
Título del proyecto de tesis: Diseño de diques en Talud con mantos de escollera, cubos y Cubípodos en Condiciones de Oleaje Limitado por Fondo

1. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL TEMA

El oleaje es el mecanismo natural más importante en la mayoría de los procesos costeros, y verdadero escultor de las formas costeras tanto en planta como en perfil. Desde que el oleaje abandona la zona de generación sufre distintas alteraciones hasta alcanzar las proximidades de la costa donde se produce su rotura. El tipo de rotura que resulta más familiar es el que se observa en aguas someras, por limitación de profundidad. Debido a los procesos de asomeramiento, las olas se peraltan hasta que las crestas se desestabilizan, a causa de la componente horizontal de su velocidad, y caen (según el tipo de rotura).

Son numerosos los diques rompeolas que en la actualidad se construyen en estas condiciones, tal es el caso del dique de cubípodos de San Andrés del Puerto de Málaga, donde la limitación de fondo provoca la rotura de las olas mayores alterando significativamente las acciones sobre el manto.

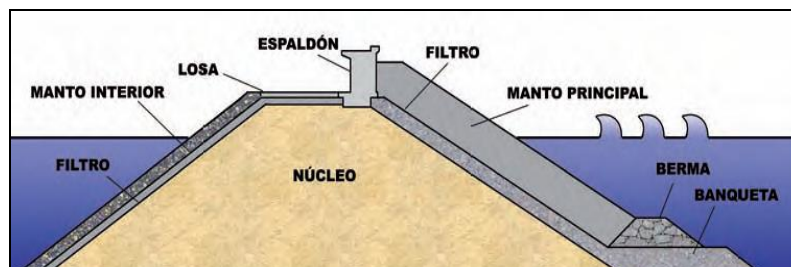


Figura 1. Sección de dique en talud convencional.

En general, los mantos principales de los diques en talud suelen diseñarse en base a formulaciones empíricas basadas en ensayos físicos a escala reducida con semejanza de Froude. La fórmula que ha venido empleándose tradicionalmente es la fórmula de Hudson popularizada por el Shore Protection Manual-SPM (1975, 1984), que incluye un coeficiente de estabilidad (K_D) que depende del tipo de pieza (escollera, tetrápodos, cubos, etc.):

$$W = \frac{1}{K_D} \frac{H^3}{\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1\right)^3} \frac{\gamma_r}{\cot \alpha}$$

donde W es el peso de las piezas del manto, γ_r y γ_w son los pesos específicos del hormigón y del agua, H es la altura de ola de cálculo y α es el ángulo que forma el talud con la horizontal. Esta formulación también ha sido ampliamente usada a partir del número de estabilidad, N_s , usando el peso específico relativo sumergido y el lado del cubo equivalente de la pieza, $\Delta = (\gamma_r/\gamma_w - 1)$ y $D_n = (W/\gamma_r)^{1/3}$.

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} = \sqrt[3]{K_D \cot \alpha}$$

Hudson (1959) propuso originalmente primera ecuación como una mejora de la fórmula de Iribarren (1938), para diseñar diques en talud y ha servido y sigue sirviendo de base para estudiar, comparar y diseñar mantos diques en talud (ver The Rock Manual-CIRIA [2007]). Al asociar de manera sencilla el peso de las unidades del manto con su geometría y colocación a través de un único parámetro KD, la fórmula de Hudson favoreció a mediados del siglo pasado el desarrollo de nuevas piezas prefabricadas de hormigón para sustituir a los bloques cúbicos y paralelepípedicos que se utilizaban desde el S. XIX como escollera artificial. En la siguiente figura aparece la clasificación propuesta por Dupray and Roberts en 2009 de los principales elementos prefabricados de hormigón para mantos:

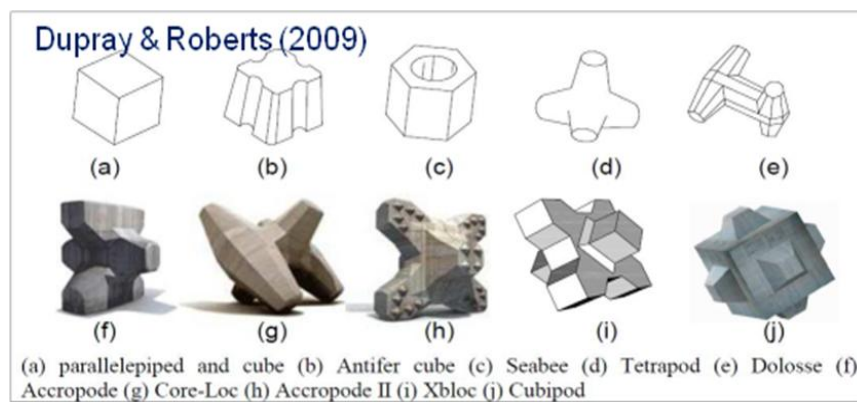


Figura 2. Elementos prefabricados de hormigón para mantos de diques en talud.

En cualquier caso, tanto la fórmula de Hudson como la mayoría de las formulaciones empleadas para el diseño de diques en talud, son formulaciones empíricas que se han obtenido a partir de ensayos físicos en condiciones de oleaje no rompiente. De modo que no son válidas directamente cuando se disponen diques en talud a una profundidad tal que el oleaje incidente rompe a causa del efecto del fondo.

Esta situación empuja habitualmente a los proyectistas a utilizar fórmulas como la de Hudson en zonas con oleaje rompiendo por el fondo (ver SPM, 1975 y 1984) sustituyendo la relación $H=H_s$ por $H=H_b$ y determinando H_b por un método general aproximado o con formulaciones y coeficientes específicos para cada tipo de pieza (ver CEM, 2006). Algunas de las formulaciones propuestas por el CEM (2006) para oleaje limitado por fondo utilizan la altura de ola significativa (H_s) frente a la estructura como variable de diseño en una única formulación de cálculo (ver fórmulas de Burcharth and Liu [1992] y Burcharth et al.[1998]) que se suponen válidas con y sin limitación de fondo; sin embargo, resulta evidente que la distribución de alturas de ola individuales suelen ser muy diferentes con y sin limitación de fondo, por lo que resulta difícil de creer que un único parámetro como H_s pueda definir los daños en el manto en todos los casos. En otras ocasiones, el CEM (2006) propone utilizar una modificación de la fórmula (por ejemplo $H^2/1.4$ en lugar de H_s) sin limitación de fondo, para utilizarla en situaciones con limitación de fondo (por ejemplo, Van de Meer [1998b] y d'Angremond et al. [1994]). Por otro lado, el CIRIA (2007) propone el uso de las fórmulas de Van Gent et al.

(2003) para mantos de escollera con limitación de fondo que son una transformación sofisticada de las fórmulas de Van der Meer (1998a) utilizadas para diques de escollera en aguas sin limitación de fondo. La variedad de formulaciones y niveles de complejidad definidos en los manuales de diseño (CEM [2006], CIRIA [2007], etc.) para estimar la estabilidad hidráulica de los mantos principales de piezas distintas en aguas someras, presenta un grado de coherencia tan bajo, que resulta poco tranquilizador desde el punto de vista práctico y nada satisfactorio desde el punto de vista científico.

Así pues, el diseño preliminar de mantos de diques frente a oleajes con limitación de fondo es un problema que no está bien resuelto. La eficiencia y trazabilidad de los procesos de diseño de diques exigen establecer métodos sencillos para que sean realmente aplicables, pero la gran complejidad de los mecanismos de rotura en esas profundidades impone la necesidad de cuestionar métodos y formulaciones demasiado simples.

2. OBJETIVOS

El objeto principal es caracterizar el oleaje en rotura con el fin de obtener una formulación específica que permita diseñar diques en talud considerando la estabilidad global de este tipo de estructuras. Para ello, se pretende realizar ensayos a escala reducida en el canal bidimensional de oleaje y viento del Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia (LPC-UPV). A partir del análisis de los ensayos realizados, se obtendrán gráficos de diseño y formulaciones empíricas de diseño para el caso concreto de diques en talud no rebasables con y sin limitación de fondo.

A continuación quedan descritos los principales objetivos secundarios:

1. Estimar la estabilidad hidráulica en el tronco (ensayos 2D) del manto principal de diques en talud con limitación de fondo ($0.8 > H_s/d_s > 0.3$), sin rebase y con pendiente de fondo $0\% \leq \tan \theta \leq 10\%$ para mantos monocapa y bicapa de Cubípodos, así como mantos bicapa de escollera y cubos. Los ensayos previstos completarán la base experimental sin limitación de fondo y permitirán diseñar mantos seguros y optimizados en zonas con limitación de fondo que son habituales en construcciones reales.
2. Realizar una modelación neuronal (no lineal multiparamétrica) del daño observado en los mantos ensayados y definir gráficos de diseño o formulaciones empíricas aproximadas que permitan realizar prediseños justificados de mantos en aguas con limitación de fondo y en el rango de experimentación. Determinar la incertidumbre de los métodos de diseño propuestos y, en su caso, definir explícitamente los coeficientes de seguridad asociados a los coeficientes de estabilidad que se propongan para compararlos con los de aguas sin limitación de fondo (Medina et al., 2010).
3. Obtener recomendaciones y criterios de diseño claros y justificados que permitan compararlos con métodos y técnicas ya publicadas. Los ahorros económicos y la reducción de las huellas energéticas y del carbono que pueden conseguirse son evidentes ya que la falta de soporte experimental de las técnicas de diseño actuales en aguas con limitación de fondo se suele traducir en diseños innecesariamente conservadores.

3. ETAPAS PRINCIPALES DEL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Para analizar la estabilidad de mantos de diques sometidos a oleajes limitados por el fondo, se realizarán ensayos en el canal de oleaje del LPC-UPV. El canal de dimensiones 30x1.2x1.2m, cuenta en uno de sus extremos con un generador de oleaje, mientras que en el extremo opuesto hay dispuesta una rejilla que actúa como disipador de oleaje para disminuir las reflexiones.

A lo largo del mismo se ubicarán 12 sensores capacitivos de nivel DHI, 3 sensores ultrasónicos y 6 sensores de presión; cuya finalidad será registrar las oscilaciones de la superficie libre del mar.

La sección a ensayar será una sección no rebasable típica de diques en talud, con talud 3/2 en la cara expuesta al oleaje. Se dispondrán cubos, escollera y cubípodos (monocapa y bicapa) en el manto principal.

Se realizarán ensayos con oleaje regular y con oleaje irregular de temporales de 500 olas. Se partirá un valor de altura de ola en que no se produzca rotura y se irá incrementando en escalones de 2 cm hasta parada por rotura del oleaje desde la zona de generación (limitación de peralte). Asimismo se ensayarán distintos rangos de periodos pico con el fin de tener caracterizados los oleajes que acontecen tanto en el Mediterráneo como en el Cantábrico.

Una vez realizados los ensayos, se procederá al análisis y caracterización del oleaje. En primer lugar será necesario separar oleaje incidente y reflejado, para lo cual se empleará el método LASA-V (Figueres & Medina, 2003), que usa un modelo de onda no lineal aproximado de tipo Stokes-V. Este modelo permite analizar experimentos con olas marcadamente no lineales. Este método puede aplicarse directamente al análisis de oleaje regular e irregular 2D, no excesivamente peraltado y con cualquier número de sensores de nivel.

Posteriormente, mediante otro programa informático desarrollado en el LPC y denominado LPCLab 2.0, se hace un análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia. El programa genera un informe, el cual contiene, entre otros parámetros, diversas alturas de ola y valores del periodo, así como espectros o momentos de orden cero necesarios para el análisis posterior. Con todo ello, ya tenemos los datos preparados para cualquier análisis posterior.

Es necesario remarcar que el LPC-UPV, cuenta con un amplio soporte audiovisual. Diversas cámaras de foto y de vídeo almacenan todo lo que ocurre durante los ensayos para su posterior análisis, comprobación y verificación de datos anómalos. Es además, a partir de las fotografías del manto realizadas, y mediante el empleo de la malla virtual (Gómez Martín & Medina, 2006) con lo que se calcula el daño o avería del mismo tras ser sometido a diversos temporales.

Las principales tareas a desarrollar quedan recogidas a continuación:

- Tarea 1: Selección de métodos de diseño existentes para mantos de diques en talud con oleaje limitado por fondo.
- Tarea 2: Ensayos físicos 2D de estabilidad hidráulica de mantos con oleaje limitado por fondo
- Tarea 3. Análisis de los ensayos físicos 2D y comparación de resultados con métodos existentes.
- Tarea 4. Modelación neuronal de los daños en el manto.

- Tarea 5. Simulación y gráficos de diseño
- Tarea 6. Contraste de las nuevas técnicas de diseño
- Tarea 7. Difusión

Actividades/Tareas	Primer año	Segundo año	Tercer año
Tarea 1. Selección de métodos de diseño existentes para mantos de diques en talud con oleaje limitado por fondo	X X X X		
Tarea 2 : Ensayos físicos 2D de estabilidad hidráulica de mantos con oleaje limitado por fondo	X X X X X X X X X	X X X X X X	
Tarea 3. Análisis de los ensayos físicos 2D y comparación de resultados con métodos existentes	X X X	X X X X X X X X X	
Tarea 4. Modelación neuronal de los daños en el manto		X X X X	
Tarea 5. Simulaciones y gráficos de diseño			X X X X X
Tarea 6. Contraste de las nuevas técnicas de diseño			X X X X
Tarea 7. Difusión	X	X	X X X X X

4. VINCULACIÓN A LAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN DEL GRUPO DE ACOGIDA

El presente trabajo está enmarcado dentro del proyecto de investigación “Estabilidad hidráulica de los mantos de escollera, cubos y Cubípodos frente a Oleaje Llimitado por el Fondo” (ESCOLIF), que se está desarrollando en la actualidad en el Laboratorio de Puertos y Costas de esta Universidad (LPC-UPV). Se trata de un proyecto del antiguo Ministerio de Ciencia e Innovación, conocido ahora como Ministerio de Economía y Competitividad, que además cuenta con fondos FEDER, y que tiene la finalidad de estudiar experimentalmente la estabilidad hidráulica de los mantos de escollera, cubos y cubípodos frente a oleajes limitados por el fondo y compararlos con las formulaciones y ensayos similares sin limitación de fondo. El objetivo último es definir un método que permita diseñar de manera fiable mantos de cubos y cubípodos frente a temporales de cálculo con limitación de fondo.

En el campo del diseño de diques en talud, el equipo investigador ha desarrollado un considerable trabajo con patentes internacionales como la del manto en D (ES2013151) y la del Cubípedo (ES2264906). Las investigaciones realizadas en los últimos 25 años incluyen sobretodo ensayos 2D de mantos E2 (escollera bicapa), C2 (cubos bicapa) y mantos C1 y C2 (cubípodos monocapa y bicapa), la mayoría en aguas sin limitación de fondo. A destacar el desarrollo del proyecto CUBIPOD (2007-2009) y CUBIPOD2 (2010), para la caracterización de los mantos C1 y C2, incluyendo ensayos 2D y 3D y desarrollos tecnológicos específicos realizados por diferentes equipos de investigación nacionales y extranjeros. En aguas con limitación de fondo, se han estudiado y realizado ensayos de remonte y rebase de mantos de cubos Antifer dentro de los proyectos europeos OPTICREST (1998-2001) y CLASH (2001-2004) y otros de estabilidad y rebase como los realizados para los diques de Gijón (B2) y Málaga (C1).

En el campo del análisis de ondas, el equipo de investigación ha desarrollado el software LASA (Medina [2001] y Figueres and Medina [2004]) que se utiliza habitualmente en los ensayos y permite discriminar oleaje no lineal incidente y reflejado en condiciones no estacionarias utilizando un sistema de optimización con recocido simulado. El equipo ha participado directamente junto con el equipo de Delft Hydraulics en el diseño de la red neuronal de CLASH para estimar rebase, que se utiliza ampliamente en el mundo; entre otros avances, ha desarrollado el software NEUROPORT de redes neuronales podadas con estrategias evolutivas para obtener formulaciones empíricas avanzadas y gráficos de diseño (Medina et al. [2002] y Garrido y Medina [2012]).

5. REFERENCIAS

- Burcharth, H. F., and Liu, Z. (1992). Design of dolos armour units. Proc. ICCE 1992, ASCE, Vol 1, pp 1053-1066.
- Burcharth, H. F., Christensen, M., Jensen, T. and Frigaard, P. (1998). Influence of core permeability on Accropode armour layer stability. Proceedings of International Conference on Coastlines, Structures, and Breakwaters '98, Institution of Civil Engineers, London, UK, pp 34-45.
- d'Angremond, K., van der Meer, J. W., and van Nes, C. P. (1994). Stresses in Tetrapod armour units induced by wave action. Proc. ICCE 1994, ASCE, 1713-1726.
- CIRIA(2007). The Rock Manual: the use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). C683 CIRIA, London (UK), 1268 p.
- CEM (2006). Coastal Engineering Manual. U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., (6 vols.).
- Dupray, S., and Roberts, J. (2009). Review of the use of concrete in the manufacture of concrete armour units. Proc. of Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2009, ICE-Thomas Telford Ltd., Vol. 1, 245-259.
- ES2013151. Medina Folgado, Josep Ramon. (1989). Mound breakwater. ES, EP y USA.
- ES2264906. Medina Folgado, Josep Ramon and Gomez Martin, Maria Esther. (2005). Element used to form breakwaters. ES and PCT (CHI, USA, EP, BRA, MEX, IND, MAR, ARG).
- Figueres, M. and Medina J.R. 2004. Estimation of incident and reflected waves using a fully non-linear wave model. Proc. ICCE 2004, ASCE, 594-603.
- Garrido, J. and Medina, J.R. (2012). New neural network-derived empirical formulas for estimating wave reflection on Jarlan-type breakwaters. Coastal Engineering, 62 (2012): 9-18.
- Gómez-Martin, M. E. and Medina, J. R. 2006. Damage progression on cube armored breakwaters. Proc. ICCE 2006, ASCE, 5229-5240.
- Iribarren, R.(1938). Una fórmula para el cálculo de diques de escollera. Ed. M. Bermejillo Usabiaga (Pasajes), julio de 1938.
- Medina, J.R., Hudspeth, R.T. and Fassardi, C. (1994). Breakwater armor damage due to wave groups. J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engng., ASCE, 120(2), 179-198.
- Medina, J.R., J.A. González-Escrivá, J.M. Garrido, and J. de Rouk. (2002). Overtopping analysis using neural networks. Proc. ICCE 2002, ASCE, 2165-2177.
- Medina, J.R., Gómez-Martín, M.E., Corredor, A., Torres, R., Miñana, J.V., Fernández, E., Menéndez, C.F., Santos, M.(2009). Cube and Cubipod armor unit drop tests and cost analysis. Proc. Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2009, ICE-Thomas Telford Ltd., Vol 1, 260-271+298-299.
- Medina, J.R., Gómez-Martín, M.E., Corredor, A. y Santos, M. (2010). Diseño de diques en talud con el manto principal de cubípodos. Revista de Obras Públicas, CICCOP. Madrid. Año 157 (Nov. 2010/No. 3.515): 37-52.
- Shore Protection Manual (1975 y 1984). Shore Protection Manual, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Missisipi.
- Van der Meer, J. (1988a). Deterministic and probabilistic design of breakwater armor layer. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. ASCE, pp. 1789–1802
- Van der Meer, J.W.(1988b). Stability of cubes, tetrapods and accropode. Proceedings of the Breakwaters '88 Conference; ICE, Thomas Telford, London, UK, 71-80.
- Van Gent, M.R.A, Smale, A.J., Kuiper, C., 2003. Estability of rock slopes with shallow foreshores. Proc. Coastal Structures 2003. Portland, Oregon.



Diseño de diques en Talud con mantos de escollera, cubos y Cubípodos en Condiciones de Oleaje Limitado por Fondo

I ENCUENTRO ESTUDIANTES DE DOCTORADO (UPV)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



Autora: M^a Piedad Herrera Gamboa
Tutor: D. Josep R. Medina Folgado



Valencia, 12 de junio de 2014

CONTENIDOS

- ▣ 1. INTRODUCCIÓN
- ▣ 2. OBJETIVOS
- ▣ 3. ETAPAS. METODOLOGÍA
- ▣ 4. RESULTADOS





1. INTRODUCCIÓN
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2. OBJETIVOS
4. RESULTADOS Y UTILIDADES

INTRODUCCIÓN

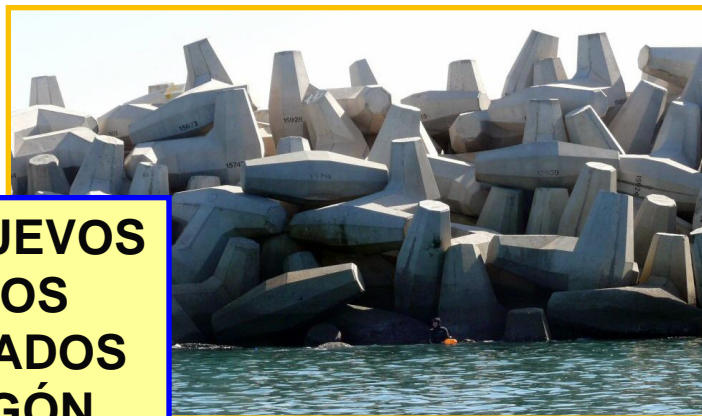
ORIGEN: ESCOLLERA



SIGLO XIX: CUBOS



SIGLO XX: NUEVOS
ELEMENTOS
PREFABRICADOS
DE HORMIGÓN

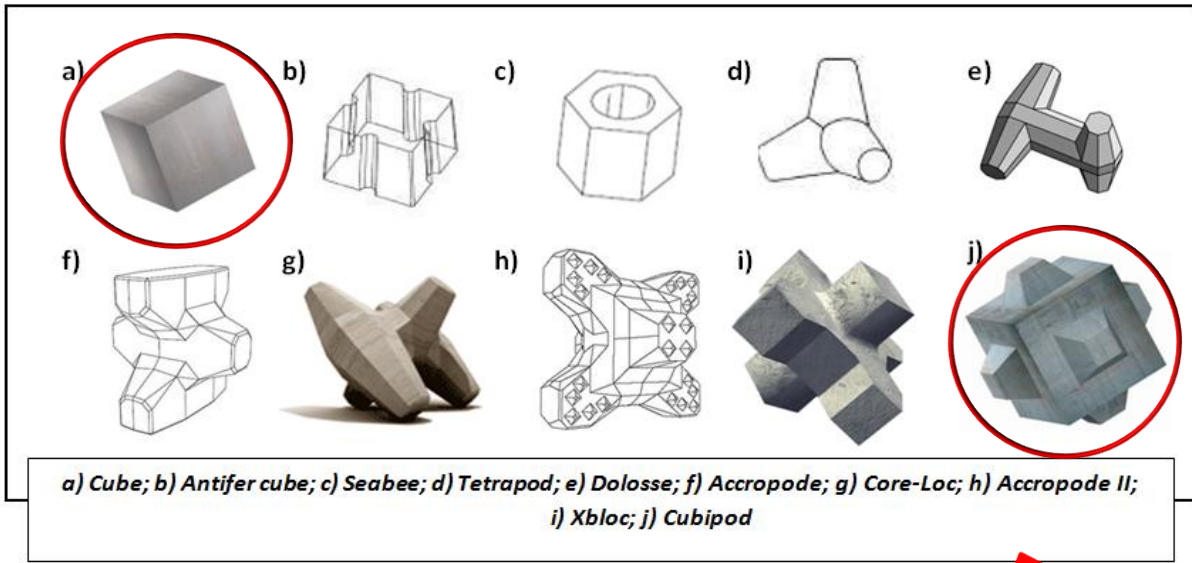




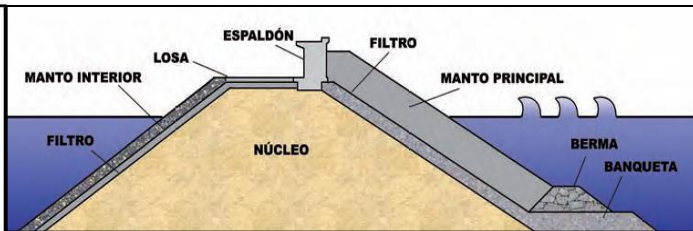
- 1. INTRODUCCIÓN
- 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

- 2. OBJETIVOS
- 4. RESULTADOS Y UTILIDADES

INTRODUCCIÓN



a) Cube; b) Antifer cube; c) Seabee; d) Tetrapod; e) Dolosse; f) Accropode; g) Core-Loc; h) Accropode II; i) Xbloc; j) Cubipod



Hudson (1959)

$$W = \frac{1}{K_D} \frac{H^3}{\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1\right)^3} \frac{\gamma_r}{\cot \alpha}$$

K_D = coeficiente de estabilidad

H = altura de ola de diseño

Formulaciones empíricas obtenidas para oleaje NO ROMPIENTE

Condiciones de rotura \rightarrow **H = H_b (SPM, 1984)**





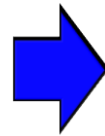
1. INTRODUCCIÓN
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2. OBJETIVOS
4. RESULTADOS Y UTILIDADES

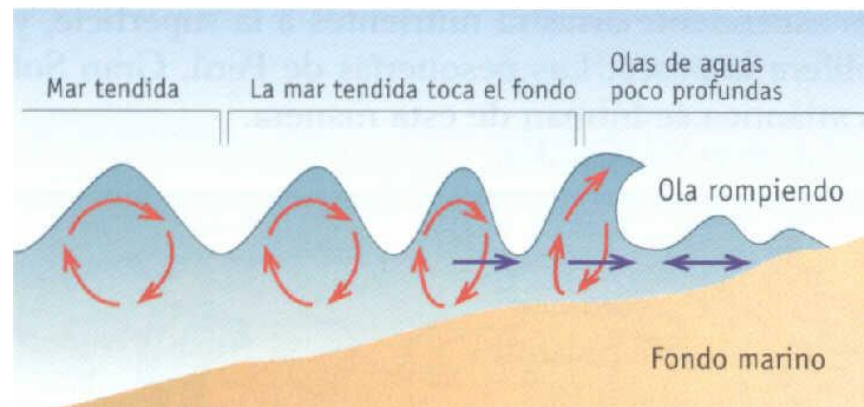
OBJETIVOS

■ Obtener formulaciones empíricas específicas para el diseño de diques en talud con mantos de:

- ❖ Escollera
- ❖ Cubos
- ❖ Cubípodos



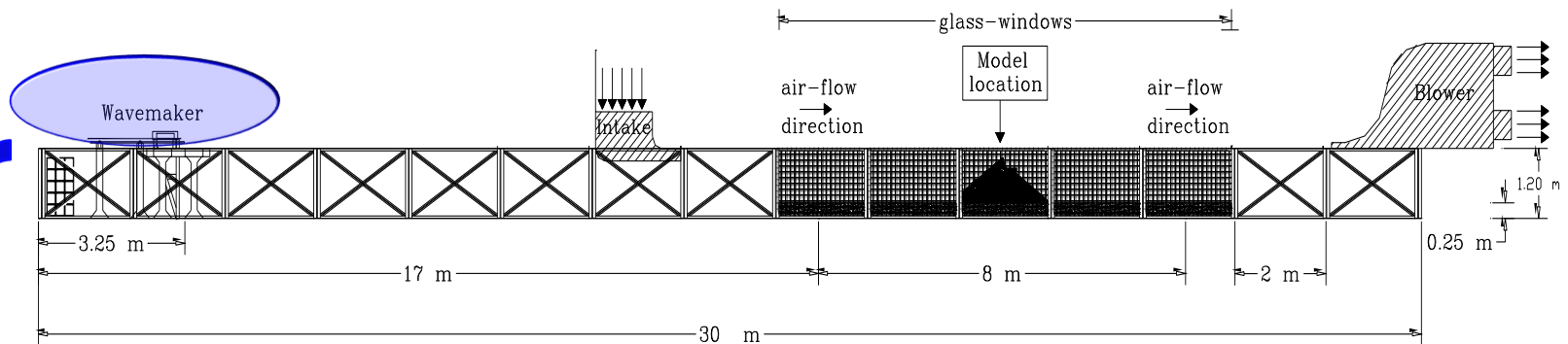
**EN CONDICIONES DE OLEAJE
LIMITADO POR FONDO
(OLEAJE ROMPIENTE)**





METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

- Ensayos físicos 2D LPC-UPV: canal oleaje (30X1.2X1.2m)
- Pendientes de fondo variables: Rotura de olas





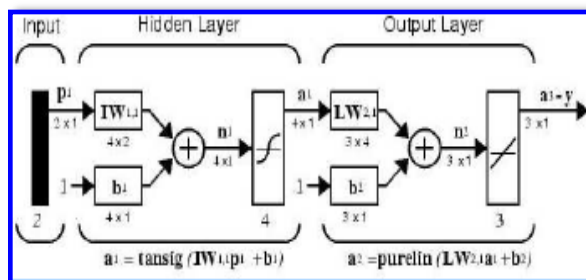
1. INTRODUCCIÓN
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2. OBJETIVOS

4. RESULTADOS Y UTILIDADES

RESULTADOS Y UTILIDADES

- Realización de modelizaciones neuronales de alturas de ola y daño observado en los mantos (técnicas de inteligencia artificial)



- Obtención de formulaciones para el diseño de rompeolas ubicados a profundidades tales que el fondo provoca la rotura de las olas mayores



Dique de San Andrés (Málaga)





Diseño de diques en Talud con mantos de escollera, cubos y Cubípodos en Condiciones de Oleaje Limitado por Fondo

I ENCUENTRO ESTUDIANTES DE DOCTORADO (UPV)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



Autora: M^a Piedad Herrera Gamboa
Tutor: D. Josep R. Medina Folgado



Valencia, 12 de junio de 2014