

4. EL CANAL DE OLAJE CIEM

4.1. ANTECEDENTES

Durante los meses de Febrero a Julio del 2001 se ejecutaron en el canal de oleaje CIEM de la UPC ensayos experimentales asociados al proyecto “Big-VOWS” (Violent Overtopping by Waves at Seawalls), dentro del programa europeo WAVELAB, propuesto por Jonathan Pierce, Tom Bruce y William Allsop, de las universidades de Edimburgh y Sheffield.

Los estudios y ensayos a escala reducida realizados en la Universidad de Edimburgh permitieron la parametrización de una formulación empírica del caudal medio y máximo de rebase en función de las condiciones de oleaje, geométricas y batimétricas. Para mejorar los criterios de formulación, se decidió prolongar los ensayos en series de tests sobre dos dimensiones realizados en el canal CIEM, con el objetivo de trabajar en una escala mayor que la utilizada hasta la fecha, considerando así unas situaciones más complejas y reales que las usadas en el modelo de la universidad de Edimburgh.



Imagen 4.1. Ensayos realizados en el canal CIEM (2001)

4.2. CANAL DE OLEAJE CIEM. INTRODUCCIÓN

La ingeniería portuaria y costera trabaja en un medio extremadamente dinámico y energético. La variabilidad del oleaje y las intensas solicitaciones que este ejerce sobre cualquier tipo de obra o actuación costera son un buen ejemplo de ello. La complejidad de este medio hace difícil cuantificar con exactitud estas solicitaciones y realizar un proyecto ingenieril adecuado. Sin embargo es esencial poder predecir al máximo el comportamiento de las actuaciones u obras ingenieriles realizadas en la costa para evitar los fallos de estas estructuras, algo que desgraciadamente ocurre de forma habitual.

Este canal es un instrumento único que permite reproducir a escalas próximas a la real el comportamiento de un perfil de playa con o sin obras y sometido a las condiciones de oleaje y nivel medio del mar que se deseen. Los ensayos más habituales que se pueden realizar en este campo son los de estabilidad y comportamiento de diques portuarios y estructuras de defensa de la costa. También es posible realizar un análisis del comportamiento de un perfil de playa o de una alimentación artificial.

Otros países con una longitud de costa considerable y con un nivel técnico-científico elevado ya poseen desde hace tiempo canales experimentales de oleaje: el canal GWK de Alemania, el canal Delta de Holanda, el canal CRIEPI de Japón y el canal de Oregón (Supertank) de los EUA. Pero estos canales mencionados están obligados a trabajar en escalas más reducidas a las utilizadas en el CIEM, lo que provoca una distorsión y menor rigurosidad en la exactitud de los resultados obtenidos.

4.3. CARACTERÍSTICAS Y PRESTACIONES DEL CANAL CIEM

El Canal de Investigación y Experimentación Marítima (CIEM) está situado en el Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM) del departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental (DEHMA) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Ha sido la instalación donde se han realizado los ensayos y su posterior análisis.

Su geometría es de 100 m de largo, por 3 m de ancho y por 5 de alto. Tiene dispuesta en su tramo final una playa de mortero de pendiente 1/15, previo a una playa final de escollera destinada a disipar energía. La rugosidad de las paredes y del fondo del canal está minimizada (exceptuando el tramo de fondo inclinado), para evitar la interacción de oleajes transversales.

Es un canal cubierto, lo que permite el mantenimiento del agua en unas condiciones ideales y constantes, evitando la influencia de agentes no controlables, como puede ser el viento e inclemencias meteorológicas o los cambios bruscos de temperatura. Factores que podrían variar los valores de las mediciones a lo largo de un ensayo, o no permitir realizarlas.

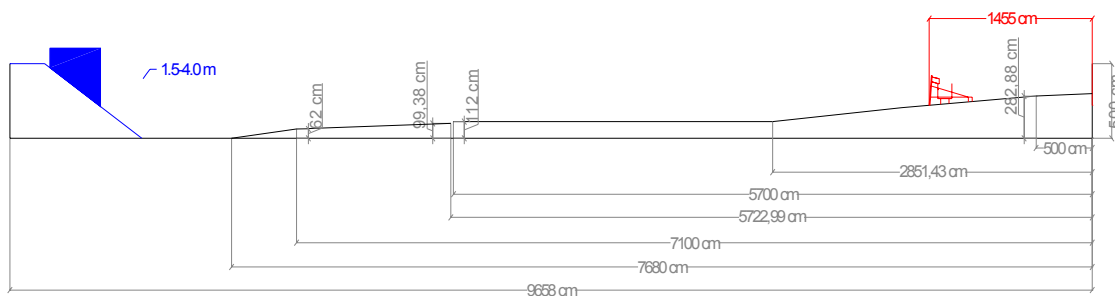


Figura 4.1. Esquema del canal CIEM preparado para los ensayos del VOWS.

El equipo del canal está compuesto por el generador tipo cuña, sistema de guía y estructura de soporte, sistema hidráulico, actuador hidráulico, sistema de control electrónico, sintetizador del espectro de oleaje software para la adquisición de datos. El actuador hidráulico dispone de tres motobombas que proporcionan presión al circuito de aceite. Una servoválvula regula el flujo de aceite a un pistón de doble cara, que es el responsable del movimiento de la pala. Ésta es de tipo cuña (“Wedge-type”), deslizándose por un plano con una pendiente de 30°.

Además, el canal dispone de un conjunto de ventanas laterales que se utilizan para la filmación de los ensayos con el objetivo de obtener mayor información de los resultados y ubicar de la forma más ajustada los diques a estudiar. También cabe la posibilidad de realizar mediciones de alta tecnología a través de dichas ventanas, como por ejemplo, utilizando rayos láser, lo que posibilita la obtención de datos muy detallados del campo de velocidades del agua.

El canal CIEM puede trabajar con niveles medios de agua variables y reproducir olas de hasta 1.6 metros de altura, tanto con oleaje regular como irregular. Posee un sistema de absorción dinámica de oleaje que elimina las distorsiones producidas por la reflexión de las olas en las estructuras o playas ensayadas.

4.4. GENERACIÓN DE OLEAJE

La servoválvula que regula el flujo de aceite al pistón está controlada por una señal de rango 10 V, llamada “demand”, que le es enviada a través de un equipo formado por dos ordenadores, cada uno de los cuales realiza una función distinta:

1. Equipo de generación de oleaje: mediante el programa WAVEGEN se envía una señal a la servoválvula que permite generar el oleaje especificado, tanto regular (definidos a partir de la altura de ola y la frecuencia) como irregular (definido a través de un espectro o de una serie temporal). En nuestro caso, para la realización de los ensayos del programa “Big-VOWS”, se ha utilizado un oleaje irregular definido a partir del espectro de JONSWAP, con la previa determinación de la altura de ola significativa y el periodo pico. El espectro de JONSWAP viene definido por:

$$S(f) = \frac{aH_s^2 f_p^4}{f^5} e^{-\left[1,25\left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right]} Y e^{-\left[\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right]}$$

donde

a parámetro definido como:

$$a = \frac{0,0624}{\left[0,23 + 0,0336Y - \frac{0,185}{1,9 + Y} \right]};$$

- f_p frecuencia pico;
- H_s altura de ola significativa;
- Y parámetro del modelo físico, con valores comprendidos entre 1 y 7. En su defecto, el valor adoptado será 3,3;
- σ parámetro definido por:

$$\sigma = 0,07 \quad \text{para } f \leq f_p;$$

$$\sigma = 0,09 \quad \text{para } f > f_p.$$

- Equipo de absorción de oleaje: el señal enviado por el WAVEGEN es modificado por el programa SAWAS. El oleaje se refleja en la parte final del canal y retorna hacia la pala. Para evitar que se vuelva a reflejar al impactar sobre la pala, hecho que variaría las características del oleaje incidente, se modifica la señal de generación restándole esta ola que hay que absorber. De esta manera, el oleaje incidente inicialmente programado no se modifica. Para obtener la señal de onda que debe ser absorbida se disponen tres sensores resistivos de nivel de superficie libre unos metros por delante de la pala, detectando así la ola reflejada.

El equipo de adquisición de datos está formado por un ordenador personal (PC), una tarjeta A/D AIP y una tarjeta A/D CIO. Las señales adquiridas por los instrumentos de medición son registradas en tiempo real como valores digitales de voltaje para su posterior análisis. Esta transformación requiere la calibración de los instrumentos.

4.5. ENSAYOS

El objetivo principal de los ensayos es determinar el rebase producido en diferentes condiciones de oleaje. El sistema se generaliza a la obtención del volumen de agua rebasada por cada ola y el total de una serie determinada. Dicho volumen se recoge por la boca de un tobogán con una anchura de 1,88 metros. El agua rebasada queda

confinada en un tanque recolector suspendido en una célula de carga, lo que nos da continuamente un valor de peso en Voltios. La conversión que se debe realizar es de 97,91 litros por cada Voltio. Las cintas resistivas que están situadas en el tobogán nos indicará el paso de agua, distinguiendo así que olas son las que producen rebase. En el apartado de instrumental se indica más detalladamente el funcionamiento propio de todos los elementos o aparatos de medición anteriormente citados.

Con estos datos se podrá obtener el valor de rebase, caudal por metro lineal de la estructura y por segundo, además del caudal total en una serie temporal al conocer la duración del evento.

4.6. INSTRUMENTAL

El canal CIEM dispone de una serie de instrumentos para la medición de distintas variables de estudio. En el momento de la ejecución de los ensayos, los instrumentos utilizados fueron los siguientes:

- Sensores de superficie libre de tipo resistivo (“wave gauges”), que constan de un mástil principal, de cinco metros, apoyado sobre una base triangular situada en el fondo del canal (para mejorar la estabilidad del instrumento frente a oleajes fuertes). Sobre el mástil móvil se sitúa un soporte que permite su calibración. En este soporte se disponen dos cables paralelos de dos metros de longitud. Para medir la altura de la lámina de agua (altura de la superficie libre) se utiliza la variación de resistencia eléctrica que hay en cada momento entre los dos cables debido a los distintos niveles de agua. Esta resistencia es proporcional a la altura de lámina de agua que los cubre, lo que nos permite transformar la señal recibida en una medida de la altura de superficie libre del agua. Antes de la ejecución de los ensayos se realizan una serie de medidas para la máxima fiabilidad en la aproximación de la función de transformación de datos. Esto se debe a la posible modificación de la conductividad del agua, que depende de la concentración de sales, temperatura, etc. Son factores no controlables que pueden conllevar la determinación de datos erróneos si no se realiza una previa calibración. La calibración se realiza con las

aguas del canal en reposo, desplazando el soporte a lo largo del mástil, dando pares de valores de inmersión de cable (medidos físicamente in situ). La diferencia de potencial obtenida entre los dos cables se comparan con los pares de valores obtenidos en las mediciones físicas. Los valores obtenidos se ajustan por una recta de mínimos cuadrados obteniéndose una función de transformación voltaje-altura de la lámina de agua.

- Correntímetros electromagnéticos sumergibles, situados en una misma vertical, para medir el campo de velocidades orbitales del fluido en dos direcciones ortogonales (“u” y “w”). Requieren previamente a cada ensayo una compensación del valor cero de velocidades, así como la medición del offset correspondiente.

Los correntímetros son fabricados por Delf Hydraulics. Constan de una cabeza esférica de 40 mm de diámetro, con cuatro electrodos que permiten medir las velocidades del fluido en las dos direcciones mencionadas. El rango máximo de medición es de ± 2.5 m/s. Su precisión es de ± 0.01 m/s $\pm 3\%$ del valor medido más la respuesta de error por estar o no inclinado. El último error es insignificante si la inclinación es menor de 10° y llega hasta un 5% de error en ángulos de 30° . Estos instrumentos se calibran en el lugar de fabricación. Solo es necesario realizar una medida de su offset previo a cada ensayo como se ha mencionado anteriormente.

- Sensores de presión sobre el muro vertical para medir las fuerzas o sollicitaciones ejercidas por el oleaje sobre el muro. Los sensores registran la presión en cada momento, enviando una señal eléctrica a un PC. Mediante un programa de transformación de datos se obtiene la fuerza ejercida sobre el muro vertical.
- Célula de carga que mide instantáneamente el peso soportado del contenedor de recogida de agua rebasada y del agua rebasada. Restando el peso del contenedor, se obtiene en cada momento el peso de agua situado el mismo. La señal de la célula de carga se envía a un PC, que registra el peso y lo transforma en volumen, utilizando una función peso-volumen. El registro queda como una serie temporal. Para analizar volúmenes máximos o volumen de ola rebasada deberá analizarse que cantidad de agua a entrado en el contenedor en un intervalo de tiempo correspondiente a una ola determinada y que volumen de agua ha sido evacuada en el mismo intervalo.

- Cintas conductoras de tipo resistivo para controlar el paso de agua rebasada sobre el embudo, desde el dique vertical hasta el contenedor de recogida. Las cintas conductoras detectan la presencia de flujo de agua sobre el embudo, enviando una señal al PC de registro de datos. Esto permite realizar una aproximación en la determinación temporal de paso de agua, lo que nos permite diferenciar los intervalos de tiempo de recogida de agua pertenecientes a cada ola por separado.

4.7. DISTRIBUCIÓN DEL INSTRUMENTAL

Los diferentes instrumentos utilizados en los ensayos fueron ubicados de la siguiente manera:

- 7 sensores de superficie libre de tipo resistivo (“wave gauge”). Se instalaron tres próximos a la pala de generación de oleaje (WG0, WG1 y WG2), utilizados para el equipo de control de generación de oleaje (WAVEGEN); uno en la zona media del canal (WG4) a modo de control indicativo; y tres más en las cercanías del dique (WG5, WG6 y WG7) para el equipo corrector de generación de oleaje debido a la refracción (SAWAS). Su ubicación, respecto a la coordenada cero del canal (situada en el extremo opuesto a la pala), es la siguiente:

| SENSOR | WG0 | WG1 | WG2 | WG3 | WG5 | WG6 | WG7 |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| X (cm) | 7360 | 7315 | 7195 | 4500 | 2655 | 2575 | 2435 |

- 3 correntímetros situados en:

| CORRENTÍMETRO | EMS0 | EMS1 | EMS2 |
|---------------|------|------|------|
| X (cm) | 2655 | 2575 | 2435 |

- 8 sensores de presión situados en la vertical media del dique, a una distancia en milímetros como se indica en la tabla siguiente:

| SENSOR | PT0 | PT1 | PT2 | PT3 | PT4 | PT5 | PT6 | PT7 |
|--------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| D (mm) | 205 | 405 | 605 | 805 | 1005 | 1205 | 1405 | 1605 |

- Célula de carga. Soporta el peso del agua retenida en el tanque recolector.
- Varias cintas conductoras fueron colocadas a lo largo del tobogán de recogida.

4.8. CURVA DE CAPACIDAD

Para tener un orden de magnitud del oleaje máximo que se puede generar en el canal, se analizó la Curva de capacidad (“Performance Curve”), que es la curva de máximos oleajes regulares generables para cada frecuencia. Para un calado de 3 m se estudió cuales eran los oleajes máximos que se podían obtener en aguas someras, manteniendo unos ciertos márgenes de seguridad, para evitar que la pala se quedara trabada.

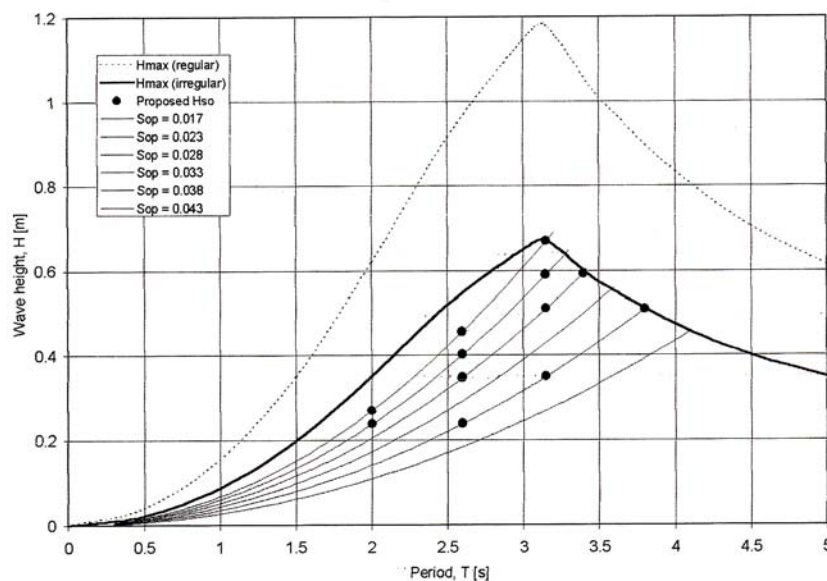


Figura 4.2. Gráfica de la Curva de capacidad.

El tramo de ascenso de la curva está limitado por la geometría del canal puesto que la ola, según las condiciones de calado y período, puede ser inestable físicamente y se produce la rotura de la ola, caso que carece de interés en el estudio. El tramo de

descenso de la Performance Curve está limitado por la capacidad generadora de la pala para producir un oleaje de altura de ola elevado en períodos cortos.

4.9. MODELO FÍSICO

El modelo físico para realizar los ensayos fue desarrollado dentro del proyecto Big-VOWS (Allsop et al). En la figura DICWORD se muestra la sección longitudinal del dique ensayado en el canal de oleaje CIEM:

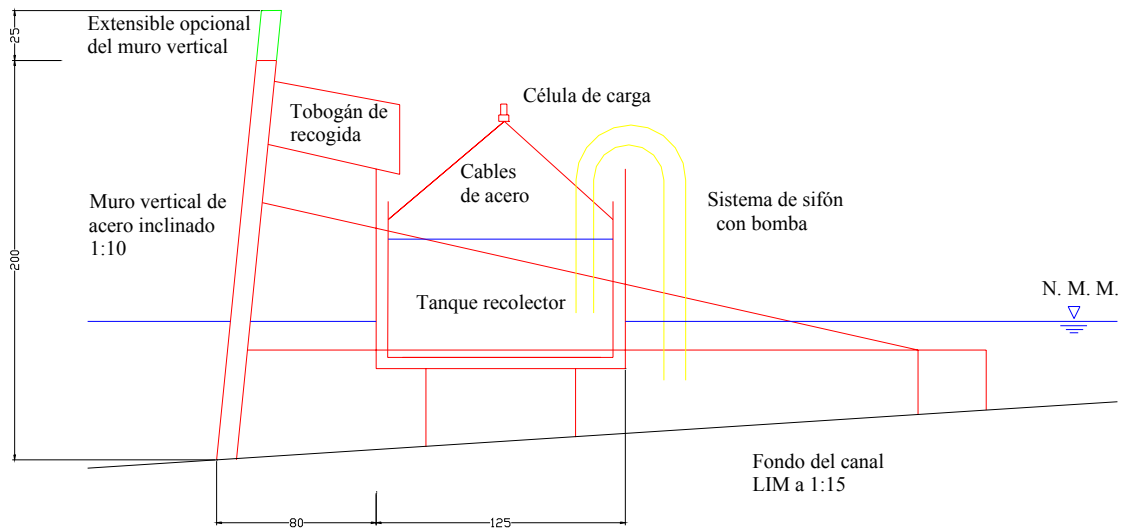


Figura 4.2. Esquema del dique vertical.

El dique vertical se realiza con un muro de acero inclinado 1:10 respecto al fondo del canal. La altura inicial es de 2 metros y la longitud del dique es la totalidad de la anchura del canal, 3 metros. Para tener la posibilidad de realizar ensayos con un dique de características diferentes sin la necesidad de realizar grandes cambios en la estructura, se optó por la construcción de una sección superior extraíble del dique que incrementaría en 25 centímetros la altura total.

El agua rebasada por encima del dique es recogida para su medición y de este modo poder cuantificar el volumen y caudal de rebase. Una vez que el agua supera el dique ésta es recogida por un tobogán que la dirige hasta el tanque recolector. El tobogán de recogida se sitúa en la parte superior y central del dique. Su boca de entrada tiene una

anchura de 1,88 metros. La longitud del tobogán es aproximadamente de 1 metro. Éste se va estrechando para verter la totalidad del agua que conduce hasta el interior del tanque recolector. En los laterales existen unas paredes verticales para evitar la pérdida de agua durante el transporte.

El tanque recolector se sitúa a 80 centímetros del dique. Su geometría es cúbica, con una longitud de su lado aproximadamente de 1,25 metros. El tanque se encuentra suspendido por cuatro cables de acero desde sus vértices hasta una célula de carga eléctrica.

Un sistema de bombeo de agua formado por un sifón evita que el tanque quede saturado. Antes de llegar a los límites de capacidad del tanque el agua es extraída mediante la ayuda de un bomba hidráulica.



Imagen 4.2. El modelo físico. Paramento vertical.

4.10. CALIBRACIÓN DEL OLEAJE

Para realizar los ensayos se necesitan unas condiciones de oleaje específicas que deben ser reproducidas en el canal con el modelo físico. Hay que comprobar que dichas condiciones de oleaje (definidas por la altura de ola significativa, H_s , y el período pico, T_p), predeterminadas por la curva de capacidad, pueden ser realizadas en el canal. Para verificar la posibilidad de establecer estas condiciones de oleaje, se procede a la calibración, previo a la construcción del dique, pues los equipos de generación permiten conocer los parámetros de oleaje generados por la pala, pero no los oleajes que incide sobre el pie del dique, que sufren fenómenos de transformación como la reflexión y el “shoaling”. Con este objetivo se instaló un equipo de medición sobre el futuro pie del dique que constaba de tres sensores de superficie libre, además de otros tres situados frente a la pala y uno en la posición intermedia del canal:

| SENSOR | WG0 | WG1 | WG2 | WG3 | WG5 | WG6 | WG7 |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| X (cm) | 7360 | 7315 | 7195 | 4500 | 1535 | 1455 | 1315 |

También se situó un correntímetro en la misma coordenada que el sensor de superficie libre WG5. Se realizaron tres grupos de calibraciones distintas para los tres calados predeterminados exigidos en la realización de los ensayos.

En el proceso de calibración se siguen los pasos a continuación detallados:

- Calibración de los instrumentos;
- Activación del sistema de absorción de oleaje;
- Generación de oleaje y medición de las variaciones de la superficie libre;
- Análisis de los datos obtenidos descomponiendo la altura de ola en altura incidente y reflejada en los calados correspondientes a la futura posición del pie de dique;

- Repetición de los procesos anteriores hasta obtener un resultado de valores de las condiciones de oleaje lo más coincidentes posible con los valores del proyecto. Esto nos determinará el “gain” correcto para el uso del espectro de JONSWAP.

4.11. SECUENCIA PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS

Antes de realizar los ensayos se debía calibrar el instrumental siguiendo la siguiente pauta:

- Calibración de los sensores de superficie libre;
- Realizar el “zero measuring” en el correntímetro (offset);
- Calibración de los sensores de presión, célula de carga y cintas resistivas;
- Generación de oleaje y obtención continua de datos de todos los sensores a una frecuencia de 32 Hz;
- Análisis preliminar y control de calidad de los valores obtenidos;
- Almacenamiento de los valores obtenidos.