

**AUTORIDAD PORTUARIA DE MÁLAGA**

**INFORME FINAL**

**ENSAYOS HIDRÁULICOS 3D EN MODELO REDUCIDO PARA  
ANALIZAR LA FUNCIONALIDAD DE LA NUEVA  
DESEMBOCADURA DEL RÍO GUADALMEDINA (MÁLAGA)**

**JULIO DE 2006**



**INHA**

Instituto de Hidrodinámica Aplicada  
Centre Tecnològic Europroject  
Parc Tecnològic del Vallès  
08290 Cerdanyola

## ÍNDICE

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>2</b>
1.1. Antecedentes .....	2
1.2. Objetivo del estudio.....	2
1.3. Metodología .....	3
1.4. Documentos de que consta el informe .....	4
<b>Capítulo 2. Planificación, preparación y ejecución de ensayos 3D .....</b>	<b>5</b>
2.1. Descripción de las instalaciones de ensayo .....	5
2.2. Análisis de la escala de trabajo y posibles efectos escala .....	7
2.3. Construcción del modelo .....	7
2.4. Selección de las condiciones de oleaje a ensayar .....	9
2.5. Calibración de ensayos .....	11
2.6. Descripción de la instrumentación y medios de medición y observación .....	15
2.7. Ejecución de los ensayos .....	16
<b>Capítulo 3. Análisis de resultados de ensayos 3D .....</b>	<b>18</b>
3.1. Ensayos de agitación .....	18
<b>Capítulo 4. Conclusiones de los ensayos en modelo físico .....</b>	<b>67</b>
4.1. Conclusiones .....	67
<b>Anejo 1. Anejo de planos 3D .....</b>	<b>68</b>
<b>Anejo 2. Anejo fotográfico 3D .....</b>	<b>71</b>
<b>Anejo 3. Anejo de modelos físicos .....</b>	<b>87</b>
A.3.1. Introducción .....	87
A.3.2. Semejanza entre modelo y prototipo .....	87
A.3.3. Relación de escalas empleadas .....	94
<b>Anejo 4. Anejo de efectos escala .....</b>	<b>96</b>
A.4.1. Fuerzas viscosas .....	96
A.4.2. Correcciones debidas a fuerzas viscosas .....	101
A.4.3. Tensión superficial .....	101
A.4.4. Correcciones debidas a tensión superficial .....	102
A.4.5. Estabilidad del manto principal .....	102
<b>Anejo 5. Anejo de software .....</b>	<b>104</b>
A.5.1. Introducción .....	104
A.5.2. Software de generación de las series temporales .....	104
A.5.3. Software para el análisis experimental del oleaje .....	110

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Antecedentes

En julio de 2005 la Autoridad Portuaria de Málaga se puso en contacto con el *Instituto de Hidrodinámica Aplicada (INHA)* con el fin de realizar una serie de ensayos 3D en piscina de oleaje que corroborasen la funcionalidad del diseño propuesto para el 'Estudio de la hidrodinámica de la nueva desembocadura del río Guadalmedina'.

## 1.2. Objetivo del estudio

El objetivo fundamental de los ensayos hidráulicos 3D en piscina de oleaje ha sido analizar, para la configuración en planta definida, las siguientes variables:

- **Funcionalidad** del modelo, mediante la medición de la **agitación** existente en distintos puntos del mismo.
- **2 direcciones de incidencia oblicua** del oleaje, correspondientes al **S** y a una dirección cercana al **ESE**.
- **Escala** de ensayo **1/150**.
- **Mínimo de seis escalones de altura de ola** de energía creciente, para **dos periodos de pico** y **un único nivel de mar (+0.0m)** y para dos caudales distintos del río.

A partir de los resultados obtenidos se han elaborado una serie de conclusiones y recomendaciones, y se han propuesto una serie de alternativas de diseño que mejoren el comportamiento de las soluciones propuestas y ensayadas.

## 1.3. Metodología

En primer lugar se ha llevado a cabo la planificación y preparación de los ensayos en modelo reducido necesarios para la obtención de los datos objeto de análisis, incluyendo los siguientes puntos:

- Selección y descripción de las instalaciones de ensayo.
- Análisis de la escala de trabajo adoptada, así como de los posibles efectos escala producidos en el ensayo.
- Estudio de las características de los modelos físicos a ensayar.
- Construcción del modelo reducido objeto de estudio.
- Selección de las condiciones de oleaje a ensayar.
- Calibración de las condiciones de oleaje.
- Calibración de las paletas generadoras de oleaje.
- Definición de los parámetros a medir u observar.
- Selección y descripción de la instrumentación utilizada para la obtención de los resultados correspondientes a cada una de las variables de estudio.

A partir de la generación de las condiciones de oleaje y la adquisición de los datos correspondientes, previa calibración y preparación de la instrumentación utilizada con tal fin, se ha procedido a la ejecución de los ensayos hidráulicos 3D. Con el objetivo de poder analizar posteriormente cualquiera de las incidencias ocurridas en los ensayos, se ha procedido a la realización de un reportaje fotográfico y de unas filmaciones en vídeo.

Los resultados obtenidos a través de los ensayos en modelo reducido han sido analizados posteriormente con el fin de determinar los niveles de agitación en distintas zonas del modelo. Una vez analizados los resultados de los ensayos se han elaborado una serie de conclusiones y recomendaciones finales.



## 1.4. Documentos de que consta el informe

El presente informe está compuesto por los siguientes documentos:

- **MEMORIA**

Capítulo 1: Introducción.

Capítulo 2: Planificación, preparación y ejecución de ensayos 3D.

Capítulo 3: Análisis de resultados de ensayos 3D.

Capítulo 4: Conclusiones y recomendaciones.

- **ANEJOS**

Anejo 1: Anejo de planos 3D.

Anejo 2: Anejo fotográfico 3D.

Anejo 3: Anejo de modelos físicos.

Anejo 4: Anejo de efectos escala.

Anejo 5: Anejo de software.



## Capítulo 2. Planificación, preparación y ejecución de ensayos 3D

### 2.1. Descripción de las instalaciones de ensayo

Los ensayos experimentales llevados a cabo han sido realizados en la piscina de oleaje del *Instituto de Hidrodinámica Aplicada (INHA)*, que tiene unas dimensiones de 22.52m x 27.60m.

Las paredes laterales de la piscina, de 1.20m de altura, están construidas a base de bloques prefabricados huecos de hormigón de 0.20m de espesor colocados a rompejuntas. A lo largo de los huecos mencionados, hay colocadas una serie de varillas verticales y horizontales cada 0.20m, recubiertas con mortero.

La impermeabilización de la piscina se consigue a base de la imprimación existente de pintura resínica a lo largo de sus paredes laterales y solera de fondo.

El sistema de generación de oleaje consiste en tres módulos o actuadores de tipo pistón que pueden ser trasladados y colocados alineadamente en distintas posiciones de la piscina mediante un puente grúa.

Las dimensiones de las paletas correspondientes a los tres actuadores disponibles son de 6.00m de largo y 1.00m de alto, y su recorrido es de  $\pm 0.25$ m. El ancho de los actuadores es de 2.00m y su misión es generar oleaje unidireccional.

Cada uno de los actuadores está accionado por un pistón conectado a un generador hidráulico que bombea aceite a presión mediante una bomba impulsada por un motor eléctrico.

El servocontrolador es modular, de forma que puede equiparse para controlar sincronizadamente el número de actuadores que se requiera. Un procesador de señal digital comandado por un programa de software de generación de oleaje en PC reemplaza al servoamplificador analógico típico de los servosistemas tradicionales.

El control de las paletas se realiza mediante el paquete de software de control antes mencionado que permite también la adquisición de datos y su posterior análisis. El programa, que funciona mediante un menú de opciones, permite generar oleaje regular e irregular y cualquier tipo de espectro a través del control 'on-line' ejercido sobre las paletas, a la vez que permite almacenar los datos medidos por los diferentes sensores instalados en la piscina. Dichos datos pueden ser analizados y presentados en forma gráfica mediante la aplicación de las distintas rutinas estadísticas y de análisis de series temporales incorporadas en el programa.

Tanto en la parte trasera de los actuadores como a lo largo de las paredes laterales de la piscina se colocan sistemas de amortiguación del oleaje que evitan las reflexiones no deseadas que puedan distorsionar los resultados de los ensayos. Dichos sistemas consisten en unas playas de escollera, de pendiente 1/2, que disipan la energía generada en esas zonas.

Un puente grúa de 3.20T, capaz de moverse a lo largo de toda la piscina, se utiliza para transportar las maquetas y otros materiales, las piezas prefabricadas de amortiguación lateral de la piscina, los módulos de generación de oleaje, las bombas y otros equipos necesarios.

Para el vaciado y llenado de la piscina se utiliza un depósito de almacenamiento de agua de 110m<sup>3</sup>, junto con un equipo de presión asociado para transportar los caudales necesarios, y que puede ser utilizado también como cámara de regulación para la simulación de mareas y corrientes.

Adicionalmente, para permitir la reutilización del agua almacenada en dicho depósito, se dispone de un equipo de filtrado. Finalmente decir que la instalación eléctrica indispensable es de 3x380Voltios y la potencia máxima es de 150KW.



## 2.2. Análisis de la escala de trabajo y posibles efectos escala

Para la realización de los ensayos tridimensionales en modelo reducido se ha utilizado la similitud de Froude con una escala sin distorsión de 1/150. Dicha escala permite reproducir fielmente las características estructurales e hidrodinámicas de las distintas tipologías de diques conservando la similitud de Froude, que es la que resulta más relevante para fenómenos hidráulicos condicionados fundamentalmente por las fuerzas de inercia y de gravedad. Para la mayor parte de los fenómenos asociados a flujos oscilatorios de superficie libre, como son la refracción, difracción y reflexión, es muy adecuado el uso de la similitud de Froude.

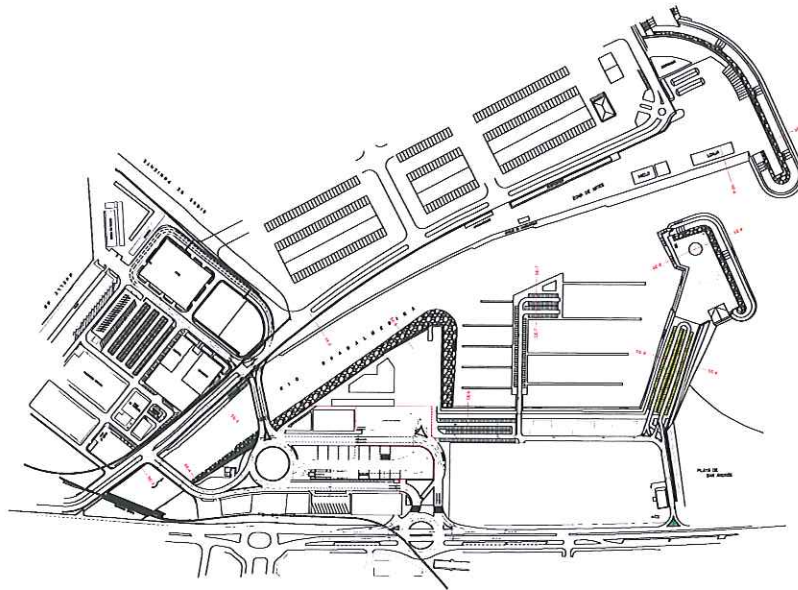
Para que los resultados del modelo sean válidos y no se introduzcan posibles efectos escala, además de la conservación del número de Froude ( semejanza geométrica) es necesario que los demás números adimensionales que no se conservan (números de Reynolds y Weber, para la semejanza dinámica) tengan un orden de magnitud que haga completamente despreciables a las fuerzas que representan (fuerzas viscosas para el número de Reynolds y fuerzas de tensión superficial para el número de Weber).

Tal es el caso de los ensayos que nos ocupan, donde para la escala 1/150 puede demostrarse que tanto las fuerzas viscosas como las de tensión superficial son despreciables respecto a las fuerzas de inercia y de gravedad, evitando de este modo posibles efectos de escala sobre los resultados obtenidos (ver Anejos 3 y 4 de modelos físicos y efectos escala respectivamente).

## 2.3. Construcción del modelo

El modelo reducido construido en las instalaciones de INHA reproduce, a escala 1/150, parte del diseño en planta (Figura 2.1) propuesto en el '*Estudio de la hidrodinámica de la nueva desembocadura del río Guadalmedina*'. Ver también el Anejo 2 de planos.

Este modelo, se ha construido en una parte de la piscina de 22.5 x 21.5m, sobre la batimetría correspondiente a una rampa de inclinación 2% que empieza a 16.5m de la pared opuesta a las palas, y que ha sido construida con una precisión de  $\pm 1\text{mm}$ . Desde el final de la rampa hasta las palas, se ha conservado el fondo plano de la piscina.



*Figura 2.1: Planta del modelo*

Para la construcción de dicho modelo se han utilizado distintos materiales en función de las características de los elementos a reproducir y en función de las variables a estudiar. La selección del peso del material correspondiente a los distintos mantos se ha llevado a cabo permitiendo un  $\pm 10\%$  de tolerancia con respecto al peso medio definido.

## 2.4. Selección de las condiciones de oleaje a ensayar

Las condiciones de oleaje a reproducir en los ensayos han sido las más críticas de las obtenidas en el 'Proyecto de estudio de la hidrodinámica de la nueva desembocadura del río Guadalmedina'.

Se han considerado como oleajes incidentes en la obra los correspondientes a las direcciones S y ESE. Para dichas direcciones de estudio, se han obtenido los parámetros representativos, a -40m de profundidad (calado donde están ubicadas las palas generadoras de oleaje), de los oleajes a ensayar (periodo de pico  $T_p$  y altura de ola significativa  $H_s$ ). Para cada uno de los casos se han ensayado un mínimo de seis escalones de altura de ola de energía creciente y dos periodos de pico distintos. Se ha considerado un único nivel de marea (+0.0m) y se han considerado dos caudales distintos del río.

A partir de estas condiciones de oleaje, la totalidad de ensayos realizados son los que se muestran a continuación (Tablas 2.1 y 2.2).

$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Nivel (m)
1.0	10-13	+0.0
2.0	10-13	+0.0
3.0	10-13	+0.0
4.0	10-13	+0.0
5.0	10-13	+0.0
6.0	10-13	+0.0

Tabla 2.1: Ensayos del puerto de Málaga. Dirección S.  $T_p=10$  y 13s.  
Caudales 600 y 300m<sup>3</sup>/s.



$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Nivel (m)
1.0	10-13	+0.0
2.0	10-13	+0.0
3.0	10-13	+0.0
4.0	10-13	+0.0
5.0	10-13	+0.0
6.0	10-13	+0.0

Tabla 2.2: Ensayos del puerto de Málaga. Dirección ESE.  $T_p=10$  y  $13s$ .  
Caudales  $600$  y  $300m^3/s$ .

Todas las condiciones de oleaje irregular descritas en el párrafo anterior han sido reproducidas en el modelo reducido a través de un espectro tipo Jonswap (Figura 2.2), que viene definido por un factor de apuntamiento  $\gamma$  (considerado igual a 3.3), una altura de ola significativa  $H_s$  y un periodo de pico  $T_p$ . Este tipo de espectro es el normalmente utilizado en modelado físico, y aceptado por toda la comunidad científica. Asimismo, el factor de apuntamiento que se ha utilizado corresponde a un valor medio usado en casos como el actual, en el que no existe más información al respecto.

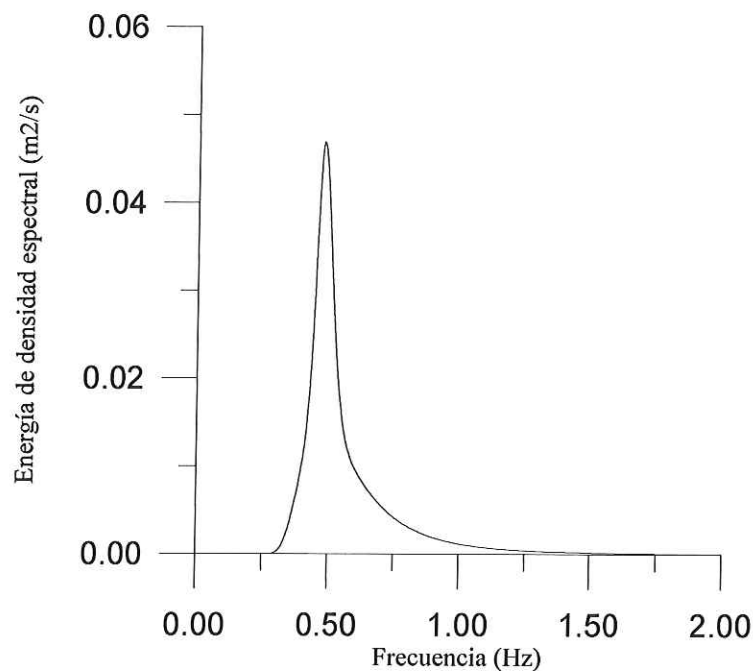


Figura 2.2: Espectro tipo Jonswap de parámetro de apuntamiento 3.3.



En los ensayos de agitación, se han realizado tests que reprodujeran como mínimo una hora de temporal en la naturaleza. Se han llevado a cabo ensayos acumulativos para cada periodo, de modo que al haber seis alturas de ola para cada uno de los periodos, la duración total del ensayo ha sido de seis horas de temporal en el prototipo.

## 2.5. Calibración de ensayos

Con el fin de poder asegurar la fiabilidad de los ensayos y de los resultados obtenidos a través de ellos, ha sido necesaria una constante calibración de todo el equipo de generación de oleaje y de todos los instrumentos de medición y de adquisición de señales.

A continuación se procede a efectuar una breve descripción de la metodología empleada para la calibración de cada uno de estos equipos.

### 2.5.1. Calibración de los sensores de oleaje

La calibración de los sensores de oleaje se ha llevado a cabo de modo que las variaciones de resistencia debidas a los cambios del nivel de agua se traduzcan en variaciones de tensión en función de la altura de ola.

Teniendo en cuenta que los oleajes generados pueden tener los senos más aplanados y las crestas más agudas, el nivel de cero, es decir, la superficie libre del agua en reposo, se ha situado con el extremo final de la sonda sumergido a una profundidad de 0.40m, y el valor máximo esperado de la amplitud positiva de las olas se ha estimado en 0.60m (Figura 2.3).

Sabiendo que los márgenes de sensibilidad del sensor están comprendidos entre +/- 10V y considerando que el valor máximo de la cresta es de 0.60m por encima de la superficie libre en reposo, se obtiene un ajuste de ganancia que viene dado por una relación *voltaje/nivel de agua* de 10V/0.60m.

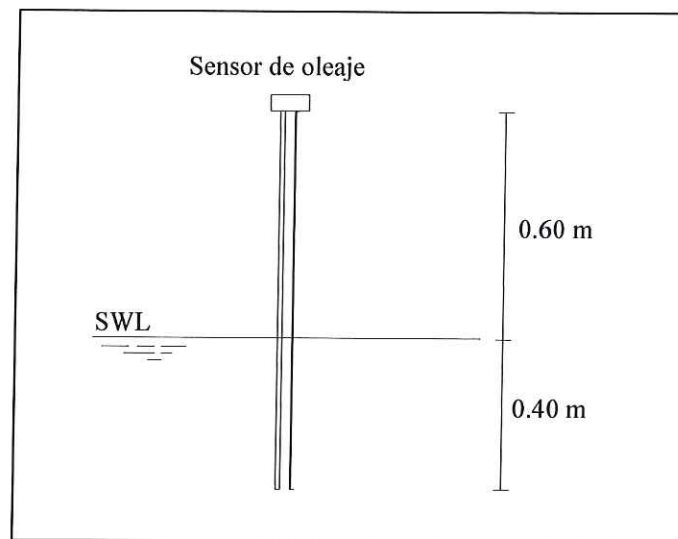


Figura 2.3: Disposición de los sensores de oleaje respecto al nivel de agua en reposo.

### 2.5.2. Calibración de la paleta de generación de oleaje

La paleta de generación de oleaje tiene un recorrido de  $\pm 0.25\text{m}$  que corresponde a una entrada de señal de  $\pm 10\text{V}$ .

De igual forma que en la calibración de los medidores de nivel resistivos, en la calibración de la paleta el ajuste del cero se fija de tal manera que el pistón se encuentre exactamente en la mitad de su recorrido.

Asimismo, el nivel de ajuste de la ganancia se realiza de tal manera que una variación de  $0.25\text{m}$  de desplazamiento del pistón corresponda realmente a una variación de  $10\text{V}$  en la entrada de señal.

### 2.5.3. Calibración de los oleajes

El oleaje generado por el viento puede describirse matemáticamente como la suma de un largo número de funciones senoidales. Las amplitudes y fases de cada una de dichas funciones son determinadas por medio de la transformada de Fourier del registro temporal de la superficie libre del agua. Esta transformada de Fourier da lugar

a la distribución de la energía del tren de ondas en función de la frecuencia asociada a cada onda (espectro de energía).

Normalmente, en el caso de oleaje irregular, se utilizan diversas expresiones matemáticas para describir el espectro de energía de un determinado clima de oleaje. Estas expresiones matemáticas han sido derivadas empíricamente a través de ajustes realizados sobre datos de campo disponibles en distintas zonas y para distintas condiciones de oleaje. Es por ello que las densidades espectrales vienen dadas en función de las condiciones del oleaje representativo de la zona.

En los ensayos llevados a cabo se han generado oleajes irregulares a partir de espectros tipo Jonswap (representado previamente en la Figura 2.2) con la finalidad de reproducir de forma realista los fenómenos objeto del estudio.

El espectro Jonswap es representativo de oleajes de viento con limitación de fetch, y la expresión de la función de densidad espectral  $S(\omega)$  viene dada por la Ecuación 2.1:

$$S(\omega) = \alpha \cdot g^2 / \omega^5 \cdot \exp(-1.25 \cdot (\omega_m / \omega)^4) \cdot \gamma^{\exp(A)} \quad (2.1)$$
$$A = (-\omega - \omega_m)^2 / (2 \cdot \sigma^2 - \omega_m^2)$$

donde:

- $\omega_p = 2\pi f_p$  es la frecuencia angular de pico
- $\alpha$  es el parámetro de escala
- $\gamma$  es el parámetro de apuntamiento
- $\sigma = \sigma_a$  para  $\omega \leq \omega_p$
- $\sigma = \sigma_b$  para  $\omega \geq \omega_p$
- $\omega_p$  es la frecuencia de pico
- $\omega$  es la frecuencia angular

Para un espectro Jonswap medio, los parámetros representativos son:

- $\gamma = 3.3$
- $\sigma_a = 0.07$
- $\sigma_b = 0.09$



- $\alpha=0.076(x)^{-0.22}$
- $f_p=3.5(g/U)(x)^{-0.33}$
- $x=gx/U^2$  es el fetch adimensional
- $x$  es el fetch
- $U$  es la velocidad del viento

La calibración de los oleajes generados a partir de un espectro Jonswap teórico de parámetros característicos  $H_s$ ,  $T_p$  y  $\gamma$  se ha realizado a través del siguiente procedimiento (Figura 2.4). Partiendo de dicho espectro teórico (*Espectro Jonswap*) se genera una serie temporal calculada mediante una transformada rápida inversa de Fourier (FFT)<sup>-1</sup>. Esta serie temporal se envía a la paleta, la cual genera un oleaje cuya serie temporal se mide con el sensor de oleaje situado enfrente de éstas. A partir de la serie temporal medida y aplicando una FFT se obtiene el espectro correspondiente (*Espectro generado*), el cual se divide banda a banda por el espectro teórico inicial obteniéndose de esta forma la función de transferencia de las paletas.

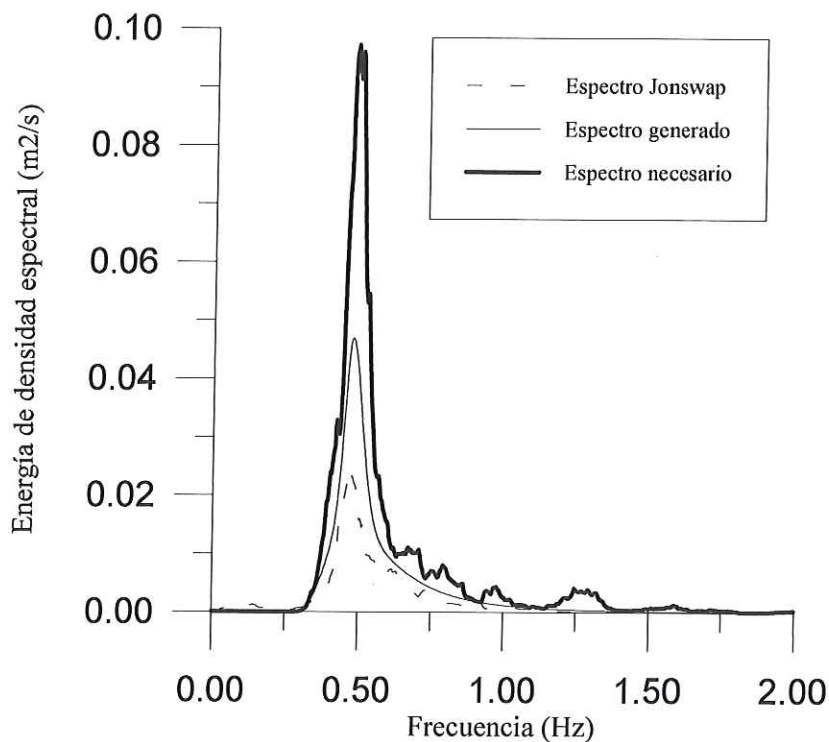


Figura 2.4: Calibración de los oleajes generados a partir de un espectro tipo Jonswap.



Dicha función de transferencia se multiplica por el espectro teórico, obteniéndose finalmente el espectro calibrado (*Espectro necesario*) a partir del cual se obtiene la serie temporal con la que se lleva a cabo el ensayo. Tras efectuar esta calibración nos aseguramos que las diferencias de altura de ola entre el espectro teórico y el calibrado sean menores que un 5% para todos los oleajes generados.

## 2.6. Descripción de la instrumentación y medios de medición y observación

Tal y como se ha comentado anteriormente, el objetivo fundamental de los ensayos hidráulicos 3D en piscina de oleaje ha sido analizar, para la configuración en planta definida en el 'Estudio de la hidrodinámica de la nueva desembocadura del río Guadalmedina', las siguientes variables:

- **Funcionalidad** del modelo, mediante la medición de la **agitación** existente en distintos puntos del mismo.
- **2 direcciones de incidencia oblicua** del oleaje, correspondientes al **S** y a una dirección cercana al **ESE**.
- **Escala de ensayo 1/150**.
- **Mínimo de seis escalones de altura de ola** de energía creciente, para **dos periodos de pico y un único nivel de mar (+0.0m)** y para dos caudales distintos del río.

Los instrumentos y medios de observación y medición instalados en la piscina de las instalaciones de INHA, para la adquisición de datos correspondientes, han sido los siguientes:

- Diecisiete sensores de altura de ola.
- Un caudalímetro.
- Una cámara de vídeo y una cámara fotográfica.
- Un monitor y un ordenador tipo PC.

Los medidores de altura de ola están formados por 2 varillas de acero inoxidable que actúan como electrodos de una resistencia. Mediante un mecanismo electrónico, el valor de la resistencia varía inversamente con la profundidad de inmersión de los electrodos.

Tres sensores (OL1, OL2, OL4) han sido dispuestos enfrente de las paletas generadoras con el fin de evaluar las condiciones de oleaje realmente incidentes sobre la zona de estudio durante la adquisición de datos. De este modo se ha tenido un valor de referencia del oleaje incidente en la zona de estudio. El resto de sensores han sido dispuestos en distintas zonas del modelo, con el fin de evaluar la agitación existente en esas zonas, concentrándose, a petición del cliente en la zona de la bocana del puerto.

La posición de los sensores de oleaje es la que se muestra en el Anejo 1 de planos.

La cámara de vídeo ha servido para dejar constancia de todos los ensayos realizados y poder así visualizar posteriormente cualquier tipo de incidencia de los mismos.

La cámara fotográfica se ha utilizado para plasmar en una instantánea algún episodio de rebase y sobretodo la configuración del dique al final de cada ensayo de estabilidad. De esta forma ha quedado constancia del número de bloques que se han desplazado en cada uno de ellos.

El monitor ha estado conectado a la cámara de vídeo para visualizar en todo momento las incidencias del ensayo desde la posición del controlador de las paletas. El ordenador PC, que tiene instalada una tarjeta de adquisición de datos, ha recibido y almacenado todas las señales de entrada adquiridas por los sensores de altura de ola.

## 2.7. Ejecución de los ensayos

En primer lugar se procedía a la colocación de las palas generadoras de oleaje según la dirección de incidencia a ensayar. A continuación, y con el fin de evitar la distorsión por pérdida lateral de energía, se disponían los encauzadores de oleaje según las

direcciones de propagación del oleaje refractado. De este modo se encauzaba el oleaje hasta la zona de estudio evitando efectos de contorno durante la propagación del mismo.

Una vez llevada a cabo la calibración de los oleajes a generar, la metodología común de cada ensayo comenzaba con la calibración diaria de los sensores de oleaje y de las paletas generadoras. La adquisición de las series temporales de elevación de la superficie libre a partir de los sensores anteriormente mencionados se ha llevado a cabo a una frecuencia de muestreo de 50Hz.

La generación del oleaje irregular en la piscina ha requerido la obtención de la serie temporal a reproducir a partir del espectro de energía definido (metodología descrita anteriormente). Esta descripción matemática de las condiciones de oleaje ha debido ir acompañada por la función de transferencia de las paletas generadoras, que nos relaciona la elevación de la superficie libre del agua y el desplazamiento de las mismas. Una vez convertido el registro temporal de la elevación de la superficie libre del agua en un registro de desplazamiento de las paletas, se está ya en disposición de proceder a la propia generación de los oleajes.

Se han realizado los ensayos de agitación, en los cuales se sometía a los diques de abrigo a series de oleaje de energía creciente (altura de ola significativa creciente), manteniendo constante el valor del periodo de pico y el caudal del río. La duración de los ensayos ha sido la necesaria para reproducir un temporal de una hora en la naturaleza, en los cuales se ha obtenido el oleaje existente en distintos puntos del modelo a partir de la medición realizada con los sensores de nivel descritos anteriormente. El tratamiento posterior de los datos ha permitido conocer el nivel de averías existente, para cada una de las condiciones de oleaje, en cada uno de los elementos ensayados de la configuración. Paralelamente a cada uno de estos procesos, se han tomado fotografías del ensayo y se han realizado filmaciones en vídeo.





## Capítulo 3. Análisis de resultados de ensayos 3D

### 3.1. Ensayos de agitación

#### 3.1.1. Metodología de ensayo

En cada uno de los ensayos realizados se siguió el mismo procedimiento: una vez construido parte del diseño de la planta del puerto de Málaga, según su diseño original se sometía a ésta a series de oleaje de energía creciente (altura de ola significativa creciente), manteniendo constante el valor del periodo de pico. La duración de cada una de estas series se correspondía con el tiempo necesario para la generación de un temporal de una hora en la naturaleza. Al término de la serie se tenían los registros correspondientes a los diecisiete sensores de oleaje utilizados, el tratamiento posterior de los cuales daba lugar a la agitación existente en cada uno de los puntos estudiados.

La selección de las distintas zonas de estudio se ha basado en la representatividad de las mismas, de manera que aportaran la mayor información posible de cara a la funcionalidad de la configuración en planta propuesta.

#### 3.1.2. Presentación de resultados

A continuación se muestran la totalidad de los resultados obtenidos experimentalmente acerca de la agitación (Tablas 3.1 a 3.48). Para ampliar la información, ver también el Anejo 2 fotográfico.

La presentación y elaboración de dichos resultados se ha basado en el cálculo de la altura de ola significativa existente en cada uno de los puntos de medición, para cada una de las condiciones generadas, así como su cociente con la altura de ola existente enfrente de las paletas generadoras de oleaje (es decir, el coeficiente de agitación).

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	0.90		1.89	
OL2	0.87	0.88	1.92	1.00
OL4	0.86		1.76	
OM3	0.38		0.62	0.43
OM2	0.26		0.53	0.32
OM6	0.28		0.57	0.29
OP8	0.06		0.18	0.22
OM1	0.05		0.15	0.17
OM4	0.08		0.20	0.15
OM5	0.06		0.18	0.12
OP7	0.09		0.22	0.10
OP4	0.15		0.29	0.07
OP3	0.19		0.40	0.06
OP5	0.13		0.26	0.09
OP1	0.04		0.13	0.06
OP2	0.04		0.16	0.05
OP6	0.10		0.18	0.05

Tabla 3.1: Resultados de agitación, dirección S, T<sub>p</sub>=10s, nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	2.50		4.55	
OL2	2.17	2.26	4.36	1.00
OL4	2.12		4.13	
OM3	0.80		1.57	0.35
OM2	0.61		1.10	0.32
OM6	0.72		1.56	0.27
OP8	0.12		0.29	0.24
OM1	0.06		0.16	0.19
OM4	0.12		0.27	0.13
OM5	0.10		0.20	0.11
OP7	0.22		0.38	0.10
OP4	0.44		0.79	0.04
OP3	0.54		0.86	0.03
OP5	0.30		0.60	0.05
OP1	0.03		0.13	0.05
OP2	0.04		0.13	0.02
OP6	0.24		0.42	0.02

Tabla 3.2: Resultados de agitación, dirección S, Tp=10s, nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	3.59		7.44	
OL2	3.43	3.50	6.51	1.00
OL4	3.47		6.51	
OM3	1.43		3.17	0.41
OM2	0.97		1.48	0.34
OM6	1.19		2.09	0.28
OP8	0.23		0.49	0.24
OM1	0.10		0.22	0.20
OM4	0.20		0.48	0.15
OM5	0.15		0.27	0.10
OP7	0.31		0.57	0.09
OP4	0.71		1.30	0.04
OP3	0.84		1.41	0.03
OP5	0.53		0.95	0.06
OP1	0.04		0.13	0.07
OP2	0.22		0.22	0.06
OP6	0.36		0.64	0.01

Tabla 3.3: Resultados de agitación, dirección S, T<sub>p</sub>=10s, nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s



Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	4.42		9.36	
OL2	4.26	4.30	8.40	1.00
OL4	4.23		8.17	
OM3	1.70		3.26	0.39
OM2	1.21		1.89	0.32
OM6	1.40		2.36	0.28
OP8	0.40		0.66	0.24
OM1	0.15		0.27	0.19
OM4	0.23		0.59	0.15
OM5	0.30		0.44	0.12
OP7	0.43		0.88	0.10
OP4	0.81		1.41	0.07
OP3	1.03		1.67	0.03
OP5	0.65		1.15	0.05
OP1	0.07		0.26	0.09
OP2	0.11		0.31	0.03
OP6	0.52		0.93	0.02

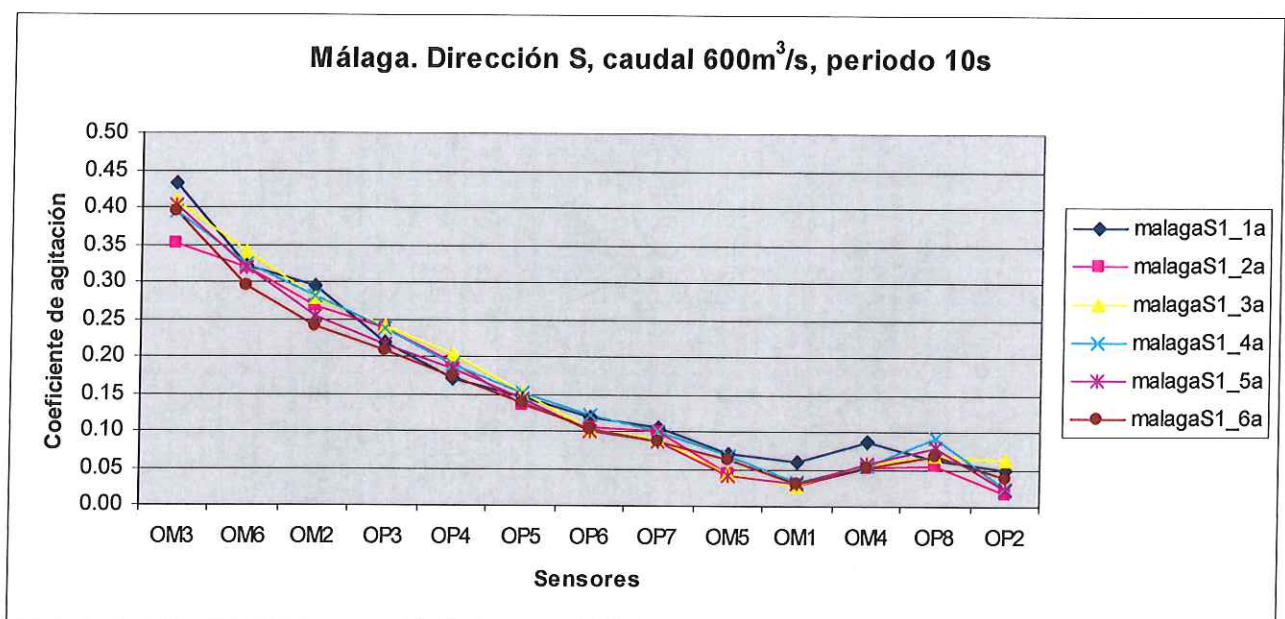
Tabla 3.4: Resultados de agitación, dirección S, T<sub>p</sub>=10s, nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	4.86		11.03	
OL2	4.75	4.76	9.26	1.00
OL4	4.67		9.49	
OM3	1.92		3.70	0.40
OM2	1.21		1.94	0.32
OM6	1.51		2.56	0.25
OP8	0.37		0.70	0.22
OM1	0.14		0.31	0.18
OM4	0.27		0.60	0.14
OM5	0.20		0.33	0.10
OP7	0.41		0.73	0.09
OP4	0.88		1.46	0.04
OP3	1.04		1.90	0.03
OP5	0.69		1.25	0.06
OP1	0.07		0.18	0.08
OP2	0.10		0.31	0.02
OP6	0.48		0.90	0.01

Tabla 3.5: Resultados de agitación, dirección S, T<sub>p</sub>=10s, nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	5.94		11.41	
OL2	5.65	5.73	12.34	1.00
OL4	5.59		11.60	
OM3	2.26		4.30	0.39
OM2	1.38		2.25	0.29
OM6	1.68		2.98	0.24
OP8	0.39		0.77	0.21
OM1	0.18		0.44	0.17
OM4	0.30		0.62	0.14
OM5	0.35		0.53	0.10
OP7	0.49		1.04	0.09
OP4	0.99		1.79	0.06
OP3	1.19		1.85	0.03
OP5	0.79		1.34	0.05
OP1	0.07		0.22	0.07
OP2	0.22		0.46	0.04
OP6	0.59		1.12	0.01

Tabla 3.6: Resultados de agitación, dirección S, Tp=10s, nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s



Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	1.12		2.21	
OL2	1.09	1.09	2.24	1.00
OL4	1.07		2.02	
OM3	0.41		0.81	0.38
OM6	0.32		0.68	0.30
OM2	0.32		0.79	0.30
OP3	0.04		0.15	0.24
OP4	0.04		0.13	0.17
OP5	0.04		0.13	0.15
OP6	0.06		0.15	0.11
OP7	0.09		0.18	0.08
OM5	0.19		0.42	0.06
OM1	0.27		0.51	0.04
OM4	0.16		0.44	0.04
OP8	0.12		0.13	0.04
OP2	0.03		0.11	0.03
OP1	0.03		0.26	0.03

Tabla 3.7: Resultados de agitación, dirección S, T<sub>p</sub>=10s, nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s



Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	2.55		4.84	
OL2	2.41	2.45	4.74	1.00
OL4	2.40		4.68	
OM3	0.99		1.96	0.40
OM6	0.68		1.23	0.30
OM2	0.73		1.34	0.28
OP3	0.12		0.26	0.24
OP4	0.08		0.16	0.17
OP5	0.10		0.22	0.15
OP6	0.14		0.27	0.12
OP7	0.20		0.37	0.08
OM5	0.43		0.77	0.06
OM1	0.58		1.15	0.03
OM4	0.38		0.81	0.04
OP8	0.04		0.11	0.05
OP2	0.04		0.09	0.02
OP1	0.28		0.55	0.02

Tabla 3.8: Resultados de agitación, dirección S, Tp=10s, nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	4.05		7.92	
OL2	3.69	3.81	7.21	1.00
OL4	3.71		6.92	
OM3	1.54		3.26	0.40
OM6	1.03		1.74	0.30
OM2	1.14		2.05	0.27
OP3	0.17		0.38	0.23
OP4	0.28		0.29	0.16
OP5	0.14		0.29	0.15
OP6	0.21		0.37	0.11
OP7	0.39		0.57	0.10
OM5	0.62		1.10	0.05
OM1	0.89		1.74	0.07
OM4	0.56		1.01	0.04
OP8	0.05		0.11	0.04
OP2	0.06		0.26	0.02
OP1	0.42		0.68	0.01

Tabla 3.9: Resultados de agitación, dirección S, T<sub>p</sub>=10s, nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	4.53		9.94	
OL2	4.38	4.42	8.59	1.00
OL4	4.36		8.33	
OM3	1.82		3.50	0.41
OM6	1.17		2.03	0.30
OM2	1.31		2.36	0.26
OP3	0.20		0.35	0.23
OP4	0.14		0.24	0.17
OP5	0.17		0.31	0.14
OP6	0.23		0.38	0.11
OP7	0.34		0.60	0.08
OM5	0.74		1.15	0.05
OM1	1.00		1.87	0.03
OM4	0.63		1.10	0.04
OP8	0.07		0.18	0.05
OP2	0.08		0.27	0.02
OP1	0.47		0.82	0.01

Tabla 3.10: Resultados de agitación, dirección S,  $T_p=10s$ , nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s

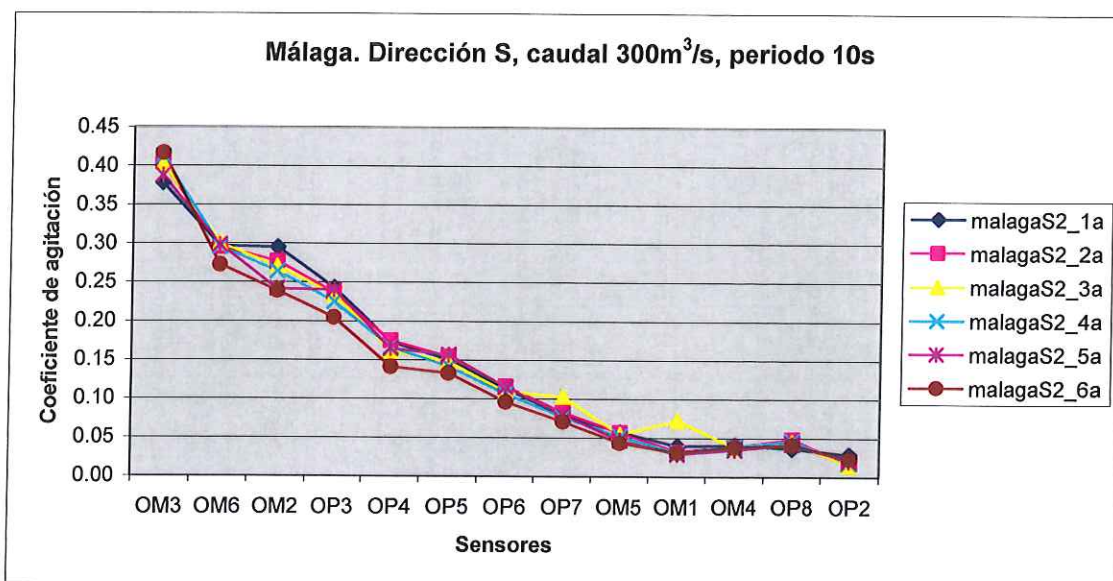
Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	5.07		9.39	
OL2	4.84	4.89	9.87	1.00
OL4	4.76		9.55	
OM3	1.90		3.77	0.39
OM6	1.18		1.90	0.30
OM2	1.46		2.42	0.24
OP3	0.21		0.53	0.24
OP4	0.14		0.31	0.16
OP5	0.17		0.37	0.16
OP6	0.23		0.35	0.12
OP7	0.39		0.70	0.08
OM5	0.81		1.28	0.05
OM1	1.18		1.76	0.03
OM4	0.77		1.15	0.03
OP8	0.10		0.29	0.04
OP2	0.10		0.31	0.02
OP1	0.56		0.82	0.02

Tabla 3.11: Resultados de agitación, dirección S, T<sub>p</sub>=10s, nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s



Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	5.91		9.97	
OL2	5.69	5.72	9.78	1.00
OL4	5.56		9.65	
OM3	2.38		4.27	0.42
OM6	1.37		2.36	0.27
OM2	1.56		2.89	0.24
OP3	0.23		0.59	0.20
OP4	0.18		0.53	0.14
OP5	0.22		0.38	0.13
OP6	0.25		0.44	0.10
OP7	0.40		0.64	0.07
OM5	0.81		1.43	0.04
OM1	1.17		1.90	0.03
OM4	0.76		1.21	0.04
OP8	0.10		0.29	0.04
OP2	0.13		0.48	0.02
OP1	0.55		0.88	0.02

Tabla 3.12: Resultados de agitación, dirección S, Tp=10s, nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s



Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	0.78		1.73	
OL2	0.74	0.76	1.54	1.00
OL4	0.76		1.60	
OM3	0.47		0.97	0.62
OM6	0.25		0.59	0.33
OM2	0.19		0.42	0.25
OP3	0.15		0.35	0.20
OP4	0.12		0.31	0.16
OP5	0.12		0.33	0.16
OP6	0.10		0.24	0.14
OP7	0.09		0.18	0.11
OM5	0.06		0.15	0.08
OM1	0.06		0.16	0.08
OM4	0.07		0.18	0.09
OP8	0.06		0.14	0.08
OP2	0.05		0.18	0.07
OP1	0.06		0.19	0.07

Tabla 3.13: Resultados de agitación, dirección S,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	2.10		3.72	
OL2	2.02	2.06	3.85	1.00
OL4	2.06		3.72	
OM3	1.25		2.80	0.61
OM6	0.90		2.05	0.44
OM2	0.53		1.14	0.26
OP3	0.45		0.77	0.22
OP4	0.38		0.71	0.18
OP5	0.32		0.77	0.15
OP6	0.26		0.57	0.13
OP7	0.20		0.44	0.10
OM5	0.09		0.18	0.04
OM1	0.06		0.13	0.03
OM4	0.12		0.26	0.06
OP8	0.07		0.18	0.03
OP2	0.09		0.22	0.04
OP1	0.05		0.11	0.02

Tabla 3.14: Resultados de agitación, dirección S,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	3.23		5.87	
OL2	3.05	3.12	5.48	1.00
OL4	3.10		5.90	
OM3	1.94		3.66	0.62
OM6	1.36		2.53	0.43
OM2	0.77		1.32	0.25
OP3	0.66		1.26	0.21
OP4	0.58		1.21	0.18
OP5	0.49		0.93	0.16
OP6	0.39		0.82	0.12
OP7	0.25		0.49	0.08
OM5	0.14		0.26	0.05
OM1	0.08		0.20	0.03
OM4	0.20		0.42	0.07
OP8	0.10		0.35	0.03
OP2	0.15		0.46	0.05
OP1	0.07		0.18	0.02

Tabla 3.15: Resultados de agitación, dirección S,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s



Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	4.28		7.95	
OL2	4.05	4.14	7.09	1.00
OL4	4.08		7.21	
OM3	2.48		4.87	0.60
OM6	1.73		3.08	0.42
OM2	0.96		1.76	0.23
OP3	0.83		1.32	0.20
OP4	0.74		1.48	0.18
OP5	0.62		1.15	0.15
OP6	0.49		0.97	0.12
OP7	0.35		0.68	0.08
OM5	0.18		0.33	0.04
OM1	0.11		0.29	0.03
OM4	0.25		0.49	0.06
OP8	0.13		0.38	0.03
OP2	0.22		0.46	0.05
OP1	0.09		0.22	0.02

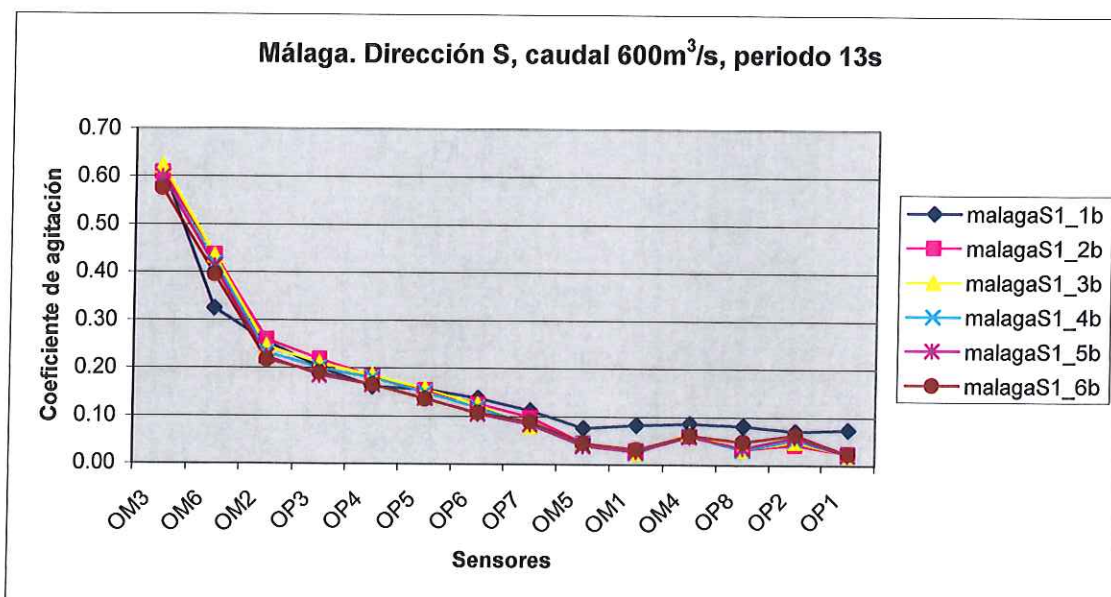
Tabla 3.16: Resultados de agitación, dirección S,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	5.32		9.94	
OL2	4.96	5.16	9.78	1.00
OL4	5.19		9.84	
OM3	3.09		6.23	0.60
OM6	2.13		4.17	0.41
OM2	1.15		2.03	0.22
OP3	0.95		1.70	0.18
OP4	0.85		1.57	0.17
OP5	0.70		1.36	0.14
OP6	0.54		0.99	0.11
OP7	0.43		0.99	0.08
OM5	0.20		0.39	0.04
OM1	0.14		0.35	0.03
OM4	0.30		0.64	0.06
OP8	0.18		0.64	0.04
OP2	0.30		0.70	0.06
OP1	0.11		0.29	0.02

Tabla 3.17: Resultados de agitación, dirección S,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal  $600\text{ m}^3/s$

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	6.53		12.37	
OL2	6.01	6.26	13.40	1.00
OL4	6.25		10.87	
OM3	3.60		7.60	0.58
OM2	2.48		5.02	0.40
OM6	1.36		2.67	0.22
OP8	1.19		2.29	0.19
OM1	1.03		2.00	0.16
OM4	0.85		1.46	0.14
OM5	0.67		1.45	0.11
OP7	0.56		1.04	0.09
OP4	0.27		0.64	0.04
OP3	0.20		0.59	0.03
OP5	0.38		0.75	0.06
OP1	0.30		0.71	0.05
OP2	0.40		0.90	0.06
OP6	0.14		0.35	0.02

Tabla 3.18: Resultados de agitación, dirección S,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal  $600\text{ m}^3/s$



Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	1.02		2.05	
OL2	0.97	0.98	1.96	1.00
OL4	0.96		1.79	
OM3	0.53		1.01	0.54
OM6	0.45		0.90	0.46
OM2	0.22		0.51	0.23
OP3	0.12		0.33	0.12
OP4	0.09		0.20	0.09
OP5	0.11		0.26	0.11
OP6	0.07		0.18	0.08
OP7	0.07		0.16	0.07
OM5	0.04		0.11	0.04
OM1	0.04		0.08	0.04
OM4	0.04		0.11	0.04
OP8	0.04		0.09	0.04
OP2	0.04		0.09	0.04
OP1	0.03		0.07	0.04

Tabla 3.19: Resultados de agitación, dirección S,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s



Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	2.02		3.85	
OL2	1.89	1.95	3.62	1.00
OL4	1.94		3.59	
OM3	1.01		2.00	0.52
OM6	0.84		1.79	0.43
OM2	0.45		1.04	0.23
OP3	0.26		0.57	0.13
OP4	0.19		0.49	0.10
OP5	0.21		0.46	0.11
OP6	0.14		0.29	0.07
OP7	0.13		0.31	0.07
OM5	0.07		0.15	0.03
OM1	0.05		0.11	0.03
OM4	0.07		0.20	0.04
OP8	0.06		0.16	0.03
OP2	0.05		0.13	0.03
OP1	0.04		0.09	0.02

Tabla 3.20: Resultados de agitación, dirección S,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	3.17		5.45	
OL2	2.94	3.04	5.32	1.00
OL4	2.99		5.29	
OM3	1.69		3.37	0.56
OM6	1.45		2.62	0.48
OM2	0.74		1.52	0.24
OP3	0.51		0.93	0.17
OP4	0.36		0.68	0.12
OP5	0.37		0.73	0.12
OP6	0.25		0.48	0.08
OP7	0.21		0.44	0.07
OM5	0.08		0.16	0.03
OM1	0.07		0.20	0.02
OM4	0.11		0.27	0.04
OP8	0.08		0.28	0.03
OP2	0.06		0.16	0.02
OP1	0.05		0.13	0.02

Tabla 3.21: Resultados de agitación, dirección S,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	4.25		8.17	
OL2	3.98	4.10	6.73	1.00
OL4	4.07		7.18	
OM3	2.31		4.82	0.56
OM6	1.84		3.20	0.45
OM2	0.97		1.79	0.24
OP3	0.72		1.28	0.17
OP4	0.53		0.99	0.13
OP5	0.52		1.08	0.13
OP6	0.38		0.77	0.09
OP7	0.33		0.57	0.08
OM5	0.12		0.27	0.03
OM1	0.10		0.26	0.03
OM4	0.16		0.33	0.04
OP8	0.13		0.37	0.03
OP2	0.11		0.27	0.03
OP1	0.07		0.20	0.02

Tabla 3.22: Resultados de agitación, dirección S, T<sub>p</sub>=13s, nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s

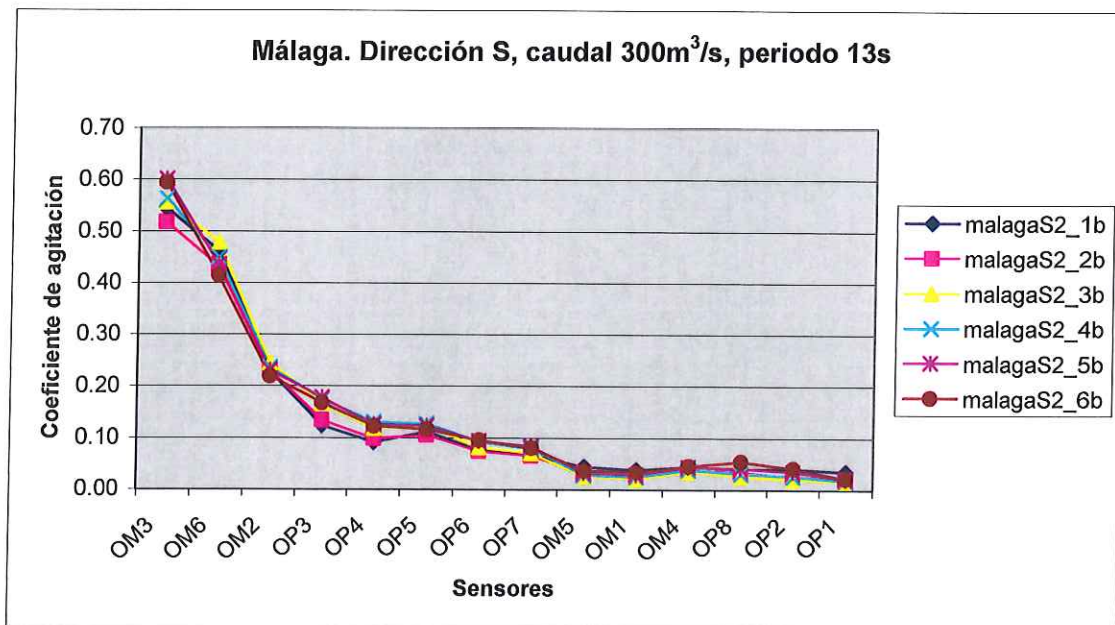
Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	5.24		9.62	
OL2	4.88	5.08	9.65	1.00
OL4	5.12		9.81	
OM3	3.05		5.38	0.60
OM6	2.21		4.50	0.44
OM2	1.17		2.38	0.23
OP3	0.90		1.68	0.18
OP4	0.64		1.32	0.13
OP5	0.63		1.36	0.12
OP6	0.48		0.92	0.09
OP7	0.42		0.77	0.08
OM5	0.16		0.40	0.03
OM1	0.15		0.35	0.03
OM4	0.22		0.49	0.04
OP8	0.21		0.62	0.04
OP2	0.18		0.46	0.04
OP1	0.10		0.25	0.02

Tabla 3.23: Resultados de agitación, dirección S,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s



Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	6.45		12.21	
OL2	6.00	6.22	13.43	1.00
OL4	6.22		10.48	
OM3	3.70		7.49	0.59
OM6	2.58		5.40	0.41
OM2	1.36		2.73	0.22
OP3	1.04		2.00	0.17
OP4	0.76		2.11	0.12
OP5	0.72		1.59	0.12
OP6	0.59		1.30	0.10
OP7	0.50		1.01	0.08
OM5	0.23		0.57	0.04
OM1	0.21		0.59	0.03
OM4	0.28		0.62	0.05
OP8	0.34		0.77	0.05
OP2	0.26		0.62	0.04
OP1	0.13		0.33	0.02

Tabla 3.24: Resultados de agitación, dirección S, Tp=13s, nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s



Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	0.79		1.73	
OL2	0.80	0.79	1.86	1.00
OL4	0.79		1.70	
OM3	0.23		0.51	0.28
OM6	0.17		0.37	0.22
OM2	0.16		0.37	0.21
OP3	0.12		0.29	0.15
OP4	0.08		0.18	0.10
OP5	0.08		0.16	0.10
OP6	0.06		0.15	0.08
OP7	0.05		0.11	0.07
OM5	0.04		0.11	0.05
OM1	0.04		0.09	0.05
OM4	0.04		0.11	0.05
OP8	0.04		0.12	0.05
OP2	0.03		0.07	0.04
OP1	0.03		0.07	0.04

Tabla 3.25: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=10s$ , nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	2.28		4.30	
OL2	2.31	2.30	4.49	1.00
OL4	2.31		4.10	
OM3	0.71		1.45	0.31
OM6	0.51		1.26	0.22
OM2	0.46		0.92	0.20
OP3	0.40		0.88	0.17
OP4	0.26		0.60	0.11
OP5	0.21		0.51	0.09
OP6	0.15		0.29	0.07
OP7	0.12		0.26	0.05
OM5	0.07		0.15	0.03
OM1	0.05		0.11	0.02
OM4	0.05		0.13	0.02
OP8	0.04		0.16	0.02
OP2	0.05		0.13	0.02
OP1	0.03		0.07	0.01

Tabla 3.26: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=10s$ , nivel +0.0m, Caudal  $600 m^3/s$

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	3.47		7.82	
OL2	3.49	3.49	7.31	1.00
OL4	3.52		7.76	
OM3	1.14		2.40	0.33
OM6	0.83		1.57	0.24
OM2	0.70		1.26	0.20
OP3	0.65		1.12	0.19
OP4	0.49		0.88	0.14
OP5	0.39		0.77	0.11
OP6	0.27		0.57	0.08
OP7	0.20		0.38	0.06
OM5	0.11		0.24	0.03
OM1	0.07		0.22	0.02
OM4	0.09		0.26	0.03
OP8	0.07		0.29	0.02
OP2	0.09		0.26	0.03
OP1	0.04		0.11	0.01

Tabla 3.27: Resultados de agitación, dirección ESE, T<sub>p</sub>=10s, nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s



Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	4.14		8.85	
OL2	4.13	4.11	8.94	1.00
OL4	4.07		9.07	
OM3	1.22		2.34	0.30
OM6	0.91		1.85	0.22
OM2	0.75		1.30	0.18
OP3	0.68		1.14	0.17
OP4	0.53		1.08	0.13
OP5	0.44		0.88	0.11
OP6	0.29		0.62	0.07
OP7	0.23		0.46	0.06
OM5	0.12		0.22	0.03
OM1	0.08		0.18	0.02
OM4	0.12		0.27	0.03
OP8	0.08		0.27	0.02
OP2	0.12		0.26	0.03
OP1	0.04		0.15	0.01

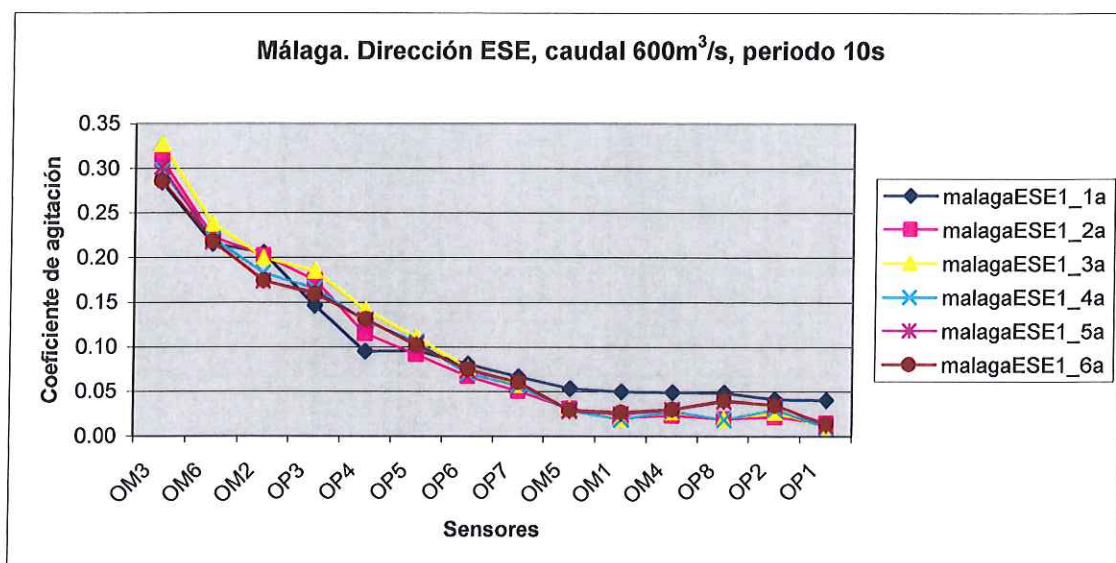
Tabla 3.28: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=10s$ , nivel +0.0m, Caudal  $600 m^3/s$

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	5.66		10.96	
OL2	5.68	5.67	11.54	1.00
OL4	5.66		11.28	
OM3	1.71		3.79	0.30
OM6	1.23		2.14	0.22
OM2	0.99		1.72	0.17
OP3	0.91		1.46	0.16
OP4	0.74		1.43	0.13
OP5	0.58		1.14	0.10
OP6	0.42		0.71	0.07
OP7	0.34		0.68	0.06
OM5	0.16		0.33	0.03
OM1	0.14		0.44	0.02
OM4	0.17		0.38	0.03
OP8	0.22		0.55	0.04
OP2	0.20		0.57	0.04
OP1	0.07		0.26	0.01

Tabla 3.29: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=10s$ , nivel +0.0m, Caudal  $600 m^3/s$

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	6.73		12.76	
OL2	6.56	6.66	11.38	1.00
OL4	6.69		11.92	
OM3	1.90		3.92	0.29
OM6	1.45		2.76	0.22
OM2	1.16		1.89	0.17
OP3	1.06		2.42	0.16
OP4	0.87		1.85	0.13
OP5	0.68		1.52	0.10
OP6	0.50		1.04	0.07
OP7	0.40		0.84	0.06
OM5	0.19		0.57	0.03
OM1	0.18		0.62	0.03
OM4	0.20		0.60	0.03
OP8	0.27		0.82	0.04
OP2	0.23		0.73	0.03
OP1	0.09		0.51	0.01

Tabla 3.30: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=10s$ , nivel +0.0m, Caudal  $600\text{ m}^3/s$



Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	1.02		2.02	
OL2	1.01	1.00	2.08	1.00
OL4	0.98		2.08	
OM3	0.28		0.49	0.28
OM6	0.23		0.49	0.23
OM2	0.22		0.46	0.21
OP3	0.14		0.33	0.14
OP4	0.11		0.26	0.11
OP5	0.12		0.29	0.12
OP6	0.09		0.18	0.09
OP7	0.07		0.15	0.07
OM5	0.05		0.09	0.05
OM1	0.04		0.08	0.04
OM4	0.03		0.08	0.03
OP8	0.04		0.12	0.04
OP2	0.03		0.06	0.03
OP1	0.03		0.06	0.03

Tabla 3.31: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=10s$ , nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s



Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	2.36		4.33	
OL2	2.40	2.39	4.84	1.00
OL4	2.41		4.68	
OM3	0.71		1.32	0.29
OM6	0.57		1.28	0.24
OM2	0.51		1.03	0.21
OP3	0.42		0.86	0.17
OP4	0.28		0.62	0.12
OP5	0.29		0.57	0.12
OP6	0.20		0.40	0.08
OP7	0.14		0.27	0.06
OM5	0.09		0.18	0.04
OM1	0.06		0.13	0.02
OM4	0.06		0.13	0.02
OP8	0.05		0.15	0.02
OP2	0.04		0.11	0.02
OP1	0.03		0.07	0.01

Tabla 3.32: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=10s$ , nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	3.65		8.17	
OL2	3.67	3.65	7.24	1.00
OL4	3.62		7.60	
OM3	1.11		2.23	0.31
OM6	0.83		1.68	0.23
OM2	0.75		1.30	0.20
OP3	0.64		1.15	0.18
OP4	0.43		0.71	0.12
OP5	0.43		0.71	0.12
OP6	0.31		0.53	0.09
OP7	0.23		0.49	0.06
OM5	0.13		0.24	0.03
OM1	0.08		0.22	0.02
OM4	0.09		0.18	0.03
OP8	0.07		0.33	0.02
OP2	0.07		0.16	0.02
OP1	0.04		0.11	0.01

Tabla 3.33: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=10s$ , nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	4.34		8.75	
OL2	4.36	4.30	8.78	1.00
OL4	4.20		8.46	
OM3	1.32		2.51	0.31
OM6	0.97		1.70	0.23
OM2	0.86		1.50	0.20
OP3	0.73		1.43	0.17
OP4	0.49		0.82	0.11
OP5	0.47		0.88	0.11
OP6	0.35		0.68	0.08
OP7	0.27		0.49	0.06
OM5	0.16		0.33	0.04
OM1	0.10		0.27	0.02
OM4	0.11		0.27	0.03
OP8	0.10		0.35	0.02
OP2	0.09		0.26	0.02
OP1	0.05		0.20	0.01

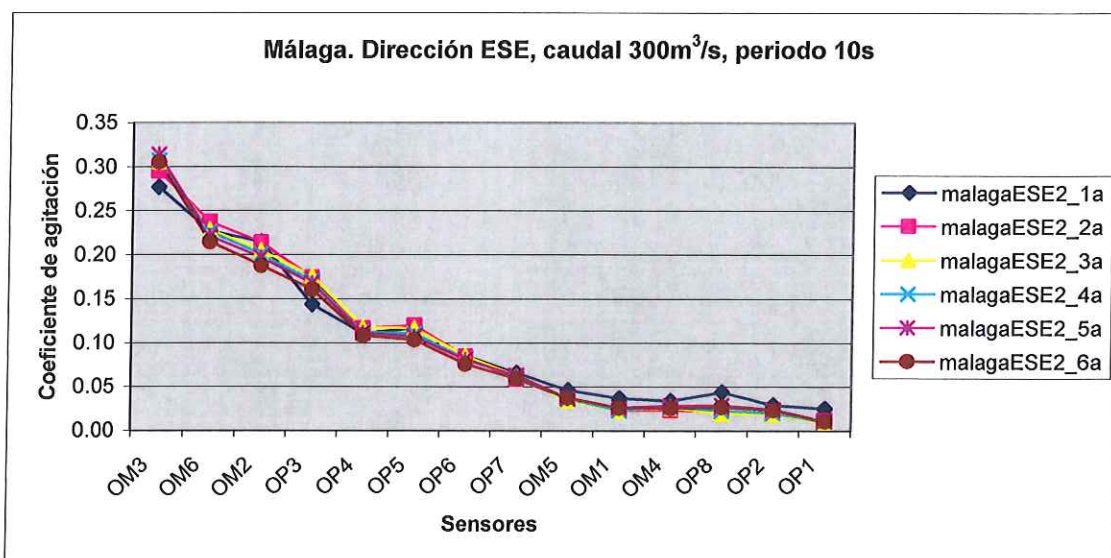
Tabla 3.34: Resultados de agitación, dirección ESE, T<sub>p</sub>=10s, nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	4.91		10.93	
OL2	4.94	4.91	10.87	1.00
OL4	4.88		10.29	
OM3	1.54		2.86	0.31
OM6	1.08		2.01	0.22
OM2	0.97		1.65	0.20
OP3	0.82		1.41	0.17
OP4	0.55		0.93	0.11
OP5	0.53		0.88	0.11
OP6	0.40		0.66	0.08
OP7	0.31		0.57	0.06
OM5	0.18		0.37	0.04
OM1	0.13		0.37	0.03
OM4	0.14		0.35	0.03
OP8	0.14		0.44	0.03
OP2	0.12		0.33	0.02
OP1	0.05		0.15	0.01

Tabla 3.35: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=10s$ , nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	5.87		12.12	
OL2	5.81	5.83	11.57	1.00
OL4	5.80		10.48	
OM3	1.78		3.20	0.31
OM6	1.25		2.09	0.21
OM2	1.09		1.98	0.19
OP3	0.93		1.76	0.16
OP4	0.63		1.26	0.11
OP5	0.60		1.04	0.10
OP6	0.44		0.77	0.08
OP7	0.35		0.70	0.06
OM5	0.22		0.46	0.04
OM1	0.15		0.57	0.03
OM4	0.15		0.37	0.03
OP8	0.16		0.70	0.03
OP2	0.14		0.57	0.02
OP1	0.06		0.26	0.01

Tabla 3.36: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=10s$ , nivel +0.0m, Caudal  $300\text{ m}^3/s$





Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	0.85		1.73	
OL2	0.80	0.83	1.54	1.00
OL4	0.84		1.73	
OM3	0.31		0.62	0.38
OM6	0.25		0.49	0.30
OM2	0.20		0.37	0.23
OP3	0.12		0.29	0.15
OP4	0.08		0.18	0.10
OP5	0.09		0.20	0.11
OP6	0.08		0.17	0.09
OP7	0.06		0.13	0.07
OM5	0.04		0.11	0.05
OM1	0.03		0.13	0.04
OM4	0.04		0.11	0.05
OP8	0.05		0.13	0.06
OP2	0.03		0.07	0.04
OP1	0.03		0.09	0.04

Tabla 3.37: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	2.05		3.75	
OL2	1.93	2.00	3.46	1.00
OL4	2.02		3.75	
OM3	0.78		1.70	0.39
OM6	0.66		1.46	0.33
OM2	0.44		0.92	0.22
OP3	0.29		0.59	0.15
OP4	0.24		0.60	0.12
OP5	0.23		0.49	0.11
OP6	0.17		0.35	0.08
OP7	0.13		0.31	0.06
OM5	0.07		0.13	0.03
OM1	0.05		0.11	0.02
OM4	0.08		0.16	0.04
OP8	0.06		0.15	0.03
OP2	0.07		0.15	0.03
OP1	0.04		0.07	0.02

Tabla 3.38: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	3.01		5.22	
OL2	2.80	2.91	5.10	1.00
OL4	2.93		5.19	
OM3	1.25		2.20	0.43
OM6	1.04		1.79	0.36
OM2	0.63		1.10	0.22
OP3	0.47		0.79	0.16
OP4	0.40		0.75	0.14
OP5	0.35		0.70	0.12
OP6	0.25		0.46	0.09
OP7	0.18		0.38	0.06
OM5	0.08		0.17	0.03
OM1	0.06		0.25	0.02
OM4	0.11		0.24	0.04
OP8	0.07		0.33	0.02
OP2	0.11		0.27	0.04
OP1	0.04		0.13	0.02

Tabla 3.39: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	4.10		8.75	
OL2	3.87	4.01	7.50	1.00
OL4	4.06		7.47	
OM3	1.75		3.50	0.44
OM6	1.43		2.67	0.36
OM2	0.83		1.56	0.21
OP3	0.67		1.25	0.17
OP4	0.54		1.01	0.13
OP5	0.45		0.86	0.11
OP6	0.32		0.60	0.08
OP7	0.26		0.49	0.07
OM5	0.13		0.26	0.03
OM1	0.09		0.37	0.02
OM4	0.17		0.44	0.04
OP8	0.13		0.44	0.03
OP2	0.17		0.40	0.04
OP1	0.06		0.24	0.01

Tabla 3.40: Resultados de agitación, dirección ESE, T<sub>p</sub>=13s, nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s

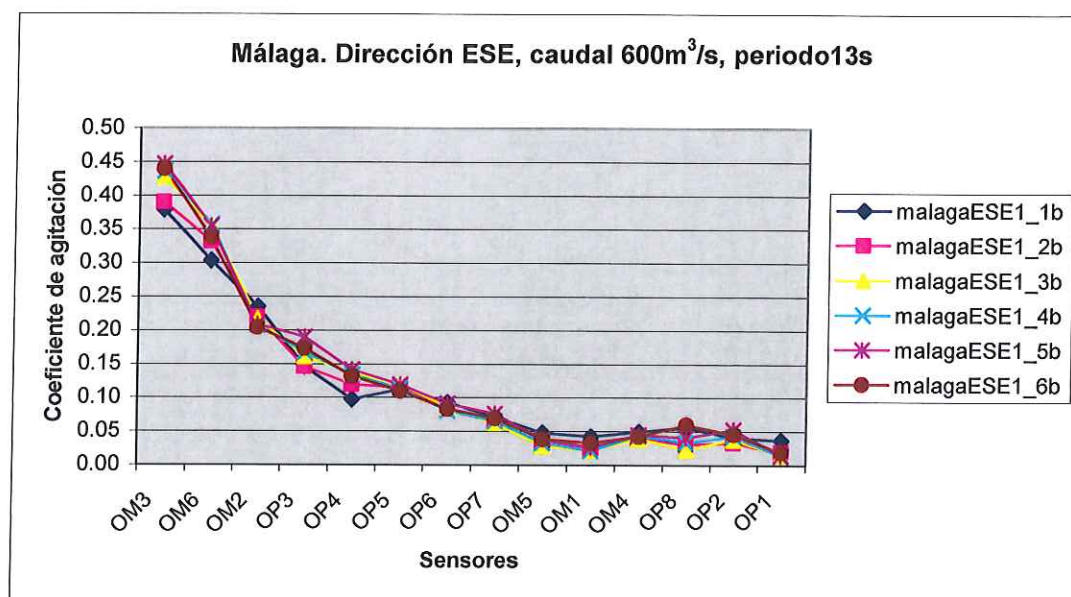
Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	5.15		10.16	
OL2	4.80	4.97	8.62	1.00
OL4	4.98		9.58	
OM3	2.22		4.76	0.45
OM6	1.76		3.13	0.35
OM2	1.04		1.65	0.21
OP3	0.94		1.65	0.19
OP4	0.70		1.25	0.14
OP5	0.59		1.01	0.12
OP6	0.45		0.77	0.09
OP7	0.38		0.66	0.08
OM5	0.19		0.40	0.04
OM1	0.13		0.42	0.03
OM4	0.22		0.55	0.04
OP8	0.20		0.59	0.04
OP2	0.26		0.57	0.05
OP1	0.07		0.25	0.01

Tabla 3.41: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 600 m<sup>3</sup>/s



Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	6.25		11.89	
OL2	5.77	6.05	9.87	1.00
OL4	6.13		10.67	
OM3	2.66		5.18	0.44
OM6	2.04		3.72	0.34
OM2	1.23		2.03	0.20
OP3	1.05		1.83	0.17
OP4	0.80		1.61	0.13
OP5	0.66		1.21	0.11
OP6	0.50		0.95	0.08
OP7	0.42		0.90	0.07
OM5	0.23		0.75	0.04
OM1	0.20		0.49	0.03
OM4	0.26		0.57	0.04
OP8	0.36		0.73	0.06
OP2	0.28		0.59	0.05
OP1	0.11		0.48	0.02

Tabla 3.42: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal  $600\text{ m}^3/s$



Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	0.96		1.99	
OL2	0.90	0.94	1.79	1.00
OL4	0.95		1.83	
OM3	0.42		0.77	0.45
OM6	0.35		0.59	0.38
OM2	0.25		0.44	0.27
OP3	0.16		0.31	0.18
OP4	0.11		0.24	0.12
OP5	0.11		0.24	0.12
OP6	0.08		0.17	0.09
OP7	0.07		0.15	0.07
OM5	0.04		0.10	0.04
OM1	0.03		0.07	0.03
OM4	0.04		0.08	0.04
OP8	0.04		0.09	0.04
OP2	0.03		0.07	0.03
OP1	0.02		0.06	0.03

Tabla 3.43: Resultados de agitación, dirección ESE, T<sub>p</sub>=13s, nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	2.13		3.72	
OL2	2.00	2.08	3.46	1.00
OL4	2.09		3.72	
OM3	0.94		1.90	0.45
OM6	0.80		1.59	0.39
OM2	0.54		1.01	0.26
OP3	0.38		0.75	0.18
OP4	0.26		0.48	0.12
OP5	0.25		0.48	0.12
OP6	0.18		0.37	0.09
OP7	0.13		0.29	0.06
OM5	0.08		0.16	0.04
OM1	0.05		0.13	0.03
OM4	0.07		0.16	0.03
OP8	0.05		0.18	0.03
OP2	0.05		0.15	0.03
OP1	0.03		0.09	0.02

Tabla 3.44: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	3.20		5.55	
OL2	2.98	3.10	5.64	1.00
OL4	3.12		5.61	
OM3	1.40		2.42	0.45
OM6	1.15		2.20	0.37
OM2	0.75		1.37	0.24
OP3	0.54		0.99	0.17
OP4	0.36		0.64	0.11
OP5	0.36		0.73	0.12
OP6	0.26		0.51	0.08
OP7	0.20		0.38	0.07
OM5	0.13		0.22	0.04
OM1	0.08		0.24	0.03
OM4	0.11		0.24	0.04
OP8	0.09		0.29	0.03
OP2	0.10		0.24	0.03
OP1	0.05		0.12	0.01

Tabla 3.45: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	4.20		8.53	
OL2	4.05	4.15	7.28	1.00
OL4	4.19		8.05	
OM3	1.87		3.64	0.45
OM6	1.46		2.80	0.35
OM2	0.94		1.70	0.23
OP3	0.72		1.28	0.17
OP4	0.46		0.99	0.11
OP5	0.47		0.92	0.11
OP6	0.36		0.62	0.09
OP7	0.30		0.57	0.07
OM5	0.18		0.42	0.04
OM1	0.12		0.46	0.03
OM4	0.16		0.33	0.04
OP8	0.15		0.46	0.04
OP2	0.15		0.35	0.04
OP1	0.07		0.20	0.02

Tabla 3.46: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s

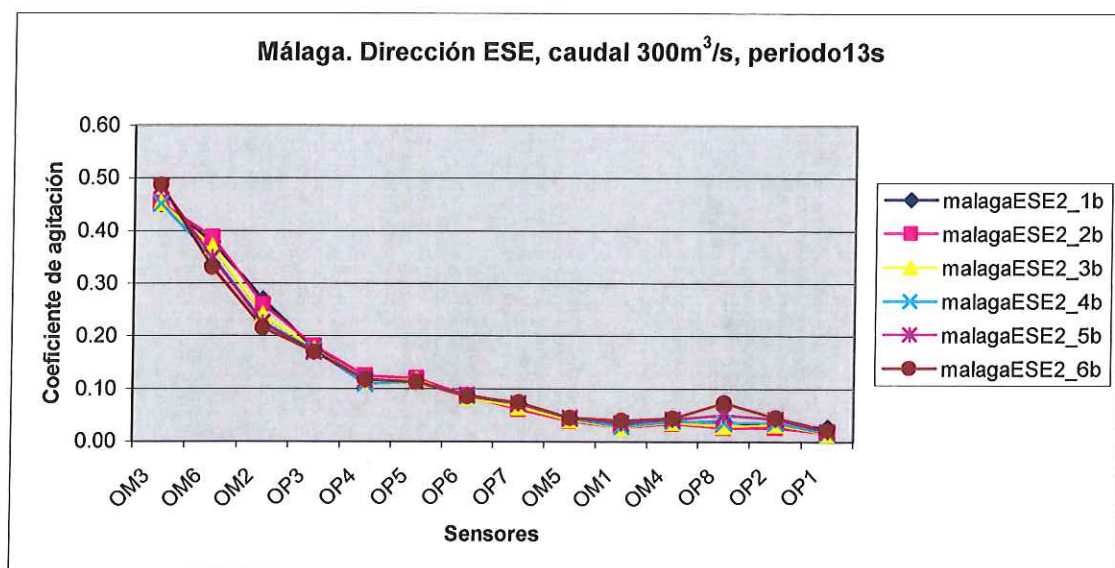


Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	5.24		10.22	
OL2	4.97	5.12	9.46	1.00
OL4	5.16		9.90	
OM3	2.48		4.65	0.48
OM6	1.79		3.33	0.35
OM2	1.15		2.05	0.22
OP3	0.87		1.48	0.17
OP4	0.60		1.23	0.12
OP5	0.59		1.19	0.11
OP6	0.45		0.91	0.09
OP7	0.37		0.66	0.07
OM5	0.23		0.48	0.04
OM1	0.18		0.56	0.03
OM4	0.21		0.49	0.04
OP8	0.26		0.66	0.05
OP2	0.21		0.48	0.04
OP1	0.09		0.24	0.02

Tabla 3.47: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal 300 m<sup>3</sup>/s

Sensores	Hs (m)	Hs media (m)	H Max (m)	K <sub>a</sub>
OL1	6.42		11.31	
OL2	6.00	6.22	10.13	1.00
OL4	6.25		11.80	
OM3	3.03		5.71	0.49
OM6	2.06		3.59	0.33
OM2	1.34		2.38	0.22
OP3	1.06		1.81	0.17
OP4	0.73		1.52	0.12
OP5	0.70		1.35	0.11
OP6	0.53		1.01	0.09
OP7	0.46		0.90	0.07
OM5	0.28		0.93	0.04
OM1	0.25		0.59	0.04
OM4	0.27		0.64	0.04
OP8	0.46		0.90	0.07
OP2	0.28		0.68	0.04
OP1	0.13		0.46	0.02

Tabla 3.48: Resultados de agitación, dirección ESE,  $T_p=13s$ , nivel +0.0m, Caudal  $300\text{ m}^3/s$





## Capítulo 4. Conclusiones de los ensayos en modelo físico

### 4.1. Conclusiones

Tras la ejecución de los ensayos experimentales y el análisis de resultados correspondiente, puede resumirse y concluirse lo siguiente:

- Los oleajes incidentes del S dan lugar a unos coeficientes de agitación superiores a los incidentes del ESE.
- Independientemente del caudal aportado por el río Guadalmedina, los oleajes de 13s de periodo de pico dan lugar a unos coeficientes de agitación superiores a los de 10s.
- Así por ejemplo, en la zona de la bocana, para oleajes incidentes del S se obtienen unos coeficientes de agitación medios inferiores al 45% para periodos de 10s, aumentando dicho límite al 60% en el caso de oleajes de 13s de periodo de pico. En el caso de la dirección ESE sucede un comportamiento análogo: los coeficientes de agitación medios son inferiores al 35% y 50% para periodos de 10s y 13s respectivamente.
- Por otro lado, en la zona ubicada aguas arriba del río Guadalmedina, se obtienen coeficientes de agitación inferiores al 5% en la mayoría de los casos analizados, independientemente de la incidencia del oleaje, de su periodo de pico y de la aportación de caudal del río.

Como consecuencia de todo lo anterior, puede confirmarse que la influencia del caudal aportado por el río Guadalmedina en la agitación existente en distintos puntos de la zona de actuación es mínima. Por tanto, la ubicación de las dársenas portuarias en la desembocadura del río no se verá muy afectada por la aportación del mismo, independientemente del caudal aportado.

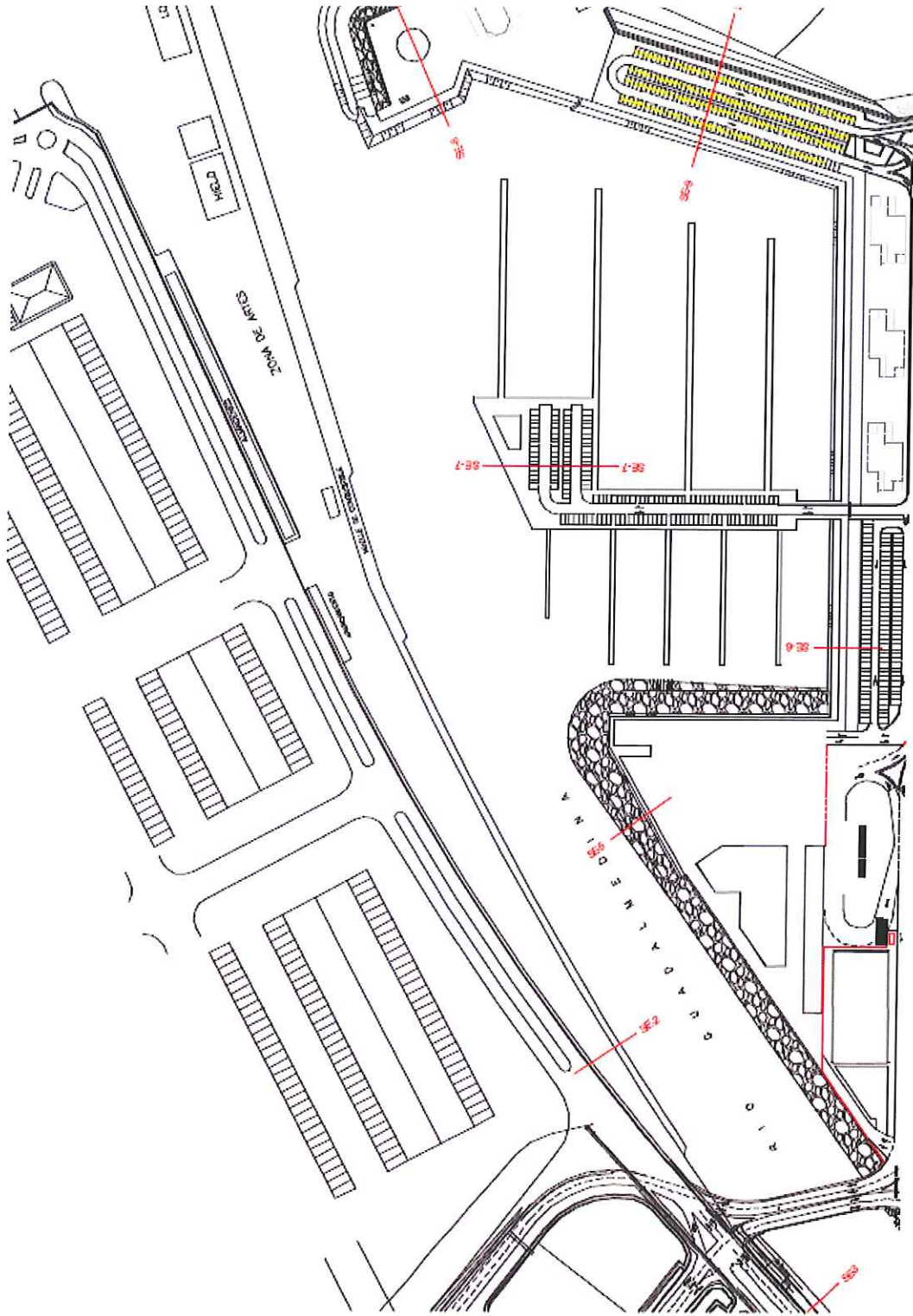




## Anejo 1. Anejo de planos 3D

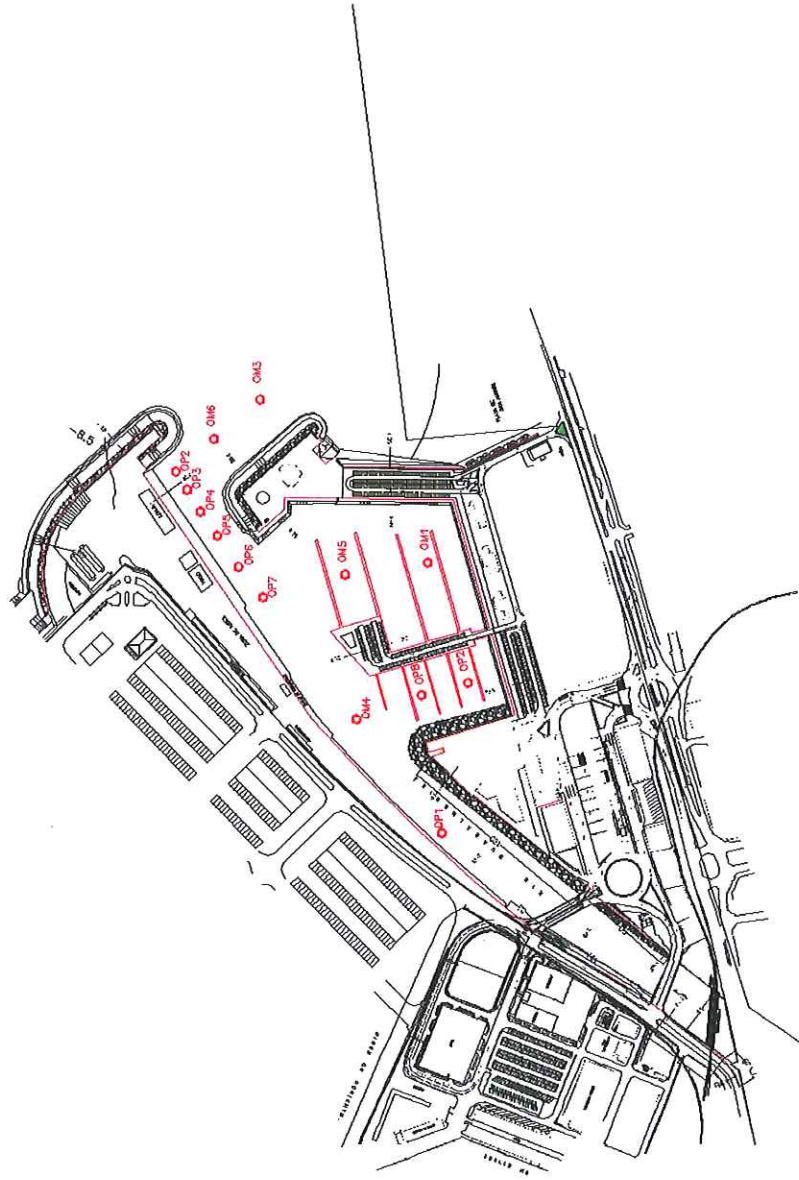
A continuación se presentan una serie de planos representativos del modelo reducido que se ha ensayado:

- Plano 1: Planta general.
- Plano 2: Ubicación de los sensores.



Plano 1: Planta general.

OL1      OL2      OL4



*Plano2: Ubicación de los sensores.*



## Anejo 2. Anejo fotográfico 3D

A continuación se presenta un reportaje fotográfico acerca del proceso constructivo de los modelos reducidos, así como de cada uno de los ensayos de llevados a cabo:

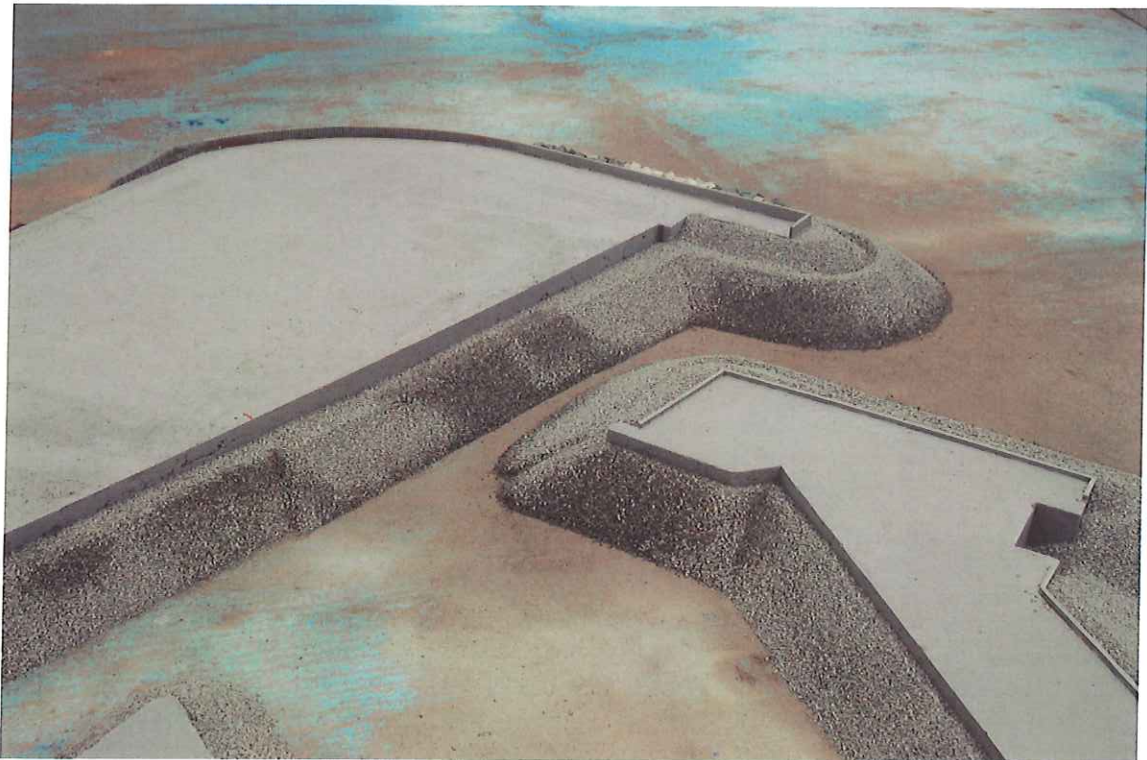
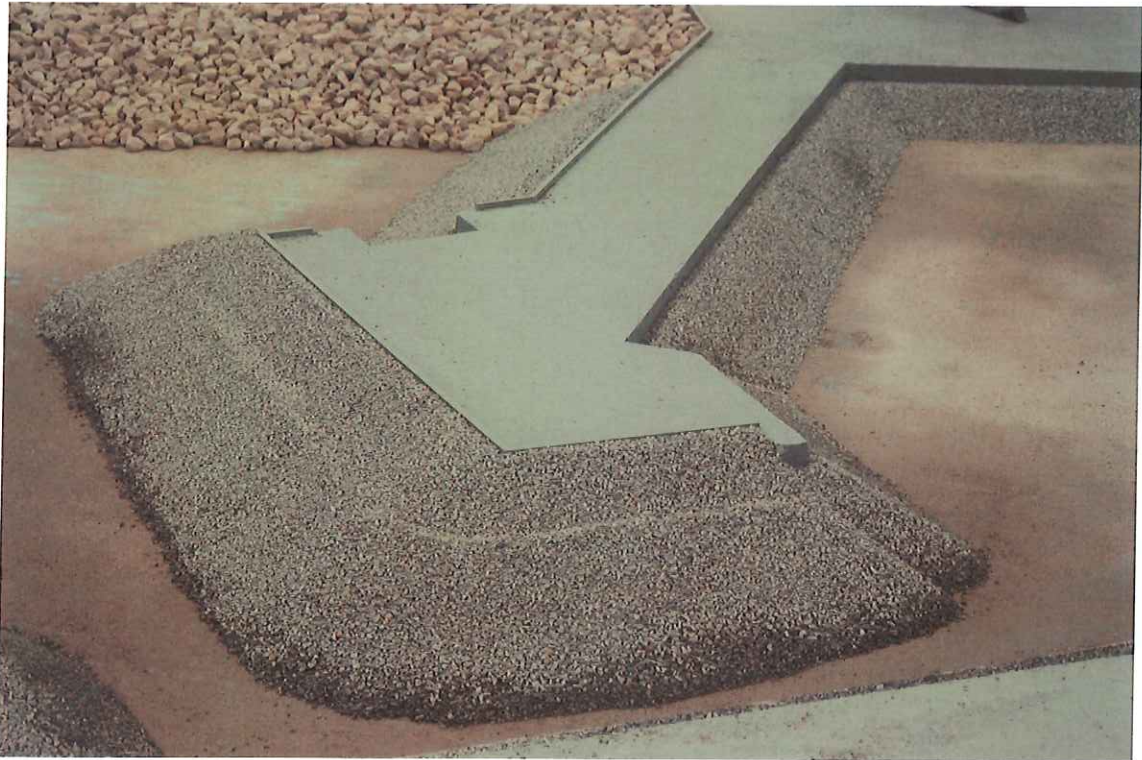
- Proceso Constructivo
- Ensayos para la dirección S
- Ensayos para la dirección ESE



## PROCESO CONSTRUCTIVO







## **ENSAYOS PARA LA DIRECCIÓN SUR**





*$T_p=10s$ , caudal  $300\text{ m}^3/s$*



*$T_p=10s$ , caudal  $300\text{ m}^3/s$*





*$T_p=10s$ , caudal  $300\text{ m}^3/s$*



*$T_p=10s$ , caudal  $300\text{ m}^3/s$*





*$T_p=10s$ , caudal  $600\text{ m}^3/s$*



*$T_p=10s$ , caudal  $600\text{ m}^3/s$*





*$T_p=10s$ , caudal  $600 \text{ m}^3/s$*



*$T_p=10s$ , caudal  $600 \text{ m}^3/s$*





*$T_p=13s$ , caudal  $300\text{ m}^3/s$*



*$T_p=13s$ , caudal  $300\text{ m}^3/s$*





*$T_p=13s$ , caudal  $300 \text{ m}^3/s$*



*$T_p=13s$ , caudal  $300 \text{ m}^3/s$*





*$T_p=13s$ , caudal  $600\text{ m}^3/s$*



*$T_p=13s$ , caudal  $600\text{ m}^3/s$*

## **ENSAYOS PARA LA DIRECCIÓN ESTESURESTE**





*$T_p=10s$ , caudal  $300\text{ m}^3/s$*



*$T_p=10s$ , caudal  $300\text{ m}^3/s$*





*Tp=10s, caudal 300 m<sup>3</sup>/s*



*Tp=10s, caudal 300 m<sup>3</sup>/s*





*$T_p=10s$ , caudal  $600\text{ m}^3/s$*



*$T_p=10s$ , caudal  $600\text{ m}^3/s$*





## Anejo 3. Anejo de modelos físicos

### A.3.1. Introducción

Los modelos físicos proporcionan al ingeniero y al científico dos grandes ventajas al estudiar un problema particular en ingeniería de costas. La primera es que se usan procesos reales que integran las ecuaciones apropiadas que gobiernan el fenómeno, como la propagación del oleaje o el transporte de sedimentos en una playa, sin simplificar hipótesis y sin omitir nada desconocido, como ocurre a menudo en un modelo matemático. La segunda ventaja es que la medida del modelo es mucho más pequeña que la del prototipo (en la naturaleza), y controlada, permitiendo una adquisición de los datos relevantes más fiable, que serían difíciles de medir en el prototipo.

Existen obviamente inconvenientes asociados al modelado físico, como es la introducción de efectos escala que se traducen en una variación de las proporciones entre algunos fenómenos que tienen lugar en el prototipo. Adicionalmente, el modelo es generalmente más simplista que el prototipo, por ejemplo, al utilizar oleaje monocromático, o al generar oleaje irregular omitiendo el viento u otras fuerzas potencialmente importantes en la naturaleza.

El propósito de este Anejo es proporcionar una breve visión de las leyes que rigen los modelos físicos, las cuales permiten al ingeniero extrapolar los resultados del modelo al prototipo.

### A.3.2. Semejanza entre modelo y prototipo

#### Criterios de semejanza

Los criterios para que los resultados del modelo se correspondan con los del prototipo implican tres semejanzas:

- Semejanza geométrica.
- Semejanza cinemática.
- Semejanza dinámica.

### Semejanza geométrica

La semejanza geométrica se consigue cuando las dimensiones del modelo son proporcionales a las del prototipo. A veces, se utiliza una escala diferente para las magnitudes horizontales y para las magnitudes verticales. En este caso, se introduce el concepto de distorsión geométrica, utilizado cuando se modelan grandes masa de agua (por ejemplo, un modelo de propagación de mareas). Este no va a ser el caso de este estudio, en el cual se trabajará con un modelo no distorsionado.

Si se define la escala de longitudes  $n_L$  de un modelo por:

$$n_L = L_m / L_p \quad (3.1)$$

donde  $L$  es la longitud (horizontal o vertical), y los subíndices  $m$  y  $p$  indican, respectivamente, modelo y prototipo, la semejanza geométrica se cumplirá cuando todas las longitudes del modelo conserven la misma proporción  $n_L$  con el prototipo. Si, por ejemplo, la escala vertical es distinta a la horizontal, tendremos un modelo distorsionado.

### Semejanza cinemática

La semejanza cinemática implica que el movimiento y las trayectorias de partículas homólogas deben estar en proporción. Definiendo, de modo similar a la escala de longitudes  $n_L$ , las escalas de aceleración  $n_a$ , velocidad  $n_v$  y tiempo  $n_t$  como:

$$n_a = a_m / a_p \quad n_v = v_m / v_p \quad n_t = t_m / t_p \quad (3.2)$$

Para que se cumpla la semejanza cinemática, deben satisfacerse las siguientes relaciones:

$$n_v = n_a \cdot n_t \quad n_L = n_v \cdot n_t \quad (3.3)$$

Para un caso determinado, fijada la escala de longitudes  $n_L$ , y tomando  $n_a=1$  (procedimiento habitual, dado que, por ejemplo, la aceleración de la gravedad no puede variarse), se obtiene de las relaciones (3.3) las escalas de velocidad  $n_v$  y de tiempo  $n_t$  necesarias para que se verifique la semejanza cinemática:

$$n_v = (n_L)^{1/2} \quad n_t = (n_L)^{1/2} \quad (3.4)$$

### Semejanza dinámica

La semejanza dinámica requiere que la masa y fuerzas sobre las partículas de un fluido en el modelo y en el prototipo estén en proporción.

Una condición necesaria, pero no suficiente, para que se cumpla la semejanza dinámica es que deben cumplirse al mismo tiempo las semejanzas cinemática y geométrica. Sin embargo, como se verá más adelante, no siempre es posible alcanzar las tres similitudes al mismo tiempo.

Según la segunda ley de Newton, que establece que la relación que sufre una partícula es igual a la suma de fuerzas exteriores que actúan sobre dicha partícula:

$$m \cdot dv/dt = \Sigma F_j \quad (3.5)$$

y, considerando que las fuerzas que actúan sobre una partícula de fluido, expresadas en términos de las mismas unidades físicas, son:

$$\text{inercia:} \quad F_i = m \cdot a = \rho \cdot L^3 \cdot v^2 / L = \rho \cdot L^2 \cdot v^2 \quad (3.6)$$

$$\text{gravedad:} \quad F_g = m \cdot g = \rho \cdot L^3 \cdot g \quad (3.7)$$

$$\text{viscosidad:} \quad F_f = \tau \cdot A = \mu \cdot dv/dy \cdot L^2 = \mu \cdot v / L \cdot L^2 = \mu \cdot v \cdot L \quad (3.8)$$



$$\text{tensión superficial: } F_s = \sigma \cdot L \quad (3.9)$$

$$\text{elasticidad: } F_p = p \cdot A = p \cdot L^2 \quad (3.10)$$

$$\text{presión: } F_e = K \cdot A = K \cdot L^2 \quad (3.11)$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $L$  es una dimensión de longitud,  $\tau$  es la tensión tangencial,  $\mu$  es la viscosidad dinámica,  $dv/dy$  es la velocidad diferencial a través de un espesor  $dy$  de fluido,  $\sigma$  es la tensión superficial,  $K$  es el módulo de elasticidad del fluido,  $a$  es la aceleración de una partícula de fluido,  $p$  es la presión media y  $A$  es el área sobre la que actúa dicha presión, se cumplirá según (3.5) que:

$$F_i = F_g + F_f + F_s + F_e + F_p \quad (3.12)$$

En sentido global, existirá semejanza dinámica entre el fluido del modelo y del prototipo si se cumple:

$$(F_i)_m / (F_i)_p = (F_g + F_f + F_s + F_e + F_p)_m / (F_g + F_f + F_s + F_e + F_p)_p \quad (3.13)$$

En un sentido más estricto, la semejanza dinámica exige que se cumpla además:

$$(F_i)_m / (F_i)_p = (F_g)_m / (F_g)_p = (F_f)_m / (F_f)_p = (F_s)_m / (F_s)_p = (F_e)_m / (F_e)_p = (F_p)_m / (F_p)_p \quad (3.14)$$

Ahora bien, no se conoce ningún fluido que satisfaga (3.14) en un modelo construido a escala inferior a la real ( $n_L < 1$ ). Este es el motivo por el cual, dado que la escala de todas las fuerzas no es siempre la misma, es posible, mediante una cuidadosa elección de escalas, priorizar unas respecto a las otras al reproducir en el modelo los procesos reales, siendo tarea esencial al diseñar un modelo hidráulico determinar y justificar qué fuerzas pueden ser despreciadas. De este modelo puede simplificarse la condición de semejanza dinámica seleccionando las fuerzas predominantes y despreciando la influencia de las fuerzas secundarias. Con lo cual, se admitirán a priori unas desviaciones entre el comportamiento del modelo y del prototipo, definidas como efectos escala.

Es obvio que, de las fuerzas presentes en el comportamiento de un fluido en movimiento, las de inercia sean las más relevantes (respuesta del fluido). Para determinar, entre las restantes, qué fuerzas podrán considerarse predominantes o secundarias, se compara la importancia relativa de cada una de ellas con las de inercia. Para ello, se definen previamente los siguientes parámetros adimensionales:

Fuerzas inerciales/Fuerzas de gravedad:

$$F_i/F_g = \rho \cdot v^2 \cdot L^2 / (\rho \cdot L^3 \cdot g) = v^2 / (L \cdot g) \quad \text{Número de Froude} \quad (3.15)$$

Fuerzas inerciales/Fuerzas viscosas:

$$F_i/F_f = \rho \cdot v^2 \cdot L^2 / (\mu \cdot L \cdot v) = v \cdot L \cdot \rho / \mu \quad \text{Número de Reynolds} \quad (3.16)$$

Fuerzas inerciales/Fuerzas de tensión superficial:

$$F_i/F_s = \rho \cdot v^2 \cdot L^2 / (\sigma \cdot L) = v^2 \cdot L \cdot \rho / \sigma \quad \text{Número de Weber} \quad (3.17)$$

Fuerzas inerciales/Fuerzas elásticas:

$$F_i/F_e = \rho \cdot v^2 \cdot L^2 / (K \cdot L^2) = v^2 \cdot \rho / K \quad \text{Número de Cauchy} \quad (3.18)$$

Fuerzas inerciales/Fuerzas de presión:

$$F_i/F_p = \rho \cdot v^2 \cdot L^2 / (\rho \cdot L^2) = v^2 / p = v^2 / (L \cdot g) \quad \text{Número de Euler} \quad (3.19)$$

Otro modo de definir semejanza dinámica total, sería exigir que se conservara cada uno de estos números (Froude, Reynolds, Weber, Cauchy y Euler) en el modelo, lo cual sería lo mismo que decir que:

$$Fr_m / Fr_p = Re_m / Re_p = We_m / We_p = Ca_m / Ca_p = Eu_m / Eu_p = 1$$

$$n_{Fr} = n_{Re} = n_{We} = n_{Ca} = n_{Eu} = 1 \quad (3.20)$$

En los modelos hidráulicos de ingeniería de costas, las fuerzas de presión son consideradas dependientes de las demás fuerzas en la ecuación (3.14), por lo que no se utiliza la determinación de la escala de trabajo. En lo que respecta a las fuerzas elásticas, toman importancia cuando son suficientemente grandes como para dar lugar

a cambios de compresibilidad en el fluido. Dado que el fluido es considerado incompresible en problemas de ingeniería costera, pueden ser despreciadas a la hora de escalar el modelo (por ejemplo, una posible excepción sería el estudio de la acción de esfuerzos en una estructura causados por la compresión del aire atrapado en las olas cuando rompen).

Es decir, la conservación de los tres números siguientes, Froude ( $Fr$ ), Reynolds ( $Re$ ) y Weber ( $We$ ) es, en general, la regla para obtener la semejanza dinámica en los modelos de ingeniería de costas. Sin embargo, esto sigue siendo imposible. Para ilustrarlo supóngase, por ejemplo, que el número de Froude y el número de Reynolds valen lo mismo en el modelo y en el prototipo. Tendría que cumplirse, al mismo tiempo la siguiente igualdad:

$$Fr_m/Fr_p = Re_m/Re_p = 1 \quad n_{Fr} = n_{Re} = 1 \quad (3.21)$$

Considerando que la gravedad no varía ( $n_g=1$ ), se obtiene para la conservación del número de Froude que  $n_v=(n_L)^{1/2}$ , y sustituyendo esta relación en la condición para que se conserve el número de Reynolds, se obtendría que:

$$n_L^{3/2} = n_\mu / n_\rho = n_\delta \quad (3.22)$$

Es decir, para que se mantuvieran proporcionales las fuerzas de gravedad y las viscosas con respecto a las de inercia, necesitaríamos modelos con un fluido cuya viscosidad  $\delta = \mu/\rho$  cumpliera (3.22), siendo  $n_L$  la relación existente entre longitudes del modelo y del prototipo. Por ejemplo, con una escala  $n_L=1/10$ , necesitaríamos modelar con un fluido de viscosidad cinemática aproximadamente 30 veces menor que el fluido del prototipo. Asumiendo que el fluido prototipo es el agua, no existe ningún fluido manejable que satisfaga tal condición.

De este modo, y en general para modelos de ingeniería de costas, partiendo inicialmente de la conservación de uno o de los tres números (Froude, Reynolds y Weber), y teniendo en cuenta que los otros dos no se conservarían (efectos escala),



pero que tendrán unos valores dentro de un rango específico que permita obviarlos, se llevará a cabo el diseño de escala del modelo.

## Semejanza de Froude

En los movimientos asociados a un fluido de superficie libre, las fuerzas de inercia son principalmente equilibradas por las de gravedad. Por este motivo, en un modelo de ingeniería de costas no pueden despreciarse estas fuerzas, siendo esencial mantener la relación existente entre fuerzas de inercia y de gravedad. Esto significa que el fluido utilizado en el modelo mantenga el mismo número de Froude que el prototipo (semejanza de Froude):

$$Fr_m / Fr_p = 1 \quad n_{(v^2/(g \cdot L))} = 1 \quad (3.23)$$

Es decir, las velocidades, longitudes y gravedad deben cumplir una relación de escala  $n_{(v^2/(g \cdot L))} = 1$ . Dado que la gravedad no varía entre modelo y prototipo ( $n_g = 1$ ), es necesario que  $n_v^2 = n_L$ , lo cual se cumple con la semejanza cinemática (3.4).

Suponiendo que se cumple la semejanza de Froude (3.23), que la escala seleccionada es  $n_L = n_m / n_p = 1/\lambda$  y considerando que  $(\rho/\mu)_m = (\rho/\mu)_p$  (salvando las diferencias debidas a la salinidad del agua y la temperatura), la proporcionalidad entre los números de Reynolds del fluido del modelo y prototipo (relación entre fuerzas de inercia y viscosas) sería:

$$Re_m / Re_p = (1/\lambda)^{3/2} \quad Re_p = \lambda^{3/2} \cdot Re_m \quad (3.24)$$

En el caso de un modelo que, por ejemplo, se diseñara con una escala  $1/\lambda = 1/150$ , para mantener la proporcionalidad de las fuerzas viscosas se requeriría un fluido con un número de Reynolds 465 veces menor que el del prototipo, es decir, 465 veces menos viscoso para reproducir el comportamiento real del fluido. Al utilizarse agua en el modelo, se reproduce mal los límites entre régimen turbulento (valores de Re altos) y laminar (valores de Re bajos) reales. Si los procesos a estudiar se realizan bajo régimen turbulento, las fuerzas viscosas pueden despreciarse frente a las de inercia, si



no es así, se requerirá trabajar con escalas más grandes, disminuyendo así las diferencias de viscosidad entre modelo y prototipo. En un mismo modelo, pueden utilizarse diferentes escalas en distintas secciones del sistema de estudio, según sea necesario conseguir reproducir un régimen turbulento o laminar lo más cerca posible al prototipo. Así, es necesario determinar la zona influida por los efectos escala incluido, al ser falseada la proporcionalidad de las fuerzas viscosas, asegurando que se trabaja con una turbulencia suficiente como para despreciarlos o tenerlos en cuenta al extrapolar los resultados al prototipo.

### A.3.3. Relación de escalas empleadas

La selección de la escala utilizada en los ensayos experimentales se realizó en base a distintos factores (posicionamiento del puerto en piscina, profundidad del agua, máxima altura de ola generada, etc), contemplando siempre la idoneidad de emplear la mayor escala posible para conseguir evitar los indeseables efectos de escala, comentados en el siguiente Anejo.

En el caso de los ensayos 3D en piscina de oleaje se tiene que:

#### Escalas geométricas

Escala de longitudes:	$n_L=1/150$
Escala de áreas:	$n_{L2}=1/150^2$
Escala de volúmenes:	$n_{L3}=1/150^3$

#### Escalas cinemáticas

Escala de aceleraciones:	$n_a=n_g=1$
Escala de tiempo:	$n_t=n_{L1/2}=1/150^{1/2}$
Escala de velocidades:	$n_v=n_{L1/2}=1/150^{1/2}$

### Escalas de los elementos estructurales

Escala de densidades*:	$n_p=1$
Escala de pesos*:	$n_W=1/150^3$
Escala de $D_{n50}$ *:	$n_{Dn}=1/150$
Escala de fuerzas:	$n_F=1/150^3$
Escala de presiones:	$n_P=1/150$

Las escalas señaladas con un \* pueden verse modificadas por efectos escala. El estudio de estos posibles efectos así como la verificación de cada uno de ellos se adjunta en el siguiente Anejo.



## Anejo 4. Anejo de efectos escala

### A.4.1. Fuerzas viscosas

Por razones prácticas, la viscosidad del fluido es la misma en el modelo que en el prototipo. Esto conlleva que, al escalar los materiales según la semejanza de Froude, el número de Reynolds decrece debido a la disminución de los materiales empleados. Al variar  $Re$ , el gradiente hidráulico en el modelo puede ser distinto al real, siendo necesario mantener este gradiente, que afecta a la estabilidad global de la estructura.

La estabilidad del manto principal y la transmisión a través del dique depende del flujo de agua a través de las capas filtro y del núcleo. En los modelos de diques es necesario reproducir el flujo de agua a través de todas las capas correctamente, a fin de obtener resultados fiables con respecto a la estabilidad de éste. Esto implica corregir la escala de longitudes en algunas zonas, especialmente en el núcleo.

#### Núcleo

El principal fenómeno con gran importancia en la estabilidad global del dique, es el gradiente hidráulico  $I$ , del flujo a través de él. Existen en la literatura varios métodos para corregir los efectos escala que sufre el gradiente hidráulico, al utilizar materiales de menor tamaño que en el prototipo. Sin embargo, no siempre predicen el mismo comportamiento. Dos de estos métodos son el de Engelund (1953), referenciado en P. Bruun (1985), y el de Le Mehauté (1985).

Engelund propuso que el gradiente hidráulico  $I$  del flujo a través de arena homogénea se podía describir como:

$$I = \alpha_0 \cdot (1-n)^3 \cdot \delta \cdot u / (n^2 \cdot g \cdot d^2) + \beta_0 \cdot (1-n) \cdot u^2 / (n^3 \cdot g \cdot d) \quad (4.1)$$

siendo:

$u$ : la velocidad de descarga

$\alpha_0, \beta_0$ : constantes dependientes de la forma de los áridos



- d: valor representativo del tamaño del árido
- n: porosidad
- g: gravedad

El primer y segundo términos de la ecuación (4.1) se interpretan como contribución laminar y contribución turbulenta al gradiente respectivamente. Aplicando la semejanza de Froude al término laminar, si  $n$ ,  $\delta$  y  $g$  se asumen como iguales en el modelo y en el prototipo, el modelo será escalado como  $u/d^2$  que significa que  $n_L^{1/2}/n_L^2 = n_L^{-3/2}$ . Por el contrario, el término turbulento se escalará como  $u^2/d$  que significa que  $(n_L^{1/2})^2/n_L = 1$ . Lo cual indica que el término laminar estará siempre incorrectamente representado en el modelo ya que el factor de escala del gradiente hidráulico debería ser 1.

Para pequeños números de Reynolds, donde predomina el flujo laminar, en un modelo con semejanza de Froude el gradiente hidráulico bien escalado requiere que:

$$(u/d^2)_p = (u/d^2)_m \quad (4.2)$$

Como en un modelo de Froude  $u_m/u_p = n_L^{1/2}$  (velocidades) la condición (4.2) se cumplirá si:

$$d_m^2/d_p^2 = u_m/u_p = n_L^{1/2} \quad d_m/d_p = n_L^{1/4} \quad (4.3)$$

Este resultado significa que debe modelarse con material más grande que el determinado según la escala de longitudes  $n_L$ .

Considerando el cociente entre el término turbulento y el laminar, que Engelund llamó  $\xi$  puede evaluarse los límites entre ambos flujos, laminar y turbulento:

$$\xi = l_t/l_l = (\beta_0 \cdot u \cdot d) / [\alpha_0 \cdot n \cdot (1-n)^2 \cdot \delta] \quad (4.4)$$

Si el flujo es caracterizado por un número de Reynolds expresado como  $Re = u \cdot d / \delta$ , la fórmula (4.4) se transforma en:

$$\xi = (\beta_0 \cdot Re) / [\alpha_0 \cdot n \cdot (1-n)^2] \quad (4.5)$$

donde, para granos irregulares  $\alpha_0 > 1500$  y  $\beta_0 > 3.6$ .

Engelund discutió cuál era el límite mayor para flujo laminar y concluyó que un valor medio probable para el número de Reynolds crítico podía ser  $\xi_c = 0.07$ . Esto significa que el término turbulento en la ecuación (4.1) es el 7% del laminar, valor a partir del cual pueden despreciarse los términos turbulentos frente a los laminares. De aquí se obtiene que el valor crítico de Re es:

$$Re_c = 60 \cdot \xi_c \approx 4.0 \quad (4.6)$$

Es decir, cuando  $Re < 4.0$ , el flujo es laminar y puede aplicarse (4.3).

Si se considera la capa filtro y el núcleo, donde las piedras son más pequeñas y la velocidad baja comparada con la velocidad del run-up y run-down en el manto principal, es obvio que el número de Reynolds (función de u) sea distinto en estas capas y puede estar por debajo del valor crítico. Esto significa que el flujo no es completamente turbulento, lo cual puede afectar la estabilidad del manto principal y, también, la reflexión y transmisión de las olas.

De cara a obtener un gradiente hidráulico más correcto y representativo en las capas del dique modelado, el núcleo y quizás también las subcapas deberían ser más grandes que lo que dice la semejanza de Froude,  $d_m/d_p = n_L$ , porque es necesario que el gradiente sea idéntico en el modelo y en el prototipo. Utilizando la ecuación (4.1) y asumiendo n y g idénticos en el modelo y en el prototipo:

$$I_m/I_p = 1 \quad (4.7)$$

Sustituyendo  $u_p = \lambda^{1/2} \cdot u_m$ , siendo  $n_L = 1/\lambda$  y, considerando que el cociente entre medidas de las piedras en el prototipo y el modelo es  $K = d_p/d_m$ , (4.7) se transforma en:

$$[K^2/\lambda^{1/2} + \beta_0 \cdot K \cdot Re_p / (\alpha_0 \cdot n \cdot (1-n)^2 \cdot \lambda)] / [1 + \beta_0 \cdot Re_p / (\alpha_0 \cdot n \cdot (1-n)^2)] = 1 \quad (4.8)$$

siendo  $Re_p$ , el número de Reynolds en el prototipo. Insertando la ecuación (4.5) en la (4.8) y despejando K:

$$K = \xi_p / (2 \cdot \lambda^{1/2}) \cdot [(1 + 4 \cdot \lambda^{3/2} \cdot (1 + \xi_p) / \xi_p^2)^{1/2} - 1] \quad (4.9)$$

De esta fórmula se observa que si  $\xi_p$  (prototipo) tiende a cero (flujo laminar) entonces K tiende a  $(n_L)^{1/4}$  y que si  $\xi_p$  tiende a infinito (flujo turbulento) entonces K tiende a  $n_L$ . El valor de K, se obtiene pues, en función de  $\xi_p$  y  $n_L$ , centrándose en conocer el valor Re en el prototipo.

Otra metodología utilizada para determinar a qué escala debe modelarse el núcleo y las capas filtro es la de Le Mehauté (1958). El gradiente hidráulico es expresado como:

$$i = C \cdot q^2 / (d \cdot n^5 \cdot 2 \cdot g) \quad (4.10)$$

siendo:

i, gradiente hidráulico

C, coeficiente de arrastre

d, tamaño representativo del material (m)

n, porosidad

q, velocidad de descarga por  $m^2$  (m/s) ( $u \cdot n$ , para compara con Engelund)

g, aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

Partiendo de (4.10) puede hacerse el análisis de escalas siguiente:

$$n_i = n_c \cdot n_d^{-1} \cdot n_n^{-5} \cdot n_q^2 \cdot n_g^{-1} \quad (4.11)$$

Asumiendo  $n_i = n_n = n_g = 1$ ,  $n_q^2 = n_L$  ( semejanza de Froude) se obtiene que  $n_c = n_L / n_d$ , es decir,  $C_m = C_p = n_L / n_D$  ( $C_m$ =coeficiente de arrastre en el modelo y  $C_p$ =coeficiente de arrastre en el prototipo). Según Venis, M. (1965) el valor del coeficiente de arrastre C, función de Re, es:

Tipo de flujo	Número de Reynolds	C (Venis)
Laminar	$Re < 4$	$24/Re$
Transición	$4 < Re < 576$	$12/Re^{1/2}$
Turbulento	$Re > 576$	0.5

El número de Reynolds que caracteriza el tipo de flujo es:

$$Re = q \cdot d / \delta \quad (4.12)$$

siendo:

$$q = (2 \cdot g \cdot d \cdot n^5 \cdot i / C)^{1/2} \quad (4.13)$$

El diámetro característico  $d$  de la capa porosa que caracteriza el tipo de flujo en la capa depende fuertemente del diámetro de las pequeñas partículas que rellenan los espacios que dejan las más grandes, considerándose para (4.12) una  $d$  definida como:

$$d = [6 \cdot W / (\pi \cdot \rho)]^{1/3} \quad (4.14)$$

### Manto principal

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, la metodología de Le Mehauté (1958) propone despreciar los efectos viscosos en el manto principal cuando:

$$Re = (g \cdot H)^{1/2} \cdot D_n / \delta > 4 \cdot 10^4 \quad (4.15)$$

Según Hudson (1975), los efectos escala debidos a las fuerzas de viscosidad en los ensayos de estabilidad de diques de escollera, pueden despreciarse si el número de Reynolds  $Re > 3 \cdot 10^4$ , definido como:

$$Re = g^{1/2} \cdot H^{1/2} \cdot D_n / \delta \quad (4.16)$$

siendo:



$g$ , aceleración gravitatoria ( $m/s^2$ )

$H$ , altura de ola (m)

$D_n$ , longitud característica del elemento (m)

$\delta$ , viscosidad cinemática ( $m^2/s$ ) (agua  $\delta=10^{-6} m^2/s$ )

Dai and Kamel (1969) y Thomson et al (1972), en base a resultados obtenidos a partir de ensayos en modelos hidráulicos, indican que para desprestigiar los efectos de escala debidos a fuerzas viscosas en el estudio de la estabilidad de las unidades que componen el manto principal,  $Re > 3 \cdot 10^4 \div 10^5$  estando definido el número de Reynolds como:

$$Re = u_{\text{máx}} \cdot D_n / \delta \quad (4.17)$$

siendo  $u_{\text{máx}}$  la máxima velocidad del flujo de agua durante el run-up y run-down.

## A.4.2. Correcciones debidas a fuerzas viscosas

### Núcleo

Aplicando tanto el método de Engelung como el de Le Mehauté se observa que la velocidad debe ser muy baja en el núcleo para que sea necesario aplicar una corrección a las dimensiones de los áridos (escalar según  $1/K$ ). Por tanto, para las velocidades normales que se van a producir en el núcleo puede construirse a la misma escala que el resto del modelo ( $1/150$ ), sin que se distorsione el gradiente hidráulico.

## A.4.3. Tensión superficial

El efecto de la tensión superficial no presenta generalmente ninguna relevancia en problemas de ingeniería costera, pero, sin embargo, debe ser considerado en algunos fenómenos cuando se reduce la escala del modelo (por ejemplo, cuando existe una

interfase entre dos fluidos, capilaridad, burbujas de aire arrastradas por la columna de agua,...).

#### A.4.4. Correcciones debidas a tensión superficial

La tensión superficial es generalmente despreciable en las olas del prototipo y, por consiguiente en el modelo también, si éste no es demasiado pequeño. Para ello, las longitudes de onda de las olas reproducidas en el modelo deben ser mayores de 0.02m, lo cual verifican las olas generadas en el canal de oleaje de las instalaciones de INHA. De este modo, pueden despreciarse los efectos escala debidos a la tensión superficial en el presente estudio.

#### A.4.5. Estabilidad del manto principal

Además de las consideraciones debidas a las fuerzas viscosas, es imprescindible recordar que la densidad del fluido en el modelo (generalmente agua dulce:  $\rho=1000\text{T/m}^3$ ) es distinta a la del prototipo (agua salada:  $\rho=1025\text{T/m}^3$ ), lo cual implica corregir las dimensiones y/o densidad de los elementos del manto principal para reproducir correctamente los esfuerzos del oleaje y los mecanismos estabilizadores. Para ello se impone que el parámetro de estabilidad  $N_s$  sea igual en el modelo que en el prototipo:

$$(N_s)_m/(N_s)_p=[H_s/(\Delta \cdot D_n)]_m/[H_s/(\Delta \cdot D_n)]_p=1 \quad (4.18)$$

lo cual implica que:

$$n_{H_s}/(n_{\Delta} \cdot n_{D_n})=1 \quad (4.19)$$

Es fácil comprobar que esto puede conseguirse corrigiendo el peso de los elementos del manto principal por un factor  $C_p$ :

$$C_p = \rho_{sm} / \rho_{sp} \cdot [(\rho_s - \rho_w) / \rho_w]_p^3 / [(\rho_s - \rho_w) / \rho_w]_m^3 \quad (4.20)$$

independientemente de cuales sean los valores de las densidades de los elementos  $\rho_s$  y del fluido  $\rho_w$ .

Esta formulación, sin embargo, no verifica la semejanza geométrica, pues las dimensiones de los elementos en el modelo resultantes no obedecen la relación  $n_L$ . Para que dicha semejanza se produzca, además de (4.20), debe corregirse la densidad de los elementos de modo que  $n_{\Delta} = 1$ , es decir, que se conserve la escala de la densidad relativa sumergida de los elementos entre modelo y prototipo.





## Anejo 5. Anejo de software

### A.5.1. Introducción

A continuación se describen la relación de programas que han sido utilizados para el procesamiento de los datos obtenidos experimentalmente.

Cada uno de los programas que se describen a continuación han sido realizados con el paquete de software Labview 5.1. de National Instruments.

### A.5.2. Software de generación de las series temporales

#### Introducción

La aplicación "Generación.vi" genera las series temporales utilizadas en los ensayos para la generación del oleaje deseado.

Estas series podrán ser de dos tipos:

- ◆ **Series regulares:** Estas series están formadas por ondas de igual amplitud y periodo todas ellas, dando lugar por tanto a la generación de un oleaje regular.
- ◆ Las **series irregulares** están formadas por ondas de diferente amplitud y periodo. Estas series resultan de aplicar la IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) a su espectro de potencia, el cual se calcula los parámetros que introduce el usuario tal y como se expone posteriormente. Estas series temporales dan como resultado la generación de un oleaje irregular.

## Parámetros de entrada

La generación de las series temporales se realiza en base a una serie de parámetros que deben ser introducidos por el usuario. Estos parámetros se han dividido en tres grupos y son:

### □ PARÁMETROS GENERALES

- ◆ **Tipo de serie:** La serie temporal generada puede ser **regular** o **irregular**.
- ◆ **Frecuencia de muestreo:** Este parámetro determina la frecuencia de muestreo con la que se adquieren las muestras. Su valor por defecto es 50 muestras/segundo.
- ◆ **Factor de escala de la pala:** Determina la relación V/m de la pala que produce la generación de oleaje.  
El fondo de escala de la pala en el canal es de  $\pm 10V$ , correspondiente a un desplazamiento de la pala de  $\pm 0.5m$ . Por lo tanto la sensibilidad es 20V/m.  
El fondo de escala de la pala en la piscina es de  $\pm 10V$ , correspondiente a un desplazamiento de la pala de  $\pm 0.25m$ . Por lo tanto la sensibilidad es 40V/m.
- ◆ **Escala del modelo:** Es la relación existente entre metros en el prototipo y metros en el modelo que se reproduce. Su valor por defecto es 30 (30 metros en prototipo es 1 metro en el modelo).
- ◆ **Duración de la rampa:** La puesta en marcha y paro de la pala se ha de realizar en forma de rampa, para así evitar la aparición de sobretensiones y sobrecorrientes que provocarían a la larga el mal funcionamiento del equipo. En este apartado el usuario debe introducir la duración en segundos que desea que tenga la rampa.
- ◆ **Fichero 1 serie:** Dirección y nombre del fichero en el que se desea se guarde la serie generada.
- ◆ **Fichero n series:** Dirección y nombre del fichero en el que se desea se guarde la serie generada repetida n veces.

□ PARÁMETROS SERIE IRREGULAR

- ◆ **Selección del espectro:** Determina el tipo de espectro que se ha de calcular para la generación de una serie irregular, que puede ser:
  - **Jonswap sin parametrizar:** La función de densidad espectral asociada a este tipo de espectro es:

$$S_{\eta}(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4} f^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_m}\right)^{-4}\right) \gamma^{\exp\left(\frac{-1}{2\sigma^2}\left(\frac{f}{f_m}-1\right)^2\right)} \quad [1]$$

Donde:

f: frecuencia

$f_p$ : frecuencia de pico

$$\alpha = 0.076x^{-0.22}$$

$$x = gFU_{10}^{-2}$$

$$f_m = \frac{3.5gx^{-0.33}}{U_{10}}$$

$$\sigma_f = 0.07 \quad \text{si } f \leq f_p$$

$$\sigma_f = 0.09 \quad \text{si } f > f_p$$

$$\gamma = 3.3$$

$U_{10}$ : Velocidad del viento 10 m por encima del nivel medio de agua

Sustituyendo cada parámetro por su valor correspondiente se obtiene la siguiente expresión:

$$S_{\eta}(f) = \alpha * H_s^2 f_p^4 f^{-5} \exp\left(-1.25\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4} \gamma^{\exp\left(\frac{-1}{2\sigma^2}\left(\frac{f}{f_p}-1\right)^2\right)}\right) \quad [2]$$

Donde:

$$\alpha = \frac{0.0624}{(0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1})} \quad [3]$$

$$\sigma = 0.07 \quad \text{si } f \leq f_p$$

$$\sigma = 0.09 \quad \text{si } f > f_p$$

f: Frecuencia

$H_s$ : Altura significativa

$f_p$ : Frecuencia de pico

$\gamma$  : parámetro de apuntamiento = 3.3

- **Jonswap parametrizado:** La función de densidad espectral asociada a este tipo de espectro es:

$$S_{\eta}(f) = \frac{1.4}{\gamma} \frac{5}{6} H_s^2 f_p^4 f^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right) \quad [4]$$

Donde:

$$\alpha = \exp\left(\frac{(f - f_p)^2}{2\sigma_f^2 f_p^2}\right) \quad [5]$$

$$\sigma = 0.1 \quad \text{si } f \leq f_p$$

$$\sigma = 0.5 \quad \text{si } f > f_p$$

f: Frecuencia

$f_p$ : Frecuencia de pico

$H_s$ : Altura significativa

$\gamma$  : parámetro de apuntamiento = 3.3

- **Pierson-Moskowitz parametrizado:** La función de densidad espectral asociada a este tipo de espectro es:

$$S_{\eta}(f) = \frac{5}{16} H_s^2 f_p^4 f^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right) \quad [6]$$

Donde:

f: Frecuencia

$f_p$ : Frecuencia de pico



$H_s$ : Altura significativa

- ◆ **Altura significativa en prototipo** –  $H_s$ : Valor de la altura significativa de las olas en el prototipo, en metros.
- ◆ **Periodo de pico en prototipo** –  $T_p$ : Valor del periodo de pico de las olas en el prototipo, en segundos.
- ◆ **Parámetro de apuntamiento** -  $\gamma$ : Valor del parámetro de apuntamiento (solo habilitado en el caso de seleccionar el tipo de espectro Jonswap paramétrizado o sin paramétrizar).
- ◆ **Número de bandas de frecuencia**: Determina el número de puntos de frecuencia con los que se calcula la densidad espectral de potencia.
- ◆ **Frecuencia máxima**: Determina el ancho de banda del espectro. Al fijar este valor se ha de tener en cuenta la frecuencia de muestreo fijada, de forma que se cumpla el **Criterio de Nyquist**:

$$f_{\text{muestreo}} \geq 2BW = 2f_{\text{máxima}} \quad [7]$$

- ◆ **Número de repeticiones de la serie**: Determina el número de veces que se desea se repita la serie. La serie resultante es la que se guarda en el **fichero n series**.
- ◆ **Semilla aleatoria**: Utilizada en el cálculo de la fase del espectro de potencia.

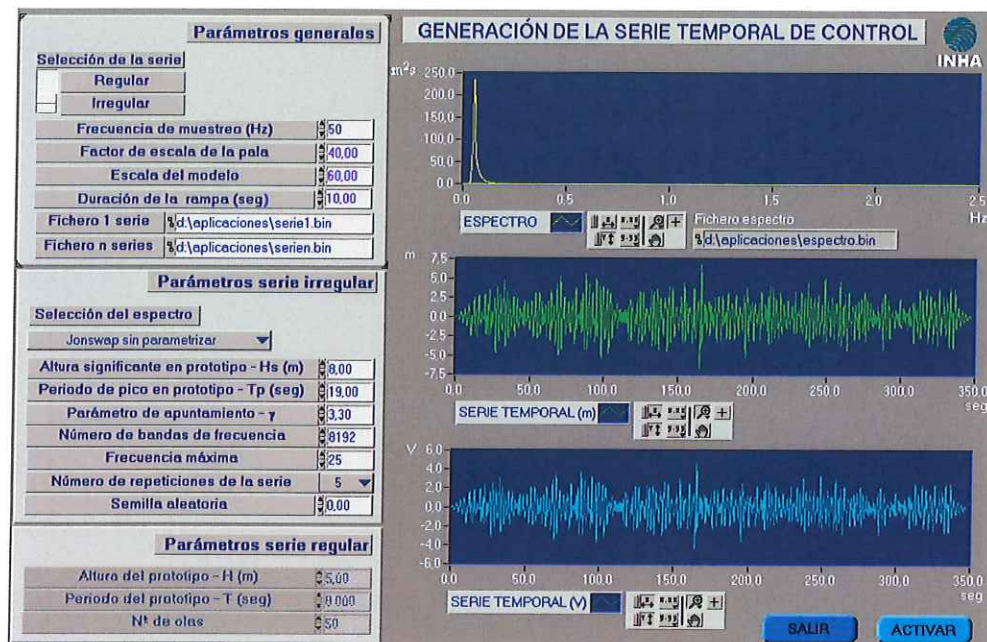
Dado que las expresiones de densidad espectral de potencia mostradas anteriormente (ver [2], [4] y [6]) solo proporcionan el módulo del espectro de la señal, la información de la fase necesaria para poder calcular la IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) se introduce como **ruido blanco uniforme** la semilla del cual se determina con este parámetro.

□ **PARÁMETROS SERIE REGULAR**

- ◆ **Altura del prototipo** –  $H$ : Altura de las olas en el prototipo, en metros.

- ◆ **Periodo del prototipo – T:** Periodo de las olas en el prototipo, en segundos.
- ◆ **Número de olas:** Número de olas que se desea compongan las serie generada.

La visualización de los parámetros antes descrita se puede realizar en la **figura 1**.



**Figura 1:** Panel gráfico de generación de series temporales

## Resultados

Los resultados obtenidos son:

- ◆ **Espectro de potencia de la serie temporal** que se ha generado. Se realiza la representación gráfica del espectro de potencia calculado en la generación de series irregulares.
- ◆ **Serie temporal en metros.** Se realiza la representación gráfica de la serie temporal obtenida convertida a al prototipo.
- ◆ **Serie temporal en Voltios.** Se realiza la representación gráfica de la serie temporal en Voltios, que es la señal con la que se va a excitar el sistema pala.

Todas las gráficas que se muestran se han programado de forma que el usuario pueda hacer diferentes tipos de aplicaciones de zonas de interés.

La visualización de las representaciones gráficas antes descritas se puede realizar en la **figura 1**.

## A.5.3. Software para el análisis experimental del oleaje

### Introducción

Esta aplicación realiza un análisis experimental de las alturas de ola adquiridas durante la realización de los ensayos, y denominadas series de superficie libre.

Este análisis consiste en:

- ◆ Visualización de las series de superficie libre
- ◆ Visualización de espectros
- ◆ Análisis estadístico de la superficie libre
- ◆ Análisis estadístico de ola a ola

### Parámetros de entrada

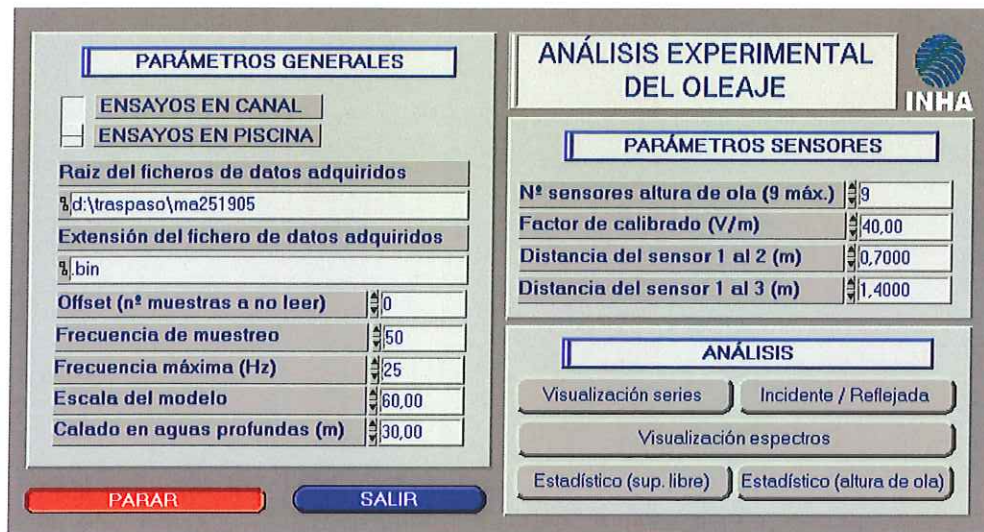
Los parámetros que se han de introducir para realizar cualquiera de estos análisis son (ver **figura 2**):

- PARÁMETROS GENERALES
  - **Raíz de los ficheros adquiridos:** Los nombres de los ficheros que contienen las series de superficie están formados por una raíz más un número. En este control el usuario debe introducir la raíz del fichero que quiere leer.



- **Extensión del fichero de datos adquiridos:** Extensión de los ficheros que se van a leer. Normalmente se trabaja con ficheros binarios, por lo que el valor por defecto es **".bin"**.
  - **Offset (número de muestras a no leer):** Número de muestras a no leer al inicio del fichero.
  - **Frecuencia de muestreo:** Frecuencia de muestreo a la que se han adquirido las muestras leídas. El valor por defecto es **50 Hz**.
  - **Escala del modelo:** Relación existente entre metros en el modelo reproducido y metros en el prototipo. El valor por defecto es **30**.
  - **Calado en aguas profundas:** Valor en metros del calado en aguas profundas en el prototipo. El valor por defecto es **30 m**.
- **PARÁMETROS SENSORES**
- **Número de sensores de altura de ola (máximo 9):** Número de sensores de los que se han realizado lecturas. El valor por defecto es **3** para el caso del canal, y **9** para el caso de la piscina.
  - **Factor de calibrado (V/m):** Sensibilidad a la que se han calibrado los sensores. Por defecto **22.78 V/m**.
  - **Distancia del sensor 1 al 2 (m):** Distancia que separa al primero del segundo sensor de oleaje en el canal. Este parámetro es necesario para el cálculo de la separación de la onda reflejada e incidente. El valor por defecto es **0.7 m**.
  - **Distancia del sensor 1 al 3 (m):** Distancia que separa al primero del segundo sensor de oleaje en el canal. Este parámetro es necesario para el cálculo de la separación de la onda reflejada e incidente. El valor por defecto es **1.4 m**.





*Figura 2: Panel gráfico de análisis experimental de oleaje*

## Análisis

Tal y como se comentó en la introducción, el análisis que se puede realizar consiste en:

- **Visualización de las series de superficie libre:** La selección de este control muestra un panel gráfico (ver **figura 3**) que consta de nueve gráficas en las que se hallan representadas cada una de las series de superficie libre. En estas gráficas es posible realizar zoom utilizando las utilidades presentes en la paleta.
- **Visualización de los espectros de las series de superficie libre:** La selección de este control muestra un panel gráfico (ver **figura 4**) que consta de nueve gráficas en las que se hallan representados el resultado de realizar el análisis espectral de las series de superficie libre. En estas gráficas es posible realizar zoom utilizando las utilidades presentes en la paleta.
- **Análisis estadístico de la superficie libre:** La selección de este control muestra un panel gráfico que consta de nueve gráficas en las que se hallan representadas el histograma y la distribución gaussiana de las series de superficie libre. Como resultado del análisis estadístico realizado también se muestran el valor correspondiente a la **máxima altura de ola, valor**

medio de las alturas de ola, desviación standard, varianza, parámetro kurtosis y skewness.

- **Análisis estadístico ola a ola:** La selección de este control muestra un panel gráfico que consta de una gráfica en la que se representa el histograma de las alturas de ola de la serie de superficie libre seleccionada, así como la distribución de Rayleigh correspondiente. Como resultado del análisis estadístico ola a ola realizado, también se muestra el **número de olas**, **duración de la serie (seg)**,  $H_{max}$  (altura máxima),  $H_{rms}$  (root mean square height),  $H_{1/3}$ ,  $H_{1/10}$ , **periodo correspondiente a  $H_{max}$** , **periodo medio y periodo de pico**.
- **Separación de la ola incidente y reflejada:** La selección de este control realiza la separación de las olas incidente y reflejada que se generan en el canal.



**Figura 3:** Representación gráfica de las series de superficie libre adquiridas durante la realización de los ensayos

Cada una de estas opciones puede ser seleccionada por el usuario al pulsar en control "Visualización de series", "Incidente/Reflejada", "Visualización de espectros",



“Estadístico (sup. libre)” y “Estadístico (altura de ola)” que se halla en el panel frontal de esta aplicación (ver **figura 2**).



**Figura 4:** Representación gráfica de los espectros de las series de superficie libre adquiridas durante la realización de los ensayos

○

○

○

○