Sección longitudinal del tren de olas.

Presentamos ese máximo también para cada caso en los resultados finales. Los resultados experimentales de los que se dispone indican que ese pico se propaga como una ola más hacia popa, como demuestran diferentes cortes realizados en canal para el S60, y que se presentan en la referencia [11].

⁶ S cociente entre el área máxima del buque y de la zona de navegación.

Para el estudio de la propagación se propone esa amplitud calculada, con ese periodo y con la dirección de propagación de 35.27 grados propuesta teóricamente, para todos los casos, dado que el número de Froude en la profundidad no llega nunca a valores en los que se produzcan cambios significativos en la dirección de propagación. El frente de ola formará entonces un ángulo β de 54.73 grados respecto a la dirección de avance del buque, como se muestra en la figura 1.

4.1.6 Selección de buques.

Se decidió considerar un buque rápido, de bajo coeficiente de bloque, y un buque lento, de alto coeficiente de bloque, como casos extremos de diseño. Como buque rápido se tomó un portacontenedores y como buque lento un granelero. Se han hecho estudios para ambos a 9 y 12 nudos, y a calado 6 metros para 8.5 metros de profundidad de dragado y calado 7 metros para 10 metros de profundidad de dragado.

Las dimensiones principales del buque granelero en la condición de proyecto y en las condiciones ensayadas son:

	Cond Proyecto	Cond 1.	Cond2
LPP	185 m	185 m	185 m
B	29 m	29 m	29 m
T	11.34m.	6 m	7 m
CB	0.809	0.760	0.77
DISF	50500 t.	24465 t.	28917 t.

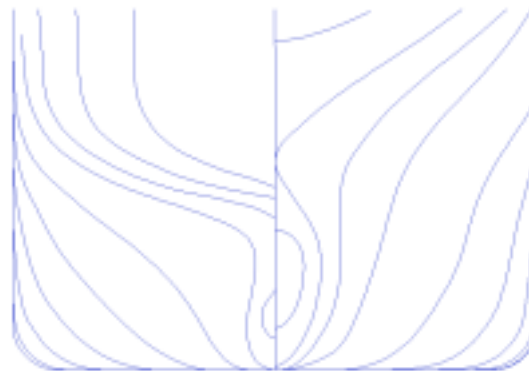


Figura 6. Formas del granelero

Las dimensiones principales del buque portacontenedores en la condición de proyecto y en las condiciones ensayadas son:

	Cond Proyecto	Cond 1.	Cond2
LPP	200 m	200 m	200 m
B	30 m	30 m	30 m
T	7.5 m.	6 m	7 m
CB	0.562	0.5145	0.546
DISF	25945t.	19002t	23526t

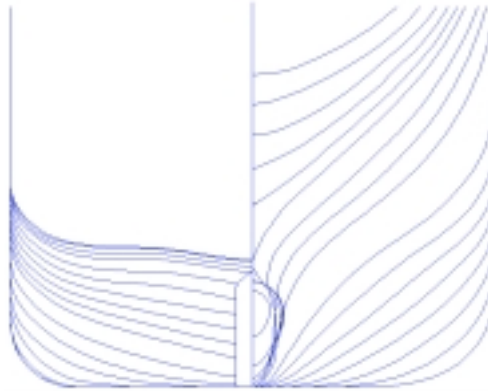


Figura 7. Formas del portacontenedores.

4.1.7 Resumen de resultados.

Se presentan las características de las olas consideradas representativas a efectos de propagación. Estos trenes de olas se propagarán formando un ángulo de 35.27 grados con respecto a la dirección de avance, lo que significa que los frentes de onda formarán un ángulo de 54.73 grados respecto a la dirección de avance.

BUQUE	VELOCIDAD	CALADO	NIVEL	ALTURA
Granelero	9 nudos	6,0 m	8,5 m	0,48 m
Granelero	9 nudos	7,0 m	10,0 m	0,61 m
Granelero	12 nudos	6,0 m	8,5 m	0,93 m
Granelero	12 nudos	7,0 m	10,0 m	1,21 m
Portacontenedores	9 nudos	6,0 m	8,5 m	0,34 m
Portacontenedores	9 nudos	7,0 m	10,0 m	0,23 m
Portacontenedores	12 nudos	6,0 m	8,5 m	0,66 m
Portacontenedores	12 nudos	7,0 m	10,0 m	0,34 m

Como resumen y análisis de estos resultados, podemos comentar:

- El oleaje generado por el buque de formas llenas, el granelero, ha sido en general mayor que el generado por el buque de formas finas, por lo cual, para establecer condiciones de diseño, debe ser el primero el considerado.
- Las tendencias en lo relativo a oleaje generado, en relación con el nivel de agua, dependen del tipo de barco, de tal manera que para los buques de formas llenas la altura de oleaje generado aumenta para mayores niveles de agua, mientras que para los de formas finas disminuyen.
- La altura de oleaje generado aumenta con la velocidad del buque.
- Para el caso de buques de formas llenas, en los cuales la altura de oleaje generado aumenta con el nivel de agua, el incremento de altura es más sensible al aumento de velocidad del buque que al nivel de agua existente, de donde se puede concluir que incrementos en la altura de ola generada por dragados del canal pueden ser contrarrestados, de forma eficaz, por limitaciones en la velocidad de navegación.

4.2 Propagación del oleaje.

4.2.1 Método de cálculo utilizado.

El estudio de propagación del oleaje ha sido realizado por HIDTMA S.L. Para la propagación de cada una de las olas regulares definitorias de los diferentes casos se ha utilizado el modelo MIKE 21 NSW, desarrollado por el Danish Hydraulic Institute, que considera la acción de la refracción, el "shoaling", la fricción del fondo y la rotura del oleaje en la propagación de un espectro de oleaje[7]. Como resultados ofrece información sobre alturas significantes y períodos de pico tras la propagación hasta tierra.

Para las simulaciones se ha descompuesto el tramo del río en estudio en 13 subtramos, aproximadamente rectos, cuyo contorno coincide con la dirección de navegación del buque y en los cuales se introduce el oleaje con las alturas y periodos antes calculados y una dirección de propagación formando $35,27^\circ$ ($90^\circ - 54,73^\circ$) con el eje de abscisas. El modelo incluye la zona comprendida entre la zona de navegación del buque, donde éste genera el oleaje, hasta la margen oeste del río. Asimismo, se han preparado, a partir de éstas, otras batimetrías considerando los dragados proyectados por la Autoridad Portuaria.

A lo largo de cada subtramo, se han definido una serie de puntos en los cuales se han obtenido las alturas de ola resultantes tanto para la situación actual como para la situación con el dragado proyectado. En las figuras 8 y 10 se presentan las batimetrías y puntos de control correspondientes a las zona 10 y 8 respectivamente, correspondiente a la Curva de Bonanza, en el punto kilométrico 80 y al tramo de Punta Cepillos en el punto kilométrico 75. Presentamos en las figuras 9 y 11 los mapas de olas correspondientes a estas zonas calculados con MIKE 21 NSW, para una altura de ola en el buque de 0.61m y un periodo de 2.42s en el primer caso, y para una altura de ola de 0.93m y un periodo de 3.23s en el segundo.

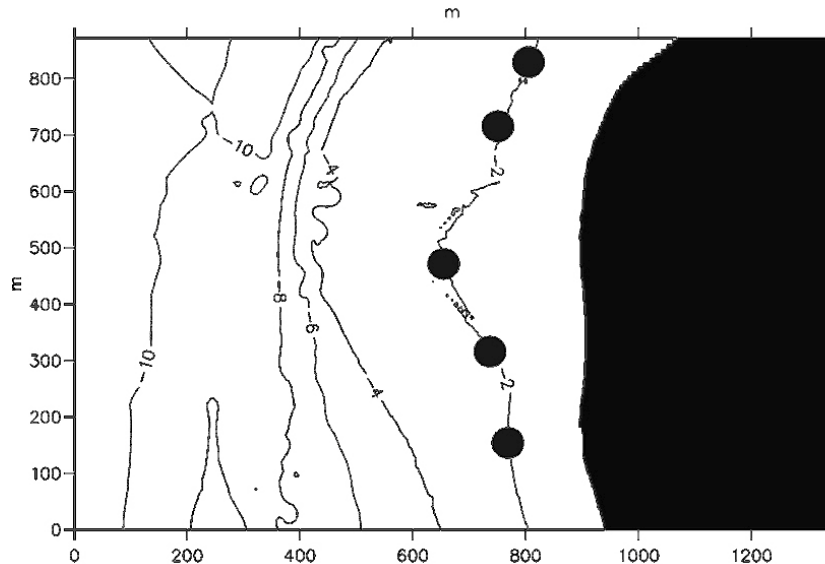


Figura 8. Batimetría para la zona 10 y puntos definidos para la obtención de resultados.

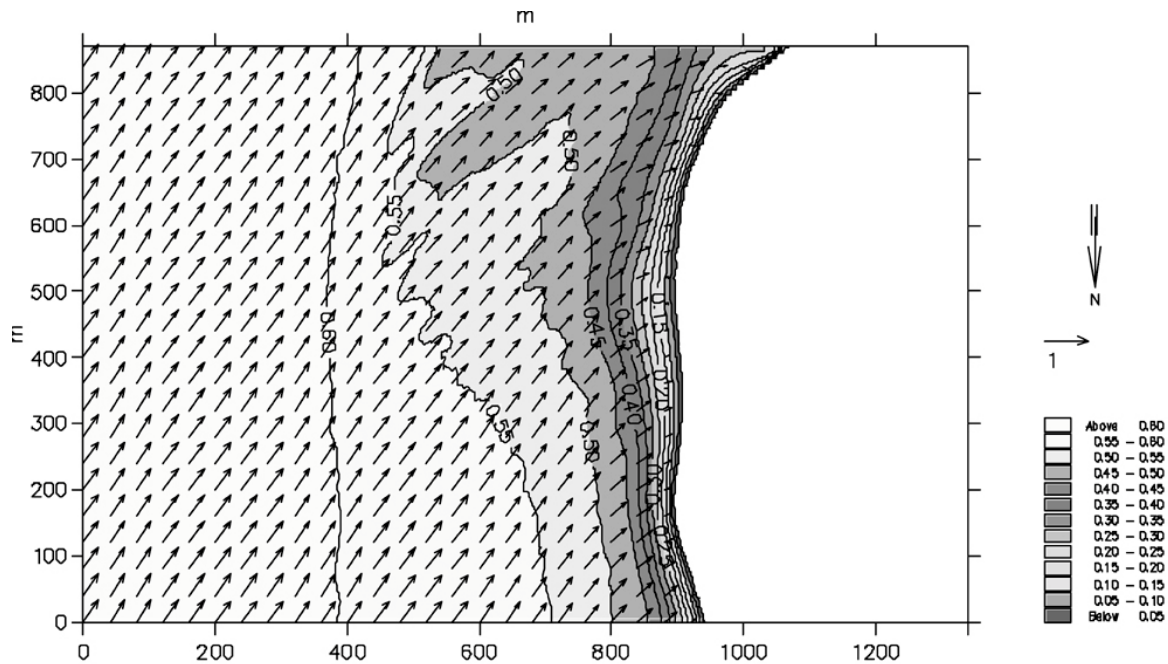


Figura 9. Propagación del oleaje generado por el buque. Canal Dragado. Zona 10. $H=0.61\text{m}$. $T_m=2.42\text{s}$.

A las olas generadas por el buque se le superpusieron en el análisis las generadas por el viento, que en puntos de la margen pueden alcanzar valores máximos de $0,40\text{ m}$.

5 Conclusiones.

1. Se ha realizado un estudio previo a la realización del dragado del río Guadalquivir con vistas a estimar la influencia que este dragado tendrá en el oleaje generado por los buques que navegan por el río hasta el puerto de Sevilla y en como éste se propaga a las márgenes del río.
2. Se trata de dimensionar correctamente las protecciones en dichas márgenes con vistas a que no se produzcan efectos erosivos significativos en las mismas.
3. El proceso de cálculo consta de la selección de dos buques patrón con los que obtener los límites a la generación de oleaje: uno de formas llenas, y otro de formas finas. Para cada uno de estos buques se estimará la posición de equilibrio por squat para posteriormente realizar el cálculo de las olas generadas mediante el método potencial de la ETSIN, obteniendo las características necesarias para su propagación hasta la orilla, la cual realiza HIDTMA S.L. mediante el modelo MIKE 21 NSW.
4. Los buques de formas llenas son los que generan mayores alturas de ola con valores muy dependientes, en mayor medida de la velocidad de navegación y, en menor medida, de la profundidad. En nuestro caso, con una velocidad de navegación de 12 nudos y una profundidad de 10 metros, con un calado del buque de 7 m, la altura obtenida ha sido de $1,21\text{ m}$.
5. La propagación del oleaje hasta las márgenes tiende a amortiguar el oleaje generado por el buque, por lo cual, se recomienda considerar una altura de 1 metro para estructuras ubicadas a una profundidad de 2 m respecto a la BMVE.
6. En los buques de formas llenas, que son los que generan mayores alturas de ola, el efecto del dragado es aumentar la altura de ola en un 50% aproximadamente. La disminución de la velocidad de navegación de 12 a 9 nudos induce disminuciones de un 50%.
7. Por ello se recomienda el control de la velocidad para disminuir la incidencia del oleaje en las márgenes, con lo cual, se contrarrestará positivamente la ejecución del dragado, pasando de un oleaje generado a 12 nudos en la situación de actual de $0,93\text{ m}$, a otro de $0,61\text{ m}$ incluyendo el dragado pero navegando a 9 nudos.

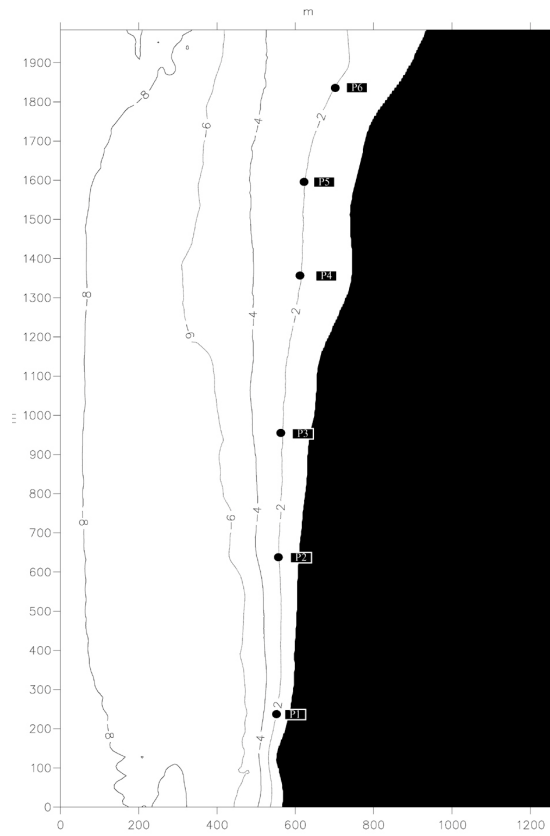


Figura 10. Batimetría para la zona 8 y puntos definidos para la obtención de resultados.

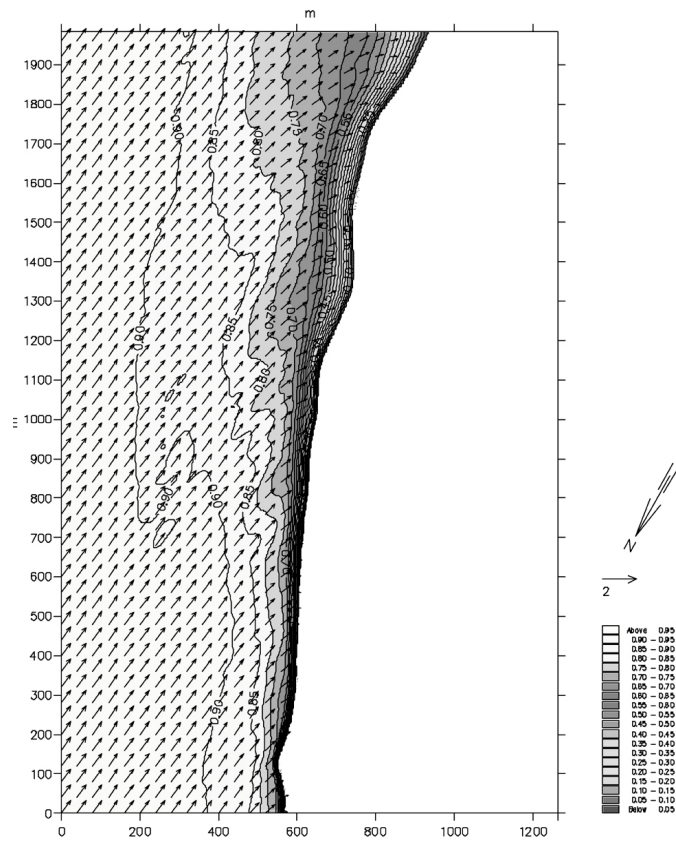


Figura 11. Propagación del oleaje generado por el buque. Canal Dragado. Zona 8. $H=0.93m$. $T_m=3.23s$.

6 Referencias.

- [1] Barrass C.B. "Ship squat" Lorne & MacLean Marine Pb. 1978
- [2] Bruzzone, D., "Numerical Evaluation of the Steady Free Surface Waves". Proceedings of CFD Workshop Tokyo 94. Vol 1. Pag 126-134.
- [3] Dawson, C.W.; "A Practical Computer Method for Solving Ship Wave Problems" Proc. 2nd. Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics, 1977 Berkeley, pp 30-38.
- [4] García Espinosa, J., Pérez Rojas, L., Valle Cabezas, J. y Chacón Alonso, J.R., El Proyecto BAJEL: Una herramienta de diseño hidrodinámico de buques de pasaje XXXIV Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval. Barcelona. 1998.
- [5] Herreros, M.A., Souto, A. La influencia de los fenómenos wake wash y squat en el diseño de buques rápidos: límites aceptables y métodos de predicción. XXXIX Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval. Cádiz, 24 y 25 de Mayo de 2001.
- [6] Havelock, T.H., The Propagation Of Groups Of Waves in Dispersive Media, With Application To Waves Produced By a Travelling Disturbance., Proc. Royal Society of London, V, London, England, Series A, pp.~398-430, 1908.
- [7] Kofoed-Hansen, H., Kirkegaard, J., Technical Investigation of Wake Wash from Fast Ferries. Danish Hydraulic Institute, Report No. 5012, 1996.
- [8] Millward A "A comparison of the theoretical and empirical prediction of squat in shallow water" International Shipbuilding Progress 1992 No. 417 pp. 69/78
- [9] Newman, J. N., Marine hydrodynamics. Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 1977
- [10] Raven, H.C., " A Solution Method for the Nonlinear Ship Wave Resistance Problem". Tesis doctoral, Marin, 1996. ISBN 90-75757-03-4.
- [11] Souto, A. "Nuevas herramientas de diseño de formas de buques basadas en códigos de flujo potencial". Tesis doctoral. ETSI Navales. Octubre 2001.