

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS DE RESONANCIA PORTUARIA:
GENERACIÓN, TRANSITORIEDAD,
NO LINEALIDAD Y ACOPLAMIENTO
GEOMÉTRICO

Presentada por: D. GABRIEL DÍAZ HERNÁNDEZ

Dirigida por: D. IÑIGO JAVIER LOSADA RODRÍGUEZ
D. MAURICIO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

Marzo, 2006

CAPÍTULO 5
DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE LABORATORIO

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realiza una descripción de los experimentos en laboratorio para el estudio de resonancia portuaria, realizados en el canal de oleaje del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria, con el objetivo de generar una base de datos de los registros temporales de superficie libre obtenidos en diferentes puntos dentro del canal, para diferentes condiciones de agitación resonante.

Como parte del trabajo desarrollado en esta Tesis doctoral, se presenta en este capítulo la componente experimental de la misma. El objetivo fundamental de la actividad experimental es la obtención de series temporales de superficie libre que sirvan para analizar aquellos factores de la resonancia que como ya se ha expuesto, se consideran de interés en esta investigación.

Las geometrías y características de los casos seleccionados permiten analizar con datos, bajo consideraciones experimentales controladas, episodios resonantes en los que la transitoriedad, no linealidad y acoplamiento se ponen claramente en manifiesto.

Más aún, la base de datos generada supone un elemento fundamental para la validación del modelo numérico presentado más adelante, así como para el establecimiento de una metodología de uso de dicho modelo en futuras aplicaciones a casos reales.

Para ello se simulan experimentalmente 26 geometrías portuarias, diseñadas en función de diversas combinaciones resonantes y no resonantes, todas trabajando con distintas condiciones de forzamiento que van desde ondas incidentes con características lineales a no lineales.

El capítulo se estructura como sigue. En primer lugar se presenta y describe el equipo utilizado, el canal de oleaje, la pala generadora de oleaje, y la instrumentación utilizada. En segundo lugar se presenta la metodología de la experimentación, la construcción de las configuraciones portuarias, la elección de las geometrías a ensayar, y la zonificación del área de estudio.

En tercer lugar se presenta el pre-proceso y caracterización de los datos obtenidos en las experimentaciones, estableciendo los parámetros adimensionales de las ondas que actúan como elemento forzador, y adicionalmente se presenta el análisis de repetitividad de las series de datos experimentales. Finalmente se establecen las conclusiones finales sobre el trabajo experimental realizado en la investigación doctoral.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO UTILIZADO

Las experimentaciones fueron realizadas en las instalaciones del Laboratorio del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria que forman parte de las infraestructuras del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, situadas en el edificio de laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.



Figura 5.1 Canal del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria.

5.2.1 Canal de oleaje

La construcción del canal de oleaje se inició en el año 1980 y a partir de esa fecha ha recibido constantes mejoras, en la estructura de soporte de la pala generadora, en la mejora de la impermeabilidad y en la implementación de nuevos sistemas de generación y absorción del oleaje, por mencionar los más representativos.

El canal cuenta con 68.9 m de longitud por 2 m de altura y 2 m de anchura. Se pueden delimitar secciones bien definidas a lo largo del canal, desde la zona de generación del oleaje de 12 m de longitud aproximadamente incluyendo la zona de *stroke* de la pala; una zona de absorción o regularización del oleaje transversal a través de dos pantallas longitudinales de 10 m; una zona de ensayos acristalada que corresponde a un sector de 20.6 m de longitud y, finalmente una zona de disipación configurada mediante una rampa porosa de 12 m de longitud y geometría variable. La figura 5.2 muestra un esquema de disposición general y dimensiones del canal.

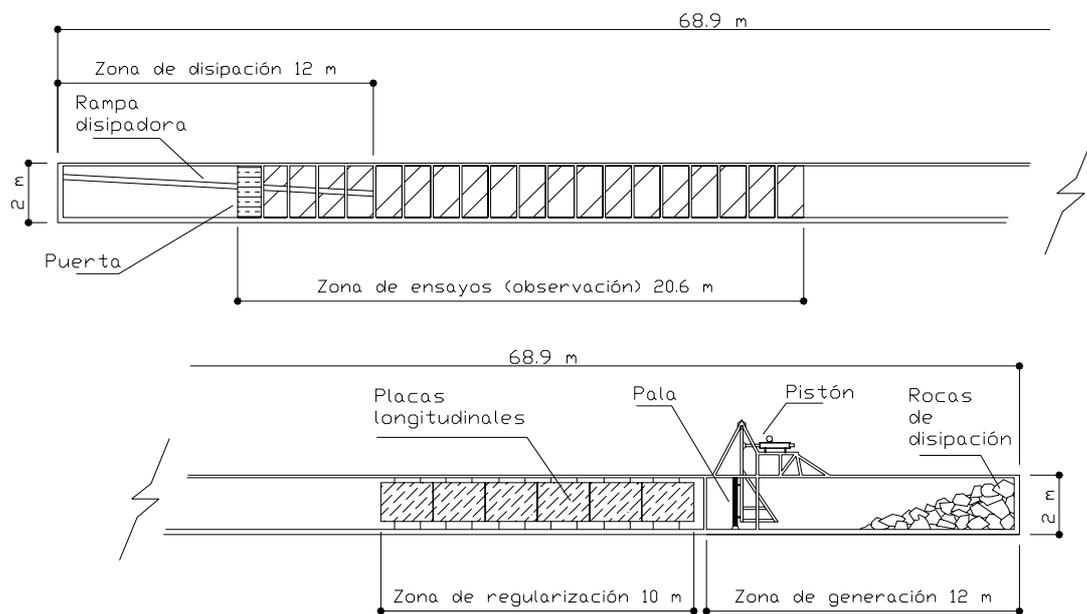


Figura 5.2. Diagrama de las dimensiones del canal

El canal está construido en su totalidad de hormigón exceptuando la zona de observación que está construida por planchas sucesivas de vidrio templado de 3 cm de espesor y cuenta con una puerta de acceso metálica de auto sellado por presión de agua. Los paneles de vidrio facilitan la construcción de modelos, observación, y toma de datos digitales y visuales durante los ensayos.

Además de las características antes mencionadas, el canal de oleaje dispone también del siguiente equipo auxiliar: un carro de medidas con desplazamiento en tres ejes; una puerta estanca metálica para el acceso a la construcción de modelos y posicionamiento del equipo de medición, una compuerta estanca que permite aislar la zona de los modelos para el llenado y vaciado rápidos y finalmente, un puente grúa ligero desmontable con 3000 N de capacidad de carga.

5.2.2 Pala generadora del oleaje

La parte fundamental del canal es la correspondiente a la zona de generación del oleaje, en donde se encuentra instalada la pala de generación regida por un sistema de pistón – péndulo de aluminio y accionada por un pistón hidráulico de 60 kW. La superficie frontal de la pala abarca el total del área de la sección del canal (4 m²) con una masa inercial de 294 N s²/m, una carrera horizontal máxima de 1200 mm y un esfuerzo máximo de 24525 N.

La superficie frontal de la pala está cubierta con una placa de PVC de 10 mm de espesor en los que se encuentran cuatro sensores de superficie libre como parte del sistema activo tipo AWACS (*Active Wave Absorption Control System*) diseñado por el DHI (*Danish Hydraulics Institute*). El sistema AWACS se complementa con una unidad de control, con un ordenador que retro-alimenta las señales de movimiento de la pala con los datos de los sensores de superficie libre.



Figura 5.3. Zona de generación del oleaje y estructura de sustentación del pistón - pala generadora.

5.2.3 Instrumentación

Se utilizaron 2 sensores de presión diferencial marca *DRUCK*, modelo *PCR830* con sus respectivas tarjetas acondicionadoras de señal fabricadas por el *DHI*. La calibración y toma de datos de los sensores de presión se realizan utilizando un software desarrollado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas.

Así mismo, se utilizaron 12 sensores de nivel o de superficie libre resistivos, manufacturados por el *DHI* conectados a sus tarjetas acondicionadoras y codificadoras de señal de la misma marca que cada sensor posee.

Además del equipo mencionado, se realizaron grabaciones digitales de video en diversos ensayos de especial importancia, así como toma de fotografía digital para captar los periodos de resonancia, rotura y efectos no lineales para casos de especial relevancia.

Todos los ensayos fueron descritos y registrados en detalle en un libro de notas destinado a este fin, prestando especial atención a casos de rebases del oleaje por resonancia, roturas en la bocana, y presencia de onda transversal en la sección del canal que pudieran desvirtuar los objetivos iniciales de los ensayos.

5.3 METODOLOGÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN

5.3.1 Construcción de las configuraciones portuarias

La configuración propuesta en los ensayos experimentales realizados, intenta implementar un sistema de oscilación portuaria con geometría simplificada, capaz de generar una gama de efectos de sobre-amplificación bajo diferentes condiciones de resonancia, y bajo una gama de elementos forzadores con diferentes características energéticas y de no linealidad, además de promover la interacción energética entre dos dársenas portuarias por efectos acoplamiento geométrico, intentando en todo momento conservar un flujo unidimensional, a través de la construcción de canales portuarios con anchuras lo suficientemente estrechas con respecto a sus longitudes.

Se propuso llevar a cabo el diseño de una configuración de dos canales estrechos con longitudes variables propuestos inicialmente por Liu *et al.* (2004), en donde inicialmente se propone una geometría inspirada en los contornos de las calas de Ciutadella y Platja Gran situadas al Oeste de la costa Menorquina en las Islas Baleares, donde se han observado episodios de resonancia importantes.

Los autores proponen una geometría simple que ejemplifica y resume perfectamente el comportamiento de dos canales portuarios trabajando conjuntamente, facilitando además su construcción en laboratorio debido a la sencillez de los contornos propuestos.

Para la fabricación de las geometrías portuarias mencionadas, se decidió utilizar láminas de madera de 1 cm de espesor a fin de poder contar con un material de fácil manejabilidad, ligero y apto para realizar variaciones geométricas constantes. El punto de partida para la colocación de las dos bocanas portuarias se hizo coincidir con el punto en donde comienza la rampa de disipación.

El punto final de colocación se dispuso a 5 m del punto inicial en dirección hacia la zona de generación, buscando con esto contemplar el mayor número de geometrías posibles, así como asegurar la mayor longitud posible efectiva para el oleaje proveniente desde la zona de generación hasta el inicio de las bocanás (aproximadamente 40 m).

Se colocaron tres tablonés para situar la base de la estructura que sirvieron de base a las paredes de los puertos (véase figura 5.4): el primero con un área de 5 m x 0.9 m (A), el segundo con un área de 5 m x 0.3 m (B) y el tercero con un área de 5 m x 0.4 m (C). Sobre los tres tablonés de madera mencionados, se colocaron 4 tablonés iguales de 5 m x 0.8 m de área que sirvieron como paredes longitudinales de los puertos (D, E, F y G), y finalmente se dispusieron tres tablonés que fueron colocados para cubrir las paredes transversales de los canales (H, I y J). También se prepararon varias tablas extras de 0.8 m x 0.2 m para su paulatina colocación, sirviendo de paredes de fondo en ambos canales, y sirvieron para configurar distintas longitudes portuarias. El resultado se puede observar en la figura 5.4, donde se construyeron 2 puertos longitudinales de 0.2 m de ancho por 5 m de largo.

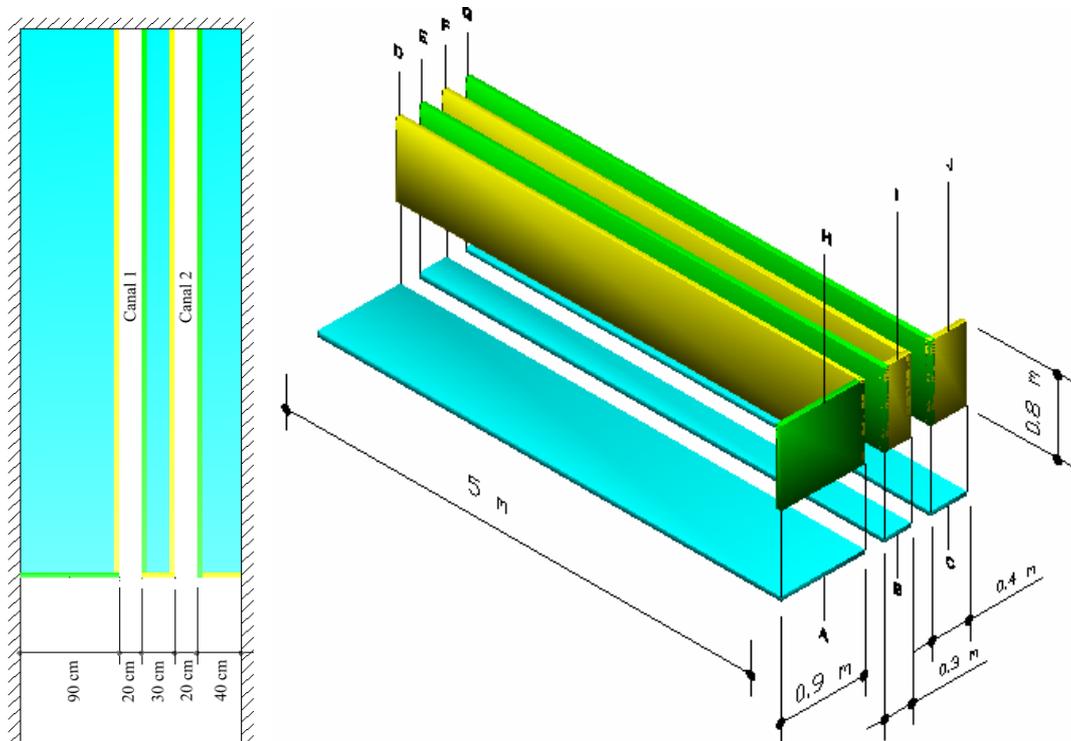


Figura 5.4 Construcción de los dos puertos longitudinales

Se denominó canal 1 al canal portuario construido y situado sobre el eje longitudinal del canal de oleaje. El canal 2 es el que se encuentra a 0.5 m de una de las paredes del canal de oleaje, como se muestra en la figura 5.5.

Por tanto, la configuración utilizada no es simétrica respecto al eje del canal. Esto, como se verá más adelante, condicionará sustancialmente los resultados experimentales al potenciar el acoplamiento y la generación de ondas transversales que modifican de manera importante el mecanismo resonante teórico.



Figura 5.5 Dos puertos longitudinales construidos en el canal de oleaje.

Las tablas de madera fueron rigidizadas con pequeñas tablas auxiliares perpendiculares para evitar la deformación y posibles oscilaciones, fijándose entre si con tirafondos y con un sellado de silicona. El conjunto de tablas de madera ya armadas y rigidizadas se fijaron al lecho de hormigón del canal con tornillos de sujeción. Para cada tabla utilizada como pared de fondo del puerto, se realizó un orificio para poder situar los correspondientes sensores de presión (uno para cada tabla), a 0.15 m del fondo y sobre el eje transversal de la tabla, como se muestra en la figura 5.6.



Figura 5.6 Colocación de los sensores de presión modelo PCR830

Ya con el modelo físico totalmente construido, se procedió al llenado del canal, alcanzando una profundidad constante de 0.5 m que se conservó durante todos y cada uno de los ensayos realizados en este experimento. Debido a que se conocía a priori el hecho de que la estructura de madera no iba a ser la suficientemente resistente a las posibles presiones hidrostáticas, se tomó la decisión de dejar abierto uno de los lados de la tabla (J) transversal adyacentes a la pared del canal de oleaje, para así permitir el llenado y paso del agua hacia la zona posterior del modelo físico, tarea que fue apoyada con el uso de una bomba hidráulica para equilibrar los niveles fácil y rápidamente.

5.3.2 Elección de las geometrías de los puertos y casos a ensayar

Uno de los factores importantes a la hora de diseñar el programa de ensayos, para poder analizar los episodios de resonancia portuaria, fue contar con una cantidad importante de casos combinando geometrías y forzamientos diferentes, que fueran representativos de diferentes órdenes de no linealidad así como de la magnitud de la respuesta resonante y la forma de resonar. A su vez se pretendió limitar en la medida de lo posible los diferentes parámetros susceptibles de modificación en cada ensayo.

En un análisis simplificado del problema y considerando un único canal suficientemente estrecho, la bocana del canal portuario en cuestión se considera conectada con el océano exterior por un lado y por el otro lado se encuentra limitada por una pared vertical perfectamente reflejante. Debido a las características lineales del problema inicial, se pueden superponer las soluciones de dos ondas largas (incidente y reflejada) para obtener la superficie libre en el canal.

$$\begin{aligned}\eta_i &= A \cos(kx - \omega t) \\ \eta_r &= A \cos(kx + \omega t) \\ \eta &= \eta_i + \eta_r = 2A \cos kx \cos \omega t\end{aligned}\tag{5.1}$$

Correspondiendo a una onda estacionaria pura, en la cual siempre se presenta un antinodo en la pared final del canal con amplitud igual al doble de la amplitud entrante. El valor absoluto de la amplificación o lo que es lo mismo el cociente entre la amplitud en la entrada ($x=0$) y la amplitud en la pared final ($x=l$), dentro del canal portuario puede llegar a ser muy importante, siendo esto.

$$\left| \frac{\eta_{x=0}}{\eta_{x=l}} \right| = \left| \frac{1}{\cos kl} \right|\tag{5.2}$$

Cuando dicho cociente de amplificación tiende a infinito, el canal portuario teóricamente presentará efectos resonantes, para las siguientes longitudes de canal.

$$l = (2n - 1) \frac{L}{4} \quad n = 1, 2, 3, \dots\tag{5.3}$$

Es decir, si es aproximadamente $L=4$ m, resuenan los casos con longitudes del canal impares.

Finalmente, se optó por el diseño y propuesta de las geometrías se realizó fijando una profundidad constante $h=0.5\text{ m}$ y un periodo de ola representativo $T=2\text{ s}$, para mantener una longitud de onda de ensayo constante de $L=4.056\text{ m}$. Ya habiéndose fijado la longitud de onda, se modificaron las longitudes de los canales portuarios para hacerlos coincidir con los modos resonantes principales y así aseguramos la presencia de episodios de resonancia.

Se propusieron 5 longitudes para los primeros ensayos generales, con únicamente el canal 1 abierto con 1 m, 2 m, 3 m, 4 m y 5 m, de longitud y el canal 2 cerrado en todos los casos. Se realizó un segundo conjunto de ensayos que trabajan con ambos canales portuarios abiertos, fijando la longitud del canal 1, y modificando cuatro veces la longitud del canal 2 para 1, 0.75, 0.5 y 0.25 veces la longitud del canal 1. Por ejemplo, si el canal 1 mide 4 m, el canal 2 se colocaría a 1, 2, 3 y 4 metros respectivamente para cada ensayo.

De forma complementaria, se propuso realizar un ensayo en el cual ambas bocanas permanecieran completamente cerradas con el fin de analizar el comportamiento del oleaje independientemente de la existencia de los canales portuarios.

El programa final ha constado de un total de 26 casos geométricos correspondientes a las 25 geometrías portuarias propuestas más la geometría sin puertos. Para cada ensayo se propusieron 3 alturas de ola $H=0.01\text{m}$, 0.025m y 0.05m . Y como se ha citado para cada configuración se ha utilizado un calado constante de $h=0.5\text{ m}$ y un mismo periodo de onda $T=2\text{ s}$.

Por tanto, en resumen se cuenta con un total de 78 ensayos realizados en el laboratorio, efectuándose 3 repeticiones para cada ensayo para poder cubrir la totalidad de puntos de la malla de medición de la zona exterior a los canales portuarios (líneas A, B y C) tal y como se explicará en el apartado siguiente.

De forma adicional a los ensayos descritos, se realizaron 103 ensayos para complementar el estudio haciendo variar el periodo de la onda incidente y conservando constante la altura de ola más energética, $H=0.05\text{m}$. Estos ensayos se realizaron para complementar aquellas situaciones resonantes de especial interés.

En el apartado 5.4 se presentan tablas detalladas de todo el programa de ensayos y el valor de sus parámetros fundamentales.

5.3.3 Zonificación del área de estudio

Con el fin de obtener la mayor cantidad posible de información relativa a variación espacial y temporal de la superficie libre en todos los ensayos se zonificó la disposición de los sensores de nivel en 3 grupos (véase figura 5.8):

- a) Zona de incidencia – Línea de sensores de oleaje incidente.
- b) Zona exterior – Malla de sensores en la zona de radiación.
- c) Zona de puerto – Líneas de sensores dentro de los canales portuarios.

El primer grupo de sensores dentro de la zona de incidencia fue colocado paralelamente a la dirección del movimiento del oleaje, y lo suficientemente alejado de la zona portuaria para poder registrar el mayor tiempo posible el oleaje incidente antes de que se registre algún oleaje reflejado o irradiado desde el puerto. Se utilizaron 3 sensores de nivel (sensores E1, E2 y E3), situados sobre el eje del canal de oleaje, a distancias sucesivas entre sensores de 0.3 m y 0.4 m respectivamente. El punto inicial de colocación de los sensores coincide con el sensor E3, colocado a 8.80 m medidos desde las bocanas portuarias o inicio de los canales.

Estos sensores de nivel se destinan al estudio del coeficiente de reflexión originado por las diferentes geometrías portuarias y como control de los oleajes incidentes. La instalación de los sensores en la zona de incidencia se realizó con ayuda de un marco construido con barras de acero interconectadas, instaladas en el techo del canal de oleaje. La figura 5.7 muestra el detalle de la disposición de los sensores de nivel de la zona de incidencia.

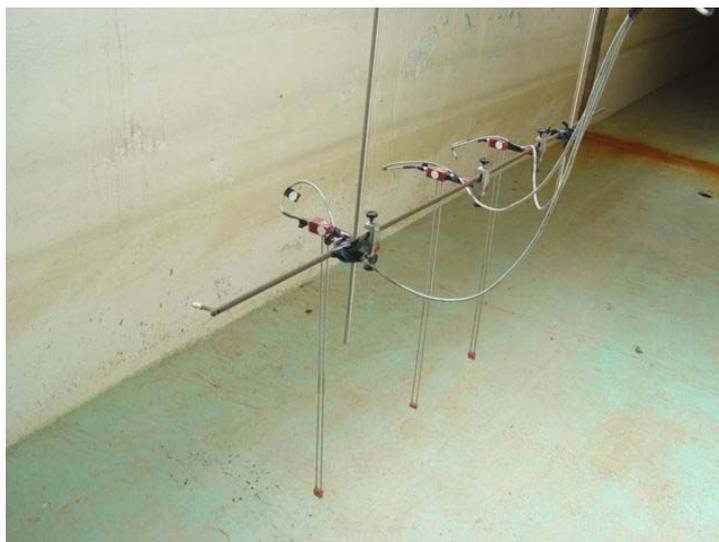


Figura 5.7 Colocación longitudinal de los sensores de nivel para la zona de incidencia del oleaje.

Para la zona exterior se diseñó una malla de medida de 9 puntos situados como muestra el diagrama de la figura 5.8. Se colocaron 3 sensores a 0.9 m de las bocanás de los puertos en una línea transversal de 0.7 m dividida en 0.3 m y 0.4 m para situar los sensores de nivel.

Debido a la limitación en el número de sensores, cada ensayo se repitió 3 veces para poder registrar los 9 puntos de la zona de radiación colocando la línea de sensores en una posición diferente cada vez y trasladándola utilizando el carro de medidas con desplazamiento en tres ejes, dando como resultado la malla de nueve sensores E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11 y E12. El objetivo de contar con una medición detallada en la zona exterior es el poder verificar el oleaje reflejado por los contornos portuarios, el oleaje irradiado hacia el exterior y formación de vórtices, las posibles ondas transversales que se generen y la descomposición frecuencial del oleaje en la zona adyacente exterior de las bocanás de los puertos.

Finalmente los sensores de nivel restantes se ubicaron en la tercera zona de medición, la zona del puerto. Se contó con 6 sensores de nivel (E13, E14, E15, E16, E17 y E18) y dos sensores de presión (sensores P1 y P2) para cubrir la instrumentación de la zona mencionada. Se dividieron equitativamente el total de los sensores de nivel y los de presión quedando asignados los sensores E13 al E5 con el P2 al canal 2 y el resto al canal 1.

La posición de los sensores de nivel sin tener en cuenta la longitud de los canales portuarios establece que en todo caso se colocara un sensor en la bocana, un sensor a media longitud propia de cada canal y un sensor en el fondo, conservando siempre la posición media con respecto a la bisectriz de cada canal portuario. También en la pared del fondo de cada canal portuario se colocó un sensor de presión tal y como se indicó anteriormente en el apartado de construcción del puerto experimental. Como se mencionó anteriormente, el objetivo de realizar las mediciones en la denominada zona portuaria es el registrar los niveles que alcanza la superficie libre en la bocana, en la zona media y en el fondo del canal para comparar mediciones de presión vs. mediciones de superficie libre. También lo es evaluar la no linealidad del oleaje y elevaciones de la superficie libre extraordinarias; verificar los episodios de resonancia, roturas y efectos de chorro en las desembocaduras.

La figura 5.8 muestra un diagrama que resume la zonificación de las diferentes áreas de estudio designadas.

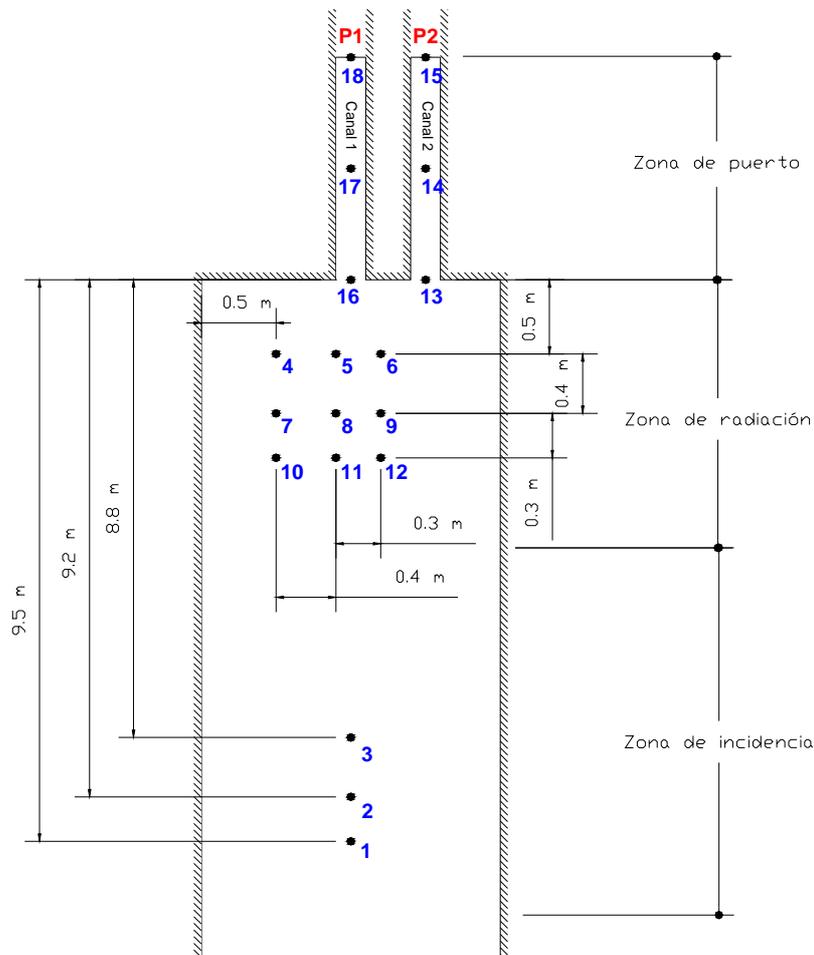


Figura 5.8 Localización de los puntos de medición dentro de las zonas de estudio.

5.4 PRE-PROCESO Y CARACTERIZACIÓN DE LOS ENSAYOS

5.4.1 Definición de los parámetros adimensionales del oleaje

El primer paso para la caracterización del oleaje en cada ensayo es definir los parámetros adimensionales obtenidos a partir de los cocientes de las magnitudes representativas de las ondas. Los parámetros adimensionales utilizados han sido el peralte de onda $\varepsilon = \frac{H}{L}$ que define la no linealidad del flujo, la altura relativa de la onda

$\delta = \frac{H}{h}$ que también da el orden de no linealidad, y la profundidad relativa $\mu = \frac{h}{L}$ o $\mu = kh$ que define la dispersividad de las ondas.

donde

H : Altura de onda

L : Longitud de onda

k : Número de onda ($k = 2\pi / L$)

h : Profundidad

Estos parámetros ayudan a caracterizar el movimiento de las ondas, realizar simplificaciones en las ecuaciones que las definen, ayudan también describir el tipo de movimiento de las partículas del fluido, el grado de dispersividad y no linealidad del fenómeno, además de que sitúan el tipo de profundidad teórica en que se trabaja dentro de cada ensayo. Además de establecer los parámetros característicos del oleaje, se obtuvo el parámetro integrado a partir de ellos denominado número de Ursell, $Ur = \frac{\delta}{\mu^2}$

con este número se pueden clasificar los diferentes tipos de movimiento del flujo.

Al observarse el rango de valores de los parámetros adimensionales utilizados se puede concluir, por ejemplo que el valor de la profundidad relativa $\mu=0.774472$ constante corresponde al régimen de onda larga en el total de los 78 ensayos del primer grupo, situados sobre aguas intermedias.

Debido a que el valor de $\mu^2 < 1$, se tiene el régimen de onda larga que si observamos los valores que adopta el número de Ursell de $Ur_1=0.0333$, $Ur_2=0.08333$ y $Ur_3=0.16667$ para las tres alturas de onda incidentes $H_1=0.01$ m, $H_2=0.025$ m y $H_3=0.05$ m respectivamente, se tiene que el régimen va de onda larga lineal a onda larga en régimen de Boussinesq (débilmente no lineal).

El paso siguiente consiste en realizar nuevamente el análisis de caracterización expuesto anteriormente para los 103 ensayos restantes, incluidos dentro del grupo denominado de ensayos adicionales. Este segundo grupo se mueve prácticamente en su totalidad sobre aguas intermedias y solo un caso sobre aguas indefinidas y sólo un caso se mueve sobre aguas indefinidas, cuando el periodo $T=0.7165$ s sobre el fondo constante $h=0.5$ m. El número de Ursell para los casos con $T < 4.5$ s presentan características dentro del régimen de onda larga lineal y el régimen de onda larga débilmente no lineal conforme el periodo de onda aumenta, mientras que cuando el valor del periodo supera el umbral de $T > 4.5$ s, el flujo comienza a moverse sobre aguas reducidas y adopta características de flujo de onda larga no lineal.

La tabla 5.1a y 5.1b presenta la organización del primer grupo de ensayos, su caracterización y los valores alcanzados para cada número adimensional.

La tabla 5.2a, 5.2b, y 5.2c muestra el conjunto de los 103 ensayos correspondientes al grupo de ensayos complementarios.

Caso	L1 (m)	L2 (m)	H (m)	h (m)	T (s)	L (m)	k	$\mu = kh$	$\epsilon = H/L$	$\delta = H/h$	Ursell (δ/μ^2)
0001	0	0	0.01	0.5	2	4.05614	1.549055	0.774528	0.002465	0.02	0.033339273
0002	0	0	0.05	0.5	2	4.05614	1.549055	0.774528	0.012327	0.1	0.166696364
0003	0	0	0.025	0.5	2	4.05614	1.549055	0.774528	0.006163	0.05	0.083348182
0101	1	0	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
0102	1	0	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
0103	1	0	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
0201	2	0	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
0202	2	0	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
0203	2	0	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
0301	3	0	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
0302	3	0	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
0303	3	0	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
0401	4	0	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
0402	4	0	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
0403	4	0	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
0501	5	0	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
0502	5	0	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
0503	5	0	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
0601	5	1.25	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
0602	5	1.25	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
0603	5	1.25	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
0701	5	2.5	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
0702	5	2.5	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
0703	5	2.5	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
0801	5	3.75	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
0802	5	3.75	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
0803	5	3.75	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
0901	5	5	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
0902	5	5	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
0903	5	5	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
1001	4	3	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
1002	4	3	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
1003	4	3	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
1101	4	2	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
1102	4	2	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
1103	4	2	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
1201	4	1	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
1202	4	1	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
1203	4	1	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
1301	4	4	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
1302	4	4	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
1303	4	4	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
1401	3	0.75	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
1402	3	0.75	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
1403	3	0.75	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
1501	3	1.5	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
1502	3	1.5	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
1503	3	1.5	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
1601	3	2.25	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
1602	3	2.25	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
1603	3	2.25	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512

Tabla 5.1a Organización de los ensayos correspondientes al primer grupo incluyendo sus valores característicos. 1 a 16.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE LABORATORIO

Caso	L1 (m)	L2 (m)	H (m)	h (m)	T (s)	L (m)	k	$\mu = kh$	$\varepsilon = H/L$	$\delta = H/h$	Ursell (δ/μ^2)
1701	3	3	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
1702	3	3	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
1703	3	3	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
1801	2	0.5	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
1802	2	0.5	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
1803	2	0.5	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
1901	2	1	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
1902	2	1	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
1903	2	1	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
2001	2	1.5	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
2002	2	1.5	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
2003	2	1.5	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
2101	2	2	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
2102	2	2	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
2103	2	2	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
2201	1	0.25	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
2202	1	0.25	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
2203	1	0.25	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
2301	1	0.5	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
2302	1	0.5	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
2303	1	0.5	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
2401	1	0.75	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
2402	1	0.75	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
2403	1	0.75	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502
2501	1	1	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
2502	1	1	0.025	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.006163	0.05	0.083348756
2503	1	1	0.01	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.002465	0.02	0.033339502

Tabla 5.1b Organización de los ensayos correspondientes al primer grupo incluyendo sus valores característicos.17 a 25

Caso	L1 (m)	L2 (m)	H (m)	h (m)	T (s)	L (m)	k	$\mu = kh$	$\epsilon = H/L$	$\delta = H/h$	Ursell (δ/μ^2)
0104	1	0	0.04	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.009862	0.08	0.13335801
0204	2	0	0.04	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.009862	0.08	0.13335801
0404	4	0	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
0405	4	0	0.05	0.5	2.8	5.93465	1.05873	0.529365	0.008425	0.1	0.356853165
0406	4	0	0.05	0.5	7.27	15.99833	0.39274	0.19637	0.003125	0.1	2.593281846
0407	4	0	0.05	0.5	2.53	5.30897	1.1835	0.59175	0.009418	0.1	0.285577158
0408	4	0	0.05	0.5	1.64	3.17811	1.97702	0.98851	0.015733	0.1	0.102338222
0504	5	0	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
0505	5	0	0.05	0.5	3.4	7.31063	0.85946	0.42973	0.006839	0.1	0.541512708
0506	5	0	0.05	0.5	1	1.5129	4.153074	2.076537	0.033049	0.1	0.023191065
0507	5	0	0.05	0.5	1.5	2.8264	2.223035	1.111517	0.01769	0.1	0.080940802
0508	5	0	0.05	0.5	2	4.0561	1.549071	0.774535	0.012327	0.1	0.166693076
0509	5	0	0.05	0.5	2.5	5.2385	1.199425	0.599712	0.009545	0.1	0.278044399
0510	5	0	0.05	0.5	3	6.3958	0.982392	0.491196	0.007818	0.1	0.414467044
0511	5	0	0.05	0.5	3.5	7.5388	0.833446	0.416723	0.006632	0.1	0.575843804
0512	5	0	0.05	0.5	4	8.6728	0.72447	0.362235	0.005765	0.1	0.762112206
0513	5	0	0.05	0.5	4.5	9.8009	0.641082	0.320541	0.005102	0.1	0.973267386
0514	5	0	0.05	0.5	5	10.9248	0.57513	0.287565	0.004577	0.1	1.209281043
0515	5	0	0.05	0.5	5.5	12.0457	0.521612	0.260806	0.004151	0.1	1.470159113
0516	5	0	0.05	0.5	6	13.1644	0.477286	0.238643	0.003798	0.1	1.755910575
0517	5	0	0.05	0.5	6.5	14.2813	0.439959	0.219979	0.003501	0.1	2.066501568
0518	5	0	0.05	0.5	7	15.3968	0.408084	0.204042	0.003247	0.1	2.401934673
0519	5	0	0.05	0.5	7.5	16.5113	0.380538	0.190269	0.003028	0.1	2.762248785
0520	5	0	0.05	0.5	8	17.6248	0.356497	0.178248	0.002837	0.1	3.14737615
0521	5	0	0.05	0.5	8.5	18.7377	0.335323	0.167662	0.002668	0.1	3.557400956
0522	5	0	0.05	0.5	9	19.8499	0.316535	0.158267	0.002519	0.1	3.992242384
0523	5	0	0.05	0.5	9.5	20.9616	0.299747	0.149874	0.002385	0.1	4.451938059
0524	5	0	0.05	0.5	10	22.0729	0.284656	0.142328	0.002265	0.1	4.936498917
0604	5	1.25	0.05	0.5	1.3	2.31155	2.71817	1.359085	0.021631	0.1	0.054138568
0605	5	1.25	0.05	0.5	3.1	6.62579	0.94829	0.474145	0.007546	0.1	0.444813183
0606	5	1.25	0.05	0.5	1.1	1.78128	3.52734	1.76367	0.02807	0.1	0.032148843
0607	5	1.25	0.05	0.5	2.6	5.472	1.14824	0.57412	0.009137	0.1	0.303385379

Tabla 5.2a. Organización de los ensayos correspondientes al grupo de ensayos complementarios, incluyendo sus valores característicos. 1 a 6.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE LABORATORIO

Caso	L1 (m)	L2 (m)	H (m)	h (m)	T (s)	L (m)	k	$\mu = kh$	$\epsilon = H/L$	$\delta = H/h$	Ursell (δ/μ^2)
0704	5	2.5	0.05	0.5	1.35	2.44224	2.57271	1.286355	0.020473	0.1	0.06043358
0705	5	2.5	0.05	0.5	3.2	6.85479	0.91661	0.458305	0.007294	0.1	0.476091918
0706	5	2.5	0.05	0.5	9.2	20.2942	0.3096	0.1548	0.002464	0.1	4.17309323
0707	5	2.5	0.05	0.5	4.85	10.58855	0.59339	0.296695	0.004722	0.1	1.136003174
0708	5	2.5	0.05	0.5	1	1.5129	4.153074	2.076537	0.033049	0.1	0.023191065
0709	5	2.5	0.05	0.5	1.5	2.8264	2.223035	1.111517	0.01769	0.1	0.080940802
0710	5	2.5	0.05	0.5	2	4.0561	1.549071	0.774535	0.012327	0.1	0.166693076
0711	5	2.5	0.05	0.5	2.5	5.2385	1.199425	0.599712	0.009545	0.1	0.278044399
0712	5	2.5	0.05	0.5	3	6.3958	0.982392	0.491196	0.007818	0.1	0.414467044
0713	5	2.5	0.05	0.5	3.5	7.5388	0.833446	0.416723	0.006632	0.1	0.575843804
0714	5	2.5	0.05	0.5	4	8.6728	0.72447	0.362235	0.005765	0.1	0.762112206
0715	5	2.5	0.05	0.5	4.5	9.8009	0.641082	0.320541	0.005102	0.1	0.973267386
0716	5	2.5	0.05	0.5	5	10.9248	0.57513	0.287565	0.004577	0.1	1.209281043
0717	5	2.5	0.05	0.5	5.5	12.0457	0.521612	0.260806	0.004151	0.1	1.470159113
0718	5	2.5	0.05	0.5	6	13.1644	0.477286	0.238643	0.003798	0.1	1.755910575
0719	5	2.5	0.05	0.5	6.5	14.2813	0.439959	0.219979	0.003501	0.1	2.066501568
0720	5	2.5	0.05	0.5	7	15.3968	0.408084	0.204042	0.003247	0.1	2.401934673
0721	5	2.5	0.05	0.5	7.5	16.5113	0.380538	0.190269	0.003028	0.1	2.762248785
0722	5	2.5	0.05	0.5	8	17.6248	0.356497	0.178248	0.002837	0.1	3.14737615
0723	5	2.5	0.05	0.5	8.5	18.7377	0.335323	0.167662	0.002668	0.1	3.557400956
0724	5	2.5	0.05	0.5	9	19.8499	0.316535	0.158267	0.002519	0.1	3.992242384
0725	5	2.5	0.05	0.5	9.5	20.9616	0.299747	0.149874	0.002385	0.1	4.451938059
0726	5	2.5	0.05	0.5	10	22.0729	0.284656	0.142328	0.002265	0.1	4.936498917
0804	5	3.75	0.05	0.5	3.4	7.31063	0.85946	0.42973	0.006839	0.1	0.541512708
0805	5	3.75	0.05	0.5	1.6	3.07786	2.04141	1.020705	0.016245	0.1	0.095984148
0806	5	3.75	0.05	0.5	2.6	5.472	1.14824	0.57412	0.009137	0.1	0.303385379
0807	5	3.75	0.05	0.5	6	13.16396	0.4773	0.23865	0.003798	0.1	1.755808401
0904	5	5	0.05	0.5	3.4	7.31063	0.85946	0.42973	0.006839	0.1	0.541512708
0905	5	5	0.05	0.5	2.8	5.93465	1.05873	0.529365	0.008425	0.1	0.356853165
1004	4	3	0.05	0.5	3.4	7.31063	0.85946	0.42973	0.006839	0.1	0.541512708
1104	4	2	0.05	0.5	2.8	5.93465	1.05873	0.529365	0.008425	0.1	0.356853165
1105	4	2	0.05	0.5	4.63	10.09399	0.62247	0.311235	0.004953	0.1	1.032340916
1106	4	2	0.05	0.5	8.3	18.29219	0.34349	0.171745	0.002733	0.1	3.390250552
1204	4	1	0.05	0.5	2.7	5.70409	1.10152	0.55076	0.008766	0.1	0.329666804
1205	4	1	0.05	0.5	6.4	14.05857	0.44693	0.223465	0.003557	0.1	2.00253897
1206	4	1	0.05	0.5	8.4	18.51571	0.33934	0.16967	0.0027	0.1	3.473680577
1304	4	4	0.05	0.5	7.7	16.95735	0.37053	0.185265	0.002949	0.1	2.913488032
1305	4	4	0.05	0.5	2.7	5.70409	1.10152	0.55076	0.008766	0.1	0.329666804
1306	4	4	0.05	0.5	1.7	3.32623	1.88898	0.94449	0.015032	0.1	0.112099912
1307	4	4	0.05	0.5	1.3	2.31155	2.71817	1.359085	0.021631	0.1	0.054138568
1404	3	0.75	0.05	0.5	2.2	4.5337	1.38589	0.692945	0.011029	0.1	0.208258372
1405	3	0.75	0.05	0.5	6.4	14.05857	0.44693	0.223465	0.003557	0.1	2.00253897
1406	3	0.75	0.05	0.5	1.4	2.57093	2.44393	1.221965	0.019448	0.1	0.066970334
1504	3	1.5	0.05	0.5	6.51	14.30318	0.43929	0.219645	0.003496	0.1	2.072799796
1505	3	1.5	0.05	0.5	2.2	4.5337	1.38589	0.692945	0.011029	0.1	0.208258372
1506	3	1.5	0.05	0.5	1.4	2.57093	2.44393	1.221965	0.019448	0.1	0.066970334
1507	3	1.5	0.05	0.5	3.6	7.7667	0.80899	0.404495	0.006438	0.1	0.611186404
1604	3	2.25	0.05	0.5	6.4	14.05857	0.44693	0.223465	0.003557	0.1	2.00253897
1605	3	2.25	0.05	0.5	5	10.92442	0.57515	0.287575	0.004577	0.1	1.209198899
1606	3	2.25	0.05	0.5	2.2	4.5337	1.38589	0.692945	0.011029	0.1	0.208258372
1607	3	2.25	0.05	0.5	1.7	3.32623	1.88898	0.94449	0.015032	0.1	0.112099912

Tabla 5.2b. Organización de los ensayos correspondientes
al grupo de ensayos complementarios, incluyendo sus valores característicos. 7 a 16.

Caso	L1 (m)	L2 (m)	H (m)	h (m)	T (s)	L (m)	k	$\mu = kh$	$\epsilon = H/L$	$\delta = H/h$	Ursell (δ/μ^2)
1704	3	3	0.05	0.5	6.4	14.05857	0.44693	0.223465	0.003557	0.1	2.00253897
1705	3	3	0.05	0.5	2.2	4.5337	1.38589	0.692945	0.011029	0.1	0.208258372
1706	3	3	0.05	0.5	1.4	2.57093	2.44393	1.221965	0.019448	0.1	0.066970334
1904	2	1	0.05	0.5	4.6	10.02556	0.62672	0.31336	0.004987	0.1	1.018387085
1905	2	1	0.05	0.5	2.7	5.70409	1.10152	0.55076	0.008766	0.1	0.329666804
1906	2	1	0.05	0.5	1.2	2.04844	3.0673	1.53365	0.024409	0.1	0.042515519
2004	2	1.5	0.05	0.5	1	1.51287	4.15315	2.076575	0.03305	0.1	0.023190214
2005	2	1.5	0.05	0.5	3.5	7.53839	0.83349	0.416745	0.006633	0.1	0.575783485
2104	2	2	0.05	3.6	2	6.23641	1.0075	0.50375	0.008017	0.01389	0.054731504
2105	2	2	0.05	4.9	2	6.24459	1.00618	0.50309	0.008007	0.0102	0.040316475
2304	1	0.5	0.05	0.5	1.2	2.04844	3.0673	1.53365	0.024409	0.1	0.042515519
2404	1	0.75	0.05	0.5	2.2	4.5337	1.38589	0.692945	0.011029	0.1	0.208258372
2405	1	0.75	0.05	0.5	1.1	1.78128	3.52734	1.76367	0.02807	0.1	0.032148843
2406	1	0.75	0.05	0.5	0.9	1.24828	5.03347	2.516735	0.040055	0.1	0.015787924
2407	1	0.75	0.05	0.5	1.56	2.97816	2.10975	1.054875	0.016789	0.1	0.089866536
2408	1	0.75	0.05	0.5	0.716	0.79979	7.85603	3.928015	0.062516	0.1	0.006481175
2601	5	2.5	0.05	0.5	2	4.05614	1.54905	0.774525	0.012327	0.1	0.166697512
2602	5	2.5	0.05	0.5	1.4	2.57093	2.44393	1.221965	0.019448	0.1	0.066970334
2603	5	2.5	0.05	0.5	5.6	12.27017	0.51207	0.256035	0.004075	0.1	1.525461759
2604	5	2.5	0.05	0.5	7.1	15.61937	0.40227	0.201135	0.003201	0.1	2.471864727

Tabla 5.2c. Organización de los ensayos correspondientes al grupo de ensayos complementarios, incluyendo sus valores característicos. 17 a 26.

5.4.2 Análisis de calidad y repetitividad de los datos

Debido a que se cuenta con una gran cantidad de ensayos y registros medidos, es de gran importancia conocer con detalle la calidad que dichos datos presentan. La realización de un análisis previo es obligado para cualquier tratamiento de información experimental dentro de un estudio con datos de laboratorio.

En este apartado se presenta un análisis que consiste en evaluar las posibles diferencias relativas o errores que los registros medidos pudiesen contener, en gran parte debido a las repeticiones llevadas a cabo en los ensayos del primer grupo en la zona exterior de la configuración experimental. Con ello se quiere garantizar la repetitividad de los ensayos. Además, es importante conocer el que de forma inherente ocurre, sea por el manejo de sistemas de laboratorio y equipo, o por las condiciones iniciales del sistema experimental. Al conocer y evaluar este tipo de errores iniciales, se puede establecer un control de calidad de los datos generados en laboratorio, de gran importancia a la hora de realizar análisis y operaciones con ellos.

Para ello, el pre-análisis de la repetitividad de los ensayos se ha basado en la obtención del espectro de energía de las series de superficie libre registradas en la zona de incidencia del oleaje, utilizando los primeros tres sensores ubicados en dicha zona. Se han considerado que los errores calculados para estos sensores son representativos de los demás sensores. La figura 5.9 muestra un registro de superficie libre para el primer sensor de la zona de incidencia, para tres repeticiones y para el ensayo 0101.

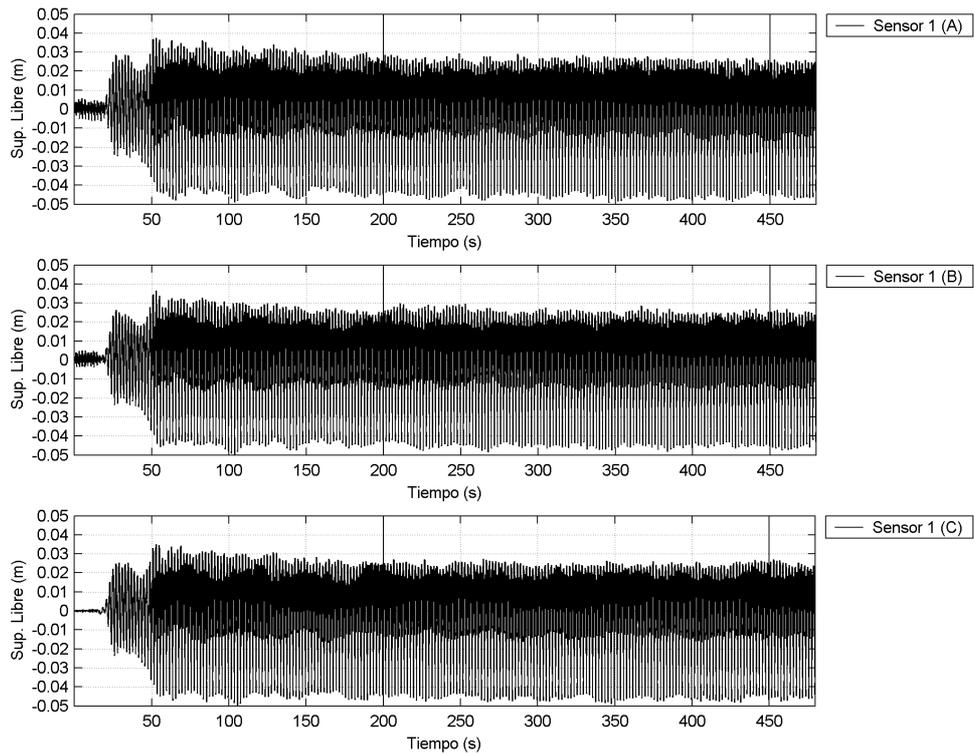


Figura 5.9 Registro de superficie libre para el ensayo 0101, el sensor 1 y las repeticiones A, B y C. Mostrando el segmento temporal para el análisis espectral

Para la obtención de los resultados del análisis de repetitividad entre las 3 series de cada ensayo (A, B y C), se trabajó con los ensayos del primer grupo (78 ensayos). Para ello, se evaluó el máximo error relativo entre los primeros cuatro armónicos principales de las series medidas, tomados directamente del espectro de energía. Este se obtiene con una función discreta de Fourier para el registro estable comprendido entre $t_i=200$ s y $t_f=450$ s, donde t_i y t_f son los tiempos inicial y final respectivamente.

La figura 5.10 muestra un ejemplo de los espectros de amplitudes obtenidos, para el caso 0101 en los tres sensores y para las tres repeticiones. Se muestran las frecuencias correspondientes a los cuatro armónicos principales $f_1=0.5$ Hz, $f_2=1.0$ Hz, $f_3=1.5$ Hz y $f_4=2.0$ Hz.

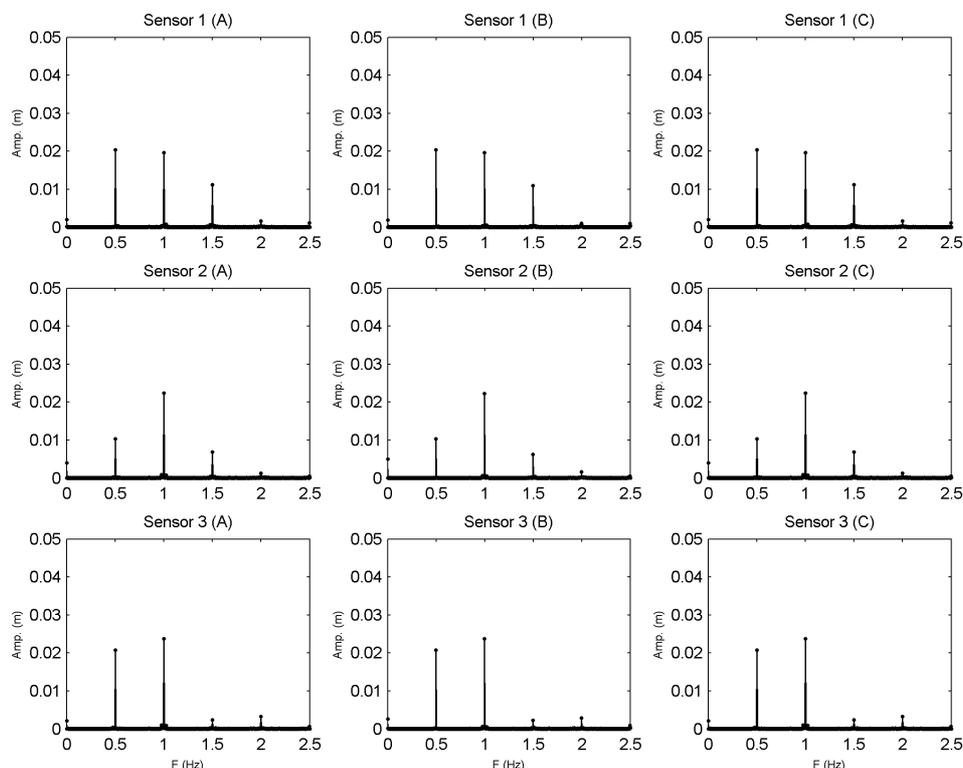


Figura 5.10 Espectros de amplitudes para los cuatro armónicos principales de las series de superficie libre. Sensores 1, 2 y 3 y sus repeticiones A, B y C.

En la figura 5.11 se presenta los valores del máximo error relativo para los tres armónicos principales, en los tres sensores que definen la zona de incidencia del oleaje. Se realiza la comparación directa del valor máximo del error obtenido de las 6 combinaciones posibles entre pares de ensayos repetidos. Es decir, se toma el error relativo máximo de los tres armónicos entre el ensayo A y el B, entre el A y el C, y así sucesivamente.

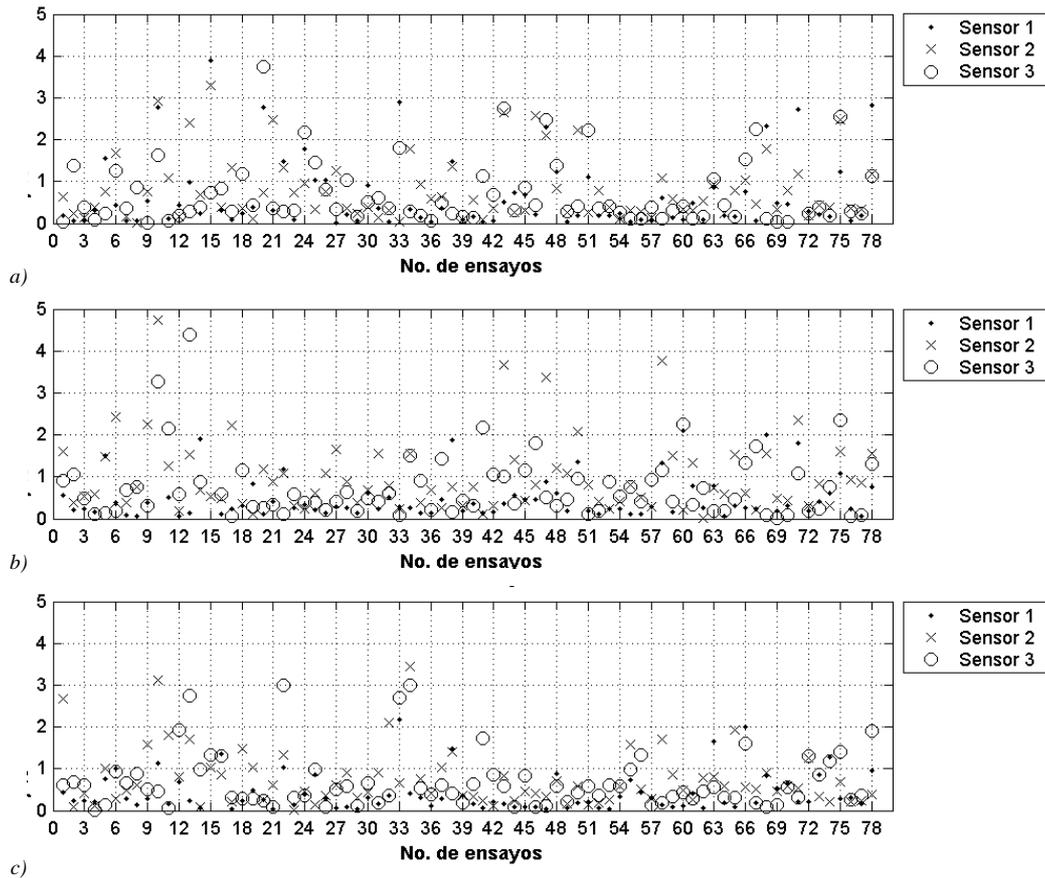


Figura 5.11 Comparaciones de los errores relativos máximos entre las 3 repeticiones dentro de la zona de incidencia. a) Primer armónico, b) segundo armónico, c) tercer armónico.

En primer lugar, se puede ver que los errores máximos relativos no superan el 5% en los 3 sensores. También se observa que para los valores del primer armónico, aparecen los máximos errores relativos en los 3 sensores si comparamos directamente con las gráficas del segundo y tercer armónico.

Los valores de error en el sensor 1 no alcanzan a superar el 2% de error máximo relativo para los dos primeros armónicos, mientras que para el mismo sensor se ve superado ese límite para los valores del primer armónico en 8 ensayos. Este comportamiento indica que aproximadamente el 85% de los ensayos queda por debajo del 1.5% de error máximo relativo lo que significa que la repetitividad de los ensayos es de buena calidad.

5.5 CONCLUSIONES

En este capítulo se presenta el trabajo experimental desarrollado en esta Tesis doctoral.

Los ensayos, su geometría, el forzamiento incidente y la instrumentación se ha diseñado para obtener la mayor información posible para analizar la transitoriedad, no linealidad y acoplamiento geométrico en la resonancia portuaria.

Los datos obtenidos no son únicamente útiles para mejorar nuestro conocimiento del proceso, si no que forman una base fundamental de referencia para validar el modelo numérico que será presentado más adelante, y para desarrollar la metodología de aplicación.

Se ha llevado a cabo un proceso de análisis preliminar de los datos con el fin de garantizar la calidad de los mismos que ha arrojado unas conclusiones satisfactorias.