

## Análisis de estabilidad ante tsunami de diques rompeolas de materiales sueltos basado en ensayos de laboratorio

Aniel-Quiroga, Íñigo<sup>a</sup>; Vidal, César<sup>a</sup>; González Mauricio y Lara, Javier L. <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria - Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, España

[anieli@unican.es](mailto:anieli@unican.es), [vidalc@unican.es](mailto:vidalc@unican.es), [gonzalere@unican.es](mailto:gonzalere@unican.es), [jav.lopez@unican.es](mailto:jav.lopez@unican.es)

---

### Resumen

*Los grandes tsunamis son fenómenos poco frecuentes pero que, debido a las devastadoras consecuencias de las inundaciones que provocan, han causado más de 420.000 víctimas desde 1850. Las estructuras marítimas juegan un papel fundamental en la mitigación del riesgo y los efectos de este tipo de eventos extremos ya que proporcionan protección a las zonas potencialmente afectadas.*

*En este trabajo se han llevado a cabo ensayos de laboratorio de diques rompeolas de materiales sueltos bajo oleaje tipo tsunami, con la intención de dar un paso más en la mejora del conocimiento relativo a la interacción existente entre los tsunamis y los puertos. Así, en estos experimentos de laboratorio se han ensayado 2 tipologías de diques en talud: (I) con espaldón, y (II), sin espaldón. La acción del tsunami ha sido modelada físicamente dividiéndola en dos componentes. El primer impacto de la onda ha sido modelado mediante ondas solitarias de varias alturas. Y en segundo lugar, el rebase posterior que un tsunami provocaría sobre el puerto ha sido modelado sometiendo a los diques a una corriente de agua en dirección a tierra, aplicando varios espesores de la lámina de rebase.*

*En los ensayos se midieron tanto el nivel de superficie libre en diferentes puntos de la geometría como presiones, en el núcleo y en el espaldón, velocidades de rebase, etc. Los cambios en la geometría provocados por cada ensayo de onda solitaria o de corriente fueron medidos con un perfilador láser.*

*Los ensayos han permitido calcular el parámetro de daño asociado a cada ensayo e identificar de esta manera qué tipo de sollicitación provoca mayor daño así como en qué zona se produce el mismo.*

**Palabras clave:** *Ensayos, diques en talud, tsunami, maremoto, estabilidad, onda solitaria, mitigación, interacción tsunami-estructura.*

### 1. Introducción

Los maremotos o tsunamis son fenómenos poco frecuentes, pero muy destructivos que pueden provocar graves consecuencias en aquellas costas a las que afectan. Un ejemplo de estas consecuencias son los eventos ocurridos en 2004 en Indonesia y 2011 en Japón, los cuales provocaron un fortalecimiento de las estrategias a seguir para mitigar los efectos de este desastre natural. En este sentido, las estructuras marítimas suponen la primera defensa contra la que se enfrenta el tsunami en su proceso de inundación costera, y por tanto, es importante que estas estructuras mantengan cierta operatividad y funcionalidad. La acción de estructuras verticales ante tsunami ha sido ampliamente estudiada, principalmente por autores japoneses, sin embargo la efectividad de las estructuras en talud aún no ha sido suficientemente analizada. Por ello, en este trabajo se ha abordado la interacción entre tsunamis y diques en talud de materiales sueltos. Se ha estudiado estructuras de tipología y geometría típicas del Mediterráneo. En esta región, se han registrado diversos tsunamis a lo largo de la historia y sin embargo, en el diseño de obras marítimas, no han sido tenidas en cuenta las posibles sollicitaciones extraordinarias provocadas por este tipo de oleaje. Con el objetivo de avanzar en el conocimiento del comportamiento de este tipo de estructuras ante tsunami se han realizado experimentos en el canal de tsunamis (Coastal and Current TSunami flume, COCOTSU) del IH Cantabria, en Santander. Estos experimentos han permitido conocer mejor la hidrodinámica y estabilidad existente en la interacción tsunami-estructura. Del mismo modo, los

resultados obtenidos son aplicables en el diseño de estructuras más resistentes ante tsunami, de manera que los efectos negativos de estos eventos extremos se vean en parte mitigados.

## 2. Características de los diques prototipo

Los diques ensayados fueron versiones escaladas de tipologías típicamente Mediterráneas de diques rompeolas de materiales sueltos, normalmente utilizados para proteger pequeños puertos pesqueros y marinas. Se seleccionaron 2 tipologías de diques en talud: con espaldón (Tipo I) y sin espaldón (Tipo II). La profundidad a pie de dique fue de 8 m, con una marea de diseño (astronómica más meteorológica) de 0.5 m. Los valores de diseño de los diques son: Profundidad a pie de dique  $h = 8.5$  m, altura de ola significativa  $H_s = 6$  m, período de pico  $T_p = 10$  s. La pendiente del manto exterior en ambos modelos es de 1/3. Las pendientes de los mantos interiores fueron 1/1.5 y las piezas que forman parte de los mantos son escollera.

En el dique tipo I, la altura de la berma superior fue de 5 m sobre el cero del puerto y su anchura de 4 m. El espaldón asciende hasta 7 metros e incluye un camino de acceso de 15 metros de anchura, situado un metro por encima del datum del puerto. En el modelo tipo II, la coronación se encuentra a 5 metros sobre el cero del puerto y su anchura fue de 4 m.

El objetivo de estas estructuras es la protección del puerto o de la costa. En una primera aproximación, la única acción a la que están sometidas las piezas que forman la estructura es la propia velocidad del flujo asociado al paso del tsunami. Esteban in 2012 argumentó que, aunque la mayor afección sobre el dique proviene del primer impacto de la onda, una de los modos de fallo puede ser el efecto del rebase sobre la propia estructura, y la generación de corrientes intensas. En este sentido, el propio Esteban en 2014 presentó una modificación de la fórmula de Hudson, para incluir la acción de los tsunamis, basada en las observaciones de los modos de fallo en el tsunami de Japón de 2011 y en ensayos con ondas solitarias sobre diques rompeolas. En este trabajo se priorizó la incorporación de corrientes que provocaran diferentes espesores de la lámina de rebase para el adecuado estudio de la interacción entre el tsunami y la estructuras.

La utilización exclusiva de ondas solitarias para la simulación de tsunamis fue discutida por Madsen en 2006, incidiendo en él la idea de que las ondas solitarias por sí solas no representan de forma adecuada la escala de un tsunami, ya que no incluyen la “cola”, es decir el posterior rebase mantenido en el tiempo asociado a este tipo de sollicitaciones.

Por esta razón, la interacción del tsunami con la estructura se dividió en 2 partes. EL impactó de los primeros solitones fue simulado con ondas solitarias de gran tamaño que provocaran un gran run-up y un gran rebase sobre el dique (ver figura 1, izquierda). A continuación, el rebase, el flujo del tsunami sobre la estructuras (Figura 1 derecha), provocado por el rápido incremento del nivel, fue simulado mediante la variación del flujo de descarga en los ensayos del laboratorio.



Figura 1. Izq: Solitones rompiendo cerca de un dique. Drch: Corriente de rebase de un tsunami sobre un dique.

## 3. Características del canal de tsunamis, equipamiento e instrumentación

Los experimentos fueron llevados cabo en las instalaciones del Instituto de Hidraulica Ambiental de la Universidad de Cantabria en Santander. Las dimensiones del canal de tsunamis que allí se encuentra son: 56 m de longitud, profundidad máxima de 2.5 m, anchura de 2 m (véase Figura 2).



Figura 2. Canal de onda-tsunami en el IHCantabria en Santander.

El canal tiene una sección de 24 metros de paredes transparentes que permiten el seguimiento visual de los ensayos. Las estructuras se localizaron en esta sección del canal. El canal además posee una rampa de asomeramiento con una pendiente de 4.71H/0.35V que se encuentra situado justo antes de dicha sección (ver Figura 3).



Figura 3. Esquema del canal de oleaje, incluyendo la sección de ensayos

La instrumentación instalada incluyó sensores de presión, superficie libre, velocidad y medida y control del daño.

Se instalaron 9 sensores de superficie libre a lo largo del canal, que permitieron medir las ondas incidentes, reflejadas y la transmisión. En la figura 4 se observa la localización de dichos sensores. Del mismo modo se instalaron sensores de presión en el núcleo de las estructuras así como en el espaldón del dique tipo I. La velocidad del agua se midió con ADVs localizados en diferentes partes del canal y la estructura, de manera que las características del flujo creado tanto en los ensayos de onda solitaria como en los de corriente quedaran perfectamente definidas (ver Figura 5). A su vez se utilizaron varios métodos para medir el daño provocado en cada ensayo. Así, cada zona de la estructura se pintó de color diferente, de manera que cada extracción de piezas fuese fácilmente observable, se midió el cambio de geometría con láser escáner, y se fotografió el estado de cada lado de la estructura antes y después de los ensayos.

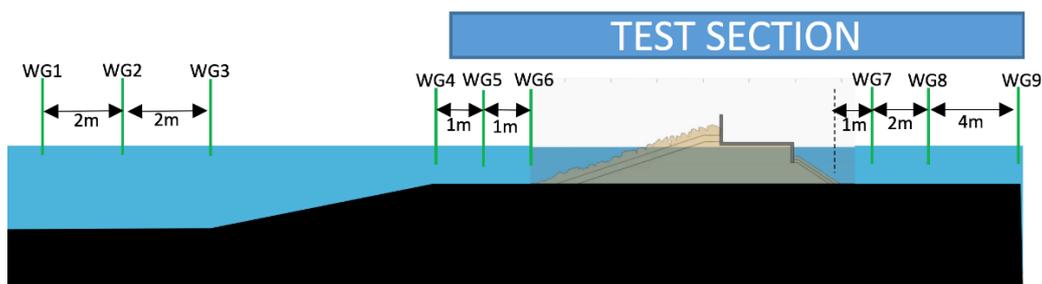


Figura 4. Esquema de la localización de los sensores de superficie libre a lo largo del canal

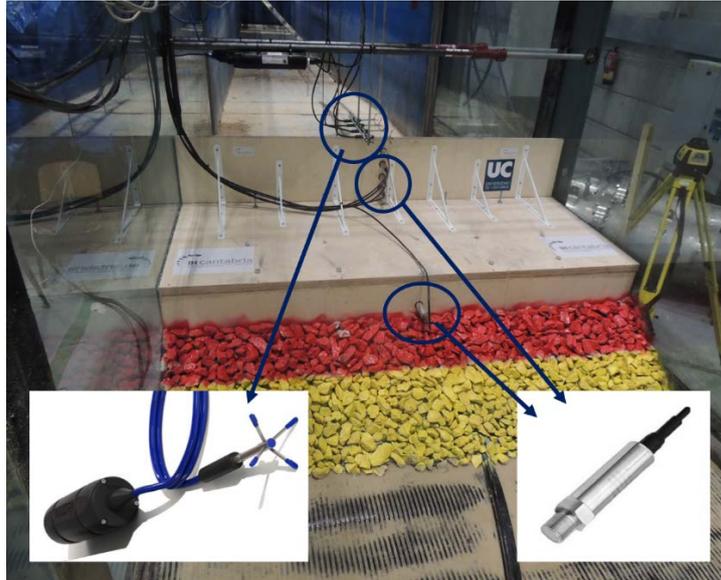


Figure 5. Algunos de los sensores de presión y “arrays” de ADVs vistos desde el lado de tierra de la tipología I



Figure 4. Estructura tipo II. Capas pintadas de diferente color para ayudar en la visualización de las piezas de los mantos extraídas durante de los ensayos

#### 4. Descripción de los modelos del laboratorio

Teniendo en cuenta las capacidades del canal se realizaron ensayos de laboratorio sobre dos tipologías de diques rompeolas de materiales sueltos: (I) con espaldón y (II) sin espaldón. Se ha diseñado, construido y ensayado un prototipo de cada tipología a una escala 1/20. En estos ensayos el fluido prototipo es agua salada con una densidad de  $\rho_p = 1025 \text{ Kg/m}^3$  mientras que el fluido del modelo es agua salada con una densidad de  $\rho_p = 1000 \text{ Kg/m}^3$ . Las características del flujo fueron escaladas siguiendo leyes de escala de Froude (ver Tabla 1).

	Scale factor	Value
Length	$N_L$	20
Time and velocity	$(N_L)^{0.5}$	4.47
Discharge	$(N_L)^{2.5}$	1788.85
Pressure	$N_L * N_\rho = 1.025 * 20$	20.5

Table 1. Factores de escala

El dique tipo I es un dique rompeolas de materiales sueltos con espaldón (ver sección transversal en figura 7) y el dique tipo II es una geometría similar pero sin espaldón (ver sección transversal en Figura 8).

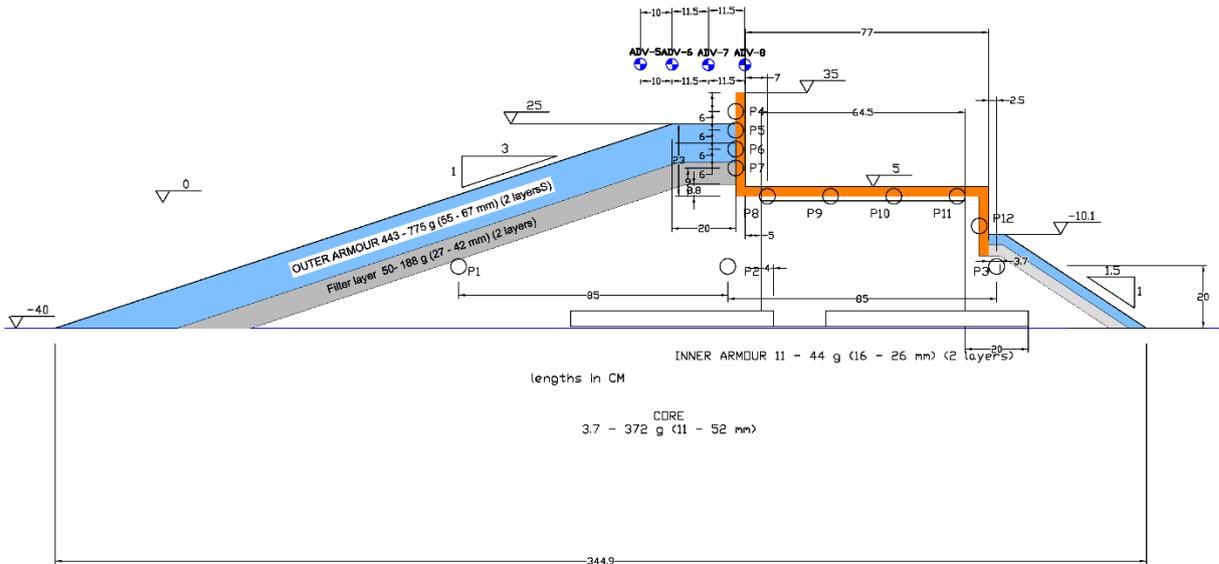


Figura 5. Sección transversal del dique en talud tipo I (con espaldón)

La pendiente exterior de ambos modelos está compuesta por un manto de 2 capas de escollera, con pesos entre 443 y 775 g. Por debajo, se sitúa un filtro compuesto por dos capas escollera de entre 50 y 188 g. La pendiente trasera de la tipología I está protegida por un manto de dos capas de escollera de entre 11 y 44 g. La coronación y la pendiente trasera de la tipología II está protegida por las mismas capas que la pendiente exterior del manto principal. El núcleo de ambos modelos contiene escollera con pesos que van desde 3 g hasta 372 g.

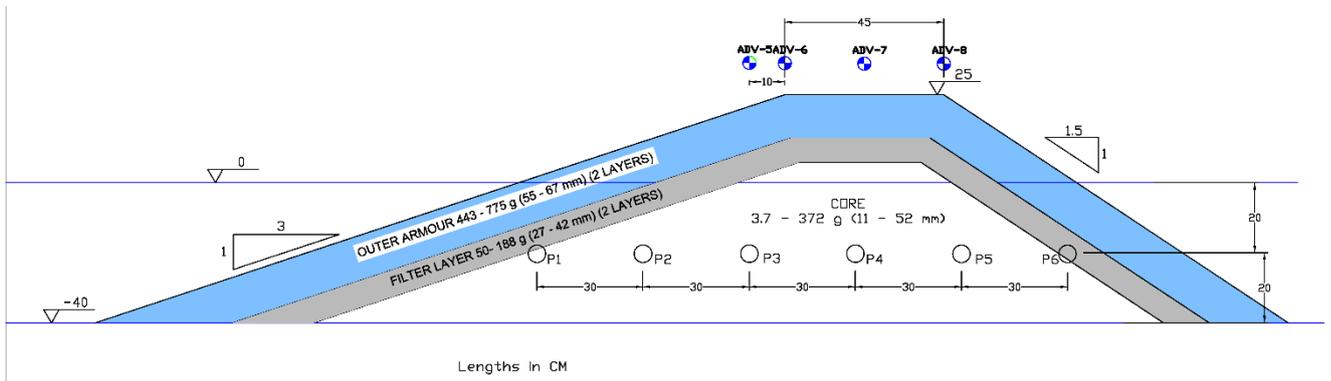


Figura 6. Sección transversal del dique en talud tipo II (sin espaldón)

La porosidad de cada medida en laboratorio se da en la tabla 2.

	Porosidad
Manto exterior	0.46
Manto Interior	0.45
Filtro	0.45
Núcleo	0.42

Tabla 2 Valores de la porosidad de cada capa de las estructuras ensayadas

## 5. Características de los experimentos

Cuando un tsunami entra en la plataforma continental, su cabecera se puede dividir en solitones. Al alcanzar la costa, estos solitones en forma de bore acompañan el gran acenso y descenso del nivel asociado a ondas de gran periodo. Cuando los solitones en forma de bore impactan en la estructura, producen un gran run-up seguido de un importante rebase,

provocando daños en la pendiente exterior del manto principal y la coronación, así como en la pendiente interior debido a que estos diques no están diseñados para soportar descargas tan grandes. Si además el dique tiene un espaldón, las grandes presiones horizontales y verticales inducidas por el flujo pueden llegar a provocar el deslizamiento o vuelco del mismo. El rebase creado por el lento incremento del nivel tiende a dañar la pendiente interior, En este sentido, pero como el tsunami también se propaga por la bocana del puerto, los niveles a ambos lados del dique tienden a igualarse rápidamente.

Debido a las dimensiones de la onda de tsunami, la representación a escala adecuada de su longitud total en el laboratorio es difícilmente abordable. Por ello, como aproximación, en este trabajo, las solicitaciones que las ondas de tsunami generan en la estructura se han dividido en 2 componentes. Primero, el impacto inicial de la onda de tsunami contra la estructura se ha simulado mediante ondas solitarias de tamaño creciente. Y, por otro lado, el subsiguiente rebase de la onda sobre la estructura se ha simulado creando una corriente en el canal de ensayos a través de bombas de recirculación.

Así, se generaron en laboratorio ondas solitarias de altura creciente desde 0.10 m hasta 0.45 m. Cada experimento de onda solitaria se repitió 5 veces, sin reconstruir la geometría de los diques, para obtener también el daño acumulado por cada nueva ola de la misma altura. La profundidad inicial a pie de dique fue de 0.4 m y después de cada ola el canal fue drenado para permitir la medida adecuada del daño provocado durante el ensayo mediante fotografía y láser escáner. Después de cada set de 5 olas de la misma altura, la geometría original fue recompuesta a su condición original y, a continuación, se realizó el siguiente set de 5 olas incrementando 5 cm la altura de la onda solitaria. Los ensayos de onda solitaria terminaron bien si el filtro quedaba visible, bien cuando se realizó el último experimento con onda de 45 cm.

Los denominados ensayos “de corrientes” se llevaron a cabo después de los ensayos de onda solitaria para cada sección tipo, usando las bombas de recirculación y llenado con que cuanta la instalación. Estos ensayos consistieron en la recirculación del agua en el canal para crear una corriente que genera un rebase sobre la coronación de ambas tipologías de diques. La profundidad del agua a pie de dique fue de 0.5 m. Para asegurar que el nivel del agua en el trasdós se mantenía (y no disminuía debido a la propia recirculación de las bombas) se construyó una ataguía 2 m del pie del manto interior. En cada test se fue incrementando la potencia de las bombas hasta llegar a la coronación del dique. A continuación se incrementó de nuevo la potencia para imitar una curva de carga triangular similar a la que provocaría un tsunami, y que está caracterizada por un periodo  $T_0$  y espesor máximo de la lámina de rebase  $H_p$ . Los experimentos continuaron incrementando  $H_p$  hasta alcanzar la destrucción de la estructura. Se realizaron ensayos incrementando el vaor de  $T_0$  desde 1 hasta 5 minutos para cada valor de  $H_p$  alcanzado. Como en el caso de los ensayos de onda solitaria, después de cada test se drenó el canal para medir el daño y se procedió a reconstruir la estructura antes de comenzar con el siguiente ensayo.

## 6. Resultados

La instrumentación dispuesta en el canal durante los ensayos permitió registrar diversas variables como nivel del agua, presiones en la estructura, y velocidad de corriente. De esta manera, la hidrodinámica asociada a cada ensayo ha quedado caracterizada. Además, se ha medido el daño provocado sobre las diferentes capas de las estructuras, midiendo para ello la modificación en la geometría, antes y después de cada ensayo, mediante un perfilador laser. Con las medidas del daño registradas se ha calculado el área de erosión y el llamado parámetro de daño ( $S=Ae/Dn50$ ), lo que ha permitido evaluar la estabilidad del manto, relacionando dicho parámetro y el número de estabilidad. A modo de ejemplo, en la tabla 3 se encuentran los parámetros de daño calculados para la pendiente interior de la tipología II.

	Test	H (m) en el pie de la estructura	Número de olas, N				
			1	2	3	4	5
Altura de ola	SW1	0.22	0	0	0	0	0
	SW2	0.28	0.44	0.7	0.87	1.13	1.35
	SW3	0.33	0.52	0.78	1.04	1.74	2.92
	SW4	0.38	0.39	1.61	2.09	5.09	7.71
	SW5	0.43	7.05	12.45	20	-*	-*
	SW6	0.48	2.31	9.58	-*	-*	-*

\*:La destrucción del dique se alcanzó antes del fin de los experimentos

Tabla 3 Resultados de los ensayos de onda solitaria para la tipología II. Talud interior.

Así, para la tipología I, no se apreció ningún daño hasta que las ondas solitarias alcanzaron una altura de 0.25 m (5 m en prototipo). En ese caso, se observó la extracción de varias piezas del manto principal. A medida que la altura de ola se incrementaba en los ensayos, se observó un incremento muy lento del daño sobre las estructuras. Los ensayos terminaron cuando para la ola de 45 cm (10 m en prototipo) el daño observado solo afectó a la capa exterior del manto principal. Del mismo modo, para los ensayos de corriente, no se observó ningún daño ni en el lado de mar ni el de tierra, ya que el rebase caía directamente sobre el camino de acceso amortiguando el impacto sobre las piezas interiores (Figura 9).

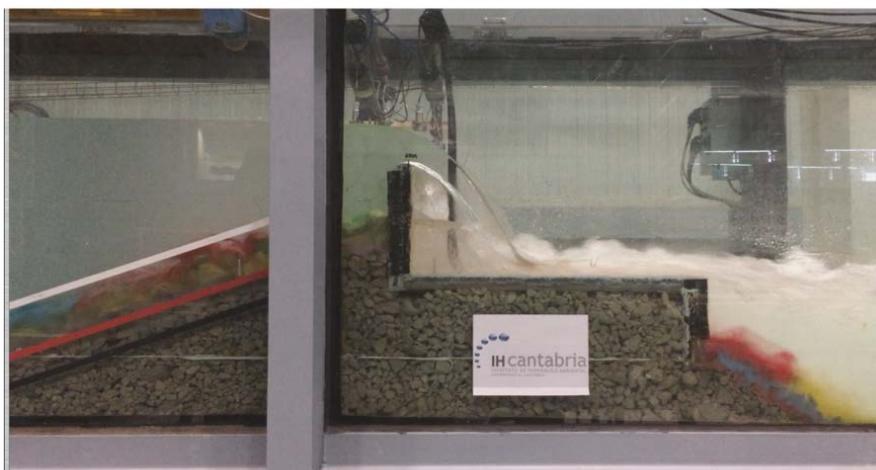


Figure 7. Rebase sobre el dique tipo I en un ensayo de corriente

En cuanto a los ensayos realizados con ondas solitarias sobre la tipología II (ver Figura 10), para una altura de ola de 20 cm (4 m en prototipo) se alcanzó un daño acumulado de en torno a 10 piezas desplazadas tras las 5 olas de esa altura. El daño fue bastante más notable que en el caso de la I tipo I. La capa del filtro quedó expuesta en la tercera ola de altura 40 cm. Tras esto, se inició un nuevo set de 45 cm de altura en el que la destrucción del dique se alcanzó en la segunda ola.

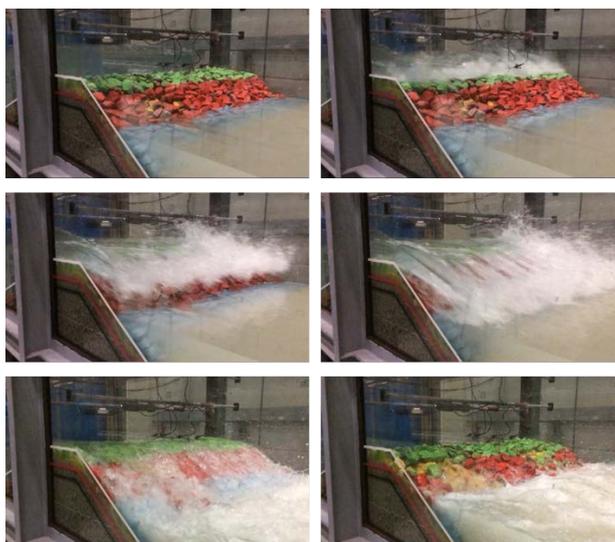


Figure 8. Vista lateral de un ensayo de onda solitaria sobre el dique tipo II (sin espaldón)

En los ensayos de corriente para este mismo tipo II aparecieron las primeras extracciones para un espesor de la lámina de rebase de en torno a 11 cm (2.2 m en prototipo). El rebase se fue aumentando gradualmente y la estructura finalmente colapso para un espesor  $H_p=12$  cm (2.4 m en prototipo) tras 5 minutos de tiempo de rebase (ver figura 11). Para dotar de mayor representatividad a este resultado, se repitió la serie de ensayos y se alcanzó la destrucción en el mismo instante.



Figure 9. Vista del estado tras destrucción del dique tipo II en los ensayos de corriente

## 7. Conclusiones

En este estudio se han realizado ensayos de laboratorio para analizar las características de la interacción entre tsunami y estructura. Se han seleccionado dos diques rompeolas de características típicas del Mediterráneo, no con espaldón y otro sin espaldón. Las ondas de tsunami se dividieron en dos componentes. El impacto inicial se modeló como onda solitaria y el rebase del tsunami se modelo como una corriente de rebase.

Como resultado de los ensayos con ondas solitarias, se ha calculado el daño en cada estructura tras cada ensayo. El daño en el lado de mar de ambas estructuras es muy similar, y aumenta de forma lineal son la altura de ola. Sin embargo el comportamiento del manto interior difiere. En el tipo I, el overtopping cae directamente sobre el camino de acceso, amortiguando la caída del agua y minimizando el daño. Por el contrario, cuando la altura de ola es suficiente, en el dique

tipo II el flujo impacta directamente sobre la estructura, arrastrando piezas a su paso y provocando, para el más extremo de los ensayos la destrucción del dique.

En cuanto a los ensayos de corriente no se observó ningún daño para ninguna de las dos estructuras en el lado de mar, pero el comportamiento del trasdós varía en función de la tipología. Como era esperable la presencia del espaldón provoca un daño despreciable ya que el camino de acceso del propio espaldón nuevamente se lleva toda la energía del rebase, amortiguando la acción sobre las piezas del manto interior del dique tipo I. Por el contrario, en el dique tipo II la corriente de rebase cae directamente sobre el trasdós de la estructura y provoca para un rebase y un tiempo de acción adecuado la rotura y el colapso de la estructura.

En Japón, tras el evento de 2011, se realizaron varias campañas para determinar el modo de fallo de las estructuras afectadas por el tsunami llegando a la conclusión de que la tipología estructural es determinante para conocer cómo va a fallar la estructura. En este trabajo se han presentado los resultados obtenidos para las estructuras detalladas, con el objetivo de que futuros ensayos sobre nuevas tipologías permitan finalmente incorporar la acción de tsunamis al diseño de estructuras marítimas.

### **Agradecimientos**

Los autores quieren agradecer la financiación de este trabajo al proyecto ASTARTE (Assessment, Strategy and Risk Reduction for Tsunamis in Europe, FP7/2007-2013 n°603839).

### **Referencias**

VIDAL C. Losada, M.A., MEDINA, R., LOSADA, Í. Análisis de la estabilidad de diques rompeolas, Ingeniería del agua, Vol. 1 (1994) 17–34.

ESTEBAN, M., IZUMI, M., TOMOYA, S., ARANGUIZ, R., MIKAMI, T., THAO, D., OHIRA, K., OHTANI, A. Stability of rubble mound breakwaters against solitary waves, in: ICCE 1012, International conference on coastal engineering (ICCE) 2012, 2012: pp. 1–13.

ESTEBAN, M., JAYARATNE, R., MIKAMI, T., MORIKUBO, I., SHIBAYAMA, T., THAO, D., OHIRA, K., A. OHTANI, A. Mizuno, M. Kinoshita, S. Matsuba, Stability of Breakwater Armor Units against Tsunami Attacks, J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng. 140 (2014) 188–198. doi:10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000227.