



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

ESTUDIO DE SOLUCIONES PARA LA ADECUACIÓN DEL DIQUE DE ABRIGO DE PORT FÒRUM (BARCELONA)

ANEJO 5. ENSAYOS CON MODELO FÍSICO DE DIQUE EN TALUD CON CUENCO AMORTIGUADOR

Autor: Alejandro Folch Ruiz

Tutora: María Esther Gómez Martín

Valencia, septiembre de 2019

ÍNDICE

1. OBJETO.....	3
2. INTRODUCCIÓN.....	4
3. FASE 2: ESBECO RAMPA 4%.....	6
3.1. DESCRIPCIÓN DEL CANAL DE ENSAYOS DEL LPC-UPV.....	6
3.2. MODELO A ENSAYAR.....	7
3.2.1 Secciones tipo del dique en talud con cuenco amortiguador.....	7
3.2.2 Materiales empleados.....	16
3.2.3 Porosidad de las secciones	16
3.3. INSTRUMENTACIÓN.....	19
3.3.1 Sensores de nivel	19
3.3.2 Miniature propellers	20
3.3.3 Sensores ultrasónicos	21
3.3.4 Equipo de captación de rebase	22
3.3.5 Soporte audiovisual	23
3.3.6 Sensores de presión.....	25
3.4. DEFINICIÓN DE ENSAYOS.....	26
3.4.1 Modelo de dique con cuenco amortiguador	26
3.4.2 Ensayos en vacío	27
3.5. ANÁLISIS DE DATOS	28
3.5.1 Introducción.....	28
3.5.2 Análisis de oleaje.....	28
3.5.3 Análisis de la estabilidad hidráulica del manto	30
3.6. RESULTADOS.....	32
4. REFERENCIAS	35

1. OBJETO

El objeto de este anejo es resumir los ensayos realizados en el canal de oleaje y viento del Laboratorio de Puertos y Costas de la *Universitat Politècnica de València* enmarcados dentro del proyecto nacional ESBECO (*Estabilidad hidráulica del manto, BErmas y COronación de diques en talud con rebase y rotura por fondo*).

En concreto, el resumen se centrará en la fase 2 del proyecto, donde se llevaron a cabo ensayos con dique en talud con cuenco amortiguador. Por lo tanto, seguidamente se realiza una introducción del proyecto completo y posteriormente se presenta la fase 2, centrándose únicamente en el cuenco amortiguador.

2. INTRODUCCIÓN

Los diques en talud con rebase relevante en condiciones de rotura por fondo no se encuentran bien estudiados en la literatura científica, ya que la mayoría de las reglas y fórmulas de diseño se basan en resultados de experimentos físicos a escala reducida. Estos ensayos suelen realizarse sin rotura por fondo y con coronaciones o muy elevada con rebase despreciable, o bien con coronaciones muy bajas y diques prácticamente sumergidos donde no es posible registrar la medición de rebase. Sin embargo, los rompeolas con rotura por fondo total o parcial ($H_s > 0.4h$) y rebase relevante (estructuras con coronación media $0.5 < R_c/H_s < 1.0$) son muy comunes en la práctica y tienen una importancia creciente debido al cambio climático (aumento del nivel medio del mar) y la presión social para reducir el impacto visual que generan las cotas de coronación elevadas de estas estructuras.

Los diques con tipología de **cuenco amortiguador** son muy interesantes con el fin de reducir el rebase y la cota de coronación (impacto visual) de las obras marítimas simultáneamente. No obstante, plantean problemas de estabilidad en la coronación que no pueden ser resueltos directamente a partir de los ensayos físicos con diques convencionales. Adicionalmente al comportamiento 3D (cuenco-canal), la sección 2D no se encuentra bien estudiada a causa de los pocos ensayos físicos realizados hasta la fecha (la mayoría orientados a una obra específica) y la multitud de parámetros involucrados.

Por este motivo, se ha desarrollado el proyecto ESBECO, cuyo **primer objetivo** es mejorar el conocimiento de la estabilidad hidráulica de mantos de escollera, cubos y Cubípodos en diques de cotas de coronación reducida rebasables ($0.5 < R_c/H_m < 1.0$) con oleaje limitado por el fondo ($H_s > 0.4h_s$). Para ello, se ha caracterizado el rebase y la estabilidad hidráulica del manto principal, no sólo en el talud frontal, sino también en la coronación y trasdós. El **segundo objetivo** es abordar la caracterización de la sección de dique en talud con tipología de cuenco amortiguador, para disponer de directrices razonables para el pre-diseño de este tipo de diques. Con este fin, se ha analizado el rebase, la estabilidad hidráulica del manto principal de talud frontal y coronación y las fuerzas sobre el espaldón.

El proyecto ESBECO se ha desarrollado en dos fases en función de la pendiente de fondo: rampa 2% y 4%. Durante los ensayos con la pendiente del fondo del 2% se han estudiado secciones de dique en talud convencional rebasables, mientras que con la rampa del 4% se han realizado ensayos tanto con diques convencionales rebasables como con diques de tipología de cuenco amortiguador. Se han realizado ensayos con oleaje de tipo regular e irregular para ambas pendientes de fondo.

En todos los ensayos con oleaje irregular, se han lanzado series de 1000 olas siguiendo un espectro JONSWAP ($Y=3.3$). Se han distribuido estos ensayos en tandas definidas por un calado a pie de dique ($h_s=20$ y 25cm o 25 y 30cm para las secciones de dique rebasable y $h_s=26$ y 30cm para la tipología de cuenco amortiguador) y un peralte de ola constante con un número de Iribarren objetivo ($I_r=3$ y 5). Además, para analizar la influencia del periodo en el rebase y estabilidad hidráulica de la sección tipo cuenco amortiguador, se han realizado ensayos correspondientes a un periodo pico constante ($T_p=2.6\text{s}$). El modelo se ha reconstruido al finalizar serie de ensayos.

Para evaluar el **comportamiento del manto** tras ser atacado por los distintos temporales, se ha aplicado el **método de la Malla Virtual (ver Gómez-Martín y Medina, 2006 y 2014)**, usando fotografías ortogonales al manto principal para las tres zonas

estudiadas (talud frontal, coronación y trasdós) realizadas antes y después de cada ensayo, para medir los desplazamientos de las piezas y el nivel de daño.

Para la medición del rebase y sus variables descriptoras en coronación (velocidad del flujo y espesor de lámina de agua), se ha dispuesto un sistema de pesaje con una canaleta de metacrilato en el trasdós de la estructura y unos *miniature propellers* y un sensor de nivel embebido en un tubo tapado en la coronación del modelo.

Finalmente, se han realizado ensayos en vacío (sin modelo y con dissipador de energía al final del canal), para validar la metodología propuesta por Herrera y Medina (2015), que compararon las mediciones de oleaje en vacío con los resultados obtenidos mediante el modelo numérico SwanOne (Verhager et al., 2008). De este modo, es posible estimar la altura de ola en la zona con limitación por fondo empleando este modelo numérico. Los ensayos en vacío se han realizado siguiendo el mismo procedimiento que en los casos en los que existe modelo.

La fase 1 del proyecto se corresponde con los ensayos realizados sobre una pendiente de fondo del canal del 2%, pendiente suave. En la fase 2 del proyecto se aumentó la pendiente de fondo del canal a un 4%.

3. FASE 2: ESBECO RAMPA 4%

En la segunda fase del proyecto ESBECO, se estudiaron unas condiciones de rotura con una pendiente más fuerte del 4% (la cual se corresponde con una pendiente fuerte equivalente a fondo rocoso), tanto para modelos de diques rebasables, como en el caso de la rampa del 2%, como para los modelos de dique con tipología de cuenco amortiguador.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL CANAL DE ENSAYOS DEL LPC-UPV

Los ensayos 2D del proyecto ESBECO, se han realizado en el canal de oleaje y viento del Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia (LPC-UPV). El canal tiene unas dimensiones de 30x1.2x1.2 metros, y cuenta con un falso fondo de 25 cm para permitir la recirculación del agua. Las paredes son transparentes para poder ver lo que ocurre en su interior. En uno de los extremos del canal se encuentra el sistema generador del oleaje, y en el extremo opuesto encontramos un sistema para disipar la energía del mismo.

En esta fase se realizaron en primer lugar ensayos en vacío (sin modelo) para después ensayar distintos modelos que se ubicaron frente al dissipador de energía: modelos de dique rebasable y modelos de dique en talud con tipología de cuenco amortiguador.

Para analizar la influencia de la pendiente de fondo sobre la rotura del oleaje y la estabilidad y rebase de diques en talud, se ha dispuesto una única rampa del 4% en el fondo del canal. Esta rampa cuenta con 1711 cm aproximadamente y se inicia a 545 cm de la pala.

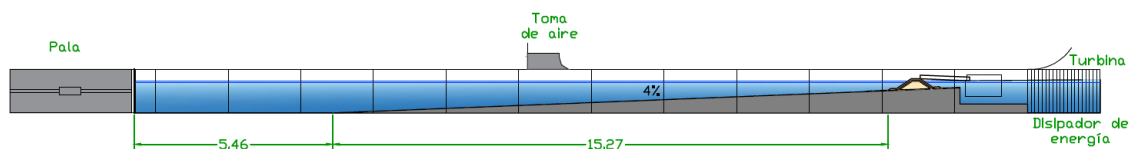


Figura 1. Sección longitudinal del canal de ensayos LPC – UPV. Cotas en m.

La profundidad del agua varía según el modelo y el ensayo; para los modelos de dique en talud rebasable, las profundidades en la zona de generación oscilan entre 82.4 y 87.4 centímetros, mientras que, para los modelos de cuenco amortiguador, esta profundidad varía entre 88.4 y 92.4 centímetros. Estos calados a pie de dique se corresponden a 20 y 25 centímetros y 26 y 30 centímetros para los modelos de dique en talud rebasable y dique con cuenco amortiguador respectivamente.

3.2. MODELO A ENSAYAR

3.2.1 Secciones tipo del dique en talud con cuenco amortiguador

Tras los ensayos con diques en talud rebasables, se ensayaron cuatro secciones diferentes de dique en talud con tipología de cuenco amortiguador y manto monocapa de Cubípodos. La primera sección (ver Figura 2) estaba basada en la solución propuesta para el dique de cuenco amortiguador del proyecto Agaete (2015) y fue evolucionando a lo largo de tres secciones hasta conseguir que fuera más estable. No obstante, se decidió ensayar posteriormente una sección más sencilla con un único tamaño de elemento en el manto (ver Figura 11), que resultó ser tan estable como la anterior más compleja. A continuación, se detallan las características de cada una de las secciones ensayadas y el razonamiento seguido para su evolución.

- **Configuración Cuenco 1**

Manto monocapa de Cubípodos ($D_n=3.8\text{cm}$), con berma en coronación formada por una primera capa de tres filas de Cubípodos ($D_n=5.17\text{cm}$) y una segunda capa de dos filas de Cubípodos ($D_n=5.17\text{cm}$). La primera fila de la berma de coronación se inició en pared y se colocaron 18 Cubípodos. En las filas de no pared se colocaron 17 Cubípodos. En cuanto a la berma de pie, se decidió ensayar la de tamaño medio ($D_{50}=3.00\text{cm}$) ya que se habían subido 6 cm el calado, siendo más estable.

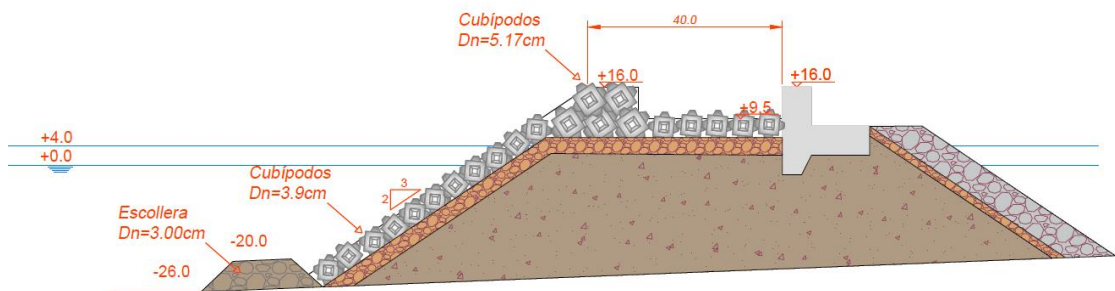


Figura 2. Sección tipo de dique en talud con tipología de cuenco amortiguador de la Configuración 1.



Figura 3. Fotografía del talud frontal, coronación y berma de pie de la Configuración 1 de cuenco amortiguador.

Con esta configuración, se lanzó la tanda de $h_s=26\text{cm}$ y $T_p=1.6\text{s}$ con buenos resultados. Al lanzar el mismo calado con $T_p=2.6\text{s}$, el cuenco falló por la berma de coronación (ver Figura 4) para $H_{sg}=16\text{cm}$.



Figura 4. Fallo por coronación de la Configuración 1 de cuenco amortiguador tras $h_s=26\text{cm}$, $T_p=2.6\text{s}$, $H_{sg}=16\text{cm}$.

- **Configuración Prueba 1**

Para darle una mayor estabilidad a los elementos de la berma de coronación, se sobrelevó el filtro del cuenco creando un talud desde la berma de coronación hasta aproximadamente la mitad del cuenco. También se añadió una fila adicional de Cubípodos ($D_n=3.80\text{cm}$) en los huecos entre los Cubípodos de la berma de coronación ($D_n=5.17\text{cm}$) de la parte más cercana al cuenco. Así, los Cubípodos del cuenco ($D_n=3.80\text{cm}$, rojos) daban apoyo a los de la berma de coronación. Además, se aumentó la porosidad en la colocación de los Cubípodos de la berma de coronación para incrementar la trabazón (aprox. 47%) y evitar que sobresalieran en exceso. Finalmente, para evitar que la discontinuidad de tamaños de Cubípodos se produjera justo en el cambio de talud frontal a coronación, se añadió una fila más de Cubípodos de manto ($D_n=3.80\text{cm}$, amarillos) retranqueando la berma de coronación.

Con esta configuración, se volvió a lanzar el ensayo $H_s=26\text{cm}$, $T_p=2.6\text{s}$ y $H_{sg}=16\text{cm}$ y el cuenco volvió a fallar. Se observó que los Cubípodos de la berma de coronación ($D_n=5.17\text{cm}$) ubicados en la tercera y segunda fila de las capas primera y segunda, respectivamente, no trabajaban. Es decir, los Cubípodos de la berma de coronación de la primera franja eran extraídos hacia el talud frontal. También se producía una grieta en el cambio de tamaño de Cubípodos al pasar del $D_n=3.80\text{cm}$ del manto principal a $D_n=5.17\text{cm}$ de la berma de coronación. Esto es, los Cubípodos del manto principal ($D_n=3.80\text{cm}$) se compactaban y desplazaban hacia el pie, mientras los Cubípodos de la berma de coronación ($D_n=5.17\text{cm}$) no los acompañaban.

- **Configuración Prueba 2**

Los Cubípodos de la berma de coronación ($D_n=5.17\text{cm}$) de las filas tercera y segunda de las capas primera y segunda, respectivamente, se eliminaron. Es decir, la berma de

coronación se redujo a 2 filas en primera capa y una única fila en segunda capa, colocadas con la misma porosidad elevada que en la prueba anterior (aprox. 47%). Se mantuvo el talud de apoyo del cuenco formado por filtro y Cubípodos $D_n=3.80\text{cm}$ y el Cubípodo ($D_n=3.80\text{cm}$, negro) adicional en los huecos de los Cubípodos de la berma coronación para darle apoyo a la berma. Además, se volvió a añadir una fila al talud frontal ($D_n=3.80\text{cm}$, amarillos) para retranquear un poco más la berma de coronación y alejarla un poco más de la zona de cambio de pendiente, buscando evitar la grieta observada. Para terminar, se añadió un Cubípodo $D_n=3.80\text{cm}$ en los huecos de la parte delantera de la berma de coronación como piezas de sacrificio o autorreparación (morados).



Figura 5. Fotografía del talud frontal, coronación y berma de la Configuración Prueba 2 de cuenco amortiguador.

Con esta configuración, se volvió a lanzar el ensayo $h_s=26\text{cm}$, $T_p=2.6\text{s}$ y $H_{sg}=16\text{cm}$. De nuevo, los Cubípodos del manto principal ($D_n=3.80\text{cm}$) se compactaban, deslizándose hacia la parte inferior y no eran acompañados por los elementos de la berma de coronación ($D_n=5.17\text{cm}$). No obstante, tras compactarse, no parecía que los elementos fueran a extraerse ni se fuera a alcanzar un estado de Destrucción. Por otra parte, la berma de coronación no falló: sólo uno de los Cubípodos $D_n=5.17\text{cm}$ fue desplazado hacia el cuenco. Los Cubípodos de sacrificio ($D_n=3.80\text{cm}$, morados) cumplieron su función: se hundieron rellenando los huecos entre los Cubípodos $D_n=5.17\text{cm}$.



Figura 6. Avería del modelo de dique en talud con cuenco amortiguador Configuración Prueba 2 tras el ensayo $h_s=26\text{cm}$, $T_p=2.6\text{s}$, $H_{sg}=16\text{cm}$.

Para comprobar la resistencia del modelo, se lanzó $H_{sg}=18\text{cm}$. El ensayo se tuvo que parar al alcanzar la destrucción, aunque se completó una buena parte del mismo. El modelo falló por estabilidad del manto principal manteniéndose bien la berma de coronación.



Figura 7. Fallo del modelo de dique en talud con cuenco amortiguador Configuración Prueba 2 tras el ensayo $h_s=26\text{cm}$, $T_p=2.6\text{s}$, $H_{sg}=18\text{cm}$.

- **Configuración Cuenco 2**

Ante el fallo por la parte superior del manto principal y su compactación, se decide introducir una nueva fila de Cubípodos ($D_n=3.80\text{cm}$, morados) de sacrificio entre la última fila de Cubípodos del manto principal y la berma de coronación, pero sin retranquear la berma. Es decir, se colocan sobre ellos como una segunda capa. Se busca que, al compactarse el manto principal, estos Cubípodos reparen la grieta y se incremente la estabilidad del manto principal.



Figura 8. Fotografía del talud frontal, coronación y berma de la Configuración 2 de cuenco amortiguador.

Se lanza una nueva tanda de ensayos con $h_s=26\text{cm}$ e $l_r=5$ y H_s desde 8cm, incrementando H_s en escalones de 2cm. Al alcanzar $H_{sg}=16\text{cm}$, gran parte de los Cubípodos de sacrificio nuevos introducidos se han hundido, reduciendo la grieta en la parte superior. El dique empieza a fallar por extracción de los Cubípodos del manto principal alrededor del nivel del agua (verdes).



Figura 9. Avería del modelo de dique en talud con cuenco amortiguador Configuración 2 tras el ensayo $h_s=26\text{cm}$, $T_p=2.6\text{s}$, $H_{sg}=16\text{cm}$.

Se lanzó $H_{sg}=18\text{cm}$, teniendo que parar el ensayo por fallo del manto principal por extracción de Cubípodos verdes y amarillos.



Figura 10. Fallo del modelo de dique en talud con cuenco amortiguador Configuración 2 tras el ensayo $h_s=26\text{cm}$, $T_p=2.6\text{s}$, $H_{sg}=18\text{cm}$.

- **Configuración Manto Monocapa de Cubípodos ($3 \cdot D_n$)**

Al comprobar la complejidad de la unión de dos tamaños de Cubípodos, especialmente en la zona alrededor de la coronación, se decide ensayar un modelo con un único tamaño de Cubípodos ($D_n=3.80\text{cm}$) para eliminar esta discontinuidad. Este modelo se define por el ancho de la berma de coronación, que es de 3 diámetros nominales.

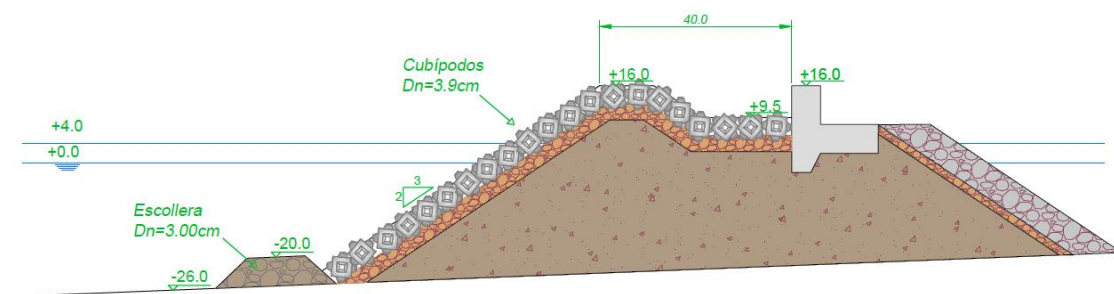


Figura 11. Sección tipo del dique en talud con tipología de cuenco amortiguador de la Configuración manto monocapa de Cubípodos ($3 \cdot D_n$ en berma coronación). Cotas en cm.

- **Configuración Manto Monocapa de Cubípodos ($6 \cdot D_n$)**

También se ensayó el modelo anterior con una berma de coronación más ancha, correspondiente a 6 diámetros nominales.

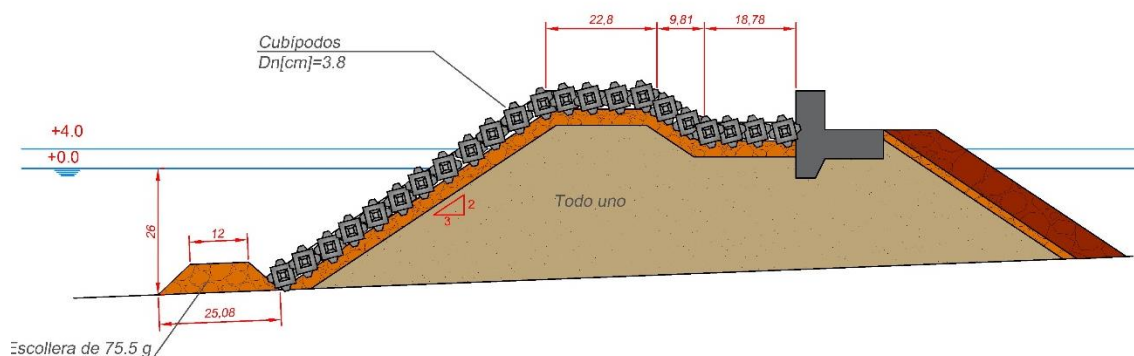


Figura 12. Sección tipo del dique en talud con tipología de cuenco amortiguador de la Configuración manto monocapa de Cubípodos (6·Dn en berma de coronación). Cotas en cm.

3.2.2 Materiales empleados

En este apartado se recogen las principales características de los materiales empleados durante los ensayos para la construcción de los modelos de cuenco amortiguador.

ELEMENTO	UBICACIÓN	D _{n50} (cm)	MASA (g)	DENSIDAD (g/cm ³)
Escollera	Núcleo	-	-	-
Escollera	Filtro	2	-	-
Cubípedo	Manto principal	3,79	121,06	2,22
Cubípedo	Manto principal	5,17	321,3	2,26
Escollera	Berma de pie	3	80	2,65
Escollera	Berma de pie	3,9	150	2,63

Tabla 1. Características principales de los materiales empleados.

3.2.3 Porosidad de las secciones

El concepto de porosidad se utiliza para analizar la estabilidad de las piezas del manto de coronación. El proyecto ESBECO estudia estructuras rebasables, por lo que ha sido necesario analizar la estabilidad del manto tanto en el talud frontal, la coronación y el trasdós de la estructura.

Inicialmente se ha calculado el número de piezas a colocar en cada fila para la construcción del modelo. En el caso de los ensayos con Cubípodos, las filas alternas son de 18 y 19 piezas logrando una porosidad inicial del 40% en manto monocapa.

Esta metodología ha sido empleada para la colocación de los elementos tanto en el talud frontal como en la coronación y trasdós de la estructura de todos los modelos. Las siguientes Figuras muestran las secciones construidas con todos los tipos de piezas en el canal de ensayos.

Las piezas del manto se disponen en bandas de diferentes colores para poder identificar con mayor facilidad los movimientos de los elementos (avería sufrida por el manto) tras haber sido sometidas a los distintos oleajes. Para la evaluación numérica de la avería del manto principal se ha empleado el método de la Malla Virtual (ver Gómez-Martín y Medina, 2006 y 2014). Este método consiste en trazar una cuadrícula de referencia a

partir de la cual se calcula la avería en función de la evaluación de la porosidad del manto y la extracción de sus piezas. Cabe mencionar que el error de la medida de la porosidad disminuye con el aumento de la superficie de la cuadrícula.

En cuanto a los diques de tipología cuenco amortiguador, se ha estudiado únicamente la estabilidad del talud frontal y coronación. Esto se debe a que el objetivo de esta tipología de dique es reducir los rebases que se producirían en un dique convencional en las mismas condiciones hasta hacerlo despreciable. Por ello, la estabilidad del trasdós no debería verse afectada.

La evolución de las secciones ensayadas de cuenco amortiguador se muestra en el apartado 3.2.2 (Figuras 2-12). **La solución final escogida es aquella con manto monocapa de Cubípodos $D_n=3.80\text{cm}$** (Figura 11). A continuación, se muestran fotografías tanto del talud frontal como de la coronación de este modelo.



Figura 13. Modelo de dique de cuenco amortiguador con manto monocapa de Cubípodos ($3 \cdot D_n$ en berma de coronación) construido con porosidad aproximada 40%. Talud frontal..



Figura 14. Modelo de dique de cuenco amortiguador con manto monocapa de Cubípodos ($3 \cdot D_n$ en berma de coronación) construido con porosidad aproximada 40%. Coronación.

3.3. INSTRUMENTACIÓN

3.3.1 Sensores de nivel

Para poder medir las características del oleaje de los ensayos realizados, se han dispuesto sensores de nivel a lo largo del eje longitudinal del canal. Se trata de sensores capacitivos, que registran el ascenso y descenso de la lámina de agua respecto al nivel del agua en reposo. Estos registros se procesan para conocer los estadísticos escalares de oleaje y sus características espectrales. Están formados por dos varillas metálicas verticales paralelas que utilizan el agua como dieléctrico para registrar las variaciones de capacidad con la variación del nivel de agua.



Figura 15. Sensores de nivel.

En la zona de modelo, los sensores se colocaron siguiendo la metodología desarrollada por Herrera et al. (2017): a $2h_s$, $3h_s$, $4h_s$ y $5h_s$ del pie del dique, siendo h_s el calado al pie del modelo. Es decir, la disposición de sensores se varió en función del calado ensayado. Para los modelos de dique con tipología de cuenco amortiguador los calados considerados fueron 26 y 30cm (ver Figura 16).

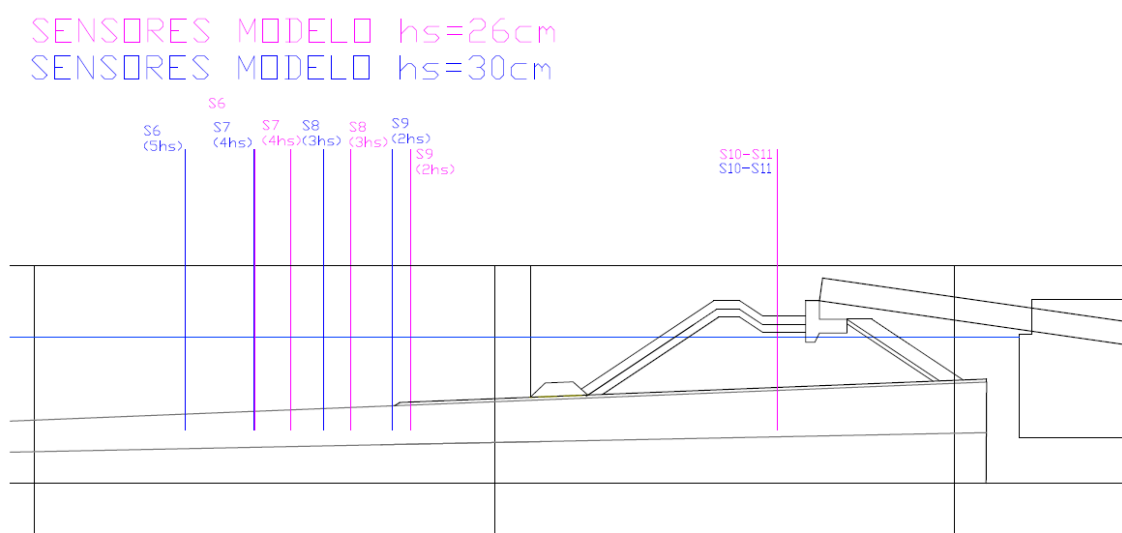


Figura 16. Colocación de sensores en zona de modelo y coronación. Ensayos con modelos de dique en talud con tipología de cuenco amortiguador.

En la Figura 16, se muestran también dos sensores ubicados en paralelo sobre la coronación del modelo. Estos sensores tienen como finalidad medir el nivel de agua del cuenco, tanto si sobrepasa su cota superior como si no. Es decir, el nivel freático dentro del dique. Para ello, los sensores se colocan dentro de tubos perforados y tapados tanto por su parte superior como inferior.

3.3.2 Miniature propellers

Con el objetivo de poder medir las velocidades del flujo del agua que sobrepasa la coronación de la estructura, se dispusieron 3 velocímetros o miniature propellers. Estos velocímetros cuentan con unas hélices de PVC que giran en contacto con el agua y permiten registrar el movimiento en forma de pulsos o velocidad (ver Figura 19).



- Figura 17. Hélice del miniature propeller o velocímetro.

Con el fin de medir la velocidad del flujo que sobrepasa el espaldón de la sección de cuenco amortiguador, se dispuso un *miniature propeller* (3106) sobre el espaldón a 33 cm de la pared del canal. La disposición de la instrumentación en coronación del dique con cuenco amortiguador se recoge en la Figura 20.

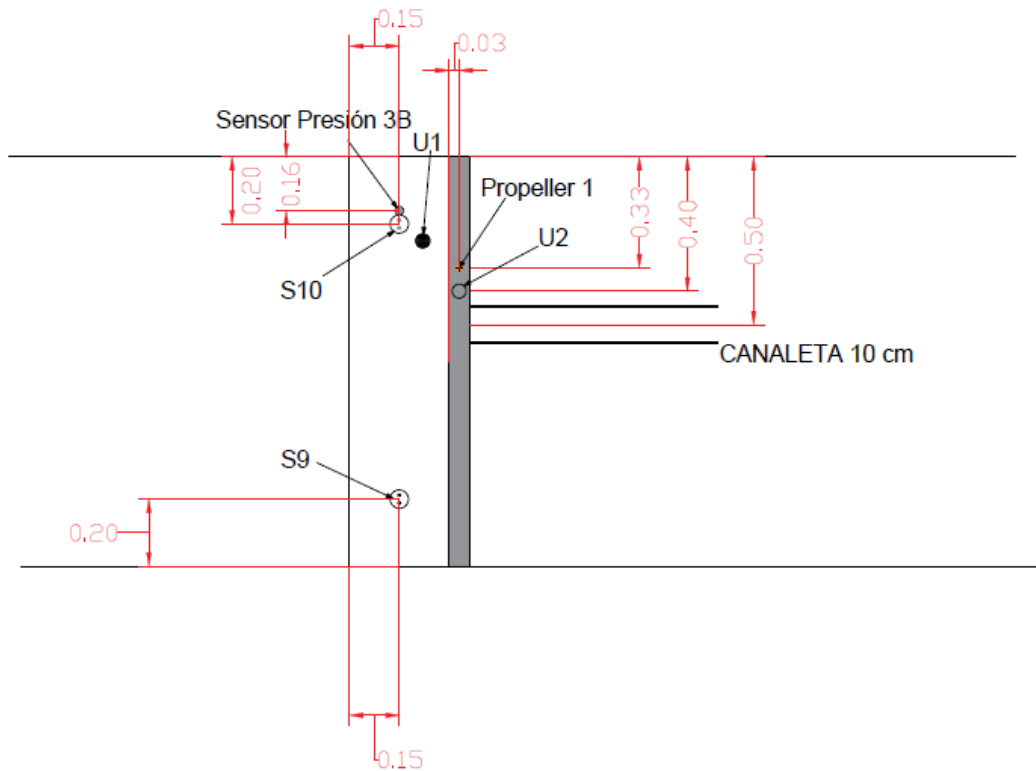


Figura 18. Detalle de la instrumentación sobre la coronación del dique en talud con tipología de cuenco amortiguador.

3.3.3 Sensores ultrasónicos

Como se puede ver en la Figura 20, se dispusieron dos sensores ultrasónicos (U1 y U2) en el modelo de cuenco amortiguador. El primer sensor (U1) se colocó sobre el cuenco amortiguador junto al sensor de nivel S10 con el fin de contrastar las mediciones realizadas sobre la cota del cuenco. El segundo sensor (U2) se dispuso sobre el espaldón para así medir el espesor de lámina de agua que sobrepasa el espaldón.

No obstante, durante los ensayos con mayores alturas de ola en los que se producía rebase relevante, el agua que llegaba al cuenco chocaba contra el espaldón. Este choque producía salpicaduras importantes y gran turbulencia en las proximidades del espaldón, provocando mucho ruido y niveles poco claros en los registros de estos sensores. El fenómeno descrito puede observarse en la Figura 21.



Figura 19. Salpicaduras producidas durante los ensayos de cuenco amortiguador.

3.3.4 Equipo de captación de rebase

Para medir los caudales de rebase de los ensayos se ha dispuesto de un equipo de captación de rebase compuesto por:

- Canaleta de metacrilato de 5cm de ancho
- Cubo metálico y cubo de plástico en su interior
- Báscula de pesaje
- Equipo de aspiración



Figura 20. Canaleta de 5 cm y equipo de recogida del caudal de rebase.



Figura 21. Equipo de aspiración para la evacuación de agua.

Las Figuras 20 y 21 detallan el equipo de medición utilizado en los ensayos. Se trata de una canaleta de metacrilato de 5cm de ancho colocada sobre la coronación de la estructura que recoge el caudal de agua que sobrepasa por coronación y la conduce al cubo de plástico de gran capacidad. Este cubo de plástico se encuentra sobre una báscula de pesaje dentro del cubo metálico de mayor tamaño. La báscula está conectada al ordenador de registro de datos.

Para los ensayos de modelo de dique de cuenco amortiguador, al esperarse menores caudales de rebase, se cambió la canaleta de 5cm de ancho por otra de 10cm de ancho para mejorar la precisión de la medición.

3.3.5 Soporte audiovisual

El LPC-UPV dispone de diverso hardware para captación y almacenaje visual: cámaras de video digitales, y cámaras de fotos digitales. Mediante ellas se graba y almacena todo o parte de cada ensayo, con el fin de disponer de esos registros para su posterior análisis, verificación y/o comprobación de datos anómalos, etc.



Figura 22. Posición de las cámaras con respecto al emplazamiento del modelo.

Además, debido a la necesidad de medir la estabilidad de la estructura en las tres partes del manto principal del dique, se colocaron tres cámaras de fotos, cada una de ellas perpendicular al talud frontal, coronación y trasdós de la estructura. La Figura 25 muestra la colocación de las tres cámaras utilizadas.



Figura 23. Disposición de las cámaras de fotos perpendiculares al talud frontal, coronación y trasdós del modelo.

3.3.6 Sensores de presión

En los ensayos con dique de tipología de cuenco amortiguador, se dispusieron un total de 9 sensores de presión: 8 de ellos en el espaldón y uno de ellos (sensor 3B) en el cuenco junto al sensor de nivel S10 (ver Figura 18).

El sensor de presión 3B se dispuso en el cuenco con el fin de comprobar si era posible realizar mediciones de lámina de agua sobre el cuenco empleando este tipo de sensor. En cuanto a los sensores del espaldón se colocaron con una finalidad más convencional: medir las presiones generadas por el oleaje sobre el espaldón. Para ello, se emplearon 4 sensores para medir subpresiones y otros 4 para medir las fuerzas sobre el frente del espaldón. La configuración detallada de los sensores del espaldón se muestra en la Figura 24.

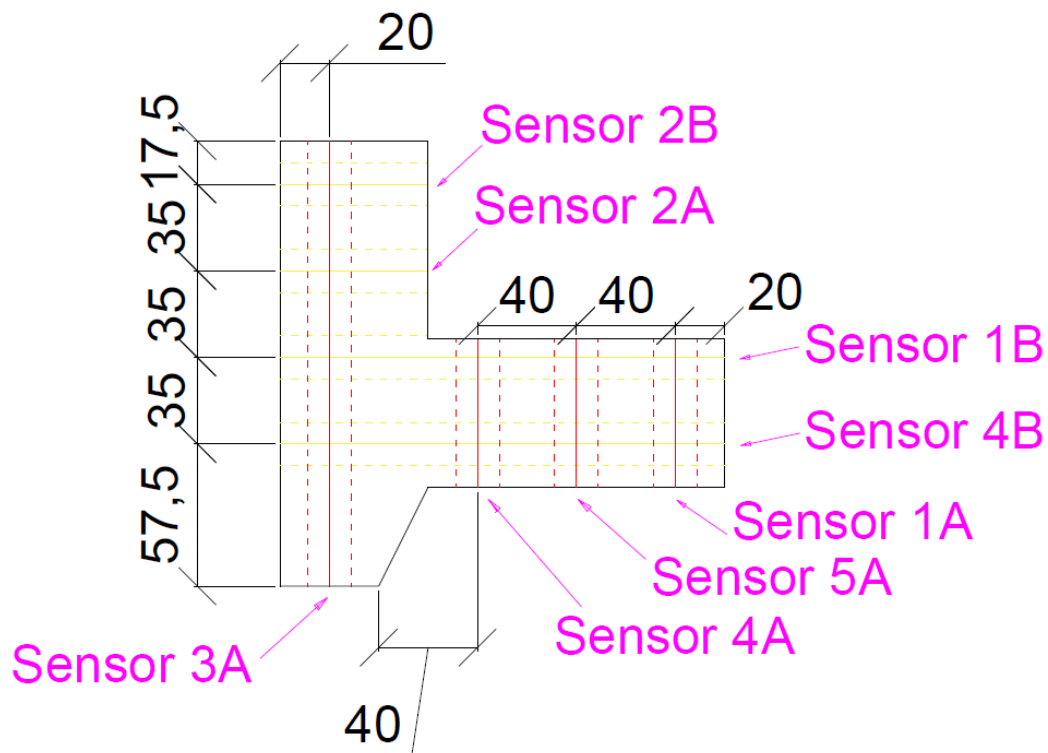


Figura 24. Definición geométrica y sensores del espaldón del modelo de dique de cuenco amortiguador (cotas en cm).

3.4. DEFINICIÓN DE ENSAYOS

3.4.1 Modelo de dique con cuenco amortiguador

Con los modelos de dique de cuenco amortiguador se realizaron ensayos 2D en el canal del LPC-UPV. Las secciones ensayadas se recogen en el apartado 3.2. Todos los ensayos irregulares se realizaron con una duración de 1000 olas y un espectro tipo JONSWAP ($\gamma=3.3$).

De nuevo, los ensayos se han realizado por series o tandas, es decir, fijando en cada una de ellas el calado a pie de dique ($h_s=26$ ó 30cm) y bien un número de Iribarren ($I_r=5$) o un periodo pico ($T_p=2.6\text{s}$). Por tanto, en cada una de las series ensayadas, una vez definido el nivel del mar (h_s), se han ensayado bien combinaciones de periodo pico (T_p) y altura de ola (H_s), de modo que el número de Iribarren se mantuviera constante, o bien alturas de ola crecientes con un T_p constante. La altura de ola se inicia en la más baja ($H_s=8\text{cm}$) con un T_p correspondiente y se aumenta de forma progresiva en escalones de 2cm en zona de generación, hasta que se alcanza el inicio de destrucción del modelo o se produce la rotura del oleaje en generación.

De este modo, los oleajes quedan definidos de forma teórica para posteriormente analizar el oleaje ensayado mediante los sensores de nivel colocados a lo largo del canal. En las siguientes tablas se muestra la definición teórica de los ensayos a realizar con dique de cuenco amortiguador.

		Nombre	Modelo				Nombre	Modelo	
			H_s (cm)	T_p (s)				H_s (cm)	T_p (s)
$h_s=26\text{cm}$	$T_p=2.6\text{s}$	AS01_2108	8	2.60	$h_s=30\text{cm}$	$T_p=2.6\text{s}$	AS01_2208	8	2.60
		AS01_2110	10	2.60			AS01_2210	10	2.60
		AS01_2112	12	2.60			AS01_2212	12	2.60
		AS01_2114	14	2.60			AS01_2214	14	2.60
		AS01_2116	16	2.60			AS01_2216	16	2.60
		AS01_2118	18	2.60			AS01_2218	18	2.60
		AS01_2120	20	2.60			AS01_2220	20	2.60
		AS01_2122	22	2.60			AS01_2222	22	2.60
		AS01_2124	24	2.60			AS01_2224	24	2.60
	$I_r=5$	AS01_3108	8	1.70		$I_r=5$	AS01_3208	8	1.70
		AS01_3110	10	1.90			AS01_3210	10	1.90
		AS01_3112	12	2.08			AS01_3212	12	2.08
		AS01_3114	14	2.25			AS01_3214	14	2.25
		AS01_3116	16	2.40			AS01_3216	16	2.40
		AS01_3118	18	2.55			AS01_3218	18	2.55
		AS01_3120	20	2.68			AS01_3220	20	2.68
		AS01_3122	22	2.82			AS01_3222	22	2.82
		AS01_3124	24	2.94			AS01_3224	24	2.94

Tabla 2. Características teóricas del oleaje a escala de modelo para los ensayos de dique de cuenco amortiguador (calados $h_s=26$ y 30cm).

3.4.2 Ensayos en vacío

En proyecto ESBECO tiene entre sus objetivos analizar la estabilidad y el rebase de diques en talud en condiciones de oleaje rompiente de por el fondo. Es por esto que gran parte de los ensayos realizados cuentan con el fenómeno de rotura del oleaje. Cuando esto ocurre en la zona en la que se ubican los sensores de nivel (ver Figura 25), no es posible separar el oleaje incidente y reflejado en esta zona de forma fiable. Por ello, durante el proyecto ESCOLIF, Herrera et al. (2017) desarrolló una nueva metodología que permitiera estimar el oleaje incidente en zona de rotura del oleaje.



Figura 25. Ola rompiendo en los sensores de zona de modelo.

Para validar esta metodología antes de emplearla en el presente proyecto, es necesario realizar los mismos ensayos irregulares, pero sin modelo y con un dissipador de energía al final del canal (ver Figura 26).



Figura 26. Dissipador de energía en el canal LPC-UPV utilizado en los ensayos en vacío.

Se realizaron ensayos en vacío correspondientes a los ensayos irregulares con modelo de dique en talud rebasable. Esto es, aquellas tandas con calados a pie de dique $h_s=20$ y 25cm y números de Iribarren constantes $I_r=3$ y 5. Estos ensayos se emplearán en apartados posteriores para validar la metodología mencionada.

3.5. ANÁLISIS DE DATOS

3.5.1 Introducción

Tras realizar los ensayos, se procede a analizar los resultados. Dentro de estos ensayos se analiza:

- Oleaje
- Caudales de rebase
- Estabilidad del manto: Talud frontal y coronación
- Estabilidad de la berma de pie
- Velocidades del flujo de rebase
- Lámina de agua en coronación
- Presiones sobre el espaldón (modelo de cuenco amortiguador)

En primer lugar, para analizar el oleaje separar correctamente el oleaje incidente y reflejado es fundamental, ya que es el oleaje incidente el que afecta realmente a la respuesta de la estructura. No obstante, es el oleaje total (incidente más reflejado) el que se puede medir físicamente en el laboratorio. En este estudio se ha empleado el software LASA-V, ampliamente contrastado frente a otros métodos y con excelentes resultados para el análisis de oleaje tanto irregular como regular no estacionario. Sin embargo, ni el LASA ni el resto de los métodos existentes conocidos son capaces de separar el oleaje cuando existe rotura del oleaje. Por este motivo, se ha empleado una metodología combinada entre modelos físicos y numéricos. En el apartado 3.5.2 se realizará una nueva validación de esta metodología para la pendiente de fondo del 4%.

Uno de los elementos fundamentales en el proyecto es analizar la estabilidad de los diferentes mantos ensayados. Se decidió analizar la estabilidad del manto principal en dos partes para el modelo de cuenco amortiguador (talud frontal y coronación). El apartado 3.5.3 detalla la metodología y los resultados obtenidos.

La berma de pie es una parte fundamental para garantizar la estabilidad de la estructura, pues sostiene el manto principal. Por este motivo, se realizaron observaciones para determinar la existencia de movimientos.

La medición de los caudales de rebase ha sido una parte fundamental del estudio. En el apartado 3.5.4 se recogen los resultados de rebase obtenidos, así como las características del flujo que sobrepasa la estructura mediante un sensor de nivel en la coronación de la estructura y diversos velocímetros. Estas mediciones, tanto de lámina de agua como de velocidad del flujo, permiten caracterizar el riesgo por rebase.

3.5.2 Análisis de oleaje

Dentro del proyecto ESBECO rampa 4%, se han realizado ensayos irregulares en condiciones de oleaje rompiente por el fondo. En consecuencia, no es posible seguir la metodología habitual para analizar el oleaje. Esto es a causa de que los sensores ubicados en la zona cercana al modelo, donde se produce la rotura, no son fiables y los

métodos existentes para separar el oleaje incidente y reflejado en estas condiciones tampoco lo son.

Durante el proyecto ESCOLIF se aplicó y desarrolló una metodología que permitiera analizar el oleaje en estas condiciones. Esta metodología consiste en emplear el modelo numérico SwanOne para estimar el oleaje incidente al pie de la estructura.

Para la validación de esta metodología, se han realizado ensayos sin estructura antes de iniciar los ensayos con modelo. Durante estos ensayos se ubicaron disipadores de energía al final del canal, por lo que el oleaje registrado en los sensores es oleaje incidente al no existir reflexiones en el canal. Estos ensayos se realizaron para dos calados a pie de dique, 20 y 25 cm.

Los resultados del oleaje registrado en zona de modelo durante los ensayos en vacío se comparan con el oleaje obtenido con el SwanOne. Para obtener este oleaje incidente con el modelo, se separa el oleaje incidente y reflejado en zona de generación de los ensayos en vacío y el oleaje incidente se propaga hasta la zona de modelo mediante el software. El resultado de esta comparación se muestra en la Figura 27.

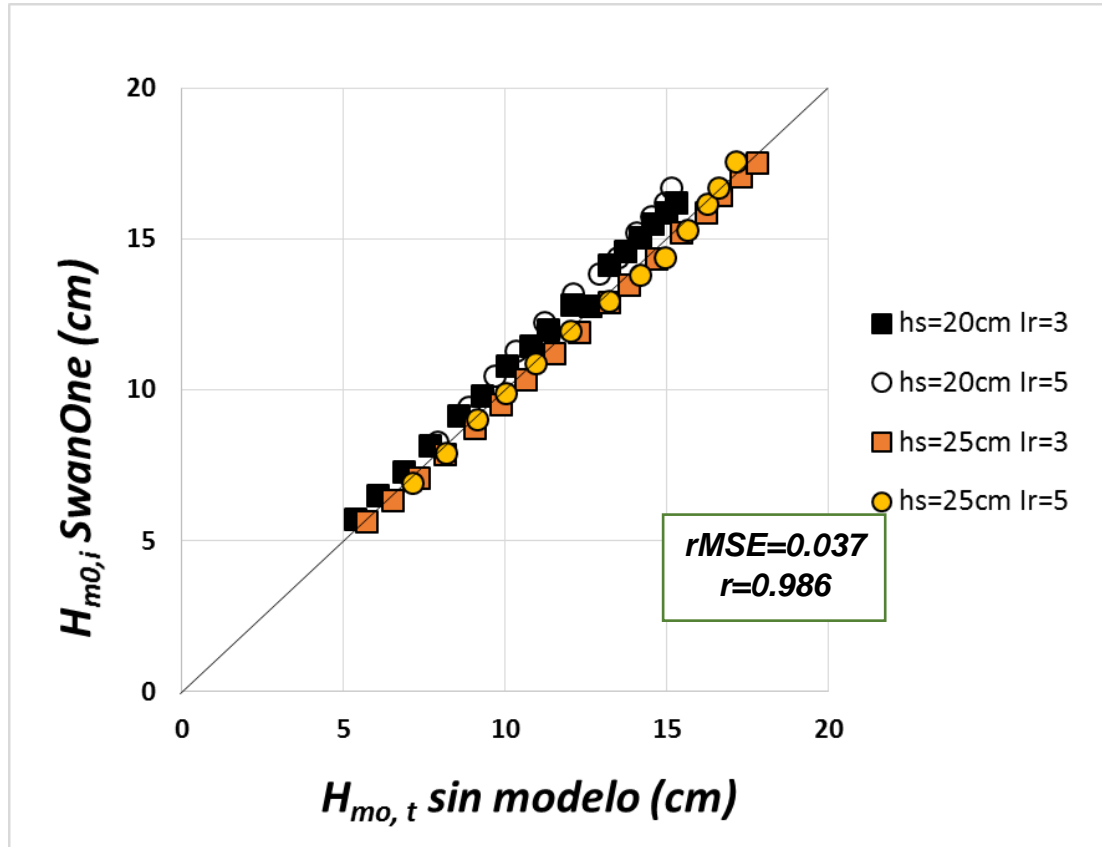


Figura 27. Comparación de la altura de ola incidente obtenida con el modelo numérico SwanOne y la altura total registrada en zona de modelo.

Para comprobar el ajuste numéricamente se ha utilizado el error cuadrático medio relativo (rMSE):

$$rMSE = \frac{MSE}{Var} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{(o_i - e_i)^2}{Var(o_i)}$$

donde, MSE es el error cuadrático medio, Var es la varianza del valor observado de la variable, N es el número de datos, o_i es el valor observado de la variable, e_i es el valor estimado de la variable, \bar{o} es la media de los valores observados y \bar{e} es la media de los valores estimados. $0 \leq rMSE \leq 1$ estima el porcentaje de varianza no explicada por el modelo, cuanto menor es el valor de rMSE mejor es el estimador.

Como se puede observar, el valor del rMSE es muy bajo ($rMSE=0.037$) por lo que se puede considerar validada la metodología a emplear. De este modo, las estimaciones que se obtienen con el SwanOne en la zona de modelo pueden considerarse como los valores de oleaje incidente de los ensayos irregulares realizados posteriormente con modelo.

3.5.3 Análisis de la estabilidad hidráulica del manto

Entre los objetivos del proyecto, se encuentra el análisis de la estabilidad de los diques rompeolas de tipología cuenco amortiguador. Esta tipología de dique en talud se plantea con el fin de reducir las tasas de rebase sin tener que incrementar francobordo de la estructura y, por tanto, el impacto visual de la misma. Por ello, es necesario analizar la estabilidad hidráulica del manto principal tanto en el talud frontal como en el cuenco amortiguador.

En este apartado, se resume la metodología empleada para el análisis de la estabilidad hidráulica del manto principal para ambas tipologías: dique en talud rebasable y dique en talud con cuenco amortiguador.

Antes de iniciar los ensayos y tras cada uno de ellos, se realizan fotografías perpendiculares al talud para las tres partes del dique estudiadas. De este modo, es posible valorar la erosión o avería sufrida en el manto principal tras cada escalón de oleaje dentro de su tanda de ensayos (calado y periodo o número de Iribarren definidos). Para cuantificar esta avería, se aplica el **método de la Malla Virtual (ver Gómez-Martín y Medina, 2006)**. Este método consiste en dividir el manto principal en bandas horizontales de ancho múltiplo del lado del cubo equivalente del elemento que compone el manto. Así, se considera una malla virtual que permite cuantificar el daño adimensional en cada una de las bandas definidas en función de la evolución de su porosidad. Se emplean las ecuaciones (1) a (3).

La ventaja principal de este método es que no sólo considera los daños por extracción de piezas sino también por el modo de fallo por compactación heterogénea.

- **Modelo de dique con cuenco amortiguador**

La estabilidad del manto principal se ha analizado únicamente para el modelo definitivo de cuenco amortiguador: dique en talud de cuenco amortiguador con manto monocapa de Cubípodos $D_n=3.9\text{cm}$. Las porosidades de este manto han sido del 41% y 40% para el talud frontal y el cuenco, respectivamente.

El manto principal del talud frontal se ha subdividido en cuatro franjas, siendo la superior de ancho $3D_n$ y las tres inferiores de $4D_n$. En cuanto al cuenco o coronación del modelo, se han diferenciado tres bandas horizontales: la primera banda se corresponde con la parte horizontal de la berma de coronación, la segunda con el talud de esta berma y la tercera con la parte horizontal del cuenco ubicada frente al espaldón donde se produce el “almacenamiento” del rebase. Para caracterizar el ancho de estas franjas, se ha

decidido medir su ancho siendo de 11.4, 11.8 y 18.8 cm, respectivamente. Nótese que las dos primeras franjas son de aproximadamente 3Dn.

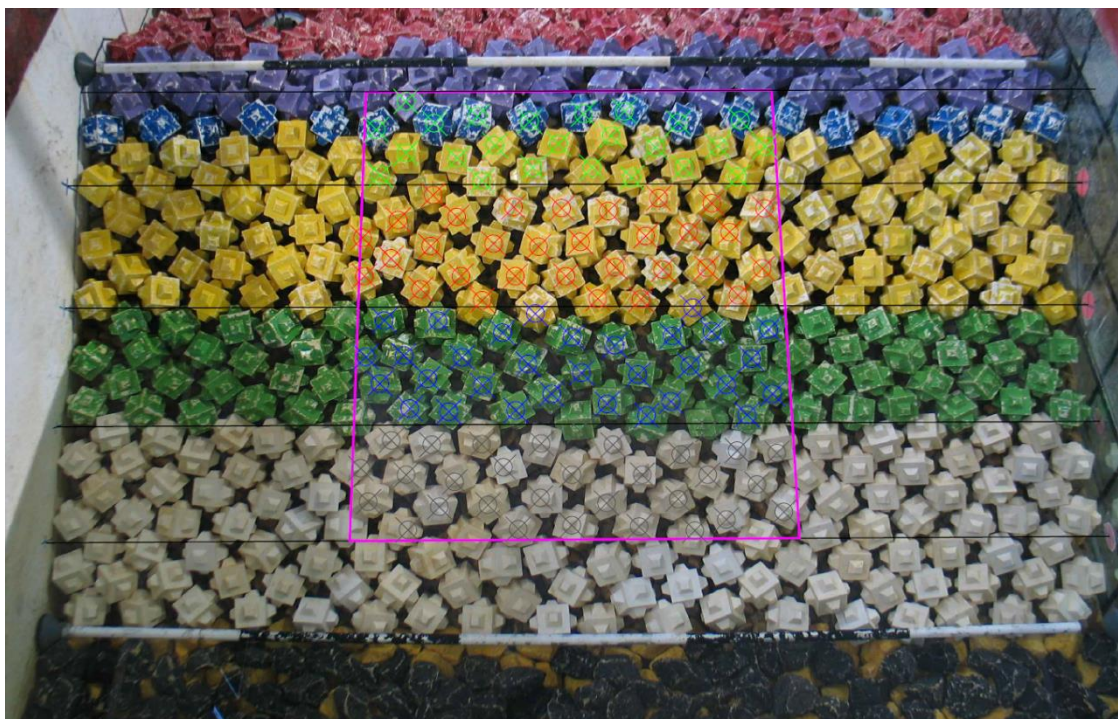


Figura 28. Malla virtual situada sobre el talud frontal del dique de cuenco amortiguador con manto monocapa de Cubípodos para el cálculo del daño adimensional equivalente (De).



Figura 29. Malla virtual situada sobre la coronación del dique de cuenco amortiguador con manto monocapa de Cubípodos para el cálculo del daño adimensional equivalente (De).

En las tablas de resultados (apartado 3.5.4) se recogen las averías para cada elemento del manto principal y tanda de ensayos.

3.6. RESULTADOS

En este apartado se recogen los resultados obtenidos de los ensayos físicos. En cada uno de los ensayos, se ha separado el oleaje incidente y reflejado empleando los sensores ubicados en zona de generación (oleaje no rompiente por fondo), dado que en esta zona los registros y la separación de ondas son muy fiables.

En zona de modelo, la rotura del oleaje es significativa para la mayoría de los casos ensayados. Por ello, la medición directa resulta menos fiable (interfaz agua-aire menos nítida) y en zona de rotura la separación de las ondas es poco fiable y la reflexión de la estructura puede dejar a los sensores en nodos o antinodos que aumenten o disminuyan el oleaje total registrado. Por este motivo, el oleaje en zona de modelo se estima mediante el método validado en apartados anteriores y propuesto por Herrera et al. (2017): se propaga el oleaje incidente en zona de generación hasta la zona de modelo mediante el software SwanOne.

En las siguientes tablas, se recogen para cada modelo los principales resultados de oleaje, la avería del manto, los caudales de rebase y los principales estadísticos de espesor de lámina de agua en coronación y velocidad del flujo.

La terminología que aparece en las tablas corresponde a:

TÉRMINO	SIGNIFICADO
H_s (cm)	Altura de ola significativa
T_p (s)	Periodo pico
h_s (cm)	Calado
Se_t	Avería en el talud frontal (obtenido a partir de la malla virtual)
Se_c	Avería en coronación (obtenido a partir de la malla virtual)
N_{od}	Daño en la berma de pie
q (m ³ /m/s)	Caudal unitario de rebase
Q	Cauda adimensional de rebase

Tabla 3. Terminología.

Ensayo	DATOS BÁSICOS						AVERÍAS				REBASE	
	Generación			Pie de dique			Se _t	Se _c	ΣSe	N _{od}	q (m³/s/m)	Q
	Ir _p	H _s (cm)	T _p (seg)	h _s (cm)	H _s (cm)	T _p (s)						
AS01_2108	7,52	7,13	2,41	26	7,524	2,411	0,63	0,00	0,63	0,05	0,0000E+00	0,000E+00
AS01_2110	6,86	9,02	2,47	26	9,623	2,411	0,63	0,00	0,63	0,10	1,7740E-06	1,898E-05
AS01_2112	6,71	10,90	2,66	26	11,918	2,689	0,38	0,24	0,62	0,20	1,0692E-05	8,297E-05
AS01_2114	6,21	12,72	2,66	26	13,774	2,689	0,50	0,36	0,86	0,18	4,1631E-05	2,600E-04
AS01_2116	5,81	14,54	2,66	26	15,399	2,689	0,50	0,60	1,10	0,20	1,0247E-04	5,414E-04
AS01_2118	5,48	16,33	2,66	26	16,809	2,689	0,63	0,84	1,47	0,23	1,2546E-04	5,812E-04
AS01_3108	5,38	6,75	1,68	26	6,685	1,729	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0000E+00	0,000E+00
AS01_3110	5,29	8,76	1,88	26	8,980	1,928	0,00	0,00	0,00	0,08	5,1842E-07	6,151E-06
AS01_3112	5,32	10,72	2,09	26	11,289	2,152	0,25	0,00	0,25	0,10	5,5607E-06	4,680E-05
AS01_3114	4,79	12,71	2,05	26	13,074	2,152	0,13	0,40	0,53	0,30	2,6179E-05	1,768E-04
AS01_3116	5,34	14,45	2,44	26	15,047	2,411	0,13	0,53	0,65	0,30	5,7993E-05	3,172E-04
AS01_3118	5,16	16,24	2,50	26	16,525	2,411	0,38	0,56	0,94	0,41	1,3379E-04	6,359E-04
AS01_2208	7,77	8,13	2,66	30	8,626	2,689	0,00	0,13	0,13	0,00	0,0000E+00	0,000E+00
AS01_2210	7,00	10,01	2,66	30	10,711	2,689	0,12	0,13	0,25	0,00	2,6492E-06	2,413E-05
AS01_2212	6,43	11,89	2,66	30	12,797	2,689	0,25	0,13	0,38	0,03	4,2672E-05	2,976E-04
AS01_2214	5,49	13,68	2,44	30	14,396	2,411	0,38	0,27	0,65	0,10	1,2650E-04	7,395E-04
AS01_2216	5,63	15,49	2,66	30	16,412	2,689	0,75	0,27	1,02	0,13	2,6161E-04	1,256E-03
AS01_3208	4,98	7,90	1,68	30	7,713	1,729	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0000E+00	0,000E+00
AS01_3210	5,15	9,97	1,95	30	10,174	1,928	0,22	0,13	0,35	0,00	0,0000E+00	0,000E+00
AS01_3212	5,14	11,81	2,12	30	12,307	2,152	0,44	0,26	0,70	0,05	4,8508E-06	3,587E-05
AS01_3214	5,13	13,67	2,28	30	13,937	2,161	0,56	0,38	0,94	0,10	6,1887E-05	3,798E-04
AS01_3216	5,01	15,48	2,37	30	15,953	2,411	0,78	0,51	1,28	0,10	1,8115E-04	9,077E-04

Tabla 4. Resumen de resultados de ensayos con modelo de dique de cuenco amortiguador con manto monocapa de Cubípodos (configuración 3-Dn en coronación).

Ensayo	DATOS BÁSICOS						AVERÍAS				REBASE	
	Generación			Pie de dique			Se _t	Se _c	ΣSe	N _{od}	q (m³/s/m)	Q
	Ir _p	H _s (cm)	T _p (seg)	d (cm)	H _s (cm)	T _p (s)						
AS01_2108	7,52	7,13	2,41	26	7,504	2,411	1,17	0,00	1,17	0,00	0,0000E+00	0,000E+00
AS01_2110	6,86	9,02	2,47	26	9,593	2,411	0,82	0,13	0,95	0,05	1,2300E-06	1,322E-05
AS01_2112	6,71	10,90	2,66	26	11,891	2,689	0,94	0,19	1,13	0,08	1,1543E-05	8,988E-05
AS01_2114	6,21	12,72	2,66	26	13,771	2,689	0,83	0,25	1,08	0,08	3,7089E-05	2,317E-04
AS01_2116	5,81	14,54	2,66	26	15,432	2,689	0,84	0,38	1,22	0,10	7,2002E-05	3,792E-04
AS01_2118	5,48	16,33	2,66	26	16,873	2,689	-	-	-	-	-	-
AS01_3108	5,38	6,75	1,68	26	6,675	1,729	-	0,00	-	0,00	0,0000E+00	0,000E+00
AS01_3110	5,29	8,76	1,88	26	8,961	1,928	0,00	0,13	0,13	0,00	0,0000E+00	0,000E+00
AS01_3112	5,32	10,72	2,09	26	11,271	2,152	0,13	0,13	0,26	0,03	1,7747E-06	1,497E-05
AS01_3114	4,79	12,71	2,05	26	13,081	2,152	0,50	0,26	0,76	0,13	1,5225E-05	1,027E-04
AS01_3116	5,34	14,45	2,44	26	15,073	24,105	0,50	0,13	0,63	0,15	2,5820E-05	1,409E-04
AS01_3118	5,16	16,24	2,50	26	16,577	24,105	-	-	-	-	-	-
AS01_2208	7,77	8,13	2,66	30	8,605	2,689	0,13	0,00	0,13	0,03	0,0000E+00	0,000E+00
AS01_2210	7,00	10,01	2,66	30	10,684	2,689	0,13	0,00	0,13	0,03	1,8923E-06	1,730E-05
AS01_2212	6,43	11,89	2,66	30	12,769	2,689	0,26	0,00	0,26	0,03	2,8195E-05	1,973E-04
AS01_2214	5,49	13,68	2,44	30	14,379	2,411	0,65	0,06	0,71	0,13	1,0483E-04	6,139E-04
AS01_2216	5,63	15,49	2,66	30	16,423	2,689	0,39	0,13	0,51	0,15	2,4988E-04	1,199E-03
AS01_3208	5,05	7,66	1,68	30	7,471	1,729	0,36	0,00	0,36	0,00	0,0000E+00	0,000E+00
AS01_3210	5,20	9,76	1,95	30	9,915	1,928	0,12	0,06	0,18	0,00	0,0000E+00	0,000E+00
AS01_3212	5,17	11,70	2,12	30	12,176	2,152	0,24	0,19	0,43	0,03	1,0648E-06	8,001E-06
AS01_3214	5,22	13,66	2,31	30	14,056	2,411	0,36	0,13	0,49	0,05	3,5270E-05	2,137E-04
AS01_3216	4,88	15,43	2,30	30	15,588	2,411	0,37	0,13	0,50	0,08	1,3084E-04	6,788E-04
AS01_3218	5,01	18,00	2,55	30	-	-	0,36	0,40	0,76	0,13	3,1077E-04	-

Tabla 5. Resumen de resultados de ensayos con modelo de dique de cuenco amortiguador con manto monocapa de Cubípodos (configuración 6-Dn en coronación).

4. REFERENCIAS

LABORATORIO DE PUERTOS Y COSTAS (2019). *Informe Final del Proyecto ESBECO*. Valencia: Universitat Politècnica de València. [Consulta: 15/08/2019]

