

TESIS DOCTORAL

Análisis de las mallas de colocación y la porosidad de los mantos monocapa y bicapa de Cubípodos en troncos y morros de diques en talud

AUTOR:

Vicente Pardo de Gregorio

DIRIGIDA POR:

Dr. Josep Ramon Medina Folgado



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Septiembre de 2015

A mi padre

Agradecimientos

Después de varios años de esfuerzo y dedicación presento esta Tesis Doctoral, la cual no podría estar completa sin los agradecimientos a las personas que han hecho posible su publicación.

A mi padre, Marcelino, de quién aprendí a echarle arrostos a la vida.

A Vanessa, por su amor y comprensión en la falta de tiempo que no le he dedicado.

A mi hermana Elena, quien en momentos duros ha demostrado tener tanto o más coraje que nuestro padre.

A mi madre, Elena, por su continuo apoyo, cuidado y cariño.

A mis compañeros del Laboratorio de Puertos y Costas de la UPV, y de forma especial a Jorge por su ayuda durante todos estos años.

A mis compañeros de trabajo en SATO por su ánimo.

A Josep, director de esta Tesis Doctoral, por la formación recibida y su dedicación.

Resumen

La porosidad del manto principal de un dique en talud y el método de colocación de los elementos de protección en él influye considerablemente en el comportamiento hidráulico de la estructura. La porosidad del manto es un parámetro de gran relevancia para la estructura, ésta influye en la estabilidad hidráulica, remonte, rebase y fuerzas sobre el espaldón, pero además es fundamental a la hora de la planificación de los materiales necesarios para la construcción del manto. Diferencias entre la porosidad de diseño, la ensayada en laboratorio y la realmente construida pueden poner en riesgo la integridad de la estructura, así como conducir a la falta o exceso de materiales en su construcción.

En las piezas de protección con formas complejas es habitual poner especial atención en su proceso de colocación para obtener las porosidades recomendadas, no siendo así para los elementos masivos de colocación aleatoria.

Esta Tesis Doctoral se ha centrado en el desarrollo de la colocación del elemento Cubípodo, elemento masivo de colocación aleatoria en una o varias capas, con la finalidad de obtener mantos con porosidades similares a las ensayadas en los test de laboratorio de estabilidad hidráulica para evitar posibles efectos de modelo. Para ello se han estudiado las mallas de colocación y los procesos a seguir en las secciones típicas que se dan en un dique en talud, como son la de tronco recto, tronco curvo de baja curvatura, morros o tramos curvos de alta curvatura, entronques y distintos tipos de transiciones.

Se han desarrollado mallas estáticas y progresivas de colocación de Cubípodos adaptadas a tronco recto y curvo. En las primeras, la separación de las filas de elementos en el talud permanece constante a lo largo de todo el manto. Mientras que en las segundas, esta distancia va reduciéndose para adaptar la malla de colocación a los posibles asentamientos de las filas a medida que se avanza con la construcción del manto. Para tramos curvos se han adaptado las mallas de colocación en función del grado de curvatura de los mismos, llegando a emplear varias mallas encadenadas en las secciones de morro, donde la separación entre piezas de elementos de la misma fila disminuye rápidamente en la dirección del pie a coronación.

El diseño de las mallas de colocación se ha optimizado a través de casi un centenar de ensayos de laboratorio de construcción realista de mantos principales mediante grúas y pinzas de presión a escala reducida, y bajo distintas condiciones de oleaje en el tanque de ensayos del Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia. Los ensayos han permitido estimar el rango de porosidades con las que se puede construir un manto de Cubípodos y obtener los parámetros definitorios de las mallas de colocación específicas para cada tramo de manto sobre taludes $H/V=1.5/1$ y $H/V=2/1$ y para mantos monocapa y bicapa.

Resum

La porositat del mantell principal d'un dic en talús i el mètode de col·locació dels elements de protecció en ell influeix considerablement en el comportament hidràulic de l'estructura. La porositat del mantell és un paràmetre de gran rellevància per a l'estructura, aquesta influeix en l'estabilitat hidràulica, run-up, ultrapassament i forces sobre l'espatller, però a més és fonamental per a planificar els materials necessaris per a la construcció del mantell. Diferències entre la porositat de disseny, l'assajada en laboratori i la realment construïda poden posar en risc la integritat de l'estructura, així com conduir a la manca o excés de materials en la seva construcció.

En les peces de protecció amb formes complexes és habitual posar especial atenció en el seu procés de col·locació per a obtenir les porositats recomanades, i no és així per als elements massius de col·locació aleatòria.

Aquesta Tesi Doctoral s'ha centrat en el desenvolupament de la col·locació de l'element Cubípedo, element massiu de col·locació aleatòria en una o diverses capes, amb la finalitat d'obtenir mantells amb porositats similars a les assajades en els test de laboratori d'estabilitat hidràulica per evitar possibles efectes de model. Per a això s'han estudiat les malles de col·locació i els processos a seguir en les seccions típiques que es donen en un dic en talús, com són la de tronc recte, tronc corb de baixa curvatura, morros o trams corbs d'alta curvatura, entroncaments i diferents tipus de transicions.

S'han desenvolupat malles estàtiques i progressives de col·locació de Cubípodos adaptades a tronc recte i corb. En les primeres, la separació de les files d'elements en el talús romanen constants al llarg de tot el mantell. Mentre que en les segones, aquesta distància es va reduint per adaptar la malla de col·locació als possibles assentaments de les files a mesura que s'avança amb la construcció del mantell. Per trams corbs s'han adaptat les malles de col·locació en funció del grau de curvatura dels mateixos, arribant a emprar diverses malles encadenades en les seccions de morro, on la separació entre peces d'elements de la mateixa fila disminueix ràpidament en la direcció del peu a coronació.

El disseny de les malles de col·locació s'ha optimitzat mitjançant un centenar d'assajos de laboratori de construcció realista de mantells principals utilitzant grues i pinces de pressió a escala reduïda, i sota diferents condicions d'onatge en el tanc d'assajos del Laboratori de Ports i Costes de la Universitat Politècnica de València. Els assajos han permès estimar el rang de porositats amb què es pot construir un mantell de Cubípodos i obtenir els paràmetres definitoris de les malles de col·locació específiques per a cada tram de mantell sobre talussos $H/V=1.5/1$ i $H/V=2/1$ i per mantells monocapa i bicapa.

Abstract

Armor porosity of mound breakwaters and the armor unit placement method have a considerable influence on the hydraulic behavior of the structure. The armor porosity is a parameter of great importance to the structure, it influences the hydraulic stability, run-up, overtopping and forces on the crown wall, but it is also essential when planning the necessary materials for the construction of the armor. Differences between design porosity, laboratory tested porosity and real constructed porosity may jeopardize the integrity of the structure and lead to lack or excess of materials in its construction.

In armor units with complex shapes it is usual to pay special attention to the placement process to obtain the recommended porosities, not however for massive elements with random placement.

This Doctoral Thesis has focused on developing Cubipod armor unit placement, massive element of random placement in one or more layers, in order to obtain armor porosities similar to those tested in hydraulic stability laboratory tests to avoid model effects. To achieve this, placement grids and processes to be followed in usual sections in mound breakwaters, such as straight trunk, curved trunk with low curvature, roundheads or high curvature curved sections and different types of transitions, have been studied.

Static and progressive Cubipod placement grids have been developed adapted to straight and curved trunk. On the first ones, the element rows separation on the slope remains constant along the entire armor. However on the second ones, this distance is reduced to adjust the placement grid to possible row settlements during armor construction. In case of curved sections placement grids have been adapted depending on the curvature degree. For roundheads or high curvature curved sections, where distances between elements of the same row decrease significantly in the direction from toe to crown, chained grids have been designed, where unit rows are grouped in an annulus of a specific placement grid that is decoupled from the placement grid of the contiguous annulus.

Placement grid design has been optimized through nearly one hundred realistic 3D small-scale placement tests, using small-scale crawler cranes and pressure clamps, under different wave conditions in the wave tank of the Laboratory of Ports and Coasts of the Universidad Politécnica de Valencia. Tests were used to estimate the porosity range Cubipod armors can be built with and to define placement grid parameters for each breakwater section on slopes $H/V=1.5/1$ and $H/V=2/1$, for one-layer and double-layer armors.

Símbolos

Acrónimos

<i>ARI</i>	Armor Randomness Index.
<i>CBPS</i>	Cartesian Blind Placement System.
<i>GPS</i>	Global Positioning System.
<i>LASA</i>	Local Approximation using Simulated Annealing.
<i>MR60</i>	Morro radio 60cm.
<i>MR70</i>	Morro radio 70cm.
<i>MR80</i>	Morro radio 80cm.
<i>PIC</i>	Potential Interlocking Coefficient.
<i>TC</i>	Tronco curvo.
<i>TR</i>	Tronco recto.

Notación

α	Ángulo que forma el talud del manto principal con el plano horizontal.
a	Distancia entre c.d.g. de dos piezas de protección contiguas de la misma fila del manto principal.
A	Área de referencia para el cálculo de la porosidad del manto principal.
β	Ángulo interior de la berma de pie con el plano horizontal.
b	Distancia entre c.d.g. de dos piezas contiguas en la dirección del pie a la coronación del manto principal.
C	Altura característica del Core-Loc TM .
Cr	Coefficiente de reflexión del oleaje.
γ	Parámetro de pico del espectro de oleaje Jonswap.

γ_f	Coeficiente de rugosidad asociado a cada tipo de elemento de protección.
δ	Ángulo entre los c.d.g. de las piezas de la primera y segunda capa del manto principal.
A	Coeficiente relativo de pesos específicos.
Δb	Decremento del parámetro b en las mallas de colocación progresivas.
Δx	Distancia entre unidades de protección en sentido horizontal según CIRIA, CUR, CETMEF (2007).
Δx	Desplazamiento de la posición teórica de una pieza de protección en zona de morro según Oever et al (2006).
Δy	Distancia entre unidades de protección en sentido paralelo al talud según CIRIA, CUR, CETMEF (2007).
D	Altura característica del Xbloc [®] .
d	Calado a pie de modelo.
$d1, d2, d3$	Distancia entre elementos del manto principal según Oever et al (2006).
D_{50}	Tamaño medio de la escollera.
D_H	Separación horizontal entre Core-Loc TM de la misma fila.
d_{hrec}	Distancia recomendada entre c.d.g. de las piezas del manto en la dirección horizontal en Oever et al. (2006).
D_n	Diámetro nominal de un elemento.
D_{n1}	Diámetro nominal de los elementos de la primera capa del manto.
D_{n2}	Diámetro nominal de los elementos de la segunda capa del manto.
D_U	Separación entre filas horizontales de Core-Loc TM sobre talud.
d_{urec}	Distancia recomendada entre c.d.g. de las piezas del manto en la dirección del talud en Oever et al. (2006).
h	Altura característica del Accropode TM .
H	Altura de ola de cálculo.
H_s	Altura de ola significativa.
H_{m0}	Altura de ola significativa espectral.
$H_{m,i}$	Altura de ola media incidente.
$H_{m,r}$	Altura de ola media reflejada.
H_{sd}	Altura de ola significativa correspondiente a un determinado nivel de averías.

K_D	Coeficiente de estabilidad de Hudson.
k_A	Coeficiente de capa asociado a cada tipo de pieza de protección.
L	Dimensión del cubo central de un Cubípedo.
MI	Separación horizontal entre Accropode TM de la misma fila.
$M2$	Separación entre filas horizontales de Accropode TM sobre talud.
n	Número de piezas en el espesor de una capa de protección.
N	Número de piezas colocadas en una malla encadenada.
N_r	Número de piezas colocadas en un área de referencia.
N_{total}	Número de piezas total colocadas en el conjunto de mallas encadenadas.
N_s	Número de estabilidad.
N_{sd}	Número de estabilidad de diseño.
p	Porosidad del manto principal.
P	Porosidad nominal del manto principal.
$P_{teórica}$	Porosidad teórica de una malla de colocación.
Q	Número de filas de elementos a colocar con cada malla encadenada.
r	Espesor del manto principal.
R	Radio que define cada fila de elementos en una malla curva.
$r1$	Parámetro a adimensionalizado por el diámetro nominal de la pieza de protección y proyectado sobre el plano del talud.
$r2$	Parámetro b adimensionalizado por el diámetro nominal de la pieza de protección y proyectado sobre el plano del talud.
s	Distancia horizontal entre la primera fila de elementos de la primera capa y la primera fila de elementos de la segunda capa del manto.
T_p	Periodo pico del oleaje.
V_T	Volumen total en el cálculo de la porosidad.
V_V	Volumen de huecos en el cálculo de la porosidad.
φ	Placing density.
Φ	Packing density.
W	Peso de las piezas que componen el manto principal de un dique.
W_{filtro}	Peso de las piezas que componen el filtro de un dique.
w_r	Peso específico del material que conforma las piezas del manto principal.

w_w Peso específico del agua de mar.

Subíndices

i Referido al número de fila de una malla de colocación de tramo recto.

j Referido al número de fila de una malla de colocación de tramo curvo.

m Referido al número de malla encadenada para tramos curvos de alta curvatura y morros.

$máx$ Referido al valor máximo.

$mín$ Referido al valor mínimo.

Índice General

Agradecimientos

Resumen

Resum

Abstract

Símbolos

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Desarrollo de la investigación.....	3
1.4. Metodología.....	5
Capítulo 2. Estado del Conocimiento	7
2.1. Introducción.....	7
2.2. Antecedentes.....	8
2.3. Diseño de mantos de diques en talud.....	13
2.3.1. Introducción.....	13
2.3.2. Parámetros relativos al diseño de mantos principales.....	14
2.3.2.1. La porosidad del manto principal	15
2.3.2.2. El <i>placing density</i> y el <i>packing density</i>	16
2.3.2.3. El espesor del manto principal.....	18
2.3.2.4. La trabazón entre las piezas del manto principal	19
2.3.2.5. La aleatoriedad en la colocación de las piezas del manto principal	21
2.3.3. Mallas de colocación de piezas de protección en el manto principal..	23
2.4. Experiencias en la colocación de elementos de protección	25
2.4.1. Introducción.....	25
2.4.2. Escollera	25

2.4.3. El cubo.....	27
2.4.4. El Tetrápodo.....	30
2.4.5. El Dolo.....	33
2.4.6. El Bloque Antifer.....	35
2.4.7. El Accropode™.....	42
2.4.8. El Core-Loc™.....	43
2.4.9. El Xbloc®.....	45
2.5. Construcción de mantos principales.....	49
2.5.1. Introducción.....	49
2.5.2. Colocación de elementos de protección en el manto principal.....	52
2.5.3. Manipulación de elementos de protección.....	56
2.6. Repercusión económica del manto principal.....	60
Capítulo 3. Análisis de la Colocación del Cubípodo.....	63
3.1. Introducción.....	63
3.2. Características del elemento Cubípodo.....	64
3.3. Diseño de las mallas de colocación del Cubípodo.....	66
3.3.1. Introducción.....	66
3.3.2. Colocación en tronco recto.....	68
3.3.3. Colocación en tronco curvo de baja curvatura.....	71
3.3.4. Colocación en morros y tronco curvo de alta curvatura.....	73
3.3.5. Colocación en arranques.....	77
3.3.6. Colocación en transiciones.....	77
3.3.6.1. Transición entre mantos moncapa y bicapa de Cubípodos.....	78
3.3.6.2. Transición entre mantos bicapa de escollera y moncapa de Cubípodos.....	80
3.3.6.3. Transición entre mantos de Cubípodos de distinto tamaño.....	80
3.3.7. Relación entre primera y segunda capa de Cubípodos.....	80
Capítulo 4. Metodología Experimental.....	83
4.1. Introducción.....	83
4.2. Descripción de las instalaciones.....	84
4.2.1. Tanque de ensayos.....	84
4.2.2. Generador de oleaje.....	85

4.2.3. Control informático	86
4.2.4. Instrumentación	87
4.2.4.1. Sensores ópticos.....	87
4.2.4.2. Soporte audiovisual.	88
4.3. Descripción de los modelos ensayados.....	88
4.3.1. Modelo ensayado por Pardo (2009).....	88
4.3.2. Modelo ensayado dentro del Proyecto CLIOMAR.....	90
4.3.3. Modelo ensayado dentro del Proyecto del Dique de San Andrés	90
4.3.4. Modelos ensayados dentro del Proyecto MMONOCAPA	92
4.4. Sistemas de colocación empleados	94
4.4.1. Sistema Cartesiano de Colocación Ciega o CBPS.....	94
4.4.2. Sistema 3D de colocación realista	97
4.5. Análisis de los resultados.....	99
4.5.1. Aspecto general del manto.....	99
4.5.2. Cálculo de la porosidad	100
4.5.3. Análisis del oleaje incidente y reflejado	101
4.5.3.1. Método LASA.	102
4.5.3.2. LPCLab 1.0.....	103
Capítulo 5. Resultados Experimentales.....	105
5.1. Introducción.....	105
5.2. Rango de porosidades construibles de un manto de Cubípodos	106
5.3. Mallas de colocación del Cubípodo en tronco recto.....	106
5.3.1. Ensayos de colocación de Pardo (2009)	107
5.3.2. Ensayos de colocación del Proyecto CLIOMAR.....	109
5.3.3. Ensayos de colocación del dique de San Andrés	110
5.3.4. Ensayos de colocación del Proyecto MMONOCAPA.....	112
5.4. Mallas de colocación del Cubípodo en tronco curvo de baja curvatura...	113
5.4.1. Ensayos de colocación del dique de San Andrés	113
5.4.2. Ensayos de colocación del Proyecto MMONOCAPA.....	114
5.5. Mallas de colocación del Cubípodo en morros y tronco curvo de alta curvatura	117
5.5.1. Ensayos de colocación del dique de San Andrés	118

5.5.2. Ensayos de colocación del Proyecto MMONOCAPA	120
5.6. Mallas de colocación del Cubípodo en entronque.....	124
5.7. Resumen de los resultados experimentales.....	126
Capítulo 6. Resumen y Conclusiones	129

Referencias

Anejo 1. Referencias del autor

Anejo 2. Modelos ensayados

Anejo 3. Resultados de los ensayos

Índice de Figuras

Figuras del Capítulo 2

Figura 2.1. Desarrollo cronológico de los elementos de hormigón prefabricado más conocidos para la construcción de diques en talud. (Fuente: propia).....	12
Figura 2.2. Aparato de test de extracción empleado por Wang y Peene (1990).....	20
Figura 2.3. Contacto entre unidades del talud según Oever et al. (2006).....	20
Figura 2.4. Parámetros empleados para calcular el <i>Potential Interlocking Coefficient</i> (PIC) propuesto por Oever et al. (2006).....	21
Figura 2.5. Esquema de una malla de colocación típica. (Fuente: propia).....	23
Figura 2.6. Métodos de colocación según CEM (2006). (a) Uniforme, (b) aleatoria, (c) selectiva y (d) especial.	27
Figura 2.7. Comportamiento frente al rebase de distintos mantos de cubos según Bruce et al. (2009). Bicapa irregular (arriba), monocapa regular (en medio) y bicapa regular (abajo).	28
Figura 2.8. Sistema Cartesiano de Colocación Ciega empleado por Pardo et al. (2010).	29
Figura 2.9. Ensayo de colocación realista 3D de cubos de Pardo et al. (2012).....	30
Figura 2.10. Ensayos de colocación llevados a cabo por Ali et al. (2014). Colocación regular (izq.) y colocación aleatoria (dcha.).....	30
Figura 2.11. Primer método de colocación para el Tetrápodo empleado por Gürer et al. (2005).	31
Figura 2.12. Segundo método de colocación para el Tetrápodo empleado por Gürer et al. (2005).	31
Figura 2.13. Primer método de colocación para el Tetrápodo definido por Fabiao (2013).	32
Figura 2.14. Segundo método de colocación para el Tetrápodo definido por Fabiao (2013).	32
Figura 2.15. Colocación específica del pie del manto de Dolos en los ensayos de Carver (1976).	33
Figura 2.16. Malla nº 1 de Dolos ensayada por Carver y Davidson (1978). Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.).....	34

Figura 2.17. Malla n° 2 de Dolos ensayada por Carver y Davidson (1978). Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.)	34
Figura 2.18. Malla n° 3 de Dolos ensayada por Carver y Davidson (1978). Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.)	35
Figura 2.19. Técnicas de colocación ensayadas por Yagci y Kapdasli (2003). Irregular (izq.); Adoquinada (dcha.), (a) primera y (b) segunda capa.....	36
Figura 2.20. Técnicas de colocación ensayadas por Yagci y Kapdasli (2003). Regular (izq.), Alternativa (dcha.), (a) primera y (b) segunda capa.	36
Figura 2.21. Métodos de colocación ensayados por Frens et al. (2008).	38
Figura 2.22. Métodos de colocación ensayados por Najafi-Jilani y Monshizadeh (2010). (a) Regular, (b) Irregular tipo A e (c) Irregular tipo B.	39
Figura 2.23. Resultados del rebase en función del talud y del método de colocación empleados en los ensayos de Najafi-Jilani y Monshizadeh (2010).....	40
Figura 2.24. Métodos de colocación ensayados por Bayram et al (2013). Aleatorio (izq.) y semi-aleatorio (dcha.)	40
Figura 2.25. Métodos de colocación ensayados por Freitas (2013). Primera capa (arriba izq.), semi-irregular (arriba dcha.), regular 1 (abajo izq.) y regular 2 (abajo dcha.).....	41
Figura 2.26. Malla de colocación de Accropode TM diseñada para el dique de Ballina según <i>Manly Hydraulics Laboratory</i> (1997).....	43
Figura 2.27. Método de colocación del pie del manto de Core-Loc TM recomendado por Turk y Melby (1997). Primera fila (izq.) y dos primeras filas (dcha.).....	43
Figura 2.28. Mallas de colocación de Core-Loc TM recomendadas por Turk y Melby (1997) en función del tamaño de la pieza (C).....	44
Figura 2.29. Tipos de colocación ensayados por Özkan Cevik et al. (2005) Colocación regular (izq.) y aleatoria (dcha.).....	44
Figura 2.30. Tipos de orientación y malla de colocación de Core-Loc TM definidos por Anastasaki et al. (2013).....	45
Figura 2.31. Resultados del ensayo de extracción de Muttray et al. (2005).	47
Figura 2.32. Formas de eslingar los Xbloc [®] según Oever et al. (2006). Forma I (izq.) y Forma II (dcha.)	47
Figura 2.33. Mecanismo para mover una pieza fuera de su posición inicial en morros según Oever et al (2006).	48
Figura 2.34. Elemento Xbloc [®] (izq.) y Xbase [®] (dcha.). (Fuente: Van der Bergen et al., 2007)	49
Figura 2.35. Esquema de avance de un dique en talud. (Fuente: empresa SATO)	51
Figura 2.36. Vista 3D del proceso constructivo de un dique en talud. (Fuente: Guía de Buenas Prácticas para la Ejecución de Obras Marítimas, 2008).....	51

Figura 2.37. Grúa de gran capacidad sobre raíles durante la construcción del dique Príncipe de Asturias (Puerto de Gijón). (Fuente: empresa SATO)	52
Figura 2.38. Tecnología en la colocación de piezas en el manto principal. GPS colocado en grúa (izq.) y programa informático de colocación en cabina operador (dcha.). (Fuente: propia).....	53
Figura 2.39. Grúa con transportador de ángulos durante la construcción del dique de la dársena de El Saladillo (Puerto de Algeciras), antes de la aparición del GPS. (Fuente: empresa FCC Construcción)	53
Figura 2.40. Accropode II con baliza registradora (izq.). Baliza registradora (dcha). (Fuente: empresa <i>Concrete Layer Innovations</i>)	54
Figura 2.41. Pantalla que proporciona el <i>POSIBLOC</i> al operario de la grúa. (Fuente: empresa <i>Concrete Layer Innovations</i>)	54
Figura 2.42. Sistema <i>Echoscope</i> y sistema de control de rotación para colocación de elementos de protección bajo el agua. (Fuente: Gelderen y Auld, 2009).....	55
Figura 2.43. Colocación de elementos de protección en el dique de San Andrés (Puerto de Málaga). (Fuente: propia).....	55
Figura 2.44. <i>Dumper</i> transportando escollera (izq.). Gánguil cargado (centro). Retroexcavadora (dcha.). (Fuente: Guía de Buenas Prácticas para la Ejecución de Obras Marítimas, 2008).....	56
Figura 2.45. Colocación de bloque mediante cadenas conectadas a asas embebidas. (Fuente: empresa SATO)	57
Figura 2.46. Accropode TM II (izquierda), Accropode TM I (centro) y Xbloc [®] (derecha) izados con eslingas. (Fuente: izq. y central <i>Concrete Layer Innovations</i> y dcha. Reedijk et al. 2005).....	57
Figura 2.47. Colocación de bloque mediante llaves con forma de T invertida. (Fuente: empresa SATO).....	58
Figura 2.48. Distintos tipos de pinzas para manipulación de bloques de hormigón cúbicos. (Fuente: Guía de Buenas Prácticas para la Ejecución de Obras Marítimas, 2008)	58
Figura 2.49. Pinzas de presión para manipulación de cubos y Cubípodos. (Fuente: empresa SATO).....	59
Figura 2.50. Pulpos para recuperación y colocación de elementos de protección. (Fuente: empresa SATO)	59
Figura 2.51. Distribución de costes en la construcción de diques en talud. (Fuente: propia)	60

Figuras del Capítulo 3

Figura 3.1. Elemento Cubípodo. (Fuente: LPC-UPV)	64
Figura 3.2. Proporciones del elemento Cubípodo en relación a la dimensión del cubo central, L. (Fuente: propia)	65
Figura 3.3. Pinzas de colocación del Cubípodo. Pinza doble (izq.) y simple (dcha). (Fuente: empresa SATO)	66
Figura 3.4. Sección tipo de un dique en talud con manto principal apoyado en berma de pie sobre banquetta de protección contra la socavación. (Fuente: Manual del Cubípodo 2015)	67
Figura 3.5. Esquema de una malla de colocación típica para tramos rectos de mantos principales. (Fuente: Pardo et al., 2014)	68
Figura 3.6. Esquema de la malla de colocación progresiva para tramos rectos de mantos principales. (Fuente: Pardo et al., 2014)	70
Figura 3.7. Esquema de malla de colocación estática para tramos curvos de baja curvatura de mantos principales. (Fuente: Pardo et al., 2014)	71
Figura 3.8. Esquema de la malla de colocación progresiva para tramos curvos de baja curvatura de mantos principales. (Fuente: propia)	73
Figura 3.9. Esquema de malla de colocación estática para morros y tramos curvos de alta curvatura de mantos principales. (Fuente: Pardo et al., 2014)	74
Figura 3.10. Esquema de funcionamiento de una de las mallas encadenadas que conforman la malla de colocación estática para morros y tramos curvos de alta curvatura de mantos principales. (Fuente: propia)	76
Figura 3.11. Transición entre manto monocapa y bicapa de Cubípodos. (Fuente: Manual del Cubípodo 2015)	79
Figura 3.12. Avance de la protección monocapa sobre filtro de Cubípodos. (Fuente: Manual del Cubípodo 2015)	79
Figura 3.13. Relación entre la posición de los Cubípodos de la primera y la segunda capa. (Fuente: propia)	80

Figuras del Capítulo 4

Figura 4.1. Vista del tanque de ensayos. (Fuente: propia)	84
Figura 4.2. Sistema generador de oleaje. (Fuente: propia)	86
Figura 4.3. Vista del programa informático generador de oleaje. (Fuente: propia)	87
Figura 4.4. Sensor óptico y módulo de control. (Fuente: propia)	87

Figura 4.5. Sección tipo tronco del dique de Cubípodos ensayada por Pardo (2009). Cotas en centímetros.	89
Figura 4.6. Cubípodos de $D_n= 3.82$ cm utilizados en los ensayos de colocación de Pardo (2009).....	89
Figura 4.7. Sección tipo tronco del dique de Cubípodos ensayada en el Proyecto CLIOMAR. Cotas en metros. (Fuente: Pardo, 2011).....	90
Figura 4.8. Sección tipo tronco del dique de Cubípodos ensayado para el dique de San Andrés del Puerto de Málaga. Cotas en metros. (Fuente: LPC-UPV).....	91
Figura 4.9. Cubípodos de $D_n= 3.80$ cm utilizados en los ensayos de colocación del dique de San Andrés del Puerto de Málaga. (Fuente: propia).....	91
Figura 4.10. Sección tipo tronco del dique de Cubípodos ensayada en MMONOCAPA. Cotas en metros. (Fuente: propia)	92
Figura 4.11. Sección tipo morro MR60 del dique de Cubípodos ensayada en MMONOCAPA. Cotas en metros. (Fuente: propia).....	93
Figura 4.12. Sección tipo morro MR70 del dique de Cubípodos ensayada en MMONOCAPA. Cotas en metros. (Fuente: propia).....	93
Figura 4.13. Sección tipo morro MR80 del dique de Cubípodos ensayada en MMONOCAPA. Cotas en metros. (Fuente: propia).....	93
Figura 4.14. Pinza empleada en el CBPS. (Fuente: propia)	95
Figura 4.15. Vista general del funcionamiento del CBPS. (Fuente: propia)	95
Figura 4.16. Operador de pinza del CBPS. (Fuente: propia).....	96
Figura 4.17. Primera capa de Cubípodos dispuestos a mano para apoyo en el CBPS. (Fuente: propia).....	97
Figura 4.18. Grúas radiales a escala empleadas en los ensayos de construcción realista de mantos. (Fuente: propia).....	97
Figura 4.19. Pinza doble de colocación de Cubípodos. A escala (izq.) y real (der.). (Fuente: propia).....	98
Figura 4.20. Transportadores de ángulos colocados en una de las grúas a escala empleada durante los ensayos. (Fuente: propia).....	99
Figura 4.21. Desplazamiento del área de referencia para el conteo de unidades. Tramo recto (izq.) y tramo curvo (dcha.). (Fuente: propia).....	101
Figura 4.22. Áreas de referencia empleada para el cálculo de la porosidad en morros. (Fuente: propia).....	101
Figura 4.23. Ventana del programa LASA-V. (Fuente: propia).....	103
Figura 4.24. Ventana del programa LPCLab.....	104

Figuras del Capítulo 5

Figura 5.1. Ensayos de obtención del rango de porosidades realmente construibles para mantos de Cubípodos en talud $H/V=1.5/1$. (Fuente: propia)..... 106

Figura 5.2. Manto construido con la malla de colocación estática para tronco recto $a/D_n = 1.565$ y $b/D_n = 1.018$ de Pardo (2009) en seco. (Fuente: propia)..... 107

Figura 5.3. Mantos construidos con la malla de colocación estática para tronco recto $a/D_n = 1.565$ y $b/D_n = 1.018$ de Pardo (2009) bajo distintas condiciones de oleaje. (Fuente: propia)..... 108

Figura 5.4. Manto construido con la malla de colocación progresiva para tronco recto $a/D_n = 1.597$, $b/D_n = 1.047$ y $\Delta b = 1\%b$ del Proyecto CLIOMAR. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia) 109

Figura 5.5. Manto construido con la malla de colocación estática para tronco recto $a/D_n = 1.500$ y $b/D_n = 1.053$ del dique de San Andrés. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)..... 111

Figura 5.6. Manto construido con la malla de colocación estática para tronco recto $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.053$ del Proyecto MMONOCAPA. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia) 112

Figura 5.7. Manto construido con la malla de colocación estática para tronco recto $a/D_n = 1.500$ y $b/D_n = 1.053$ del Proyecto MMONOCAPA. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia) 112

Figura 5.8. Manto construido con la malla de colocación estática para tronco curvo $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.053$ del dique de San Andrés. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia) 114

Figura 5.9. Manto construido con la malla de colocación estática para tronco curvo $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.053$ del Proyecto MMONOCAPA sobre talud $H/V=2/1$. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)..... 115

Figura 5.10. Manto construido con la malla de colocación progresiva para tronco curvo $a/D_n = 1.605$, $b/D_n = 1.018$ y $\Delta b = 1\%b$ del Proyecto MMONOCAPA sobre talud $H/V=1.5/1$. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia) 116

Figura 5.11. Proceso constructivo del morro paso a paso mediante mallas encadenadas. (Fuente: propia)..... 118

Figura 5.12. Manto construido con la malla de colocación encadenada para morro $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.053$ del dique de San Andrés. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)..... 119

Figura 5.13. Manto construido con la malla de colocación encadenada para morro $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.018$ del Proyecto MMONOCAPA sobre morro R60. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)..... 120

Figura 5.14. Manto construido con la malla de colocación encadenada para morro $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.018$ del Proyecto MMONOCAPA sobre morro R70. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)	121
Figura 5.15. Manto construido con la malla de colocación encadenada para morro $a/D_n = 1.763$ y $b/D_n = 1.018$ del Proyecto MMONOCAPA sobre morro R80. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)	122
Figura 5.16. Proceso constructivo de la primera fila del entronque del dique de San Andrés.	125
Figura 5.17. Proceso constructivo de la sexta fila del entronque del dique de San Andrés.	125
Figura 5.18. Mantos ensayados en el entronque del dique de San Andrés. Primera capa de 6 t (izq.) y segunda capa de 15 t (dcha.). (Fuente: propia)	126
Figura 5.19. Ficha resumen de las mallas a emplear en mantos de Cubípodos en talud $H/V=1.5/1$. (Fuente: propia)	127
Figura 5.20. Ficha resumen de las mallas a emplear en mantos de Cubípodos en talud $H/V=2/1$. (Fuente: propia)	128

Índice de Tablas

Tablas del Capítulo 2

Tabla 2.1. Valores de porosidad para varias piezas de protección según el USACE (1984).....	16
Tabla 2.2. Características geométricas y parámetros del manto principal de distintos tipos de piezas según el CIRIA, CUR, CETMEF (2007).....	24
Tabla 2.3. Número de bloques empleados, porosidad y <i>packing density</i> para cada técnica de colocación según Yagci y Kapdasli (2003).....	36
Tabla 2.4. Coeficiente de reflexión y estabilidad hidráulica pala los distintos métodos de colocación y <i>packing densities</i> ensayados por Frens et al. (2008)	38

Tablas del Capítulo 5

Tabla 5.1. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco recto en talud $H/V=1.5/1$ de Pardo (2009). (Fuente: propia).....	108
Tabla 5.2. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco recto en talud $H/V=2/1$ del Proyecto CLIOMAR. (Fuente: propia).....	110
Tabla 5.3. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco recto sobre talud $H/V=2/1$ del dique de San Andrés. (Fuente: propia)	111
Tabla 5.4. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco recto en talud $H/V=2/1$ del Proyecto MMONOCAPA. (Fuente: propia).....	113
Tabla 5.5. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco curvo sobre talud $H/V=2/1$ del dique de San Andrés. (Fuente: propia)	114
Tabla 5.6. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco curvo sobre talud $H/V=2/1$ del Proyecto MMONOCAPA. (Fuente: propia).....	115
Tabla 5.7. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco curvo sobre talud $H/V=1.5/1$ del Proyecto MMONOCAPA. (Fuente: propia).....	116
Tabla 5.8. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de morro del dique de San Andrés. (Fuente: propia)	119
Tabla 5.9. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de morro del Proyecto MMONOCAPA sobre morro R60. (Fuente: propia).....	120

Tabla 5.10. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de morro del Proyecto
MMONOCAPA sobre morro R70. (Fuente: propia) 122

Tabla 5.11. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de morro del Proyecto
MMONOCAPA sobre morro R80. (Fuente: propia) 123

Índice de Fórmulas

Fórmulas del Capítulo 2

Fórmula 2.1. Fórmula de Hudson (1959).	13
Fórmula 2.2. Fórmula de Hudson generalizada.....	13
Fórmula 2.3. Fórmula clásica de la porosidad.....	15
Fórmula 2.4. Fórmula para el cálculo del <i>placing density</i> según el USACE (1984).....	17
Fórmula 2.5. Fórmula para el cálculo del <i>packing density</i>	18
Fórmula 2.6. Fórmulas para el cálculo del espesor de capa según el USACE (1984). .	18
Fórmula 2.7. Fórmula para el cálculo del <i>Potential Interlocking Coefficient</i> (PIC) propuesto por Oever et al. (2006).....	21

Fórmulas del Capítulo 3

Fórmula 3.1. Fórmula para obtener la porosidad teórica de la malla de colocación típica para tramos rectos de mantos principales.....	69
Fórmula 3.2. Fórmula para obtener la distancia entre filas de elementos en la malla progresiva para tramos rectos de mantos principales.	70
Fórmula 3.3. Fórmula para obtener la porosidad teórica de la malla progresiva para tramos rectos de mantos principales.....	70
Fórmula 3.4. Fórmula para obtener el acortamiento de radios en tramos curvos de mantos principales.....	72
Fórmula 3.5. Fórmula para obtener la porosidad teórica de la malla estática para tronco curvo de baja curvatura de mantos principales.....	72
Fórmula 3.6. Fórmula para obtener la distancia entre filas de elementos en la malla progresiva para tramos curvos de baja curvatura de mantos principales.....	73
Fórmula 3.7. Fórmula para obtener el radio de la última fila de elementos a colocar utilizando la malla progresiva de tramos curvos de baja curvatura.....	73
Fórmula 3.8. Fórmula para obtener la porosidad teórica de la malla de colocación estática para morros y tramos curvos de alta curvatura de mantos principales.	75

Fórmula 3.9. Relación entre los c.d.g. de las piezas de la primera y última fila de cada malla encadenada que conforman la malla de colocación estática para morros y tramos curvos de alta curvatura de mantos principales..... 76

Fórmula 3.10. Máximo número de filas a colocar con cada una de las mallas encadenadas que conforman la malla de colocación estática para morros y tramos curvos de alta curvatura. 76

Fórmula 3.11. Fórmula para relacionar la posición de los Cubípodos de la primera y la segunda capa. 81

Fórmulas del Capítulo 4

Fórmula 4.1. Fórmula para el cálculo de la porosidad real. 100

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

El transporte marítimo es de vital importancia en las relaciones comerciales actuales, es un sector en continuo crecimiento. El intento de reducir los gastos fijos del transporte marítimo y su incesante aumento ha conllevado a que cada vez se construyan buques de mayor tamaño, lo que a su vez ha ocasionado la necesidad de construir áreas abrigadas del oleaje a mayores profundidades para darles servicio, lo que se traduce en diques cada vez más resistentes y profundos.

Por otro lado, en periodos de crisis económicas, como en las que nos encontramos actualmente, se intenta optimizar los recursos para conseguir el mayor beneficio con la mínima inversión. A esto se suma la creciente consideración de las afecciones al medio ambiente que ocasionan las actuaciones de obras marítimas, por lo que se intenta reducir las huellas ecológica, energética y del carbono. Por norma general, la energía es una parte importante del precio de los productos y procesos básicos de la obra (cemento, acero o transporte entre otros), por lo que suele haber una alta correlación entre el coste económico de la obra y sus huellas ambientales. La optimización económica de las obras marítimas suele derivar también en una minimización de las huellas ecológica, energética y del carbono.

En el caso de los diques en talud, el principal factor que permite el mayor ahorro económico es el número de capas y el tamaño de las piezas del manto principal, puesto que un menor tamaño implica menor consumo de material y además reduce el peso de los elementos o piedras de las capas inferiores y por lo tanto su coste.

Desde mediados del siglo XX se desarrollaron y patentaron numerosos tipos de elementos artificiales para mantos principales, con la finalidad de reducir el tamaño de los mismos. Muchos de ellos se han basado en el principio de realizar geometrías complejas para aumentar la estabilidad de la pieza por trabazón entre ellas, como por ejemplo el Dolo. La contraindicación de este tipo de piezas esbeltas al aumento de la estabilidad hidráulica es la reducción de su robustez estructural, lo que condiciona su tamaño máximo sin armadura. Esta lección fue duramente aprendida después de los desastres acaecidos a finales de los años 70 y principios de los 80, donde grandes diques como el de Sines (Portugal) y San Ciprián (España) sufrieron daños de consideración, que se tradujeron en elevadas pérdidas económicas y conflictos costosos, debido a la escasez de resistencia estructural de las piezas del manto.

Desde el desastre de Sines, el diseño con piezas esbeltas fue revisado meticulosamente, lo que conllevó a la reducción de los coeficientes de estabilidad de este tipo de piezas. Además, con ellos creció la predisposición a utilizar elementos de protección de carácter masivo, tipo bloque paralelepédico, cubos o bloques Antifer, los cuales tienen unos coeficientes de estabilidad bastante más bajos que las piezas esbeltas, y por lo tanto consumen más hormigón, pero presentan una mayor resistencia estructural y un modo de fallo menos frágil.

A partir de 1980 aparecen en el mercado piezas que resisten por trabazón para ser colocadas en mantos monocapa (AccropodeTM, Core-LocTM, Xbloc[®], etc.), frente al manto bicapa convencional. Estas piezas no son tan esbeltas como el Dolo, exigen una colocación especial y control de obra muy bueno, lo que se traduce en mayores costes de construcción, pero ahorran consumo de hormigón. Las piezas para colocación trabada en mantos monocapa tienen limitación de tamaño (unas 40 t) por su esbeltez, pero pueden ser competitivas frente a los diques con mantos bicapa de cubos convencionales si el oleaje no es muy intenso.

En 2005 surge una nueva pieza prefabricada de hormigón para mantos de diques en talud, el Cubípedo, inventado en la Universidad Politécnica de Valencia por D. Josep R. Medina Folgado y Dña. María Esther Gómez Martín y cuya licencia de explotación de patente pertenece a la empresa Sociedad Anónima Trabajos y Obras (SATO). Este nuevo elemento es una pieza masiva de colocación aleatoria en una o dos capas, resiste por gravedad y tiene unos coeficientes de estabilidad más próximos a las piezas esbeltas que a las masivas tradicionales, gracias a las protuberancias troncocónicas de sus caras. Esto hace que el Cubípedo presente las ventajas de resistencia estructural y facilidad de fabricación, acopio y colocación de las piezas masivas y la optimización de peso y la posibilidad de colocarse en una sola capa de las piezas esbeltas.

Por otro lado, numerosos autores afirman que la porosidad del manto principal de un dique en talud influye considerablemente en su estabilidad hidráulica. Diferencias entre las porosidades ensayadas en laboratorio y las realmente construidas entrañan

riesgos considerables. Los riesgos financieros más directos son los asociados con los materiales necesarios y su coste, mientras que el riesgo potencial más importante es el relativo a la incertidumbre en el comportamiento hidráulico de la estructura, ya que la disipación de la energía ocurre en los huecos, los cuales a la vez afectan a la reflexión del oleaje, la estabilidad, el remonte y el rebase.

Se ha probado la gran estabilidad hidráulica del elemento Cubípodo en numerosos ensayos físicos; sin embargo, debe profundizarse en su método de colocación en las diferentes secciones de los mantos de diques en talud para minimizar errores en su proceso constructivo y conseguir porosidades del manto lo más parecidas posible a las ensayadas en los test de estabilidad para evitar efectos de modelo, además de conseguir optimizar los recursos en la construcción del manto. Esta es la motivación principal para realizar la presente Tesis Doctoral.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar los métodos de colocación del elemento Cubípodo en los mantos principales para las distintas secciones tipo que se dan en un dique en talud, como son las secciones de tronco recto, de tronco curvo de baja curvatura, de morro o tronco curvo de alta curvatura y distintos tipos de transiciones. De forma que en todas ellas se obtengan mantos con porosidades similares a las ensayadas en los test de laboratorio de estabilidad hidráulica (41-42%) para evitar posibles efectos de modelo.

Para ello se parte del estudio de trabajos de colocación de otro tipo de piezas y de las pautas que dan diversos manuales de ingeniería marítima de reconocido prestigio. En este proceso se discuten algunas de las afirmaciones que hacen estos manuales en referencia a la fijación de la porosidad de los mantos principales al elegir una determinada pieza de protección, así como al empleo del denominado coeficiente de capa para modificar el espesor del manto y variar el valor de la porosidad del mismo, sobre todo en las piezas de protección masivas de colocación aleatoria.

Además, se genera una base experimental de ensayos de construcción realista de mantos principales de Cubípodos de diques en talud mediante la realización de casi un centenar de ensayos en modelo físico sobre los que se define y ajusta el método de colocación de Cubípodos.

1.3. Desarrollo de la investigación

Esta Tesis Doctoral es el resultado de un proceso de investigación llevado a cabo por el autor mediante la participación en diversos proyectos de investigación relacionados con el desarrollo del elemento Cubípodo, y en especial en lo relativo al diseño de los métodos de colocación de éste en el manto principal de diques en talud. A continuación se mencionan los proyectos de investigación relacionados con este trabajo:

- Evaluación de la Influencia del Clima Meteo-Oceanográfico en la Evolución del Comportamiento de las Obras Marítimas (CLIOMAR, 2009-2011). Financiado por la empresa SATO. Objeto del proyecto: estudiar la influencia de la porosidad de mantos de cubos y Cubípodos sobre la estabilidad y el rebase, además del estudio de las mallas de colocación de ambas piezas en ensayos de construcción realista.
- Ensayos 3D de Construcción Realista de Mantos del Dique de San Andrés (2012). Financiado por la empresa SATO. Objeto del proyecto: profundizar en el estudio del método constructivo de mantos de Cubípodos para la primera aplicación de la pieza en el Dique de San Andrés (Puerto de Málaga).
- Estudio de Mantos Monocapa de Cubípodos (MMONOCAPA, 2013-2014). Financiado por la empresa SATO. Objeto del proyecto: la realización de estudios y diseños experimentales para evaluar la estabilidad hidráulica de los morros protegidos con mantos monocapa de Cubípodos y la realización de ensayos físicos 3D de construcción realista de mantos de Cubípodos.

Algunos de los resultados de la investigación se han publicado en congresos de ingeniería marítima nacionales e internacionales:

- *Experimental analysis of the influence of armor unit placement method on armor porosity* (Pardo et al., 2010), presentado en la *International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection* en Barcelona.
- *Las mallas de colocación de cubos y cubípodos y la porosidad del manto principal de los diques en talud* (Pardo et al., 2011), presentado en las XI Jornadas Nacionales de Costas y Puertos en Las Palmas de Gran Canaria.
- *Placement grids, porosity and randomness of armor layers* (Pardo et al., 2012), presentado en el *33rd International Conference on Coastal Engineering* de Santander.

La mayor parte de los resultados de esta investigación se han publicado en el artículo titulado *Placement Test, Porosity and Randomness of Cube and Cubipod Armor Layers* (Pardo et al., 2014), en el volumen 140, número 5 de la revista *Journal of Waterway, Ports, Coastal, and Ocean Engineering* de la *American Society of Civil Engineers* (ASCE), ISSN 0733-950X/04014017. Revista de gran difusión entre los ingenieros que trabajan en puertos y costas en todo el mundo, cuyo nivel de impacto en verano de 2015 era de 1.11.

Los documentos a los que se ha hecho referencia se adjuntan de manera íntegra en el Anexo 1. Referencias del autor.

El desarrollo de esta línea de investigación por parte del autor comenzó con la redacción de su Proyecto Final de Carrera, titulado *Análisis de la colocación de bloques cúbicos y cubípodos en el manto principal de diques en talud. Aplicación a la ampliación del Puerto de Valencia* (Pardo, 2009), el cual fue merecedor de un Accésit Premio Proyecto Final de Carrera de la Cátedra Puerto Valencia. Continuó con su Tesis

Final de Máster titulada *Ensayos 3D de construcción realista de mantos de diques en talud. Porosidad del manto y mallas de colocación de cubos y cubípodos* (Pardo, 2011). Y culmina con la publicación de la presente Tesis Doctoral.

Las mallas de colocación desarrolladas en este trabajo han sido utilizadas con éxito en todas las obras ejecutadas hasta la fecha con mantos de Cubípodos, que son:

- Dique de San Andrés (Puerto de Málaga), construido entre 2011 y 2013. Objeto de la obra: abrigo de la dársena pesquera en zona con baja capacidad portante. Características del dique: manto bicapa de Cubípodos de 6 t en tronco y morro, longitud de 270 m, $H/V=2/1$, $H_{sd}= 5.1$ m, $T_p= 12$ s, carrera de marea de 1.0 m, berma de fondo de 40 m de anchura y profundidad de 6.75 m.
- Dique Sur de Langosteira (Puerto Exterior de A Coruña), construido el año 2012. Objeto de la obra: proteger la toma de agua de la central térmica de Sabón y servir como Fase 1 del Contradique de Langosteira. Características del dique: perpendicular a la costa, manto monocapa de Cubípodos de 15 t en tronco y 25 t en morro, longitud de 450 m, $H/V=3/2$, $H_{sd}= 5.85$ m, $T_p=18$ s, carrera de marea de 5.0 m y profundidad de 8.3 m.
- Dique Norte de Langosteira (Puerto Exterior de A Coruña), construido el año 2013. Objeto de la obra: proteger la toma de agua de la central térmica de Sabón. Características del dique: perpendicular a la costa, manto monocapa de Cubípodos de 15 t en tronco y morro, longitud de 350 m, $H/V=3/2$, $H_{sd}= 5.85$ m, $T_p= 18$ s, carrera de marea de 5.0 m y profundidad de 6.0 m.
- Dique Oeste de Langosteira (Puerto Exterior de A Coruña), en construcción. Objeto de la obra: Fase 2 del contradique del puerto continuando la traza del dique Sur. Características del dique: manto monocapa de Cubípodos de 25 t y 30 t en tronco y bicapa de 45 t en morro, longitud de 1350 m, $H/V=3/2$, $H_{sd}= 8.75$ m, $T_p= 18$ m, carrera de marea de 5.0 m y profundidad de 22.0 m.
- Cierre Sur de la Dársena de la Esfinge (Puerto de las Palmas), en construcción. Objeto de la obra: protección de las explanadas de la zona sur de la dársena y formación de su contradique. Características del dique: manto monocapa de Cubípodos de 6 t en tronco y morro, longitud de 260 m, $H/V=3/2$, $H_{sd}= 2.70$ m, $T_p= 10$ m, carrera de marea de 3.0 m y profundidad de 23.0 m, con manto apoyado en berma de pie a la -5.20m.

1.4. Metodología

Una vez expuesta la motivación y los objetivos de esta Tesis Doctoral, se establece la metodología de investigación con la que alcanzar los objetivos planteados.

El Capítulo 2 del presente documento presenta la fase inicial de esta investigación, la cual se ha basado en la recopilación, clasificación y análisis de las diferentes referencias bibliográficas relacionados con el diseño de mantos principales

de diques en talud. Este estudio se ha centrado en los parámetros básicos de diseño de los mantos principales, así como en los procedimientos que se siguen para su construcción. En la creación del estado del arte se han estudiado las técnicas de colocación de los elementos de protección más empleados para conformar los mantos de diques en talud. Todo ello orientado a establecer las bases y criterios a seguir en el estudio y diseño de las mallas de colocación del elemento Cubípodo.

A continuación, en el Capítulo 3, se introduce el elemento de protección Cubípodo, sobre el que versa esta Tesis Doctoral, y se desarrollan las metodologías y mallas de colocación apropiadas para conformar mantos principales en las distintas secciones que pueden darse en un dique en talud.

La metodología experimental seguida se expone en el Capítulo 4. En este apartado se describen las instalaciones del Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia (LPC-UPV) donde se realizaron los ensayos de construcción realista, los distintos modelos ensayados, los sistemas de colocación empleados así como la forma de analizar los resultados obtenidos.

En el Capítulo 5 se procede al análisis de los resultados de los experimentos de construcción realista de mantos principales de Cubípodos.

Por último, en el Capítulo 6, se establecen las conclusiones de todo el trabajo de investigación desarrollado en la presente Tesis Doctoral y se apunta el camino hacia futuras líneas de investigación.

Capítulo 2

Estado del Conocimiento

2.1. Introducción

Este capítulo pretende recoger el estado del conocimiento que se ha empleado para establecer la situación actual de los trabajos de investigación con respecto al diseño y construcción de mantos principales de diques en talud.

Para ello, se establecen y documentan los antecedentes relacionados con el problema tratado, el desarrollo actual de las técnicas y las aplicaciones realizadas sobre el diseño y construcción de mantos principales con los elementos de protección más utilizados.

El listado de las referencias que se han empleado para formar el presente estado del conocimiento se incluye en el último apartado de este documento.

2.2. Antecedentes

Los primeros puertos se hicieron en zonas de refugio natural que ofrecían a las embarcaciones lugares seguros para llevar a cabo las operaciones de carga y descarga de mercancías en condiciones de seguridad.

Debido al aumento del tráfico de mercancías y del tamaño de los buques pronto fue necesaria la ampliación de estos puertos hacia aguas más profundas, lo que obligó a la construcción de estructuras artificiales de protección. Se tiene constancia de que las antiguas civilizaciones egipcias, griegas, romanas y fenicias ya construían diques para la protección de sus puertos. Siendo la referencia contrastada más antigua de construcción de un dique rompeolas el del puerto egipcio de ArUr, que data aproximadamente del año 3000 a.de. C.

La construcción de estos primeros diques rompeolas se basaba en la colocación de piedras de gran tamaño en la totalidad de la sección, utilizando en algunos casos hormigones primitivos como ligante entre ellas.

Actualmente, la estructura de la mayoría de los diques en talud está dividida en tres partes principales: (1) *Núcleo*, parte central de la estructura, formado por un todo uno de cantera que sirve de cimiento para las capas de filtro y el espaldón. Debe procurar la permeabilidad adecuada al dique, puesto que afecta directamente a la estabilidad del manto, al remonte y a la transmisión de energía a través del dique; (2) *Capas de filtro* (o intermedias), compuestas por escolleras de menor tamaño que el dispuesto en los elementos del manto principal, con la finalidad de evitar que los materiales de menor tamaño del núcleo salgan a través de los huecos existentes en las capas de protección (lavado de los finos). Actúan como protección del núcleo en construcción y sirven de cimiento para el manto. El tamaño de las escolleras que las conforman son función del peso de las piezas empleadas en el manto principal; (3) *Manto principal* (o de protección), es la capa más exterior de un dique en talud. Puede estar formado por una o varias capas de grandes elementos, que son los que confieren a la estructura la estabilidad frente al oleaje.

Hasta el s. XIX el uso de piedra natural para conformar el manto principal era un hecho generalizado. Sin embargo, el uso de escollera condicionaba el tamaño de los diques, y por lo tanto el calado máximo de los puertos, ya que la escollera natural esta limitada a un tamaño máximo, el cual no sirve para hacer frente a los oleajes severos que se dan en aguas más profundas.

No fue hasta principios del s.XIX cuando aparecieron en escena los mantos de diques en talud formados por bloques cúbicos o paralelepípedicos de hormigón, siendo una de las primeras aplicaciones que se tiene constancia la reconstrucción del puerto de Argel con bloques cúbicos de 15m³. La colocación de estos suele realizarse en dos capas de forma aleatoria, aunque también es posible colocarlos de manera uniforme, y resisten la acción del oleaje por su propio peso. La mayor desventaja de estos elementos es que tienden a reordenarse y a colocarse cara con cara dando lugar a zonas de baja porosidad en la parte inferior del manto y zonas de mayor porosidad en la parte superior asemejables al fallo de extracción de piezas, fenómeno conocido como

compactación heterogénea (Gómez-Martín y Medina, 2008). Este hecho puede generar una mayor subpresión dentro del dique que puede levantar los boques (VandenBosch et al., 2002). Tal y como indica Negro et al. (2009), el cubo tiende más hacia esta compactación en la zona inferior que el bloque.

En 1950, el laboratorio *Dauphinois d'Hydraulique*, predecesor de Sogreah, introdujo el Tetrapod, un elemento de hormigón con cuatro patas que se convirtió en la primera pieza de protección que no resistía únicamente por su propio peso, sino que también contribuía a su resistencia la trabazón entre las piezas. Por otro lado, este elemento dotaba a los mantos principales de una mayor porosidad, lo que ocasionaba una mayor disipación de la energía del oleaje en los huecos y un menor remonte. El Tetrápodo fue el precursor del concepto de aumentar la estabilidad mediante la trabazón (o *interlocking*) entre las piezas del manto, lo que generó una vorágine de creación de nuevas piezas prefabricadas de hormigón, cuya principal premisa era conseguir aumentar la estabilidad de las piezas a través de geometrías complejas y de esta forma ahorrar en volumen de hormigón.

Entre la década de 1950 y 1970 se crearon numerosos elementos de hormigón prefabricados cuyo mecanismo principal de resistir el oleaje era la trabazón entre piezas. Estas piezas esbeltas eran diseñadas para ser colocadas en dos capas, de forma aleatoria o según a un patrón uniforme.

El desarrollo de este tipo de elementos se vio frenado a raíz de los desastres acaecidos en varios diques entre los años 1976 y 1982, en especial el del Puerto de Sines en Portugal (1978), construido con Dolos colocados de forma aleatoria en dos capas. Los Dolos son piezas de hormigón con unas largas patas unidas por una parte central esbelta. El modo de fallo más común en estos diques fue la rotura masiva de las piezas como consecuencia de la baja resistencia estructural de las mismas. Este fenómeno se producía en particular cuando las piezas eran colocadas en aguas cada vez más profundas y con alturas de ola elevadas. La rotura de unos pocos elementos ocasionaba la extracción de piezas que desencadenaba la rotura acelerada al aumentar el movimiento de balanceo de las piezas y la fractura de las piezas adyacentes.

El fallo de estos diques ocasionó que en los años siguientes se estudiaran en profundidad las piezas que resistían principalmente por trabazón. Desde entonces, además de la estabilidad hidráulica, se investigan también las cargas y la máxima resistencia estructural de los nuevos elementos para limitar el riesgo de avería durante su vida útil.

Entre los años 1976 y 1978 aparece el bloque Antifer, de forma cúbica con las caras ranuradas e inclinadas para facilitar su desencofrado y aumentar su estabilidad hidráulica. El diseño de su forma es consecuencia de las investigaciones llevadas a cabo durante su primera aplicación en el Puerto de Antifer (Francia), no habiendo estado nunca patentada.

En 1980 *Sogreah* presenta el AccropodeTM, el primer elemento prefabricado de hormigón para mantos monocapa. Tiene una forma compacta, basada en combinar la trabazón y la resistencia estructural. Se coloca siguiendo una serie de reglas de colocación estrictas para garantizar la trabazón entre las piezas, las cuales son

colocadas según una malla de colocación prefijada, en la que debe asegurarse que la orientación relativa de las piezas va variando. Este elemento se convirtió en uno de los más utilizados en todo el mundo en los 20 años siguientes a su invención.

Posteriormente apareció el Core-LocTM, desarrollado por la *US Corps of Engineers* en 1994. Fue inventado inicialmente para reparar diques de Dolos (prueba de ello es que sus patas son una copia idéntica de las de los Dolos), aunque en la actualidad se utiliza para conformar nuevos mantos. Este elemento se caracteriza por su gran trabazón, aunque en su estabilidad frente al oleaje su propio peso sigue desarrollando un papel importante, y presenta una resistencia estructural suficiente, a diferencia del Dolo. Además, se considera un elemento económico por colocarse en una única capa. Su método de colocación es similar al del AccropodeTM.

De forma paralela al desarrollo de este tipo de elementos, a finales de la década de los sesenta se desarrolló un concepto totalmente diferente de pieza de protección, el *cobblestone-concept* o concepto de adoquinado en español. Se trata de elementos de hormigón huecos que se colocan en una sola capa, de forma uniforme y con una elevada densidad (número de unidades por superficie). Mientras las piezas anteriores disipaban la energía del oleaje en los huecos o espacios entre ellas, y por tanto dependían en gran medida del peso y la trabazón entre las piezas para asegurar la porosidad del manto principal, estas piezas disipan la energía dentro de sus propios huecos, con lo que en su gran mayoría están diseñadas para proporcionar una gran rugosidad que aumente la energía disipada. Estas piezas resisten también principalmente por trabazón, por la fricción entre los bloques contiguos y el encaje de sus protuberancias. Una ventaja es que el peso de las piezas puede reducirse enormemente utilizando este método, pero por otra parte, las secciones de dichas piezas son a menudo tan esbeltas que necesitan ser reforzadas. Uno de los primeros elementos de esta nueva generación fue el COB, desarrollado en el Reino Unido en 1969. Otros ejemplos típicos de este tipo de piezas son el Shed, el Seabee y el Diahitis.

Sogreah en 1996 desarrolló un nuevo elemento definido como un bloque ambiental, el EcopodeTM, que se integra en el medio físico, con terminaciones basálticas, graníticas y pigmentaciones en gris o rojizas, en función de las características del entorno en el que se coloque. Movido por el fin de la patente del AccropodeTM, este laboratorio desarrolló en 1999 el AccropodeTM II, cuya forma y características se asemejan a su predecesor.

En el 2003 *Delta Marine Consultants*, una consultoría holandesa, desarrolló el Xbloc[®], un elemento robusto de seis patas que se coloca en una capa de forma aleatoria, y cuya resistencia estructural es similar a la del AccropodeTM. Además del Xbloc[®], en 2007 desarrollaron una unidad especial para el pie del dique, el Xbase[®], que es básicamente un Xbloc[®] sin una de sus patas cúbicas para conseguir una mayor estabilidad del pie al colocarla de manera horizontal.

En 2005 aparece en escena el Cubípodo, pieza sobre la que versa la presente Tesis Doctoral, desarrollado por el LPC-UPV, e inventado por Josep Ramón Medina y María Esther Gómez Martín, y cuya licencia exclusiva de explotación pertenece a la empresa SATO. Se trata de un elemento cúbico de gran resistencia estructural que presenta unas protuberancias troncocónicas en sus seis caras que evitan la ya comentada

compactación heterogénea, manteniendo la porosidad del manto a lo largo de su vida útil, a la vez que aumentan la fricción con la capa inferior de escollera, lo que se traduce en un aumento de la estabilidad hidráulica y una reducción del remonte y rebase de la estructura. El Cubípodo ha sido diseñado para construir mantos monocapa o multicapas siguiendo unas mallas de colocación predefinidas y con una orientación aleatoria entre piezas.

En 2012 Berenguer Ingenieros presenta un nuevo elemento cúbico de protección de diques, el Blacastar, cuya forma podría definirse como un cubo rebajado en sus caras para mejorar su estabilidad hidráulica. Estando diseñado para ser colocado en una capa de forma adoquinada, o en múltiples capas de forma aleatoria.

En la Figura 2.1 pueden verse las piezas de hormigón prefabricado más empleadas en la construcción de diques en talud por orden cronológico de invención.

Debido al gran número de piezas existentes, multitud de autores han sentido la necesidad de clasificarlas según diversos criterios. Dupray y Roberts (2009), exponen algunos de los criterios más empleados para la clasificación de elementos de hormigón prefabricado: número de capas (monocapa o multicapas); tipo de colocación (uniforme, siguiendo un patrón, orientada o aleatoria); contribución a la estabilidad (peso propio, trabazón o fricción); forma de la pieza (paralelepédica, agujereada, esbelta, con patas, *bulky* y otras variaciones); detalles de su forma (biselados, ranuras o muescas, potenciadores de fricción,...); aspecto (estándar, natural, con pigmentación o de tipo arquitectónico); tipo de refuerzo (sin refuerzo, de fibra, de acero,...); densidad del hormigón empleado (estándar o pesado); resistencia del hormigón (estándar o alta); características del hormigón empleado (hormigón estándar, reciclado, baja emisión de carbono); etc.

Smolka (2008) propone nuevos criterios y clasificaciones que están relacionados con el proceso constructivo, como son los medios empleados en su colocación (pinzas o eslingas), la dificultad de fabricación (encofrados verticales u horizontales) o la superficie necesaria de almacenamiento (número de alturas apilables) entre otros.









































Elemento	País	Año	Imagen	Elemento	País	Año	Imagen
Cubo	_	s. XIX		Mexápodo	MX	1978	
Tetrapod	FR	1950		Pey	BOL	1978	
Grabbelar	ZA	1957		Seabee	AU	1978	
Tribar	USA	1958		Accropode	FR	1980	
Hollow Tetrahedrom	JP	1959		Shed	UK	1982	
Modified Cube	USA	1959		Haro	BE	1984	
Tetrapod (Danel et al.)	FR	1960		O'Neill	USA	1986	
Stabit	UK	1961		Tourmen	FR	1990	
Akmon	NL	1962		Core-Loc	USA	1994	
N-Shaped Block	JP	1962		Voisin	FR	1995	
Ridehalgh	GB	1962		Ecopode	FR	1996	
Dolos	RSA	1963		A-Jack	USA	1998	
Hollow Square	JP	1965		Diahitis	IE	1998	
Sta-Bar	USA	1966		Accropode II	FR	1999	
Toskane	ZA	1966		Atamán	ES	2003	
Gassho	JP	1967		Half-Loc	KR	2003	
Cob	UK	1969		Xbloc	NL	2003	
Taisuke	JP	1971		Cubipod	ES	2005	
Chevalier & Alsthom	FR	1972		Xbase	NL	2007	
Antifer Cube	FR	1976		Blacastar	ES	2012	

Figura 2.1. Desarrollo cronológico de los elementos de hormigón prefabricado más conocidos para la construcción de diques en talud. (Fuente: propia)

2.3. Diseño de mantos de diques en talud

2.3.1. Introducción

Ya en los tratados clásicos de construcción de diques era posible encontrar observaciones sobre la influencia de la altura de las olas que llegaban a las obras, de la densidad de los cantos, de la ligazón entre ellos, del ángulo de los taludes, etc. No obstante, el conocimiento puramente cualitativo de esas influencias no era suficiente para proyectar bien.

El factor de diseño básico para diques en talud es el cálculo del peso de los elementos del manto principal. Este factor condiciona en gran medida el diseño y el coste final de la obra. A lo largo de la historia numerosos autores han estudiado los parámetros a tener en cuenta para el diseño de un dique en talud, proporcionando diversas fórmulas para obtener el peso de los elementos del manto principal. En 1959, Hudson presenta una fórmula para el cálculo de la estabilidad de los diques de escollera natural y tetrápodos con el criterio de ausencia de daños y rebase que ha sido pródigamente utilizada desde entonces, esta fórmula estaba basada en la de Iribarren (1938) y fue popularizada por el Shore Protection Manual de 1975 (USACE,1975).

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

Fórmula 2.1. Fórmula de Hudson (1959).

donde, W es el peso de las piezas que forman el manto principal; w_r y w_w son los pesos específicos del hormigón y del agua respectivamente; H es la altura de ola de cálculo; α es el ángulo del talud de la estructura con respecto a la horizontal; y K_D es el coeficiente de estabilidad, que depende de la forma de las piezas del manto principal, de su rugosidad, la trabazón entre ellas y de la zona del dique a diseñar (tronco o morro).

Considerando el peso específico relativo sumergido y el lado del cubo equivalente de la pieza, $\Delta = (w_r/w_w - 1)$ y $D_n = (W/w_r)^{1/3}$, la Fórmula 2.1 puede escribirse en forma de número de estabilidad, tomando la equivalencia $H = H_s$ propuesta por el USACE (1975). Reordenado los términos de la Fórmula 2.1 se puede definir la ecuación conocida como fórmula de Hudson generalizada.

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} \quad y \quad N_{sd} = \frac{H_{sd}}{\Delta D_n} = (K_D \cot \alpha)^{1/3}$$

Fórmula 2.2. Fórmula de Hudson generalizada.

donde, N_s es el número de estabilidad, H_s es la altura de ola significativa, N_{sd} el número de estabilidad de diseño y H_{sd} la altura de ola significativa correspondiente a un determinado nivel de averías.

A lo largo de los años, tras la aparición de nuevos elementos prefabricados, sus inventores se han apresurado en proporcionar el coeficiente de estabilidad (K_D) de la pieza desarrollada para poder compararla con el resto y para facilitar el diseño de diques. Hay manuales de ingeniería, como el USACE (1984), que recopilan los coeficientes de estabilidad de diversas piezas.

Bruun, en 1978, tras analizar las posibles causas de fallo de un dique rompeolas expuesto a la acción del oleaje, realizó una síntesis de ellas, agrupándolas en once causas principales, entre las que se encuentra la extracción de piezas que componen el manto principal.

El *Coastal Engineering Manual* (CEM, 2006), define el término *fallo*, en el contexto del diseño de fiabilidad de estructuras costeras, como el daño que ocasiona que las prestaciones y la funcionalidad de la estructura resulten por debajo del mínimo previsto por el diseño. Además, propone una serie de razones por las que una estructura costera puede fallar, haciendo especial referencia a los diques en talud, que son: (1) *Fallos de diseño*, ocurre cuando la estructura, considerada como un todo, incluyendo los cimientos o componentes individuales, no pueden resistir las condiciones de carga que se encuentran dentro de los criterios de diseño; (2) *Fallo por exceso de carga*, ocurre al ser excedidas las cargas de diseño para las cuales se proyectó la estructura; (3) *Fallos de construcción*, aparecen como consecuencia de una mala construcción o por la mala calidad de los materiales empleados en la misma; (4) *Fallo por deterioro*, es el resultado del deterioro de la estructura y la falta de un correcto proyecto de mantenimiento de la misma.

De todos los modos de fallo que pueden acontecer en un dique en talud, los más importantes son la extracción de piezas del manto principal, la rotura de dichas piezas por sobrepasar su resistencia estructural y el rebase del oleaje. Estos tres efectos han sido investigados intensamente y juegan un papel dominante en el diseño de un dique en talud.

Normalmente se considera como el principal modo de fallo la pérdida de piezas en determinadas zonas del talud del dique. Este modo de fallo puede deberse a dos razones diferentes: la simple extracción de las piezas del manto bajo la acción del oleaje, o a la ya comentada compactación heterogénea.

El diseño del manto principal de los diques en talud ha centrado el interés de los entendidos en el tema durante años, lo que manifiesta su gran importancia en el correcto diseño y construcción de un dique en talud.

2.3.2. Parámetros relativos al diseño de mantos principales

Los parámetros más importantes asociados al diseño y construcción del manto principal de un dique en talud son los siguientes:

- La porosidad.
- El *placing density* y el *packing density*.
- El espesor.
- La trabazón (o en inglés, *interlocking*) entre las piezas.

Además, para piezas con forma cúbica de colocación aleatoria, Pardo et al (2014) proponen un método para cuantificar la aleatoriedad con la que se colocan estas piezas en el manto, asegurando la mayor similitud entre los ensayos a escala reducida y la realidad construida.

En los apartados siguientes se exponen de forma más desarrollada los conceptos arriba citados.

2.3.2.1. La porosidad del manto principal

La porosidad es un concepto muy utilizado en geotecnia, cuya definición más amplia es:

- *Porosidad*: Cociente entre el volumen de huecos (V_V) y el volumen total (V_T), incluyendo el de los huecos.

$$Porosidad = \frac{V_V}{V_T}$$

Fórmula 2.3. Fórmula clásica de la porosidad.

La porosidad del manto principal es uno de los parámetros más importantes a la hora de definir y construir un manto principal, puesto que es responsable del cómputo de los materiales necesarios para su construcción. Además, diversos autores como Van der Meer (1999), VandenBosch et al. (2002), Frens (2007) o Medina et al. (2014) llevaron a cabo ensayos de laboratorio para analizar la estabilidad hidráulica de mantos principales compuestos por distintos tipos de piezas y todos ellos concluyeron que la porosidad del manto tiene una influencia significativa en la estabilidad hidráulica del mismo. Como norma general se puede afirmar que a mayor densidad de colocación se obtiene una mayor estabilidad de la construcción. Sin embargo, son muy pocas las fórmulas de estabilidad de diques que incluyen como parámetro la porosidad del manto.

Esta porosidad está influenciada por numerosos factores como las características intrínsecas de las piezas empleadas (forma, dimensiones, facilidad de erosión o desgaste, etc.), las características de los materiales de la capa de filtro, la climatología durante el proceso constructivo, el método de colocación o los medios empleados para la misma.

Hasta hace poco en el mundo ingenieril, la porosidad del manto principal ha sido condicionada por el elemento que lo constituye, de forma que manuales de ingeniería como el USACE (1984) asocia a cada tipo de pieza una porosidad que podríamos

definir como nominal o “absoluta”, dicha porosidad fue llamada *fictitious porosity* por Zwamborn (1978). En la tabla siguiente se puede ver el valor de porosidad que el USACE (1984) daba a cada elemento de protección.

Armor Unit	n	Placement	Layer Coefficient k_{Δ}	Porosity (P) %
Quarrystone (smooth) ¹	2	Random	1.02	38
Quarrystone (rough) ²	2	Random	1.00	37
Quarrystone (rough) ²	>3	Random	1.00	40
Quarrystone (parallepiped) ⁶	2	Special	--	27
Cube (modified) ¹	2	Random	1.10	47
Tetrapod ¹	2	Random	1.04	50
Quadripod ¹	2	Random	0.95	49
Hexipod ¹	2	Random	1.15	47
Tribar ¹	2	Random	1.02	54
Dolos ⁴	2	Random	0.94	56
Toskane ⁵	2	Random	1.03	52
Tribar ¹	1	Uniform	1.13	47
Quarrystone ⁷	Graded	Random	--	37

Tabla 2.1. Valores de porosidad para varias piezas de protección según el USACE (1984).

Cabe mencionar que tanto el valor de la porosidad como el del coeficiente de capa (definido en el apartado siguiente) dados por la tabla anterior, fueron obtenidos experimentalmente bajo unas condiciones particulares no definidas en el USACE (1984), por lo que es más que dudable que estos resultados sean aplicables a la totalidad de los mantos principales de los diques en talud.

Por otro lado es bastante usual no prestar la atención que se merece a la porosidad del manto en los ensayos de laboratorio, en muchos de ellos se realizan los ensayos y no se mide la porosidad, y si se mide no se refleja en los artículos o informes generados. La porosidad ensayada debe de ser reproducible en prototipo, hay que tener en cuenta que la construcción del manto en laboratorio se realiza en condiciones ideales, construcción a mano con una visibilidad perfecta y sin oleaje, con lo que es relativamente fácil obtener la porosidad objetivo. Sin embargo, en prototipo la construcción depende en gran medida de las condiciones medioambientales (oleaje, viento, visibilidad, etc.) y de los equipos empleados (grúas, pinzas de presión, eslingas, etc.). La porosidad de diseño, la ensayada a escala reducida y la realmente construida deben ser similares, ya que si no pueden aparecer efectos de modelo que pongan en riesgo la integridad de la estructura (compactación heterogénea, reducción de la estabilidad hidráulica, aumento del remonte y del rebase, etc.) u ocasionar desajustes en el cálculo de materiales.

2.3.2.2. El *placing density* y el *packing density*

En el USACE (1984) se define el *placing density* como el número de unidades del manto principal de un dique en talud en un área de referencia dada. Y presenta la siguiente fórmula para su cálculo:

$$\varphi = \frac{N_r}{A} = n \cdot k_{\Delta} \cdot \left(1 - \frac{P}{100}\right) \cdot \left(\frac{w_r}{W}\right)^{2/3}$$

Fórmula 2.4. Fórmula para el cálculo del *placing density* según el USACE (1984).

donde:

- $\varphi = N_r / A$, es el *placing density*, número de unidades colocadas en un área de referencia.
- n , es el número de bloques de escollera o elementos prefabricados en el espesor de la capa de protección.
- k_{Δ} , es el coeficiente de capa, cuyos valores para varios tipos de elementos se pueden ver en la Tabla 2.1.
- P , es la porosidad nominal de los elementos dispuestos en la capa de protección, cuyos valores para varios tipos de elementos se pueden ver en la Tabla 2.1.
- w_r , es la densidad de las piezas colocadas en la capa de protección.
- W , es el peso de una unidad individual colocada en el manto de protección.

Cabe mencionar que la finalidad del parámetro denominado como coeficiente de capa, k_{Δ} , es la corrección del hecho de que el espesor de una capa compuesta por elementos, ya sean naturales o artificiales, no tiene porqué ser un múltiplo entero de su diámetro nominal, por ejemplo, un manto principal compuesto por dos capas de escollera o tetrápodos de hormigón no tienen por qué tener un espesor igual a dos veces su diámetro nominal.

Con esta formulación, diferentes valores de coeficiente de capa y porosidad nominal pueden conducir al mismo valor de *placing density*. Frens (2007) analizó algunos malentendidos causados por los diferentes criterios de varios autores en lo relativo al coeficiente de capa y la porosidad. Por ejemplo, una porosidad nominal $P=47\%$ con un coeficiente de capa $k_{\Delta} = 1.10$ (valores dados por USACE 1984 para cubos modificados) es equivalente a una porosidad $p=42\%$ con un coeficiente de capa $k_{\Delta} = 1.00$.

Se da el caso que en manuales de reconocido prestigio como son el ya nombrado USACE (1984) y el CIRIA, CUR, CETMEF (2007) se proporcionan valores distintos del coeficiente de capa para un mismo tipo de pieza, como es el caso del Tetrápodo, para el que el primero da un valor de 1.04 mientras que el segundo recomienda un valor de 1.02.

Otro concepto utilizado en la literatura portuaria, tanto a nivel científico como constructivo, es el llamado *packing density* o densidad de colocación (Φ), es un

parámetro que estima la cantidad de hormigón en el manto principal. Este parámetro está asociado con la porosidad y el número de capas, puede considerarse como el *packing density* adimensionalizado usando el lado del cubo equivalente, D_n de los elementos. A continuación se muestra su formulación:

$$\Phi = n \cdot k_{\Delta} \cdot (1 - P\%)$$

Fórmula 2.5. Fórmula para el cálculo del *packing density*.

donde:

- Φ , es el *packing density*.
- n , es el número de bloques de escollera o elementos prefabricados en el espesor de la capa de protección.
- k_{Δ} , es el coeficiente de capa.
- $P\%$, es la porosidad nominal de los elementos dispuestos en la capa de protección en tanto por uno.

Para evitar malentendidos, en esta Tesis Doctoral se aplica el criterio dado por Medina et al. (2010), válido para elementos de protección masivos de colocación aleatoria, según el cual la porosidad del manto es $p = (1 - \Phi/n)$, la cual se corresponde con un coeficiente de capa $k_{\Delta} = 1.00$.

2.3.2.3. El espesor del manto principal

El espesor de las distintas capas de las que se compone un dique en talud es un importante parámetro de diseño, sobre todo para las estructuras protegidas con escollera. Dicho parámetro se mide perpendicularmente al talud y es frecuentemente utilizado como herramienta de diseño a la hora de dimensionar las secciones transversales sobre plano en la fase de estimación, así como para el cómputo del volumen de material necesario para la construcción de la estructura.

En el USACE (1984) aparece una formulación para su cálculo, que es:

$$r = n \cdot k_{\Delta} \cdot \left(\frac{W}{w_r} \right)^{1/3} \quad \text{ó} \quad r = n \cdot k_{\Delta} \cdot D_n$$

Fórmula 2.6. Fórmulas para el cálculo del espesor de capa según el USACE (1984).

donde r es el espesor de capa, y los valores del coeficiente de capa (k_{Δ}) y del número de elementos en la capa de protección (n) pueden verse en la Tabla 2.1 para varios tipos de elementos.

Según el criterio dado por Medina et al. (2010), anteriormente mencionado, el espesor del manto principal es igual al D_n para mantos monocapa y $2D_n$ para mantos bicapa de elementos masivos de colocación aleatoria.

2.3.2.4. La trabazón entre las piezas del manto principal

El término trabazón, en inglés *interlock*, es usualmente aplicado a grupos de elementos de protección en mantos principales de diques en talud para reflejar el grado en el que las piezas individuales son obligadas, o comprimidas, por sus vecinas desde el punto de vista de la rotación o movimiento relativo con respecto a otra unidad.

La trabazón depende principalmente de la forma de la pieza y del método de colocación, pero además también se ve influenciada por otros parámetros como: el ángulo de la fuerza de extracción con respecto al talud, la fricción entre las piezas y la capa inferior, la densidad de piezas colocadas o su porosidad, la pendiente del talud, etc.

Aunque hay un tipo de piezas que trabajan principalmente por trabazón, como por ejemplo el Dolo, el resto de tipos de unidades de protección, también desarrollan un cierto grado de trabazón con sus vecinas, aunque la forma de estas nos haga pensar lo contrario.

Según el CIRIA, CUR, CETMEF (2007), la trabazón entre piezas idénticas se puede definir de forma precisa y determinar experimentalmente. Esto es si se asume que el ángulo natural de reposo puede expresarse como suma de dos partes, una que representa el ángulo de fricción de contacto y la otra el ángulo de trabazón. Se puede afirmar que bajo unas mismas condiciones de colocación y densidad de piezas el ángulo de trabazón es constante para cada unidad.

Wang y Peene (1990) llevaron a cabo un estudio sobre la trabazón que desarrollan las piezas de escollera, los dolos y los tetrápodos. Para ello utilizaron un aparato inventado por ellos mismos, basándose en los ensayos de Price (1979), diseñaron un ensayo muy simple que permitía aislar la fuerza resistente que ofrecía una unidad de protección cuando era desplazada de su posición en el manto. Dicho ensayo recibió el nombre de *Static Pull-Out Test*, o lo que es lo mismo, ensayo estático de extracción. El parámetro para comparar la trabazón entre unidades se fijó como la relación entre la fuerza necesaria para extraer la pieza y el peso de la misma. La gran mayoría de los ensayos de extracción que se han realizado hasta la fecha siguen las mismas pautas que el ensayo diseñado por los citados autores.

El aparato del test de extracción consiste básicamente en una pendiente de talud variable donde se colocan las capas pertinentes de la unidad a ensayar sobre una capa de filtro de la forma que se desee (tanto con respecto a la orientación relativa de las unidades como al método de colocación). La pieza es extraída por un cable motorizado a una velocidad muy reducida, de forma que el historial de la fuerza de extracción

aplicada queda registrado por una célula de carga. Además, el aparato permite variar el talud de ensayo y la dirección de la fuerza de extracción.

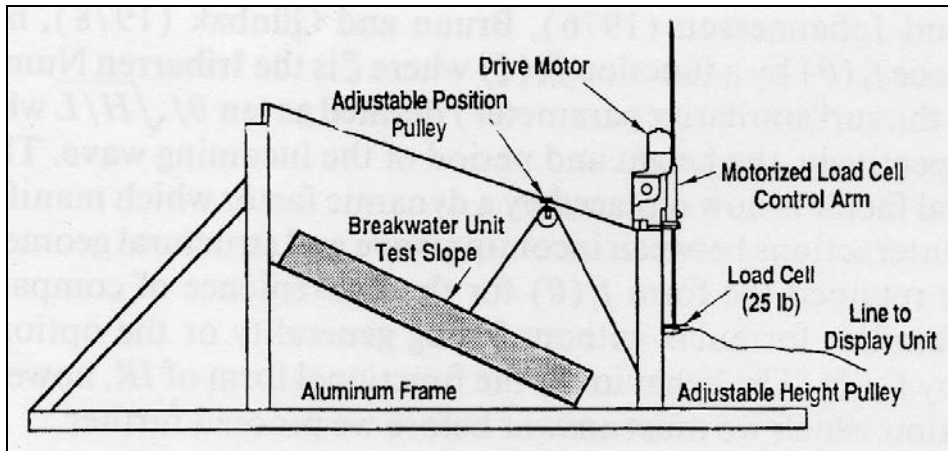


Figura 2.2. Aparato de test de extracción empleado por Wang y Peene (1990).

Como resultado de su estudio encontraron que la trabazón está, más o menos, relacionada o es proporcional al peso de las unidades. Sólo para el caso de que las piezas artificiales se encuentren muy juntas y apretadas la fuerza de extracción se desvía de ser proporcional al peso.

En 2006, Oever et al. proponen otro parámetro para calcular la trabazón de forma que se pueda predecir la estabilidad hidráulica de un dique más exactamente. Dicho parámetro fue bautizado con el nombre de *Potential Interlocking Coefficient (PIC)* o coeficiente de trabazón potencial. Este parámetro se basa en la posición de las unidades vecinas a la estudiada. Según los autores, cada unidad interactúa con las cuatro unidades vecinas, dos de la fila de abajo y otras dos de la de arriba, las unidades de la izquierda y derecha de la misma fila no están en contacto. En la figura siguiente se representan los contactos entre unidades, las líneas continuas simbolizan que existe contacto entre las piezas que unen, las discontinuas indican la no existencia de contacto.

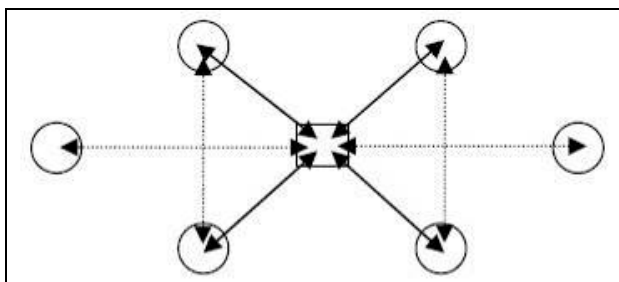


Figura 2.3. Contacto entre unidades del talud según Oever et al. (2006).

Para cuantificar el PIC se presentó una escala del cero al uno, donde $PIC = 0$ indica que la unidad no contacta con ninguna de sus vecinas, y donde $PIC = 1$ indica que la unidad interactúa con las cuatro de su alrededor de la forma recomendada según la malla de colocación. Este parámetro se constituye de dos partes diferenciadas, la primera es un factor de reducción por si la colocación no resultase paralela al pie del talud, y la segunda parte es el sumatorio de la trabazón potencial de la unidad con sus cuatro vecinas.

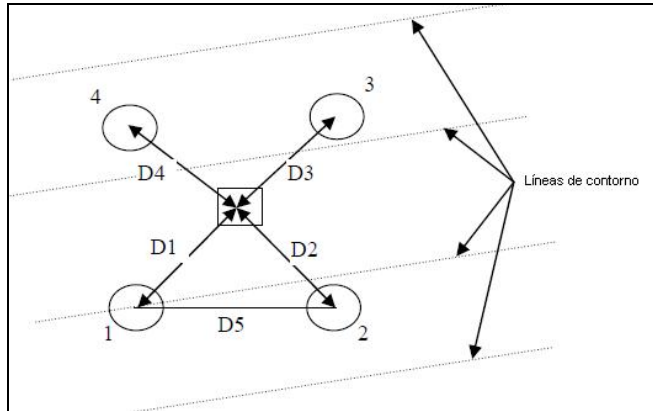


Figura 2.4. Parámetros empleados para calcular el *Potential Interlocking Coefficient* (PIC) propuesto por Oever et al. (2006).

$$PIC = \left(1 - \left[\arctan \left(\frac{z_1 - z_2}{D5} \right) \right] \right) \cdot \sum_{i=1}^4 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{2} \cdot \left(Di - \sqrt{(0.5 \cdot d_{hrec})^2 + d_{urec}^2} \right) \right)$$

Fórmula 2.7. Fórmula para el cálculo del *Potential Interlocking Coefficient* (PIC) propuesto por Oever et al. (2006).

donde:

- d_{hrec} es la distancia entre c.d.g. recomendada en la dirección horizontal.
- d_{urec} es la distancia entre c.d.g. recomendada en la dirección del talud.

2.3.2.5. La aleatoriedad en la colocación de las piezas del manto principal

En la comunidad ingenieril está ampliamente aceptado que la estabilidad hidráulica de las piezas de protección con geometrías complejas está directamente relacionada con la forma de colocación de las mismas, siendo necesario seguir unas indicaciones estrictas durante su colocación tanto en laboratorio como en prototipo. Sin embargo, no es así cuando se trata de piezas de colocación aleatoria, ya que el significado del término colocación aleatoria no está totalmente claro.

Por norma general, la colocación aleatoria se refiere a que el operador de grúa no trata de colocar las piezas con una determinada orientación con respecto a sus vecinas. Algunas piezas como los cubos, los bloques paralelepípedicos, los bloques Antifer o los Cubípodos se colocan de forma aleatoria, pero no se proporcionan medidas de la aleatoriedad para los ensayos de laboratorio ni para prototipo. En este tipo de piezas suele ser habitual no prestar mayor atención a la colocación, sin embargo, un mismo tipo de pieza puede colocarse con una mayor o menor aleatoriedad. Como por ejemplo, un manto de cubos puede colocarse de manera poco aleatoria si se permite que las piezas se coloquen cara con cara o con una de las caras paralelas a la capa de filtro, como suele ser habitual, lo que da un manto mucho menos aleatorio que si se fuerza a las unidades a ser colocadas de manera distinta. Este hecho deja patente que la aleatoriedad de un manto está fuertemente condicionada por la forma de la pieza.

Movido por esta problemática, Pardo et al. (2014) establecieron un método para cuantificar la aleatoriedad de mantos de piezas con forma cúbica, tipo bloque, Antifer o Cubípedo. Dicho método se basa en el cálculo de tres índices denominados Armor Randomness Index (ARI):

- ARI_0 , que mide la aleatoriedad en la orientación de la pieza con respecto al plano del talud.
- ARI_1 , que mide la orientación relativa de una pieza con respecto a la pieza más cercana del manto.
- ARI_2 , que mide la orientación relativa de una pieza con respecto a la segunda pieza más cercana del manto.

El ARI_0 sirve para cuantificar el paralelismo entre las caras de las piezas y el plano del talud, mientras que el ARI_1 y ARI_2 son útiles para evaluar la colocación cara contra cara (adoquinamiento) de las piezas.

Los valores de los $ARIs$ van desde 0% al 100%, cuanto más reducido sea el valor más baja es la aleatoriedad con la que se han colocado las piezas en el manto. Un valor de $ARI_0= 100%$ significa que las piezas están colocadas de forma aleatoria con respecto al plano del talud, mientras que un valor de $ARI_0= 0%$ implica que todas las piezas están colocadas con una cara paralela al talud. Si $ARI_1=ARI_2= 100%$ el grupo de piezas se han colocado completamente aleatorias, mientras que si $ARI_1=ARI_2= 0%$ todas las piezas tienen sus tres ejes ortogonales a las caras paralelos, estando todos los elementos perfectamente ordenados con sus caras paralelas.

Pardo et al. (2014) llevaron a cabo ensayos de construcción realista de mantos de cubos y Cubípodos sobre los que midieron la aleatoriedad, obteniendo para ambos tipos de piezas los valores medios de los $ARIs$. Para los mantos de cubos resultaron $ARI_0= 67%$, $ARI_1= 60%$ y $ARI_2= 70%$; mientras que para los Cubípodos fueron $ARI_0= 93%$, $ARI_1= 74%$ y $ARI_2= 82%$. Llegando a la conclusión que la aleatoriedad de los mantos de Cubípodos es notablemente mayor que la de cubos.

2.3.3. Mallas de colocación de piezas de protección en el manto principal

Antes de la aparición de las piezas prefabricadas de hormigón, todos los diques en talud se construían mediante escolleras. La forma de colocación de éstas es relativamente sencilla, mientras que con la aparición de los elementos prefabricados surgen nuevos aspectos a tener en cuenta para su colocación, ya que ésta depende de las características de las piezas (forma, resistencia estructural, etc.).

Las piezas de protección pueden colocarse de diversas formas: uniforme, siguiendo un patrón, orientada o aleatoria (Dupray y Roberts, 2009). Suele ser habitual que todas las piezas se posicionen en el talud según una malla o rejilla de colocación (cuyas características dependen del tipo de elemento a colocar y de las consideraciones de diseño) que proporciona las coordenadas donde se deben depositar cada una de las piezas. Esto permite conocer el número de piezas a colocar, y por lo tanto controlar la porosidad del manto. Es bastante usual colocar los elementos prefabricados de hormigón según una malla con forma de diamante, término empleado por Oever et al. (2006), la cual dispone los elementos de una fila superior encima del hueco que dejan los de la fila inferior, tal y como se observa en la figura siguiente:

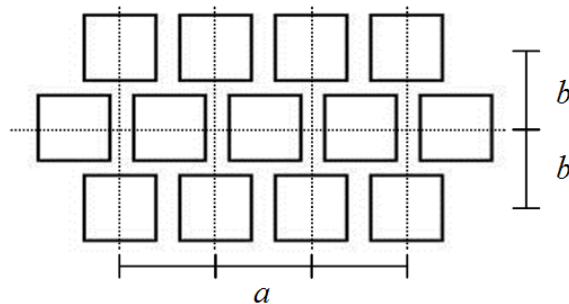


Figura 2.5. Esquema de una malla de colocación típica. (Fuente: propia)

donde:

- a , es la distancia entre c.d.g. de dos piezas contiguas.
- b , es la distancia entre c.d.g. de dos piezas contiguas medidas en la dirección del pie a la coronación, sobre el talud o en un plano horizontal.

Es común establecer los valores de a y b en función del diámetro equivalente de la pieza, D_n (raíz cúbica del volumen de la pieza), para poder comparar entre unidades de distinto peso. Además, debe indicarse si los parámetros a y b se refieren al plano del talud o a un plano horizontal. El manual CIRIA, CUR, CETMEF (2007) proporciona estas distancias entre elementos para distintos tipos de piezas (Δx y Δy).

Armour unit type	Size (m ³)	Layer coefficient k_t (-)	Shape coefficient k_s (-)	Distance between units		Porosity n_v (-)	Packing density coefficient ϕ (-)	Modified layer coefficient k_c	Recommended slope $\cot \alpha$ (-)
				Horizontal $\Delta x/D_n$ (-)	Slope-parallel $\Delta y/D_n$ (-)				
Cube (two layers)		1.10	1.0	1.70	0.85	0.47	1.17	1.10	
Tetrapod		1.02	0.280	1.98	0.99	0.50	1.02	0.667	4/3 to 1.5
Dolos ($r = 0.32$) ¹⁾		0.94	0.16	2.19	1.10	0.56	0.83	0.51	2 to 3
Accropode	< 5	1.29	0.341	1.77	0.86	0.491	0.656	0.9012	4/3 to 1.5
	5-12			1.82	0.91	0.531	0.605		
	> 12			1.86	0.93	0.552	0.578		
Core-loc	< 5	1.516	0.2236	1.83	0.91	0.606	0.598	0.9201	4/3 to 1.5
	5-8.5			1.85	0.92	0.613	0.587		
	8.5-12			1.85	0.93	0.618	0.580		
	> 12			1.87	0.94	0.624	0.569		
Xbloc	< 5	1.40	0.333	1.87	0.92	0.587	0.578	0.97	4/3 to 1.5
	5-12			1.92	0.94	0.606	0.552		
	> 12			1.96	0.97	0.623	0.528		
Cube (one layer)	high ²⁾	1.0	1.0	1.33	1.00	0.25	0.75	1.0	
	low ²⁾			1.70	0.85	0.31	0.69		

Tabla 2.2. Características geométricas y parámetros del manto principal de distintos tipos de piezas según el CIRIA, CUR, CETMEF (2007).

Este tipo de mallas están indicadas para tramos rectos de los troncos de los diques, sin embargo, la colocación en secciones curvas de tronco y sobretodo en morros de un dique en talud es mucho más compleja. En los morros la distancia horizontal (a) decrece conforme avanza la construcción en la dirección del pie del talud a la coronación. En un determinado nivel, o fila de elementos, la distancia llega a ser demasiado pequeña para colocar la siguiente unidad correctamente. En estos puntos, la distancia horizontal entre unidades suele incrementarse dejando un número de unidades fuera en el nivel correcto. Puede ocurrir que se tengan que dejar sin colocar varias piezas en una misma zona del morro, lo que podría suponer la creación de un punto débil para la estructura. Por lo que en el caso de las secciones curvas deben estudiarse con cuidado las mallas de colocación de cada tipo de elemento para evitar estos puntos débiles que aumentan el riesgo de fallo de la estructura.

Según Muttray y Reedijk (2009), las mallas de colocación de morros deben variar las distancias entre elementos establecidas para zonas de tronco recto para adaptarse a la especial geometría del morro, de forma que se cambia el *packing density* y el grado

de trabazón de estas zonas debido a la forma convexa de la capa de filtro sobre la que se colocan. Además, especifica que para piezas como el AccropodeTM, el Core-LocTM y el Xbloc[®], el radio al nivel medio del mar en morros no debe ser menor de tres veces la altura de ola de diseño.

2.4. Experiencias en la colocación de elementos de protección

2.4.1. Introducción

Puesto que el presente trabajo se centra en el método de colocación del elemento Cubípodo, a continuación se presenta un repaso a las investigaciones referentes al método de colocación de los elementos de protección más utilizados para la construcción de mantos principales de diques en talud. En este apartado se ordenan las investigaciones según el tipo de pieza de la que versan y dentro de las mismas por orden cronológico, analizando el método de colocación, la forma de manipular las piezas y las mallas de colocación.

2.4.2. Escollera

La piedra natural o escollera ha tenido y tiene una gran importancia en la construcción de diques en talud. El método de colocación más empleado es la disposición aleatoria en dos capas. Sin embargo, son numerosos los autores que afirman que en el caso de escolleras con la dimensión de uno de sus ejes notablemente superior a los demás, la colocación con dicho eje perpendicular al talud contribuye al aumento de la estabilidad hidráulica del manto.

Sollitt y DeBok (1976) estudiaron la estabilidad de una capa de escolleras con forma paralelepípedica, con uno de sus ejes claramente más largo que los demás, colocada con este eje perpendicular al talud ($H/V=2/1$) y con una alta densidad de colocación. En estos ensayos obtuvieron valores de estabilidad similares a la de los Dolos.

Hald et al. (1998) compararon tres formas de colocar la escollera con talud $H/V=3/2$: bicapa de forma aleatoria, bicapa de forma regular y monocapa de forma aleatoria. Para el caso de la colocación aleatoria el daño comenzó en la zona debajo del nivel medio del mar, mientras que en la colocación regular se produjo encima de este. Se obtuvo que la colocación regular era más estable que la aleatoria, el doble si se compara con los coeficientes de estabilidad de Hudson. El caso de colocación aleatoria de una capa de escollera obtuvo un tercio de la estabilidad que dos capas de colocación aleatoria.

VandenBosch et al. (2002) presentan un estudio sobre la influencia del método de colocación de la escollera en la estabilidad de los diques rompeolas. Ensayaron dos formas de colocar la escollera, una con los cantos colocados horizontalmente y otra con los cantos colocados de punta con respecto al talud, ambos con una porosidad del 30%. Los taludes ensayados fueron $H/V=3/2$, $2/1$ y $3/1$. Concluyendo que el mejor método de

colocar la escollera es disponerla de punta, ya que este método presenta una habilidad de auto-reparación que no ocurre en la colocación horizontal.

El CEM (2006) da una serie de indicaciones para los mantos formados por escollera basados en la experiencia acumulada por el *Corps of Engineers*. Según este manual, las escolleras colocadas individualmente deben estar orientadas de manera que el eje más largo quede aproximadamente perpendicular al plano del talud, con la finalidad de proporcionar una mayor estabilidad. También establece 4 formas de colocación de la escollera en el manto, que son:

- *Colocación uniforme.* Sólo utilizable cuando las piedras empleadas son uniformes en tamaño y forma. Las piedras se colocan según un patrón ordenado, según el cual las piezas quedan colocadas unas muy cercas de otras, lo que hace más difícil la extracción de piezas, sin embargo proporciona estructuras menos permeables, con más remonte y rebase. Este método es el más costoso de los descritos por el CEM (2006) para escollera.
- *Colocación aleatoria.* Basada en la colocación de escollera según un patrón aleatorio, donde las piezas suelen tener formas y tamaños diferentes (dentro de unos límites). Los mantos principales así construidos deben disponer de al menos dos capas de piedras, construyéndolas de forma simultánea. Esto proporciona una mejor trabazón entre las piedras que construir primero una capa y después la otra.
- *Colocación selectiva.* En este método se realiza una cuidadosa selección y colocación de las piedras para lograr un alto grado de trabazón. Aunque este tipo de colocación aumenta la estabilidad hidráulica, la variación observada entre proyectos realizados no justifica el aumento de los valores de los coeficientes de estabilidad. En cierto modo, la colocación selectiva es simplemente una colocación aleatoria construida cuidadosamente, este tipo de colocación se correspondería con la que en España se designa con el nombre de “careada”.
- *Colocación especial.* Este tipo de colocación se aplica sólo a las piedras con forma paralelepípedica, además, requiere un esfuerzo especial para alinear el eje más largo de las piedras perpendicularmente al talud de la estructura. Requiere una cuidadosa supervisión durante la construcción y más tiempo para la selección, manipulación y colocación, lo que implica mayores costes de construcción.

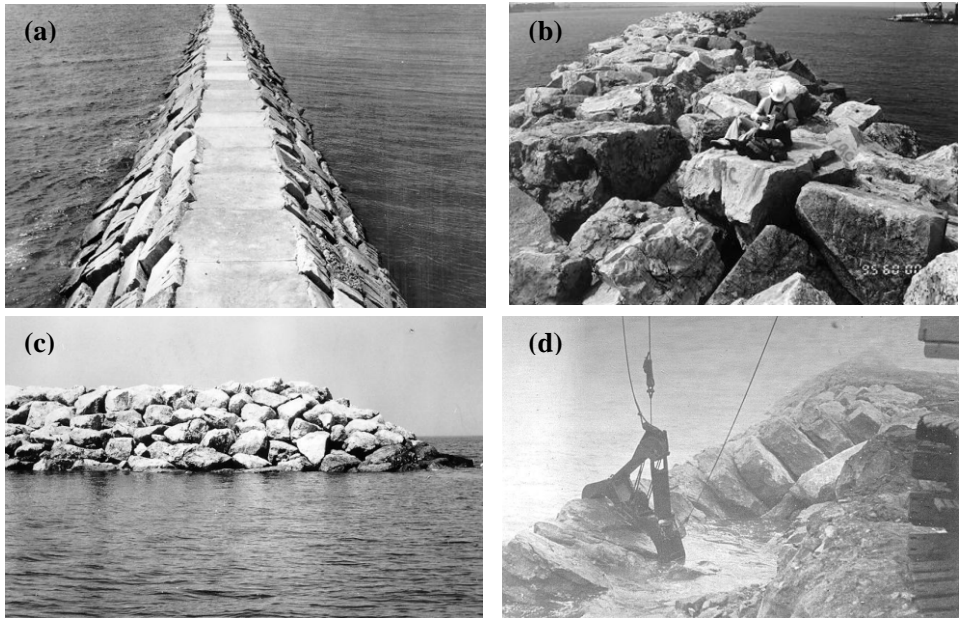


Figura 2.6. Métodos de colocación según CEM (2006). (a) Uniforme, (b) aleatoria, (c) selectiva y (d) especial.

Nurmohamed et al. (2006) estudiaron la estabilidad de una sola capa de escollera colocada de forma ordenada, entendiendo por ordenada el colocar las piedras durante la construcción de manera más estable que con la colocación aleatoria. Tras los ensayos se obtuvo que una capa de escollera colocada de forma ordenada era más estable para inicio de averías que la típica colocación bicapa de escollera de manera aleatoria.

2.4.3. El cubo

Verhagen et al. (2002) presentaron un estudio sobre la colocación de cubos en un dique en talud. Pero este estudio se plantea de una forma un poco singular debido a que la forma de colocar las piezas en el talud es dejándolas caer desde unas determinadas alturas por encima de la superficie del agua. Este método de colocación resulta impensable cuando las piezas que se utilizan pesan como mínimo varias toneladas, que es lo que ocurre en cualquier dique rompeolas convencional. Por lo que este método de colocación debe estar enfocado a la construcción de pequeños diques o presas en el país de donde proceden los autores (Holanda). Por ello, no se cree conveniente presentar las conclusiones de este estudio en el presente apartado.

Maciñeira (2004) analizó la estabilidad de morros de cubos bicapa, siendo una de las variables analizadas el método de colocación. Para ello realiza ensayos de estabilidad en mantos construidos con dos metodologías distintas: una colocación aleatoria y otra colocación regular careada. Tras los ensayos se observó que el morro parecía más estable con la colocación regular, sin embargo cuando el daño comenzaba éste progresaba más rápidamente hasta el fallo que en el caso de la colocación

aleatoria. Por ello recomendó que se tuviera cuidado con las colocaciones especiales en morros de cubos, ya que pueden dar estructuras menos flexibles y con una reserva de estabilidad menor entre escalones de daño.

Bruce et al. (2009) estudiaron la influencia de la orientación en la colocación de cubos en el rebase sobre un talud $H/V=2/1$. Para ello ensayaron cubos bicapa dispuestos según una malla regular (*packing density* de 1.19), con las caras de las piezas paralelas entre si y al talud, con lo que se obtuvo un acabado suave de la superficie del talud; y con cubos bicapa colocados según una malla irregular o aleatoria (*packing density* de 1.17). Además, también se estudió un manto de cubos monocapa colocados según una malla regular (*packing density* de 0.65). Sorprendentemente, los resultados obtenidos mostraron que no había diferencia entre el tipo de colocación regular e irregular con respecto al rebase, tal y como se puede apreciar en la figura siguiente, mientras que el manto monocapa de colocación regular si presenta un mayor rebase con respecto a la solución bicapa.

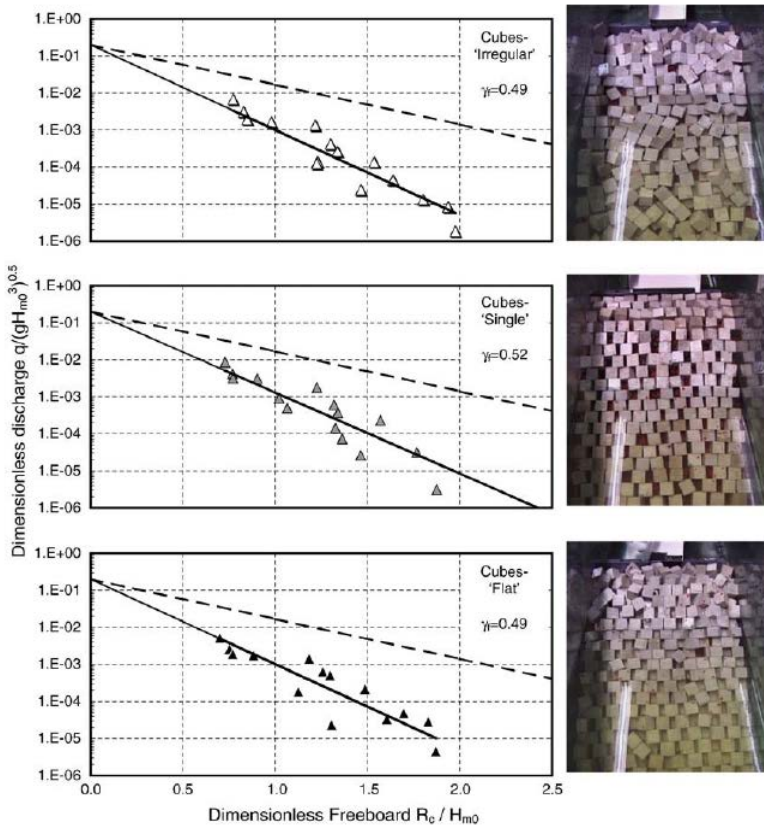


Figura 2.7. Comportamiento frente al rebase de distintos mantos de cubos según Bruce et al. (2009). Bicapa irregular (arriba), monocapa regular (en medio) y bicapa regular (abajo).

Pardo et al. (2010) utilizaron el *Cartesian Blind-Placement System (CBPS)* o Sistema Cartesiano de Colocación Ciega para estudiar el rango de porosidades con el que los cubos podían colocarse en un talud $H/V=3/2$. Dicho sistema se basaba en una pinza de colocación que se movía sobre unos raíles, los cuales permitían fijar coordenadas $X-Y$. En estos ensayos la pinza se colocaba en las coordenadas que fijaban las mallas de colocación estudiadas, entonces el operador de la pinza, sin seguir visualmente la maniobra, liberaba la pieza cuando ésta tocaba el talud. El rango de porosidades obtenido fue $35\% < p < 45\%$.



Figura 2.8. Sistema Cartesiano de Colocación Ciega empleado por Pardo et al. (2010).

Pardo et al. (2012) llevaron a cabo ensayos de construcción realista 3D de mantos principales de cubos, empleando para ello una grúa radial y pinzas de presión a escala de las utilizadas en prototipo. Bajo distintas condiciones de oleaje moderado construyeron varios mantos de cubos sobre una capa de filtro de talud $H/V=2/1$, concluyendo que el mejor método de colocación era utilizando una malla tipo forma de diamante con parámetros $a/D_n= 1.44$ y $b/D_n= 1.06$ (ambos medidos sobre el plano horizontal), con la que se obtuvo una porosidad cercana a $p= 37\%$.



Figura 2.9. Ensayo de colocación realista 3D de cubos de Pardo et al. (2012).

Ali y Diwedat (2014) estudiaron la estabilidad de un manto de cubos (talud $H/V=2/1$), para tronco y morro, colocados de dos formas: aleatoria y regular. Encontrando que la colocación regular presentaba una mayor estabilidad para inicio de averías y una progresión del daño más gradual que en el caso de colocación aleatoria, tanto para el caso del tronco como para el morro.



Figura 2.10. Ensayos de colocación llevados a cabo por Ali et al. (2014). Colocación regular (izq.) y colocación aleatoria (dcha.)

2.4.4. El Tetrápodo

La forma habitual de colocar los tetrápodos es con las piezas que forman la capa inferior con tres de las patas hacia abajo, y las que forman la segunda capa con una pata hacia abajo, tal y como indican Danel y Greslou (1962).

Gürer et al. (2005) estudiaron la estabilidad de un dique en talud ($H/V=3/2$) formado por 2 capas de tetrápodos dispuestos según dos métodos de colocación y sometido a oleaje regular y condiciones de *Non-Breaking*. Para el primer método de

colocación (la primera capa con las tres patas de los tetrápodos hacia abajo, y la segunda con las tres patas de los tetrápodos hacia arriba) se obtuvo una porosidad del 54% y un *packing density* de 1.03, mientras que para el segundo (ambas capas con las tres patas de los tetrápodos hacia abajo) una porosidad del 61% y un *packing density* de 0.90. Dichos métodos de colocación se pueden ver en las siguientes figuras.

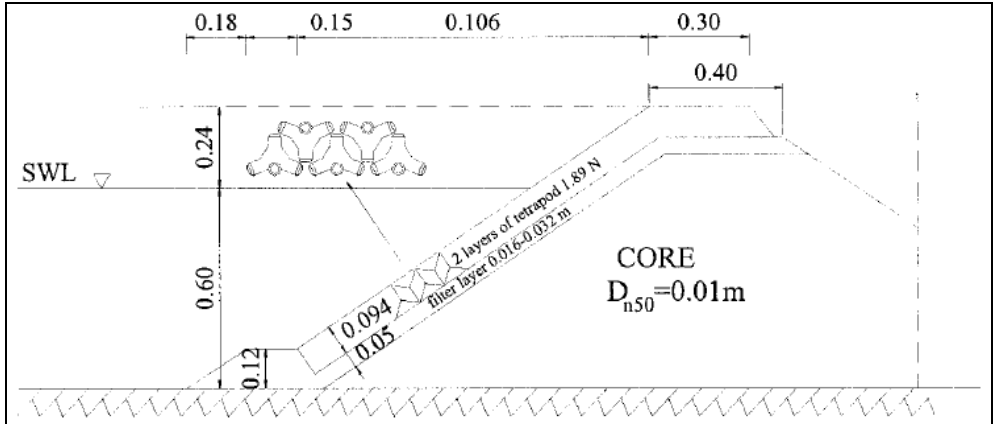


Figura 2.11. Primer método de colocación para el Tetrápodo empleado por Gürer et al. (2005).

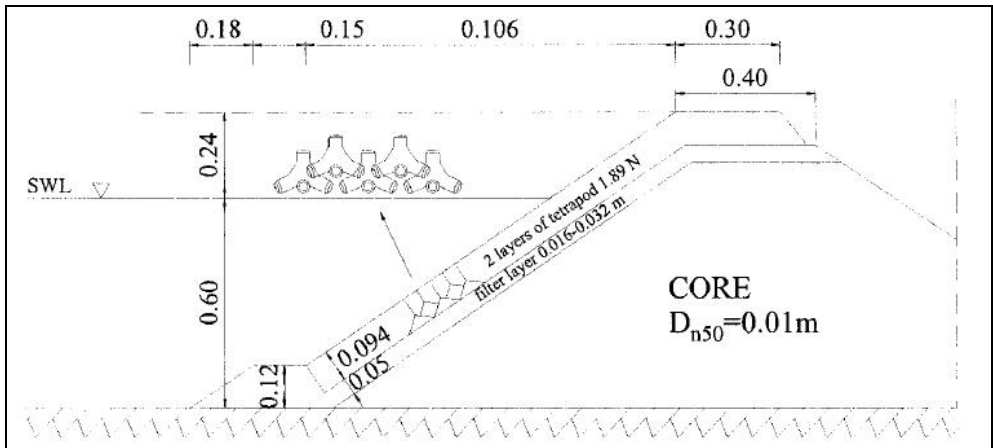


Figura 2.12. Segundo método de colocación para el Tetrápodo empleado por Gürer et al. (2005).

En el citado estudio, los autores concluyeron que el primer método de colocación ($P=54\%$) ofrece una progresión del daño gradual con el aumento de la altura de ola significativa. Mientras que el segundo método ($P=61\%$) presenta un inicio de averías más tardío (tiene una estabilidad inicial más alta) que el primer método, por el contrario, su progresión del daño no es gradual, sino que se produce rápidamente

cuando se alcanza una altura de ola que ronda el valor de la crítica. Esto hace que el segundo método sea menos robusto que el primero, o lo que es lo mismo, más frágil.

Fabiao (2013), estudió el impacto que sobre la estabilidad hidráulica del manto tenían diferentes métodos de colocación de tetrápodos con el mismo *packing density*. Para ello dos métodos de colocación fueron ensayados en un talud $H/V=3/2$. El primero se componía de una malla cuadrada con las piezas de la primera capa con tres patas hacia abajo y giradas 180° en filas sucesivas paralelas a la pendiente del talud (líneas del pie a la coronación), mientras que las piezas de la segunda capa se disponían con tres patas hacia arriba siguiendo el mismo patrón que las de la primera capa. El segundo método de colocación consistía en una malla triangular con todas las piezas de la primera capa colocadas con la misma orientación y con tres patas hacia abajo, mientras que las piezas de la segunda capa se colocaban con tres patas hacia arriba siguiendo el mismo patrón que las de la primera capa.

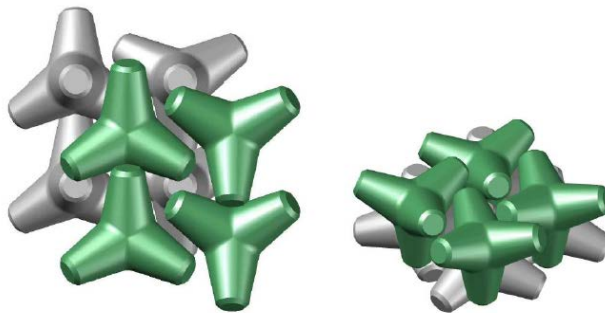


Figura 2.13. Primer método de colocación para el Tetrápodo definido por Fabiao (2013).

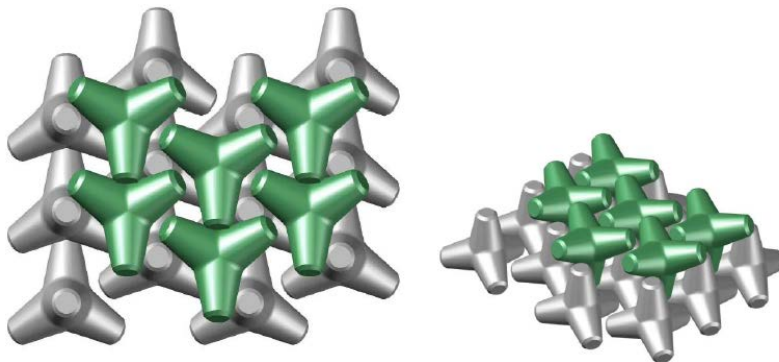


Figura 2.14. Segundo método de colocación para el Tetrápodo definido por Fabiao (2013).

Durante el desarrollo de los ensayos se observó que el primer método de colocación estudiado presentaba más puntos de contacto entre piezas que el segundo. Además, el primer método daba unos valores de estabilidad que se aproximaban más a los valores de la fórmula de Van der Meer para tetrápodos, siendo mayores que los

obtenidos para el segundo método. Por todo ello concluyó que no es suficiente con fijar un valor del *packing density*, el método de colocación tiene una influencia significativa en la estabilidad del manto.

2.4.5. El Dolo

Habitualmente el elemento Dolo ha sido colocado en dos capas de manera aleatoria, sin embargo la primera fila de piezas que conforma el pie del talud suele colocarse de forma específica. Un ejemplo de ello es presentado por Carver (1976), según el cual la primera fila del manto de Dolos debe colocarse poniendo una de las patas verticales girada hacia el exterior del talud, asegurando que con este tipo de colocación se obtiene una mayor estabilidad que con la colocación aleatoria del pie.

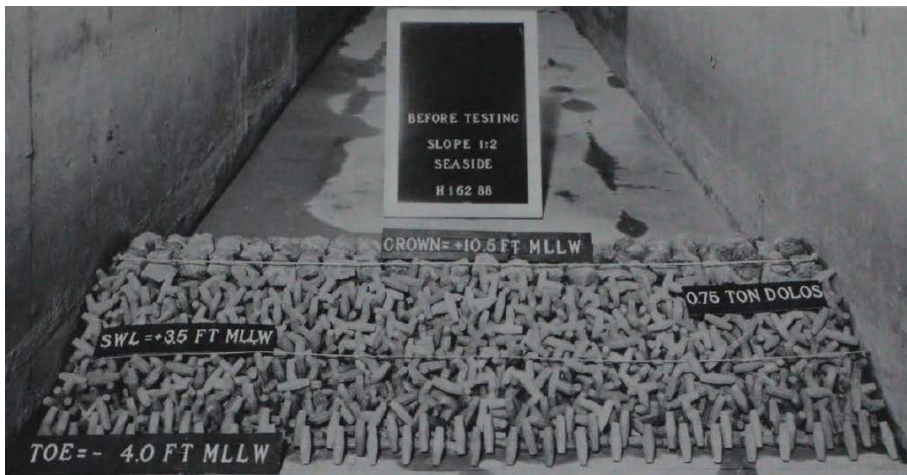


Figura 2.15. Colocación específica del pie del manto de Dolos en los ensayos de Carver (1976).

Carver y Davidson (1978) estudiaron la influencia en la estabilidad de la colocación del Dolo según distintas mallas de colocación. En los ensayos se emplearon Dolos con un diámetro en la parte central del elemento de 0.32 veces la altura característica de la pieza. Estudiaron 3 tipos de mallas de colocación sobre un talud $H/V=1.5/1$, cuyos resultados eran comparados con un manto de colocación aleatoria. Todos ellos sometidos a las mismas condiciones de oleaje.

- Malla n° 1: la primera capa de unidades colocadas con los vástagos (parte central) paralelos a la pendiente y las patas verticales alternativamente pendiente arriba y abajo. La segunda capa se colocó en el plano horizontal de la pendiente con los vástagos perpendiculares a los de la primera capa. Este método de colocación resultó ser menos estable que el aleatorio, produciéndose grandes daños, llegando a dejar expuesta la capa de filtro cerca de la coronación.

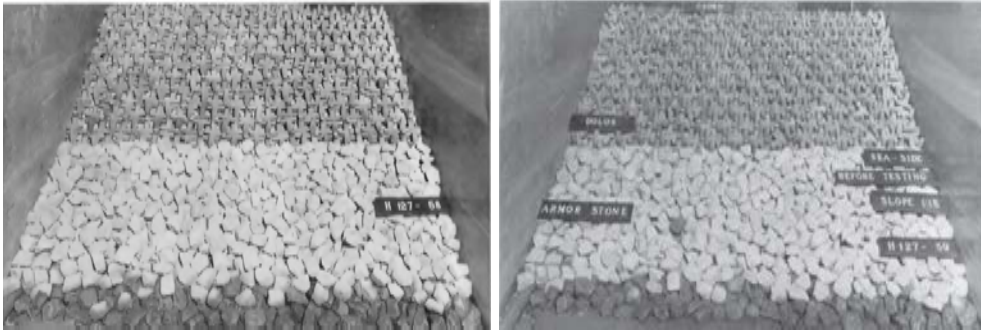


Figura 2.16. Malla n° 1 de Dolos ensayada por Carver y Davidson (1978). Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.)

- Malla n°2: se construyó el manto con los vástagos de todas las piezas en paralelo a la pendiente y las patas verticales pendiente abajo. Este método de colocación también resultó ser menos estable que el aleatorio.

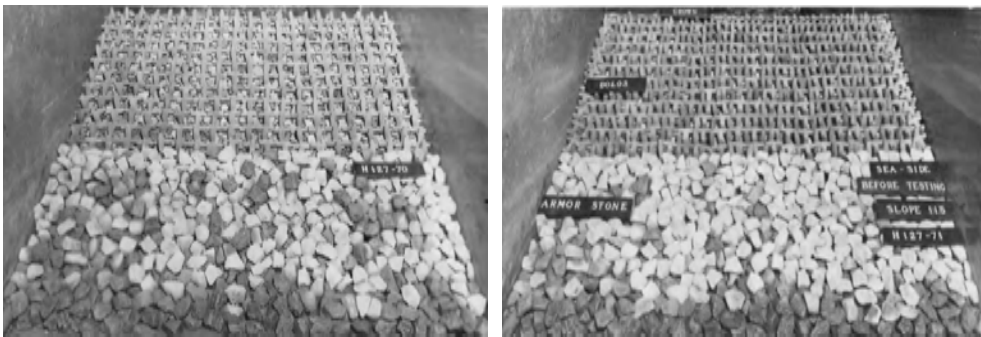


Figura 2.17. Malla n° 2 de Dolos ensayada por Carver y Davidson (1978). Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.)

- Malla n° 3: con la primera capa de unidades colocadas con los vástagos paralelos a la pendiente y con todas las patas verticales hacia arriba o hacia abajo en filas alternas. La segunda capa se colocó de manera idéntica a la primera. Este método de colocación resultó ser más estable que el aleatorio, no produciéndose daño alguno en la estructura.

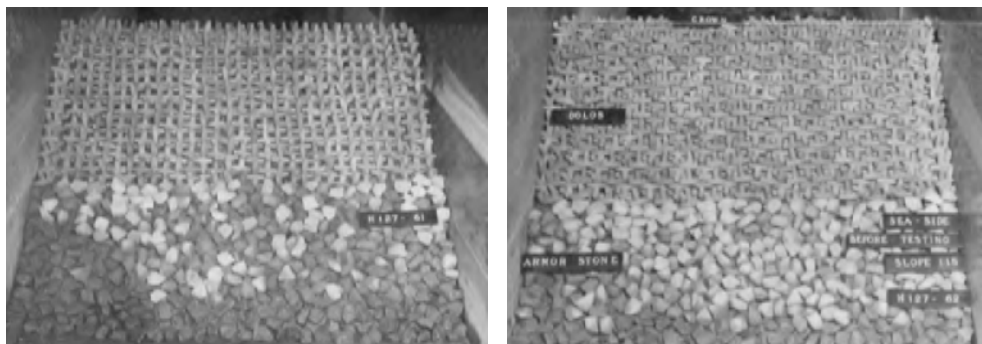


Figura 2.18. Malla n° 3 de Dolos ensayada por Carver y Davidson (1978). Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.)

Sorprendidos por la gran estabilidad de la malla n° 3 la ensayaron sobre taludes $H/V=1.5/1$, $2/1$ y $3/1$ para obtener los coeficiente de estabilidad, resultando 42, 43 y 44 respectivamente, muy superiores al que en aquella época Carver y Davidson atribuían al Dolo en colocación aleatoria, $K_D=33$.

Después de estudiar tres tipos de mallas de colocación específicas para el Dolo y ver que dos de ellas eran menos estables que la colocación aleatoria los autores concluyeron que había que actuar con precaución con las mallas especiales, ya que el uso de éstas no aseguraba una mayor estabilidad.

2.4.6. El Bloque Antifer

Como ya se ha comentado anteriormente, el bloque Antifer fue inventado durante la construcción del puerto de Antifer (Francia). Este elemento nunca ha sido patentado, lo que ha ocasionado que no exista un manual de uso del mismo que indique el mejor método de colocarlo. Por esta razón, son numerosos los autores que proponen distintos métodos de colocación para la construcción de mantos principales con ellos.

Yagci y Kapdasli (2003) presentaron un estudio sobre una técnica alternativa para colocar bloques Antifer en un dique rompeolas. En este estudio, dicha técnica alternativa de colocación se comparaba con otras técnicas de colocación existentes en el momento, todas sobre un talud $H/V=2/1$, que eran: la colocación regular, la colocación irregular o aleatoria (en este caso con alta y baja porosidad) y la colocación de los elementos de forma adoquinada. Estas técnicas de colocación se pueden ver en las figuras siguientes:

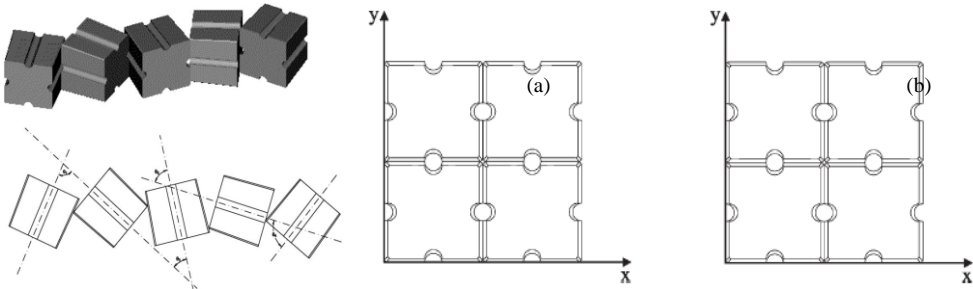


Figura 2.19. Técnicas de colocación ensayadas por Yagci y Kapdasli (2003). Irregular (izq.); Adoquinada (dcha.), (a) primera y (b) segunda capa.

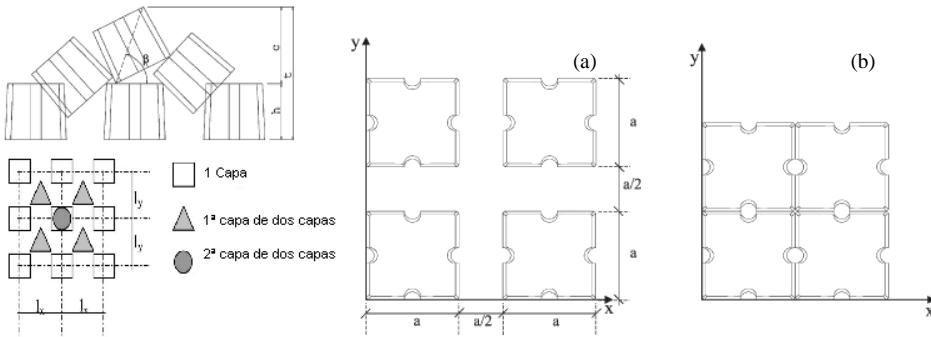


Figura 2.20. Técnicas de colocación ensayadas por Yagci y Kapdasli (2003). Regular (izq.); Alternativa (dcha.), (a) primera y (b) segunda capa.

Para cada una de estas técnicas, obtuvieron el número de bloques empleados, la porosidad y la *packing density*, cuyos valores se pueden ver en la tabla siguiente:

Técnica de colocación	Irregular con alta porosidad	Irregular con baja porosidad	Adoquinada	Alternativa	Regular
Número de bloques usados	589	710	920	697	650
Porosidad (%)	56	47	21	44	53
Packing density	0,94	1,13	1,47	1,11	1,04

Tabla 2.3. Número de bloques empleados, porosidad y *packing density* para cada técnica de colocación según Yagci y Kapdasli (2003).

Como conclusiones de su estudio, los autores destacaron las siguientes:

- La estabilidad de la técnica de colocación irregular con baja porosidad (47%) es mayor que la de la misma técnica con alta porosidad (56%), por lo que afirman que para este tipo de técnica de colocación, la estabilidad decrece con el incremento de la porosidad. Además, exponen que la de baja porosidad tiene

una capacidad de auto-reparación mayor que la de alta porosidad. No se obtuvieron conclusiones con respecto a esta capacidad para las otras técnicas.

- La técnica de colocación regular es la que presenta una estabilidad menor. Sin embargo, es la que usa un número menor de unidades, a excepción de la técnica irregular de alta porosidad, por lo que tiene un menor coste de construcción. Además, esta técnica se consideró fácil de aplicar a la construcción real por sus claros criterios de definición. Por todo ello, los autores recomendaron su utilización sólo en casos de bajos valores de ola incidente.
- La técnica de colocación adoquinada es la más cara, debido a que emplea el mayor número de piezas. Además, la estabilidad que ofrece dicha técnica no es significativamente diferente de la que proporciona la técnica irregular con baja porosidad o la alternativa. Por otra parte, su baja porosidad y rugosidad hace que sea la técnica con mayor remonte y reflexión. Como resultado de lo expuesto, se llega a la conclusión de que este tipo de colocación no es conveniente.
- La colocación alternativa y la irregular de baja porosidad presentan valores de estabilidad, número de bloques necesarios y remonte similares. La ventaja más clara de la primera sobre la segunda radica en que la técnica alternativa proporciona unos criterios de construcción mucho mejor definidos que la colocación irregular, lo que la hace más fácil de utilizar en condiciones reales.

Por todo lo anteriormente expuesto (estabilidad del manto, criterios de definición del método, coste del manto y remonte), los autores consideraron la técnica de colocación alternativa como la más conveniente para la colocación de los bloques Antifer.

Yagci et al. (2004), presentan un estudio sobre la estabilidad de un dique de Antifer para el caso de colocación irregular, visto en Yagci & Kapdasli (2003). Pero en este estudio, al igual que en el de Verhagen et al. (2002), se plantea la construcción del manto principal del dique dejando caer las piezas desde una altura de 30 cm sobre el nivel del agua. Por ello, al igual que en el caso anterior, no se cree conveniente presentar las conclusiones de este estudio en el presente apartado.

Frens et al. (2008) estudiaron la influencia en la estabilidad hidráulica de cinco métodos de colocación del bloque Antifer en un talud $H/V=2/1$ para diferentes valores de *packing density*. Estos métodos de colocación fueron divididos en irregulares y regulares. El método de colocación irregular o aleatoria se realizó de dos formas, el primero con los bloques Antifer colocados por capa y el segundo por fila. Se probaron cuatro tipos de colocación regulares (ver figura siguiente): método de la columna, método de pirámide llena, método de pirámide cerrada, y colocación de doble pirámide. En la tabla siguiente pueden verse los resultados de coeficientes de reflexión (Cr) y estabilidad hidráulica (a través del coeficiente de estabilidad K_D) para cada método de colocación y rango de *packing densities*.

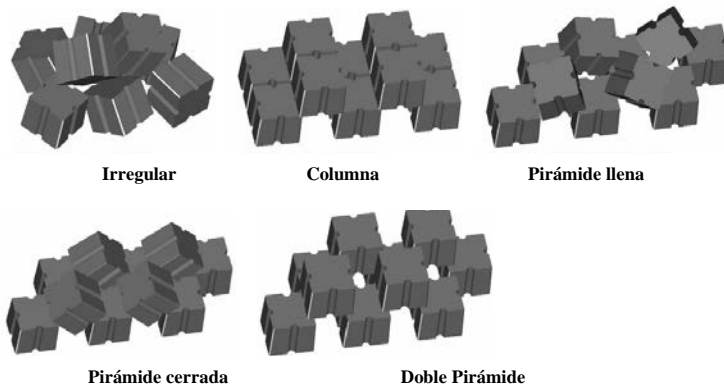


Figura 2.21. Métodos de colocación ensayados por Frens et al. (2008).

Packing densities around 45%				
Placement method	Experiment	Ψ_s (%)	K_D	C_r
Closed pyramid	14	44.8	4.1	0.34
Packing densities around 50%				
Placement method	Experiment	Ψ_s (%)	K_D	C_r
Column	6	49.1	16.3	0.36
Column (under an angle)	8	50.0	9.4	0.36
Closed pyramid	1	49.7	6.4	0.34
Double pyramid ($0\frac{1}{2} \cdot D_n$)	12	49.1	4.0	0.31
Filled pyramid	4	49.1	-	0.31
Packing densities around 55%				
Placement method	Experiment	Ψ_s (%)	K_D	C_r
Double pyramid ($\frac{1}{2} \cdot D_n$)	11	54.3	16.4	0.29
Closed pyramid	13	54.3	16.0	0.35
Double pyramid ($\frac{3}{4} \cdot D_n$)	15	53.9	15.9	0.31
Double pyramid ($\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot D_n$)	10	53.2	15.7	0.31
Double pyramid ($0\frac{1}{2} \cdot D_n$)	17	53.5	13.2	0.32
Irregular (placed per layer)	16	57.4	9.7	0.29
Irregular (placed per row)	2	57.0	9.4	0.30
Column (irregular pos.)	3	54.2	4.0	0.31
Packing densities around 60%				
Placement method	Experiment	Ψ_s (%)	K_D	C_r
Double pyramid ($0\frac{1}{2} \cdot D_n$)	9	58.5	23.7	0.33
Double pyramid (irregular pos.)	7	58.5	16.7	0.31
Irregular (placed per layer)	5	61.1	16.3	0.33

Tabla 2.4. Coeficiente de reflexión y estabilidad hidráulica para los distintos métodos de colocación y *packing densities* ensayados por Frens et al. (2008)

Para valores similares de *packing density*, los métodos de colocación regular presentaron una mayor estabilidad que los de colocación irregular. Un posicionamiento menos preciso de los bloques dentro de un método de colocación regular provoca una disminución en la estabilidad. Una desventaja de los métodos de colocación regulares es que requieren un filtro bien perfilado. Para un mismo método de colocación cuanto mayor es el valor del *packing density* mayor es la estabilidad y los coeficientes de reflexión.

Por todo ello, los autores recomiendan que cuando la capa de filtro esté bien perfilada y se puedan colocar los bloques de forma precisa la construcción debe realizarse con el método de colocación pirámide cerrada para *packing densities* en torno al 45% y el 50%, y el método de colocación doble pirámide para *packing densities* alrededor del 55% y 60%. El último proporciona los resultados más estables de ambos métodos y conduce a coeficientes de reflexión ligeramente inferiores.

Najafi-Jilani y Monshizadeh (2010) estudiaron el efecto sobre el rebase que tienen los métodos de colocación del bloque Antifer para distintos taludes ($H/V=1/1$, $3/2$, $2/1$ y $5/2$). Para ello realizaron ensayos con tres métodos de colocación: colocación regular, en la que los bloques fueron dispuestos con las caras paralelas entre ellos y al talud, lo que ocasionaba un manto poco poroso y poco rugoso; irregular tipo A, basada en rotar alternativamente el bloque Antifer 45° en el plano del talud; e irregular tipo B, basado en la rotación de las piezas alrededor del eje perpendicular al talud, este tipo de colocación podría asimilarse a una colocación aleatoria.

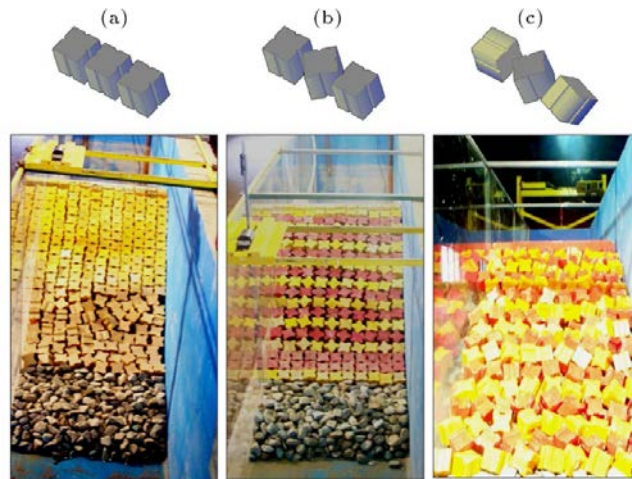


Figura 2.22. Métodos de colocación ensayados por Najafi-Jilani y Monshizadeh (2010). (a) Regular, (b) Irregular tipo A e (c) Irregular tipo B.

Tras los ensayos concluyeron que el rebase está fuertemente influenciado por el método de colocación. De forma que se puede reducir en un 10% o un 20% el rebase si se emplea el método irregular tipo A o B, respectivamente, en lugar del regular.

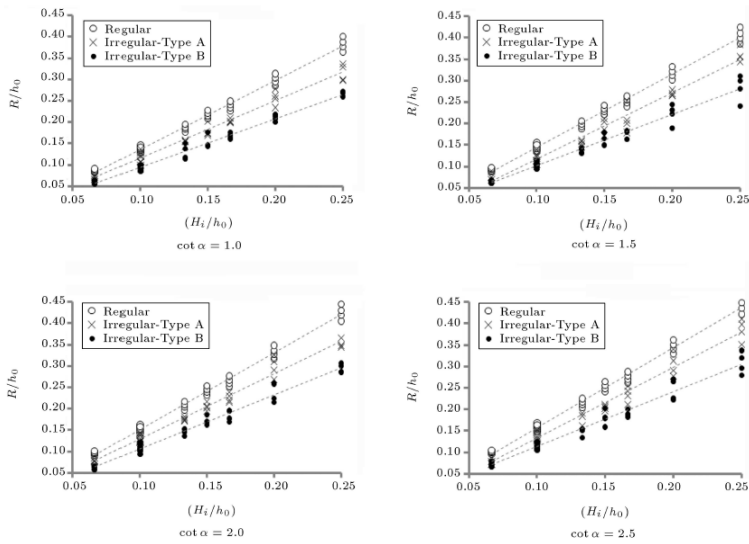


Figura 2.23. Resultados del rebase en función del talud y del método de colocación empleados en los ensayos de Najafi-Jilani y Monshizadeh (2010).

Bayram et al. (2013) estudiaron la influencia sobre la estabilidad hidráulica de dos métodos de colocación del bloque Antifer, ambos con un *packing density* de 1.17, sobre un talud $H/V=2/1$ y una porosidad del 47%. Los métodos ensayados fueron denominados como colocación aleatoria y semi-aleatoria. En la colocación aleatoria cada bloque se colocó según una malla prefijada de coordenadas pero con los bloques dispuestos con diferentes orientaciones con respecto a las piezas vecinas. El espaciado de la malla adoptado empleaba una separación idéntica para X (distancia entre piezas en la dirección de la traza de la estructura) e Y (distancia entre piezas en la dirección del pie a la coronación) de $1.31D_n$. En la llamada colocación semi-aleatoria los bloques se colocaron de acuerdo con una cuadrícula predefinida pero con orientación similar (ranuras perpendiculares al talud). El espaciado de la malla adoptó valores de $1,41D_n$ para la dimensión X y $1.2D_n$ para la dimensión Y .



Figura 2.24. Métodos de colocación ensayados por Bayram et al (2013). Aleatorio (izq.) y semi-aleatorio (dcha.).

El método de colocación aleatoria presentó una mayor estabilidad que el semi-aleatorio, según los autores debido a que exhibía un mayor grado de trabazón entre las piezas y con la capa inferior, previniendo el deslizamiento y la ordenación de las piezas cara contra cara.

Freitas (2013) estudia la influencia en la estabilidad hidráulica de tres métodos de colocación del bloque Antifer, todos ellos sobre talud $H/V=3/2$, con una porosidad del 50% y con la primera capa de elementos colocados según una malla regular.

El primer método es denominado Semi-irregular y se basa en la construcción de 4-5 filas de la primera capa según una malla regular y 4-5 filas de la segunda capa colocando los bloques encima de los huecos de la primera capa. La distancia entre piezas en la dirección de la traza de la estructura era $X= 1.86D_n$ y entre piezas en la dirección del pie a la coronación de $Y= 1.08D_n$. Este método resulta ser el de menor estabilidad hidráulica ($K_D=2.1$) debido al bajo efecto de trabazón entre piezas. Sin embargo también es el que refleja menos el oleaje.

El segundo método denominado como colocación regular 1 consiste en construir el manto fila por fila, es decir, colocación de la primera fila de la primera capa seguida de la primera fila de la segunda capa, y así sucesivamente. La primera capa se coloca según una malla regular y los de la segunda capa se colocan en los huecos que dejan los de la primera capa pero de forma diagonal, alternando el sentido en cada fila. La distancia entre piezas era la misma que para el anterior método, $X= 1.86D_n$ e $Y= 1.08D_n$. Con este método se consigue una mayor trabazón, lo que aumenta significativamente la estabilidad hidráulica ($K_D=5.8$). Por otro lado, es el método con mayor coeficiente de reflexión.

El tercer método denominado como colocación regular 2 es idéntico al regular 1 pero aumentando la distancia entre piezas, siendo $X= 2.02D_n$ e $Y= 1.08D_n$. Este método consigue una buena trabazón, pero menor que el anterior, con lo que la estabilidad hidráulica también resulta inferior ($K_D=4.0$).

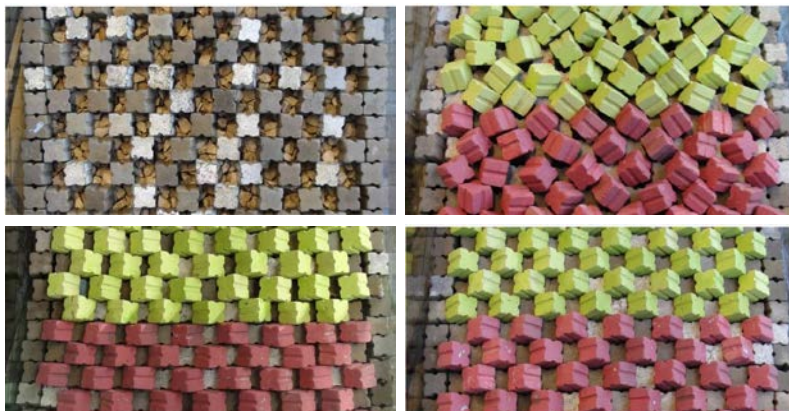


Figura 2.25. Métodos de colocación ensayados por Freitas (2013). Primera capa (arriba izq.), semi-irregular (arriba dcha.), regular 1 (abajo izq.) y regular 2 (abajo dcha.).

2.4.7. El Accropode™

Tanto el Accropode™ como el Accropode™ II son elementos patentados por la empresa *Sogreah* y explotados por *Concrete Layer Innovations* (CLI), ellos son los encargados de proporcionar las mallas de colocación específicas para cada obra en la que se coloquen. El Accropode™ se coloca siguiendo una serie de reglas de colocación estrictas para garantizar la trabazón entre las piezas, las cuales son colocadas siguiendo una malla predefinida que marca las coordenadas de cada elemento. Las piezas deben colocarse deliberadamente con orientaciones distintas de las de las vecinas para asegurar un buen grado de trabazón, lo cual es complicado debajo del agua. Normalmente esto se consigue empleando distintos métodos de eslingar los elementos, mediante el uso de buzos que guíen las maniobras y con la experiencia del operador de grúa. Además, en la actualidad existen nuevas tecnologías que permiten al operador de grúa tener una visión 3D en tiempo real de lo que ocurre bajo el agua, como por ejemplo el sistema *Posibloc* o *Echoscope*, comentados en apartados posteriores.

Debido a la patente y a la poca divulgación científica sobre las mallas de colocación del Accropode™, no se han encontrado artículos de investigación que traten esta materia. En las especificaciones técnicas del Accropode™ (CLI, 2011a) se pueden encontrar unas indicaciones básicas sobre su colocación:

- Las piezas son colocadas en una sola capa y ningún bloque debe quedar fuera del perfil (menos de 1/3 de la pieza debe sobresalir del perfil exterior del manto).
- Cada pieza está en contacto con la capa inferior.
- Las piezas deben estar trabadas unas con otras, de forma que no sean libres para moverse.
- Las mallas de colocación se emplean en todo el manto, aunque excepciones locales son tolerables.
- Las piezas deben colocarse con orientaciones variadas.
- La primera fila de piezas debe ser colocada con la mayor precisión posible. La tolerancia máxima con respecto a las coordenadas que fije la malla es $H/12$, siendo H la altura característica del Accropode™.

La única referencia a una malla de colocación del Accropode™ se ha encontrado en el informe de *Manly Hydraulics Laboratory* (1997) sobre la estabilidad del dique de Ballina (Australia). La malla empleada para la construcción de su manto puede verse en la figura siguiente y se basa en un talud $H/V=4/3$, una separación horizontal $M1=1.24h$ y una distancia entre filas horizontales $M2=0.6h$, siendo h la altura característica del Accropode™.

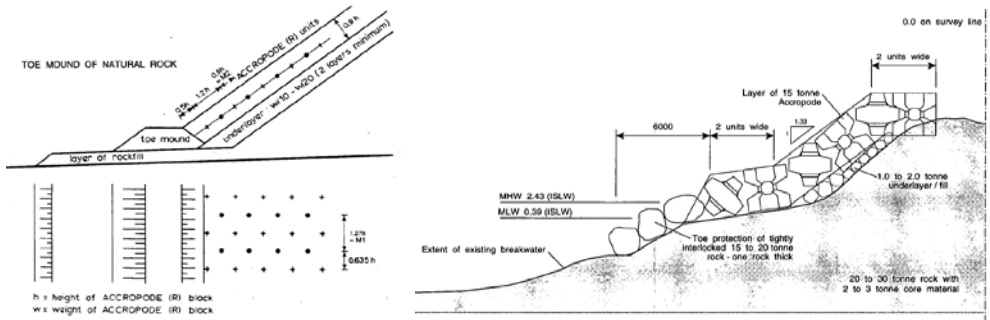


Figura 2.26. Malla de colocación de Accropode™ diseñada para el dique de Ballina según *Manly Hydraulics Laboratory* (1997).

2.4.8. El Core-Loc™

El elemento Core-Loc™ fue desarrollado por la *US Corps of Engineers* y, al igual que el Accropode™, la licencia de explotación la tiene la empresa CLI, excepto en Japón, Norte América, México y algunos estados de África del Sur. En las especificaciones técnicas del Core-Loc™ (CLI, 2011b) se dan unas indicaciones básicas sobre su colocación, las cuales son idénticas a las ya comentadas para el Acrópedo™. Debido a la patente de la pieza, CLI es la encargada de proporcionar las mallas de colocación específicas para cada obra. Sin embargo, a diferencia del elemento Accropode™, en el caso del Core-Loc™ sí que es posible encontrar artículos técnicos donde se ha estudiado su método de colocación.

Turk y Melby (1997) aseguran que la parte más vulnerable del manto es el pie, por lo que hay que tener especial cuidado en colocar las dos primeras filas de elementos. Aunque es posible su colocación aleatoria aconsejan que se coloquen de forma regular, ya que así se aumenta su estabilidad. Su recomendación consiste en colocar la primera fila con los elementos muy juntos y en posición de “cañón”; la segunda fila se coloca sobre la primera con la parte central del elemento entre las patas de las piezas de la primera fila.

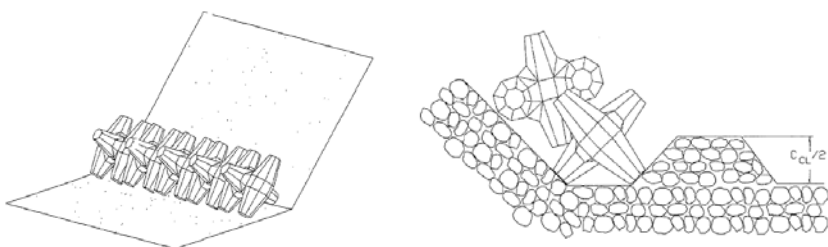


Figura 2.27. Método de colocación del pie del manto de Core-Loc™ recomendado por Turk y Melby (1997). Primera fila (izq.) y dos primeras filas (dcha).

Una vez las dos primeras filas están colocadas de manera regular, el resto del manto se construye de forma aleatoria mediante una malla de colocación prefijada definida por las distancias entre elementos de la misma fila (D_H) y elementos de filas contiguas medidas en el plano del talud (D_U). Según los autores, para conseguir el máximo grado de trabazón, la distancia máxima entre piezas no debe superar el 110% de las establecidas en la tabla siguiente.

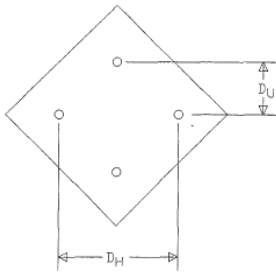


Table 2 Specifications for Placement Grid Coordinates			
Volume (m ³)	≤ 5 m ³	6.3-12 m ³	14-22 m ³
P. D. Coefficient, ϕ	0.60	0.56	0.54
D_H	1.11C	1.15C	1.18C
D_U	0.55C	0.57C	0.59C

Figura 2.28. Mallas de colocación de Core-LocTM recomendadas por Turk y Melby (1997) en función del tamaño de la pieza (C).

Özkan Cevik et al. (2005) estudiaron la estabilidad de una estructura monocapa armada con Core-LocTM y talud $H/V=3/2$ para diferentes tipos de colocación bajo oleaje regular y condiciones de *Breaking* y *Non-Breaking*. Los tipos de colocación fueron: regular ($P=61\%$) y aleatoria ($P=63\%$).

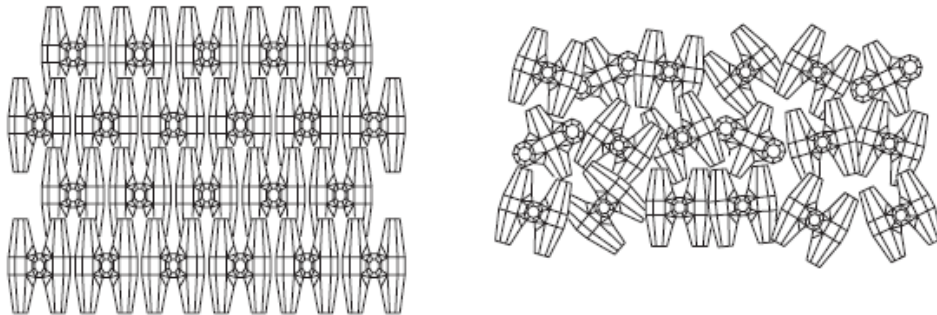


Figura 2.29. Tipos de colocación ensayados por Özkan Cevik et al. (2005) Colocación regular (izq.) y aleatoria (dcha).

El análisis de los ensayos desarrollados por los autores reflejó los siguientes resultados:

- El inicio de averías se presenta primero en el tipo de colocación regular.
- El daño relativo en el tipo de colocación regular es en general más pequeño que para el aleatorio bajo las mismas condiciones de oleaje. Sin embargo, el fallo ocurre con olas más pequeñas en el caso regular, por tanto el aleatorio tiene más estabilidad, tal y como reflejan los coeficientes de estabilidad

obtenidos para oleaje regular: para colocación regular $K_D=16.04$ y para colocación aleatoria $K_D=17.17$.

- A medida que avanzan los ensayos el tipo de colocación regular se va convirtiendo en el tipo aleatorio.
- La elevación (*run-up*) y descenso (*run-down*) de la lámina de agua es mayor para el caso de colocación regular que para el aleatorio.

Besley y Denechere (2009) dan una serie de reglas para la colocación de Core-LocTM, de las que cabe destacar las siguientes: las piezas deben ser colocadas en una sola capa y según una malla en forma de diamante; la forma de eslingar las piezas y su inclinación debe ser variada; deben colocarse de manera aleatoria de forma deliberada, con las orientaciones distintas de las de las piezas vecinas; cada pieza debe estar entre dos unidades de la fila inferior; dos piezas adyacentes no pueden tener partes centrales paralelas; y no pueden colocarse más de 15 filas en el talud del manto.

Anastasaki et al. (2013) diseñaron un nuevo método de colocación del Core-LocTM a través de un modelo numérico. Después de estudiar varios ensayos de colocación, los autores concluyeron que los mantos aleatorios de Core-LocTM están basados en cuatro tipos de orientación de los elementos. Mediante una herramienta informática, llamada *FEMDEM code Y3D*, estudiaron la colocación de un manto de Core-LocTM de 8m³ sobre un talud $H/V=4/3$ y con una malla de colocación recomendada para ese volumen basada en los cuatro tipos de orientación, concluyendo que dicha malla era aplicable a la construcción real.

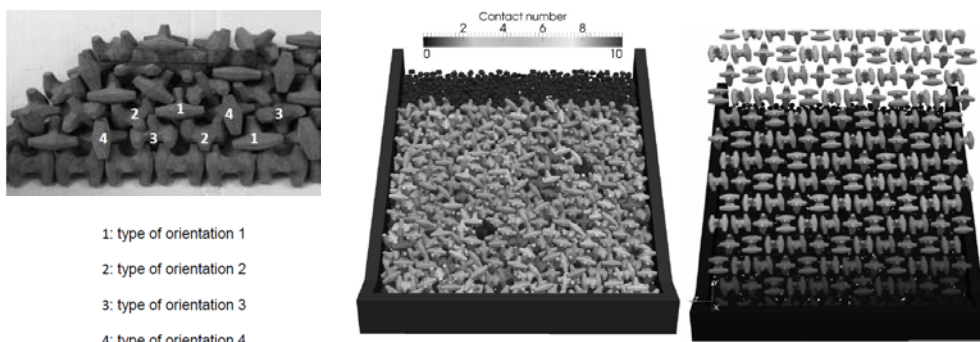


Figura 2.30. Tipos de orientación y malla de colocación de Core-LocTM definidos por Anastasaki et al. (2013).

2.4.9. El Xbloc[®]

El Xbloc[®] fue desarrollado por *Delta Marine Consultants* (DMC), siendo esta misma empresa la que se encarga de su comercialización y asistencia técnica. Según su web, el Xbloc[®] se debe colocar de forma aleatoria siguiendo las coordenadas marcadas por una malla de colocación, proporcionada por DCM para cada proyecto. Cada pieza debe ser colocada encima de dos de la fila inferior, y siempre deben estar en contacto

con la capa de filtro. Según DCM no hay restricciones con respecto a la orientación de las piezas, pero sí es importante que las piezas se coloquen con diferentes orientaciones.

El Xbloc[®] cuenta con una guía de diseño muy completa, realizada por DMC (2014), en la que especifica los criterios básicos de diseño del manto:

- Establece las distancias entre elementos de una misma fila y la distancia entre filas medidas en el plano del talud para Xbloc[®] de distintos tamaños.
- Limita el máximo número de filas a 20 para prevenir asientos excesivos de las piezas.
- Define la berma de pie que sirve de apoyo del manto.
- Recomienda colocar por lo menos dos filas de unidades en la berma superior del manto.
- Establece que el radio mínimo de los morros sea de $2.5H_s$ (altura de ola de cálculo) medidos en el nivel máximo de agua, así como un radio mínimo para la colocación de $5.9D$, siendo D la dimensión característica de la pieza.
- Para transiciones entre tamaños de Xbloc[®] establece un límite del doble de tamaño de una pieza con respecto a la otra.

Al igual que para el Core-Loc[™], en el caso del Xbloc[®] sí que existe cierta divulgación científica con respecto a sus métodos de colocación.

Muttray et al. (2005) investigaron sobre la colocación de Xbloc[®] en una sola capa en un dique en talud ($H/V=4/3$). En esta investigación se estudió, entre otras, la forma de colocar las unidades mediante eslingas y el efecto de la colocación en la estabilidad hidráulica y los asientos. Además, también estudiaron la trabazón de dichas piezas.

Las dos formas de eslingar las piezas que se emplearon fueron: método I, Xbloc[®] eslingado de cualquiera de las patas que forman la base en forma de “X”; método II, Xbloc[®] eslingado mediante una de sus dos patas cúbicas.

De los ensayos desarrollados extrajeron que:

- Con el método I era más fácil conseguir el *packing density* deseado (según los autores de valor igual a $1.20/D^2$, siendo D la longitud característica de la pieza) que con el método II, por lo que fue este el que recomendaron para la construcción con Xbloc[®] en situaciones reales.
- La estabilidad del manto principal se incrementa significativamente con el aumento del *packing density*. Además, este parámetro también afecta a los asientos de las piezas, de forma que para valores cercanos o superiores a un *packing density* de $1.20/D^2$ no se producen asientos, produciéndose éstos para valores inferiores.

Con respecto a la determinación de la trabazón de dichas unidades llevaron a cabo un total de 53 *pull-out test*, ensayos de extracción de piezas, sobre un talud $H/V=1.5/1$. La probabilidad de ocurrencia y excedencia pueden verse en la figura siguiente, ambas

representadas frente a la relación de la fuerza de extracción entre el peso de las unidades. La fuerza de extracción está en torno a 7 veces el peso de la pieza, mientras que para el caso de escollera, estudiado por Hald y Burcharth (2000), y también graficado, está en torno a 1.8 veces el peso de la unidad.

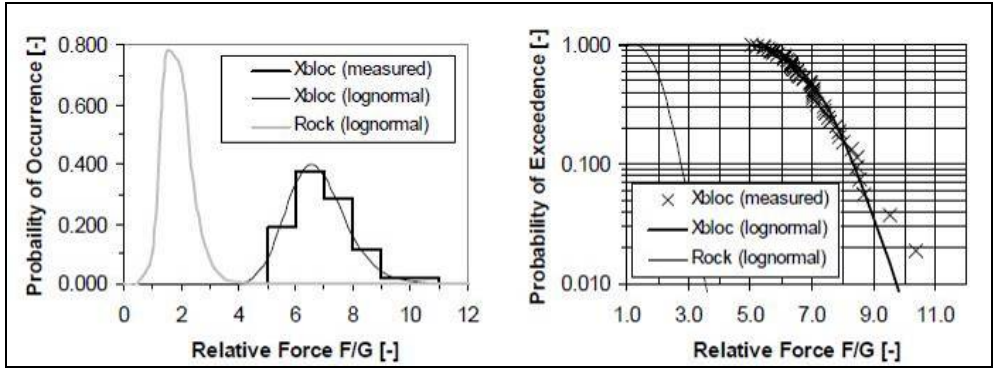


Figura 2.31. Resultados del ensayo de extracción de Muttray et al. (2005).

Oever et al. (2006) continuaron con los estudios sobre la colocación de las piezas Xbloc[®] en diques en talud. Para ello llevaron a cabo una serie de ensayos de construcción siguiendo una malla con forma de diamante predeterminedada y utilizando dos formas de eslingar las piezas.

Las dos formas utilizadas para eslingar las piezas fueron: forma I, eslingar el elemento de forma que una única pata de las forman la base en forma de “X” mire hacia abajo; forma II, eslingar el elemento de forma que tenga tres puntos mirando hacia abajo (dos patas de las que forman la base en forma de “X” y una de las patas cúbicas).

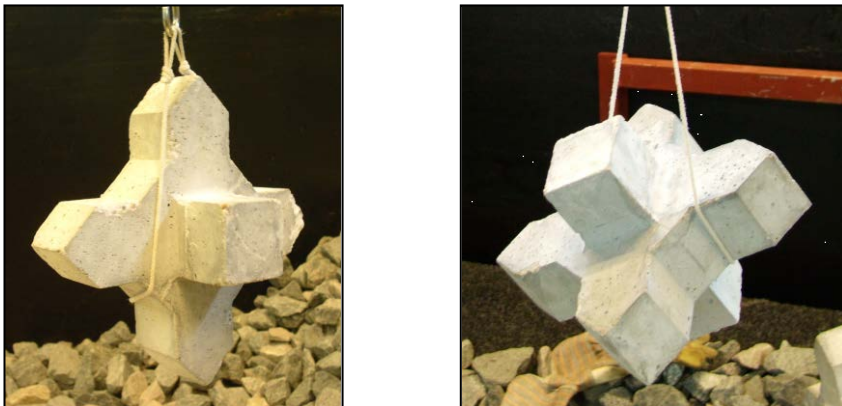


Figura 2.32. Formas de eslingar los Xbloc[®] según Oever et al. (2006). Forma I (izq.) y Forma II (dcha.).

Durante los ensayos, los autores decidieron realizar las construcciones de los mantos colocando la primera fila de elementos mediante la forma II de eslingado y el resto con la forma I, puesto que de este modo se conseguían mantos mejor acabados

Los ensayos se centraron en observar la influencia del control de la orientación de la pieza eslingada, es decir, del control o no de la rotación de los elementos en el eje de izado a la hora de posicionarlos sobre el talud. Como conclusiones más relevantes de la investigación destacan las siguientes:

- Es posible la colocación de Xbloc[®] mediante una malla de coordenadas predefinidas.
- En general, la calidad de la construcción con orientación de la pieza eslingada es muy superior a la ejecutada con ausencia de la misma. Además, en la primera no se producen errores acumulativos de colocación, no siendo así en la segunda, donde hay una clara diferencia de calidad entre las primeras y las últimas filas de elementos. Por lo que se considera necesario el control de la orientación de la pieza para la construcción real.
- En la construcción con orientación de las piezas hay una clara dependencia de las distancias horizontales y sobre el talud entre los elementos. Cuando una aumenta significativamente, la otra se ve reducida y viceversa.

En el caso particular de los morros, donde a medida que se avanza con la construcción no es posible colocar las piezas según una malla de colocación recta, Oever et al. (2006) propusieron un método para colocar los Xbloc[®] que no caben en su posición inicial en otra nueva posición generada como consecuencia de la modificación de las coordenadas de colocación de las piezas vecinas. Para ello se estudió la distancia necesaria a la que hay que poner las piezas fuera de sus coordenadas originales para que se mantengan fuera de ellas, en lugar de rodar para ocupar la posición que les correspondería. Llegando a la conclusión de que la colocación de piezas fuera de sus centros de posición es posible, pero para ello se necesita que la distancia fuera de la posición sea $\geq 0.2D$.

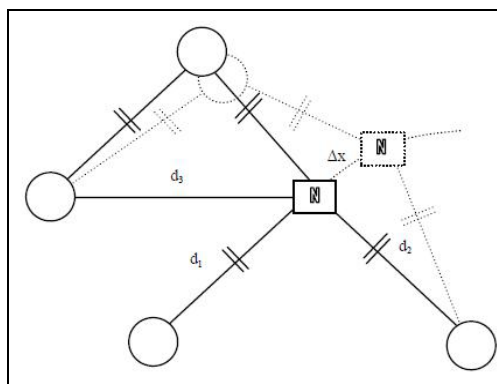


Figura 2.33. Mecanismo para mover una pieza fuera de su posición inicial en morros según Oever et al (2006).

El mecanismo para mover la unidad fuera de la posición inicial está condicionado por la distancia entre la pieza vecina horizontal y la siguiente unidad a colocar. Cuando la distancia d_3 llega a ser demasiado pequeña para colocar la unidad de la fila superior en medio de las unidades de la fila inferior, la unidad N se desplaza una distancia Δx a lo largo de la curva con radio d_2 para crear más espacio para la nueva unidad. La distancia a la que la unidad es colocada fuera del centro está condicionada principalmente por la distancia d_3 . Cuando la unidad ha sido desplazada una distancia considerable, la cual es fijada por los autores en $0.4D_n$, la pieza debe dejarse fuera, es decir, no colocarla. Posteriormente, Nik Mohd Kamel (2007) recomendó que esta distancia pasara de $0.4D_n$ a $0.3D_n$.

Van der Bergen et al. (2007) presentaron una variante del Xbloc[®] para ser utilizada en la primera fila del manto, llamada Xbase[®]. La cuál tiene la geometría de un Xbloc[®] pero le falta una de sus patas cúbicas, de forma que la parte en forma de “X” de la pieza se coloca hacia abajo. Este nuevo elemento es menos propenso a girar y ofrece una mayor fricción con el material sobre el que apoya, lo que le confiere una mayor estabilidad al pie del manto y por lo tanto a toda la estructura.

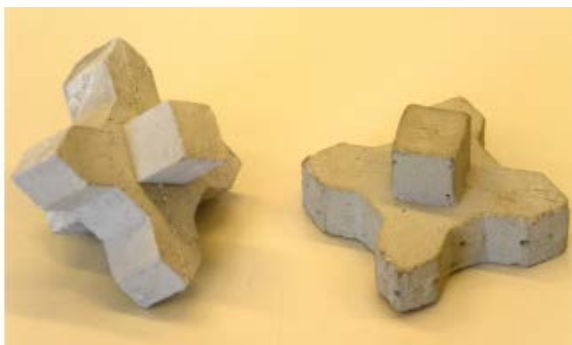


Figura 2.34. Elemento Xbloc[®] (izq.) y Xbase[®] (dcha.). (Fuente: Van der Bergen et al., 2007)

2.5. Construcción de mantos principales

2.5.1. Introducción

Independientemente de la naturaleza de las piezas empleadas para la construcción del manto principal de un dique en talud, ya sean escolleras naturales o elementos de hormigón prefabricados, se presentan una serie de pautas comunes, que son:

- Como norma general la construcción del dique debe realizarse a sección completa, de forma que las capas inferiores queden protegidas de la acción del oleaje por las piezas del manto.
- Se debe redactar un procedimiento de protección de la obra en ejecución cuando se prevea la llegada de olas con altura significativa mayor a la

establecida para el umbral de daños tolerables de las distintas capas del dique. En general, es conveniente mantener acopios de elementos de protección en obra que permitan una rápida protección de los taludes ante la previsión de condiciones extremas.

- Siempre que sea posible se debe realizar la colocación de piezas desde tierra, por su mayor economía, facilidad y rendimiento. La colocación con medios marítimos es posible con grúas sobre pontonas, sin embargo resulta más cara y por ello se suele emplear solamente cuando las condiciones de la obra impiden la colocación desde tierra.
- Debe disponerse de una buena información meteorológica, así como un buen conocimiento de las mareas y temporales (alturas de ola, duración, viento, etc.).
- Las piezas deben quedar colocadas de forma que se consiga una porosidad homogénea en todo el manto para evitar puntos débiles.
- Los elementos que resulten rotos como consecuencia de su transporte, manipulación o colocación, no deben formar parte del manto, puesto que pueden comprometer la estabilidad del mismo.
- El empleo de buzos durante la colocación de las piezas puede ser necesario, sin embargo, se recomienda que los métodos de colocación planteados no requieran el uso de los mismos para evitar riesgos laborales.
- La colocación debe ejecutarse con un talud bien refinado, dejando su superficie de acuerdo con la tolerancia y con la pendiente prevista en el proyecto y en función de las especificaciones de cada tipo de elemento.
- La colocación debe realizarse con líneas de avance de 45° en planta para ir abrigados, de menor a mayor ángulo vertical (de las filas inferiores a las superiores) y de menor a mayor ángulo horizontal (medido con respecto a la dirección de avance del dique).

A continuación se nombran los factores más importantes que influyen en la colocación de las piezas del manto principal:

- Método de colocación.
- Tipo y naturaleza del elemento de protección.
- Peso del elemento de protección.
- La porosidad de diseño.
- Maquinaria y método de manipulación empleado (eslingas, pinzas, etc.).
- El refinado de la capa de filtro.
- La existencia o no de berma de pie.

- Las condiciones climáticas: características del oleaje (altura de ola y periodo principalmente), fuerza y dirección el viento, precipitaciones, etc.
- El factor humano (como por ejemplo la experiencia del operador de grúa)

Las figuras siguientes describen gráficamente los trabajos que se deben llevar a cabo para la construcción de un dique en talud, incluyendo la colocación del manto principal.

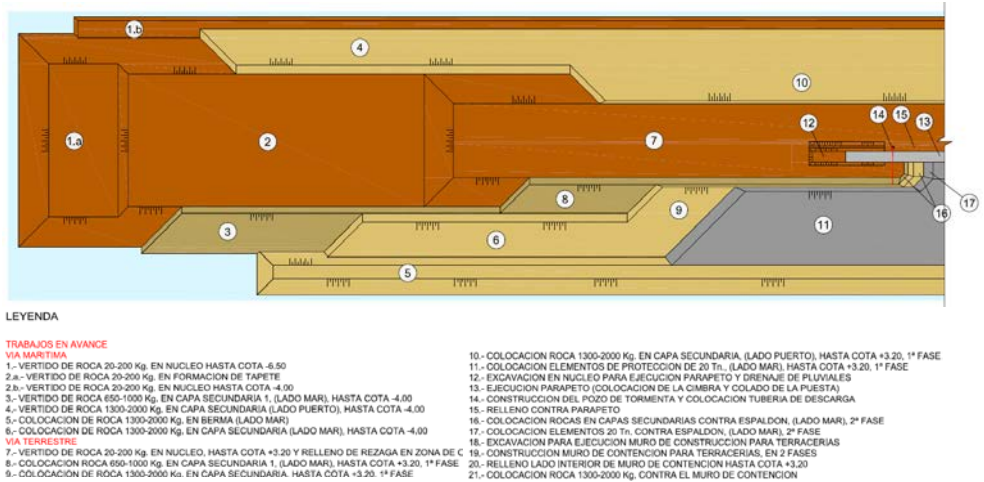


Figura 2.35. Esquema de avance de un dique en talud. (Fuente: empresa SATO)

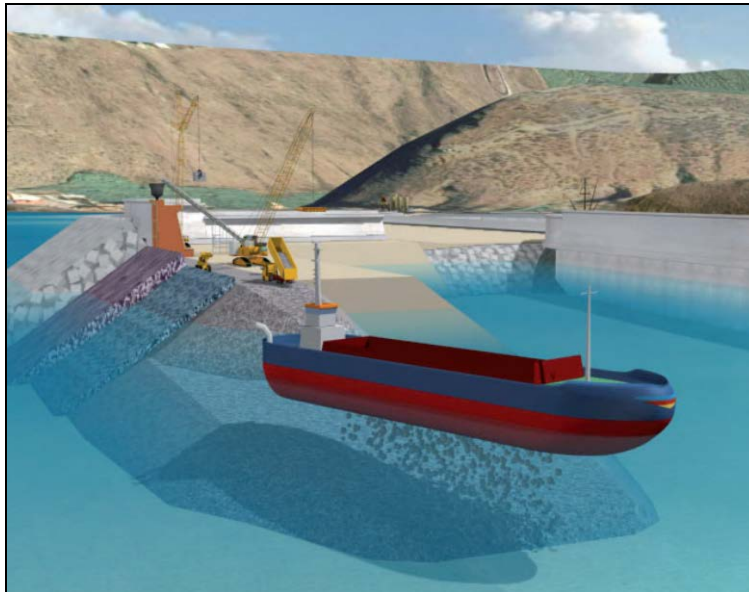


Figura 2.36. Vista 3D del proceso constructivo de un dique en talud. (Fuente: Guía de Buenas Prácticas para la Ejecución de Obras Marítimas, 2008)

2.5.2. Colocación de elementos de protección en el manto principal

El manto principal es la capa que proporciona la estabilidad a un dique en talud, por ello es de vital importancia colocar los elementos que lo conforman correctamente. Cuando estos elementos son escolleras naturales de pesos inferiores a las 3 toneladas puede emplearse para su colocación retroexcavadoras con brazos largos, sin embargo cuando este peso es mayor o se trata de elementos prefabricados de hormigón se hace necesario el empleo de grúas de gran tonelaje. Estas grúas permiten la colocación de elementos naturales y artificiales de notable envergadura y peso a un alcance grande. Sin embargo, estos equipos representan un coste muy elevado para la obra, por lo que debe optimizarse el proceso de colocación.



Figura 2.37. Grúa de gran capacidad sobre raíles durante la construcción del dique Príncipe de Asturias (Puerto de Gijón). (Fuente: empresa SATO)

La forma de colocación de los elementos prefabricados de hormigón depende de las características de éstos, si son masivos, si trabajan principalmente por trabazón o si son huecos. El método de colocación de cada uno puede variar, pero todos ellos deben colocarse siguiendo un plan de colocación y sistematización para simplificar el proceso.

Las colocaciones específicas, tipo bloques monocapa, requieren un control y seguimiento especial del manto, ya que la capacidad resistente es función de la forma de colocación.

Es recomendable estudiar la posición que deben ocupar las piezas antes de ser tomadas por la grúa, con objeto de optimizar los movimientos de la misma, sobre todo los de izar y arriar. Es importante sistematizar la colocación, el plan de colocación debe

indicar claramente el orden de colocación, el número de capas, las distancias relativas y las coordenadas de las piezas.

En la actualidad la colocación de las piezas con grúa se facilita instalando un lector GPS (*Global Positioning System*) en la cabeza de la pluma, que junto a un programa informático de colocación instalado en la cabina permite al operador de grúa colocar la pieza en las coordenadas asignadas por la malla de colocación. Antes de la aparición del GPS, en el caso de mantos de piezas especiales tipo AccropodeTM donde la correcta colocación de las piezas es de vital importancia, se podía colocar en la grúa un sistema de coordenadas mediante un transportador de ángulos en la base fija de la pluma y conociendo la longitud e inclinación de la pluma.



Figura 2.38. Tecnología en la colocación de piezas en el manto principal. GPS colocado en grúa (izq.) y programa informático de colocación en cabina operador (dcha.). (Fuente: propia)



Figura 2.39. Grúa con transportador de ángulos durante la construcción del dique de la dársena de El Saladillo (Puerto de Algeciras), antes de la aparición del GPS. (Fuente: empresa FCC Construcción)

Actualmente están apareciendo nuevos métodos que proporcionan al operador de grúa una visión 3D y en tiempo real de cómo está quedando el manto a medida que lo construye. Como por ejemplo el sistema *POSIBLOC*, desarrollado por la consultora *Sogreah* junto con *MESURIS* en 2008. El sistema se basa en disponer a cada unidad a colocar una baliza registradora que manda información acerca de su posición real al operario de la grúa. Dicha baliza es fácil de instalar en las piezas y de retirar cuando éstas estén posicionadas, basta con tirar de ellas por medio de cabrestantes.

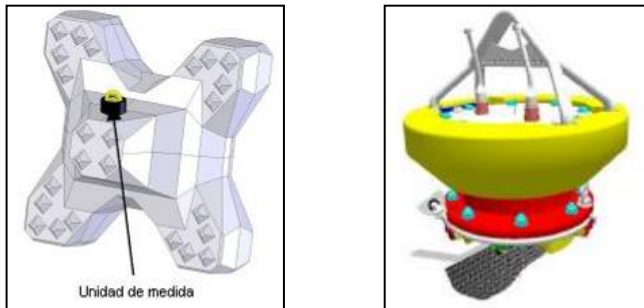


Figura 2.40. Accropode II con baliza registradora (izq.). Baliza registradora (dcha). (Fuente: empresa *Concrete Layer Innovations*)

La información emitida por la baliza registradora es transmitida a la cabina de la grúa, donde un sofisticado software reproduce en 3D, y en tiempo real, el estado en que está quedando el manto principal, graficando la posición y orientación de cada pieza. De este modo, el operario de la grúa cuenta con una valiosa información, puesto que ve la posición real donde coloca cada pieza, pudiendo modificar la misma a placer.

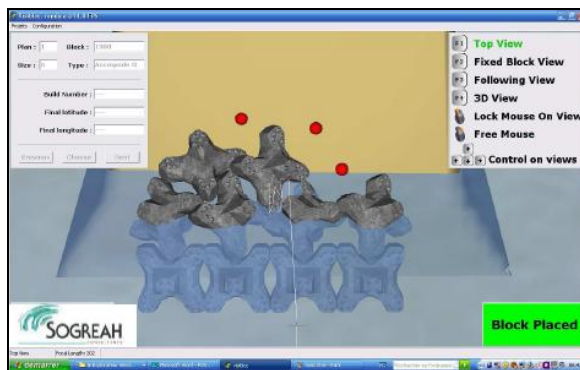


Figura 2.41. Pantalla que proporciona el *POSIBLOC* al operario de la grúa. (Fuente: empresa *Concrete Layer Innovations*)

Otro sistema de visualización 3D en tiempo real es el *Echoscope*, desarrollado por la empresa *CodaOctopus*. Este sistema se basa en un sonar que emite señales acústicas que permiten obtener una imagen precisa de la construcción del manto bajo el agua.

Esta tecnología puede emplearse junto con un sistema de control de rotación de las piezas eslingadas, de forma que no es necesario el empleo de buzos para la colocación de piezas que necesiten controlar su orientación.



Figura 2.42. Sistema *Echoscope* y sistema de control de rotación para colocación de elementos de protección bajo el agua. (Fuente: Gelderen y Auld, 2009)

Según la Guía de Buenas Prácticas para la Ejecución de Obras Marítimas (Puertos Del Estado, 2008), la secuencia de colocación de las piezas prefabricadas de hormigón es:

1. Comprobar la geometría de la capa de escollera (y de la berma de pie en el caso de existir) sobre la que asienta y, en su caso, rectificar la misma.
2. Colocar las piezas a partir de una malla predeterminada y confeccionar un listado con las piezas a colocar con indicación del orden, el número de fabricación de cada pieza y las coordenadas del punto donde se debe situar.
3. Introducir los datos en el programa informático para dirigir los movimientos robotizados de la grúa en la colocación de las piezas.



Figura 2.43. Colocación de elementos de protección en el dique de San Andrés (Puerto de Málaga). (Fuente: propia)

2.5.3. Manipulación de elementos de protección

Tradicionalmente la utilización de escollera no requería medios muy especializados para su manipulación. Era suficiente con camiones o *Dumpers* para su transporte y retroexcavadoras o grúas con bandeja para su colocación por medios terrestres; o gánguiles y/o grúas o retroexcavadoras sobre pontona para su colocación por vía marítima.



Figura 2.44. *Dumper* transportando escollera (izq.). Gánguil cargado (centro). Retroexcavadora (dcha.). (Fuente: Guía de Buenas Prácticas para la Ejecución de Obras Marítimas, 2008)

Con la aparición de los nuevos elementos prefabricados de hormigón para la formación de los mantos principales de diques en talud se desarrollaron una serie de técnicas y tecnologías para posibilitar la colocación de los mismos en obra. La manipulación de estos elementos está condicionada fundamentalmente por su forma y peso.

A continuación se detallan algunas de las tecnologías aplicadas a los diferentes medios de elevación (grúas fijas, móviles, puentes grúa, etc.) para manipular las piezas, ya sea para su colocación en el manto del dique o para su correcta gestión dentro del parque de fabricación y almacenamiento:

- Cadenas, con grilletes o ganchos que se conectan a unas “asas” que previamente se han instalado en las piezas de hormigón por distintos procedimientos (roscando unas piezas a modo de “asas” a unos casquillos embebidos; cables metálicos, trozos de eslinga o barras metálicas ancladas en la masa de hormigón; bulones anclados mediante inyección de resina, etc.). Estos procedimientos de elevación se recomiendan cuando el número de piezas a movilizar es pequeño y cuando las piezas se coloquen de forma provisional para ser retiradas posteriormente. Además, permiten fabricar y/o colocar las piezas adosadas unas a otras.



Figura 2.45. Colocación de bloque mediante cadenas conectadas a asas embebidas. (Fuente: empresa SATO)

- Cadenas, eslingas o bandas textiles de alta resistencia, que abrazan las piezas de hormigón. Los extremos de estas cadenas, eslingas o bandas se conectan con grilletes a los sistemas de elevación. Las operaciones utilizando este método son lentas, requieren mayor personal (además del operador de grúa es necesario como mínimo otro operario para eslingar la pieza), pero por el contrario las inversiones necesarias son muy reducidas. Suelen emplearse en piezas de geometrías complejas formadas por varios brazos.



Figura 2.46. Accropode™ II (izquierda), Accropode™ I (centro) y Xbloc® (derecha) izados con eslingas. (Fuente: izq. y central *Concrete Layer Innovations* y dcha. Reedijk et al. 2005)

- Llaves con forma de T invertida, que se introducen en unos alojamientos dejados al efecto en las piezas y al girar se fijan o liberan. Estas llaves actúan sobre la cara superior de las piezas permitiendo adosarlas tanto en la fabricación como en la colocación, sin embargo deben colocarse en pendientes inferiores al 15% para poder liberar o colocar una llave. Este sistema es adecuado para los bloques de guarda de las banquetas al pie de los cajones, ya que permiten adosar los bloques a la pared del cajón y entre sí y se puede liberar el enganche sin la necesidad de buzos.



Figura 2.47. Colocación de bloque mediante llaves con forma de T invertida. (Fuente: empresa SATO)

- Pinzas de presión, son unos mecanismos que sujetan las piezas por los laterales, que al ejercer una presión sobre ellas posibilitan su elevación por rozamiento. Sus principales características son: las operaciones son muy rápidas, necesita muy poca mano de obra (únicamente el operador de grúa), el diseño y construcción de las pinzas es costoso, y el peso de las pinzas obliga a disponer de grúas con capacidad de carga suficiente para el peso conjunto de la pieza y de la pinza. Este tipo de sistema de manipulación está indicado para piezas de forma cúbica, tipo cubo, bloque, Antifer o Cubípodo. Existen una gran variedad de modelos de pinzas y con alguna de ellas se pueden recuperar bloques ya colocados.



Figura 2.48. Distintos tipos de pinzas para manipulación de bloques de hormigón cúbicos. (Fuente: Guía de Buenas Prácticas para la Ejecución de Obras Marítimas, 2008)



Figura 2.49. Pinzas de presión para manipulación de cubos y Cubípodos. (Fuente: empresa SATO)

- Pulpos, son unos mecanismos que disponen de varios brazos capaces de coger las piezas. Al igual que las pinzas su funcionamiento se fundamenta en ejercer presión sobre la pieza, que al ser izada genera un rozamiento que posibilita su elevación. Son utilizados principalmente en la colocación de escollera natural, aunque también pueden colocar piezas prefabricadas robustas y de formas sencillas, sin brazos esbeltos. También suelen ser empleadas para la recuperación de piezas.



Figura 2.50. Pulpos para recuperación y colocación de elementos de protección. (Fuente: empresa SATO)

La manipulación de las piezas de forma compleja se debe ajustar a los procedimientos y recomendaciones del diseñador en cuanto a la resistencia mínima necesaria del hormigón, a los puntos de enganche de la pieza o a los sistemas de volteo cuando sean requeridos.

2.6. Repercusión económica del manto principal

En cuanto a la repercusión económica que supone la construcción del manto principal de un dique en talud con respecto al coste total de la estructura es muy disperso en función de la fuente utilizada. Esto es debido a que el coste de un dique en talud está muy influenciado por las características particulares de diseño (clima, cotas de coronación, tipo y cantidad de elementos de protección, peso de los mismos, del plan de colocación, los medios empleados, etc.) y por las condiciones del entorno en el que se construye (costes y disponibilidad de los materiales, coste del transporte, etc.).

A continuación se muestra un estudio económico de nueve proyectos españoles que contaban con la construcción de un nuevo dique en talud. En dicho estudio se han analizado los presupuestos de los proyectos base de cuatro obras desarrolladas en el mar Cantábrico, dos en Canarias y tres en el Mediterráneo.

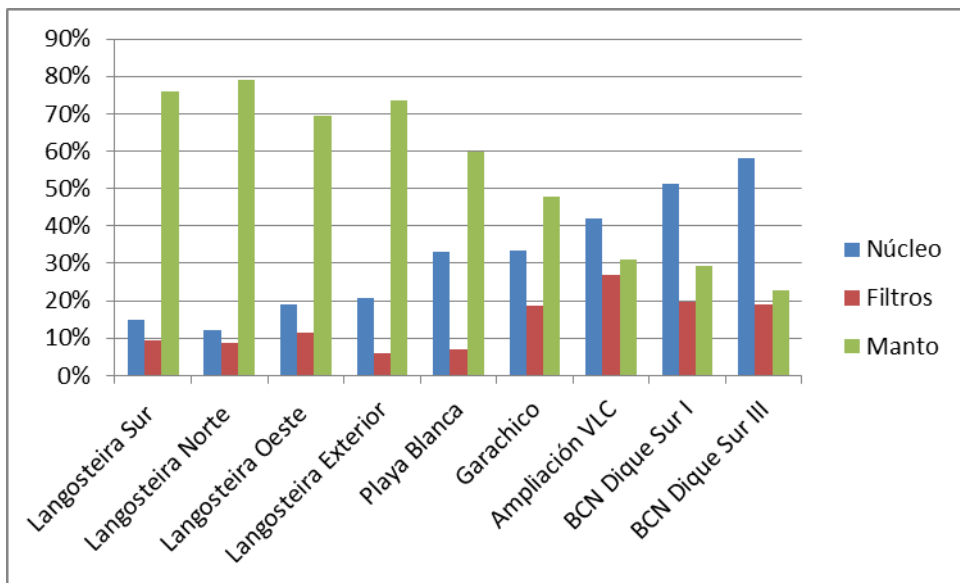


Figura 2.51. Distribución de costes en la construcción de diques en talud. (Fuente: propia)

Como se puede apreciar en la figura anterior, la variabilidad de los porcentajes de costes entre proyectos es muy grande, en especial para el caso del núcleo (del 12.2% al 58.3%) y del manto (del 22.6% al 79.1%). Si analizamos estos datos teniendo en cuenta el mar donde se encuentra cada obra se pueden explicar mejor estos resultados en rasgos generales. En el Mar Cantábrico los oleajes de diseño son muy severos, lo que ocasiona que se tengan que disponer piezas de gran peso en los mantos de protección, lo que se traduce en un mayor coste económico de éste con respecto al total de la estructura. En cuanto a los diques construidos en Canarias, el oleaje sigue jugando un papel importante a la hora de fijar el tamaño de los elementos del manto principal, pero también es determinante la baja disponibilidad de piedra natural, lo que

aumenta el coste de los núcleos y filtros. Por último, las obras ejecutadas en el Mediterráneo se caracterizan por oleajes relativamente suaves, lo que junto a que las obras que se han analizado son diques de grandes dimensiones (calados entre la -16m y -20m) hace que el peso relativo del núcleo sea muy importante en el coste total de la estructura, reduciéndose el coste relativo del manto.

Cabe mencionar que dentro del coste del manto se ha diferenciado entre el suministro de los elementos y su colocación, llegando a la conclusión de que la colocación de las piezas en el manto de los diques analizados oscilaba entre el 11% el 34% del coste total del manto.

En resumen, el coste de construcción del manto de un dique en talud está fuertemente condicionado por las características particulares de cada proyecto, sin embargo, en todos ellos el coste del mismo tiene un peso muy relevante dentro del total de la estructura. Por lo tanto, no resulta descabellado intentar reducir el coste total de un dique en talud a través de un mejor diseño de su manto principal.

Capítulo 3

Análisis de la Colocación del Cubípodo

3.1. Introducción

Como ya se ha comentado en el capítulo anterior, la porosidad del manto principal de un dique en talud está fuertemente condicionada por el método de colocación que se emplee durante su construcción. La porosidad influye notablemente en la estabilidad hidráulica del manto, así como en el remonte y rebase, en la reflexión y en los volúmenes de materiales a emplear. Por ello, desde el grupo de trabajo del LPC-UPV, se ha desarrollado una línea de investigación para definir de forma concreta las mallas de colocación a emplear durante la construcción de un manto principal de Cubípodos, para conseguir un buen acabado del mismo y una porosidad similar a la ensayada en laboratorio para evitar efectos de modelo.

En este capítulo se van a desarrollar las mallas de colocación específicas del elemento Cubípodo para las distintas secciones del manto principal de un dique en talud, como son: tronco recto, tronco curvo de baja curvatura, morro y tronco curvo de alta curvatura, arranques y transiciones. Estas mallas de colocación también pueden adaptarse a elementos de la misma familia que el Cubípodo, es decir, a elementos

masivos de colocación aleatoria con forma cúbica como son el cubo o el bloque Antifer.

3.2. Características del elemento Cubípodo

El Cubípodo es un elemento prefabricado de hormigón para la formación de mantos principales de diques en talud, desarrollado en 2005 por el LPC-UPV, e inventado por D. Josep Ramón Medina y Dña. María Esther Gómez Martín, y cuya patente de explotación (nº P200501750) pertenece a la empresa constructora SATO.



Figura 3.1. Elemento Cubípodo. (Fuente: LPC-UPV)

Se trata de un elemento que resiste fundamentalmente por gravedad y se coloca en el talud de forma aleatoria en una o varias capas. Con su diseño se mantienen las ventajas de los cubos y de los elementos paralelepípedicos de facilidad de fabricación, acopio y colocación, robustez y elevada resistencia estructural, y se resuelven las desventajas de este grupo de elementos, como son la falta de fricción con la capa de filtro, el adoquinamiento cara contra cara y la ya comentada compactación heterogénea.

La geometría del Cubípodo se basa un elemento cúbico central que presenta unas protuberancias troncopiramidales en sus caras (cuyas dimensiones relativas pueden verse en la figura siguiente) que evitan el adoquinamiento entre piezas, manteniendo constante la porosidad del manto durante su vida útil (41-42%). Las protuberancias dotan al elemento de una mayor fricción con la capa de filtro, ya que dichas protuberancias tienden a penetrar en la capa inferior generando un empuje pasivo que mejora ostensiblemente la tendencia de los bloques cúbicos o paralelepípedicos a situar las caras paralelas a la capa inferior con un bajo nivel de trabazón entre capas. Todo ello se traduce en una reducción del remonte y rebase de la estructura (coeficiente de rugosidad, γ_f , de 0.46 para Cubípodos monocapa y de 0.44 para Cubípodos bicapa, frente a un valor de 0.5 de la escollera o cubos tradicionales) y un aumento de la

estabilidad hidráulica (con valores del coeficiente de estabilidad de Hudson, K_D , de 12 para tronco de Cubípodos monocapa y de 28 para tronco de Cubípodos bicapa, frente a un valor de 6 del cubo convencional).

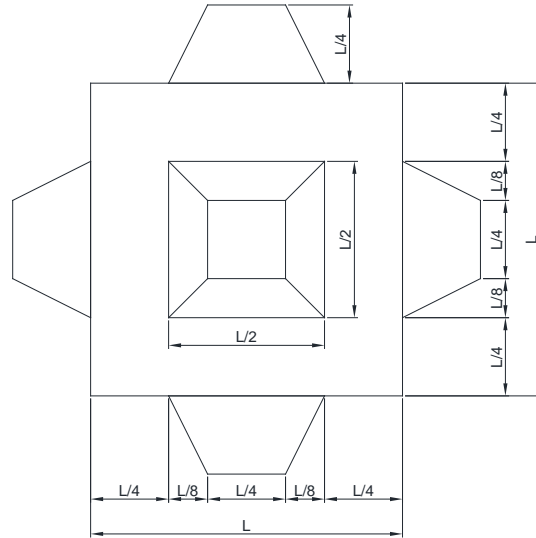


Figura 3.2. Proporciones del elemento Cubípodo en relación a la dimensión del cubo central, L.
(Fuente: propia)

Otra ventaja de este nuevo elemento es que si se produjese una posible rotura o erosión de las protuberancias la nueva pieza derivaría en un elemento cúbico convencional, por lo que cuanto menos tendrán las características de estabilidad y robustez de los mismos. Cabe mencionar que este hecho, aunque es posible, es difícil de acontecer puesto que las protuberancias muestran una gran resistencia estructural, hecho constatado en los ensayos de caída llevados a cabo en el Puerto de Alicante en marzo de 2008, y cuyos resultados pueden verse en Medina et al. 2011.

Al igual que en el caso del cubo, el Cubípodo debe ser colocado de forma aleatoria siguiendo una malla de colocación que determina las coordenadas de cada elemento para formar el manto. La forma de manipular los Cubípodos es mediante pinzas de presión, ya sean dobles o simples (similares a las utilizadas para la manipulación de cubos).



Figura 3.3. Pinzas de colocación del Cubípodo. Pinza doble (izq.) y simple (dcha). (Fuente: empresa SATO)

3.3. Diseño de las mallas de colocación del Cubípodo

3.3.1. Introducción

Los Cubípodos han sido diseñados para ser colocados aleatoriamente según mallas de colocación tipo forma de diamante, en la que los elementos de una fila superior se disponen encima del hueco que dejan los de la fila inferior. La construcción del manto principal comienza por la primera fila de elementos, normalmente apoyada en una berma de pie, y continua con la colocación de filas sucesivas hasta llegar a la coronación del dique, avanzado en cuña de aproximadamente 45°.

La colocación del Cubípodo se realiza de manera individual, empleando pinzas de presión operadas por grúas dotadas de posicionamiento GPS en la cabeza de la pluma para poder situar cada elemento en las coordenadas fijadas por la malla de colocación. Un ratio de colocación conservador estaría en torno a 6-8 elementos/hora, dependiendo del tamaño del Cubípodo.

La porosidad inicial del manto depende de las características de la malla de colocación y de las condiciones climáticas durante la colocación. La disposición aleatoria de los Cubípodos está garantizada por la facilidad de colocación, su geometría y por la tendencia de éstos a reorientarse girando hasta cubrir homogéneamente el talud.

En contraposición a los elementos que resisten principalmente por trabazón que suelen exigir un patrón de colocación específico muy estricto o las piezas cúbicas que tienden a compactarse cara contra cara, los Cubípodos tienen una cierta capacidad de auto-ordenación en el talud buscando la porosidad uniforme que les caracteriza (41-42%). Sin embargo, es deseable que la colocación de la primera fila de Cubípodos presente pocos errores, ya que el resultado final de la colocación será un manto mejor construido con una porosidad más uniforme.

Los Cubípodos están diseñados para tener una alta fricción con la capa de filtro, ya que el tamaño de las protuberancias de sus caras es similar al de los huecos de las piedras de la capa inferior. Es recomendable disponer una capa de Cubípodos sobre una capa de piedra de tamaño $W/20 < W_{filtro} < W/10$, siendo preferible no concertar la escollera de la capa inferior para maximizar la fricción entre capas.

Para apoyar correctamente el manto principal, es recomendable la construcción de una berma de pie que debe ser diseñada para ser estable y asegurar que la primera fila de elementos del manto esté correctamente colocada. Si la primera fila de piezas no está bien colocada y apoyada sobre la berma de pie, los errores pueden afectar a la trabazón, porosidad y estabilidad hidráulica de la totalidad del manto. El correcto diseño y construcción de la berma de pie (generalmente de escollera) es especialmente importante en el caso de mantos monocapa, ya que la colocación de la primera fila afectará el resto de filas que se apoyan en ella. La siguiente figura muestra la sección tipo de un dique en talud con manto principal apoyado en berma de pie sobre banqueteta de protección contra la socavación.

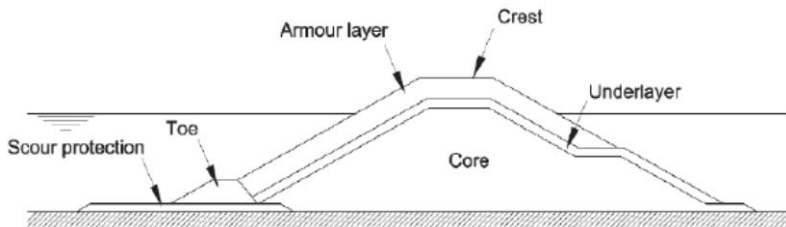


Figura 3.4. Sección tipo de un dique en talud con manto principal apoyado en berma de pie sobre banqueteta de protección contra la socavación. (Fuente: Manual del Cubípodo 2015)

Como regla general, la berma de pie suele tener una forma trapecial, estando el peso de la escollera que la forma entre el 10-20% del peso de las piezas del manto principal, dependiendo de la profundidad del dique y de la cota de coronación de la berma de pie. La profundidad de la coronación de la berma de pie no suele exceder de 1.5 veces la altura de ola de diseño, la longitud de la berma en coronación suelen ser $3-4D_n$ (de las piezas de la berma) y el espesor suele ser $2D_n$ y $3D_n$ para mantos monocapa y bicapa, respectivamente.

Si el dique proyectado se encuentra sobre un fondo marino sedimentario con un elevado riesgo de socavación, además de la berma de pie, será necesario construir una banqueteta de fondo contra la socavación que permita proteger la berma de pie contra la erosión de fondo inducida por la construcción del dique en talud. Si las condiciones geotécnicas son muy malas, puede ser recomendable además el dragado del fondo y relleno de sustitución o bien la construcción de banquetetas de fondo y precargas para reducir las presiones intersticiales, reducir los asentamientos diferenciales y evitar los modos de fallo geotécnicos.

El manto principal normalmente termina en una berma de coronación horizontal en la que se suele poner un número de filas determinado. Varios autores, como Besley y Denechere (2009), especifican que este número no debe ser menor de 3. En el caso

del Cubípodo este es el número de filas que se recomienda colocar en la berma superior. En esta zona las mallas de colocación empleadas en el talud también son útiles, sin embargo deben tomarse como guía, pudiendo el operador de grúa reacondicionar en cierta medida la posición de las piezas. Cabe mencionar que las mallas de colocación del Cubípodo fijan sus parámetros según un plano horizontal, antes de aplicar estas mallas a la zona de coronación se debe transformar sus parámetros al plano del talud.

Un buen perfilado de la capa de filtro y del talud interior de la berma de pie evita la necesidad de utilizar buzos durante la colocación de los Cubípodos, ya que las mallas de colocación que a continuación se desarrollan han sido ensayadas con oleajes moderados y colocación ciega, emulando las condiciones que se dan en la construcción real.

Lo diques en talud suelen presentar secciones distintas de la típica de tronco recto ensayada en tests 2D, como son las secciones de tronco curvo de baja curvatura, morro o tronco curvo de alta curvatura, arranques y zonas de transición entre tipo o tamaño de piezas. En este apartado se pretenden definir las reglas generales para la colocación de Cubípodos en cada uno de estos tramos.

Puesto que el elemento Cubípodo se basa en una forma cúbica central, se parece mucho geoméricamente a un cubo o bloque Antifer, por lo que las mallas desarrolladas en esta Tesis Doctoral son fácilmente adaptables a estas piezas.

3.3.2. Colocación en tronco recto

Para la construcción de los mantos principales en los tramos rectos de un dique en talud el Cubípodo debe colocarse siguiendo una malla de colocación tipo forma de diamante, la cual dispone los elementos de una fila encima del hueco que dejan dos piezas de la fila inferior, tal y como se puede observar en la siguiente figura:

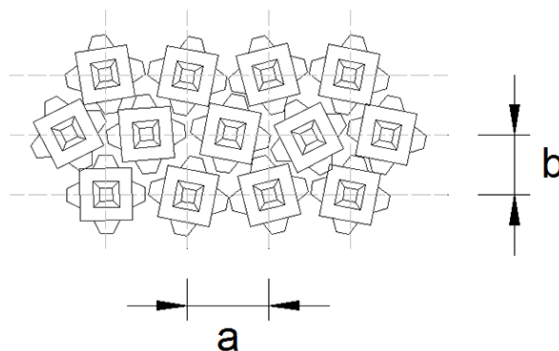


Figura 3.5. Esquema de una malla de colocación típica para tramos rectos de mantos principales. (Fuente: Pardo et al., 2014)

donde:

- a es la distancia entre c.d.g. de dos piezas contiguas de la misma fila medida sobre el plano horizontal en la dirección del pie del talud.
- b es la distancia entre c.d.g. de dos piezas contiguas medida sobre el plano horizontal en dirección del pie a la coronación.

De forma teórica se puede obtener la porosidad de este tipo de malla con la siguiente fórmula:

$$P_{teórica} = 1 - \frac{1}{r_1 \cdot r_2} \quad \text{donde} \quad r_1 = \frac{a}{D_n} \quad \text{y} \quad r_2 = \frac{b / \cos \alpha}{D_n}$$

Fórmula 3.1. Fórmula para obtener la porosidad teórica de la malla de colocación típica para tramos rectos de mantos principales.

donde:

- r_1 es el parámetro a adimensionalizado por el diámetro nominal y proyectado sobre el plano del talud.
- r_2 es el parámetro b adimensionalizado por el diámetro nominal y proyectado sobre el plano del talud.
- α es el ángulo que forma el talud con el plano horizontal.

Para el caso de tronco recto se propone otro tipo de malla de colocación basada en la anterior, denominada como malla de colocación tipo forma de diamante progresiva, o simplemente malla progresiva. Esta malla dispone los elementos de una fila encima del hueco que dejan dos piezas de la fila inferior, tal y como hace la malla de colocación tipo forma de diamante convencional, pero variando la distancia entre filas a medida que se avanza en la construcción para incorporar el efecto de la compactación de las filas inferiores del manto que se puede producir. De aquí en adelante, la anteriormente comentada malla de colocación tipo forma de diamante pasará a ser denominada como malla de colocación estática.

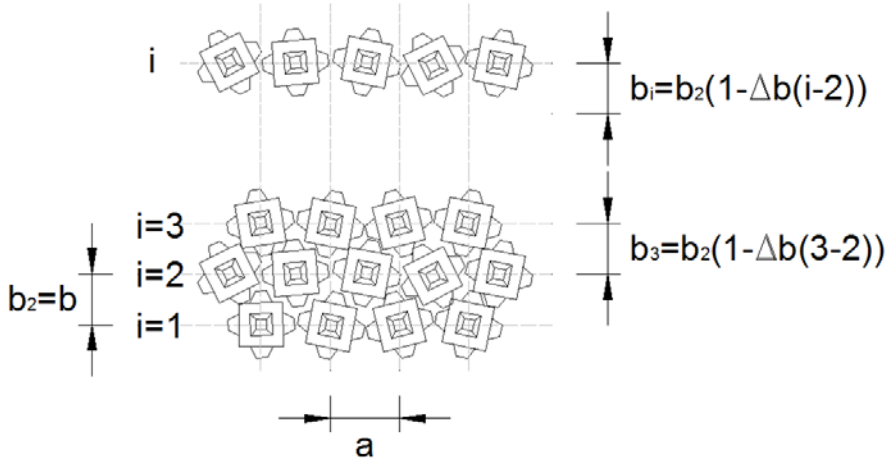


Figura 3.6. Esquema de la malla de colocación progresiva para tramos rectos de mantos principales. (Fuente: Pardo et al., 2014)

donde:

- a es la distancia entre c.d.g. de dos piezas contiguas de la misma fila medida sobre el plano horizontal en la dirección del pie del talud.
- $b = b_2$ es la distancia entre c.d.g. de las piezas de la primera y segunda fila, medida sobre el plano horizontal en dirección del pie a la coronación.
- b_i es la distancia entre c.d.g. de las piezas de la fila i y de la fila $i-1$, con i ($i = 2, 3, 4, \dots, I$), medida sobre el plano horizontal en dirección del pie a la coronación, donde:

$$b_i = b_2 \cdot [1 - \Delta b \cdot (i - 2)]$$

Fórmula 3.2. Fórmula para obtener la distancia entre filas de elementos en la malla progresiva para tramos rectos de mantos principales.

- Δb es el decremento, en tanto por uno, del parámetro $b=b_2$ para implementar a la malla el efecto de la compactación de las filas inferiores.

De forma teórica se puede obtener la porosidad de este tipo de malla con la siguiente fórmula:

$$P_{teórica} = 1 - \frac{2 \cdot D_n^2}{a \cdot (b_2 + b_1) / \cos \alpha}$$

Fórmula 3.3. Fórmula para obtener la porosidad teórica de la malla progresiva para tramos rectos de mantos principales.

Donde α es el ángulo que forma el talud con el plano horizontal.

3.3.3. Colocación en tronco curvo de baja curvatura

En el caso de tramos de tronco con trazado curvo se han diferenciado dos casos, el primero se correspondería con tramos curvos de baja curvatura y el segundo con tramos curvos de alta curvatura (tratados junto a los morros en el apartado siguiente), o lo que es lo mismo, con radios de trazados amplios o reducidos, respectivamente. Esta distinción hace referencia a que se pueda o no llevar a cabo la colocación de la totalidad de las filas que componen el manto con una misma malla de colocación, sin necesidad de emplear mallas encadenadas (explicadas en el siguiente apartado).

En la construcción de los mantos principales en los tramos curvos con radios amplios de un dique en talud el Cubípodo debe colocarse según una malla de colocación tipo forma de diamante adaptada a dicho tramo, la cual dispone también los elementos de una fila encima del hueco que dejan dos piezas de la fila inferior. En este tipo de malla las filas de elementos ya no son rectas, sino que siguen una trayectoria circular. En estas secciones basta con emplear este tipo de malla estática curva y ampliar la distancia entre elementos de la primera fila con respecto a la del tramo recto, para contribuir a que en las filas superiores el acortamiento de esta longitud no impida poner ningún elemento.

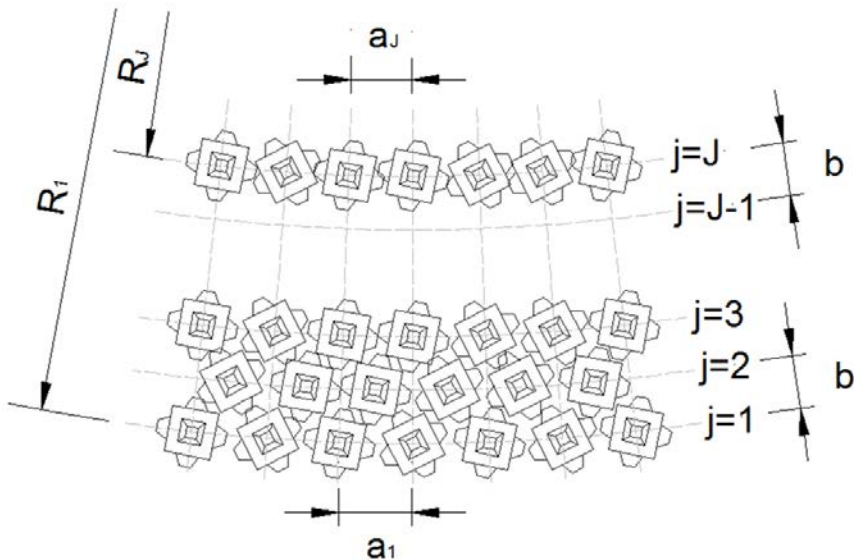


Figura 3.7. Esquema de malla de colocación estática para tramos curvos de baja curvatura de mantos principales. (Fuente: Pardo et al., 2014)

donde:

- a_j es la distancia entre c.d.g. de dos piezas contiguas de la fila j ($j = 1, 2, 3, \dots, J$) en la dirección del pie del talud. Esta distancia se mide sobre el arco de circunferencia.
- b es la distancia entre c.d.g. de dos piezas contiguas medida sobre el plano horizontal en dirección del pie a la coronación. Esta distancia se mide sobre el radio que une el centro de gravedad del elemento con el centro de la circunferencia.
- R_j es el radio de la circunferencia correspondiente a la fila j ($j = 1, 2, 3, \dots, J$) de elementos. Se obtiene como $R_j = R_1 - (j-1)b$.

Tanto a_j , b y R_j se miden sobre el plano horizontal, no sobre el talud.

A medida que se avanza con la construcción, la distancia a_j se va acortando con cada fila sucesiva. Este acortamiento viene dado por la relación entre los radios y los arcos:

$$\frac{a_j}{a_{j+1}} = \frac{R_j}{R_{j+1}}$$

Fórmula 3.4. Fórmula para obtener el acortamiento de radios en tramos curvos de mantos principales.

De forma teórica se puede obtener la porosidad de este tipo de malla con la siguiente fórmula:

$$P_{teórica} = 1 - \frac{(J-1) \cdot D_n^2}{a \cdot \frac{(R_1^2 - R_J^2)}{2 \cdot R_1 \cdot \cos \alpha}}$$

Fórmula 3.5. Fórmula para obtener la porosidad teórica de la malla estática para tronco curvo de baja curvatura de mantos principales.

Donde α es el ángulo que forma el talud con el plano horizontal.

Al igual que en las secciones de tronco recto, para los tamos curvos de baja curvatura también se propone una malla progresiva con la misma finalidad, adaptar la malla de colocación a la compactación de las filas inferiores del manto a medida que se avanza con la construcción.

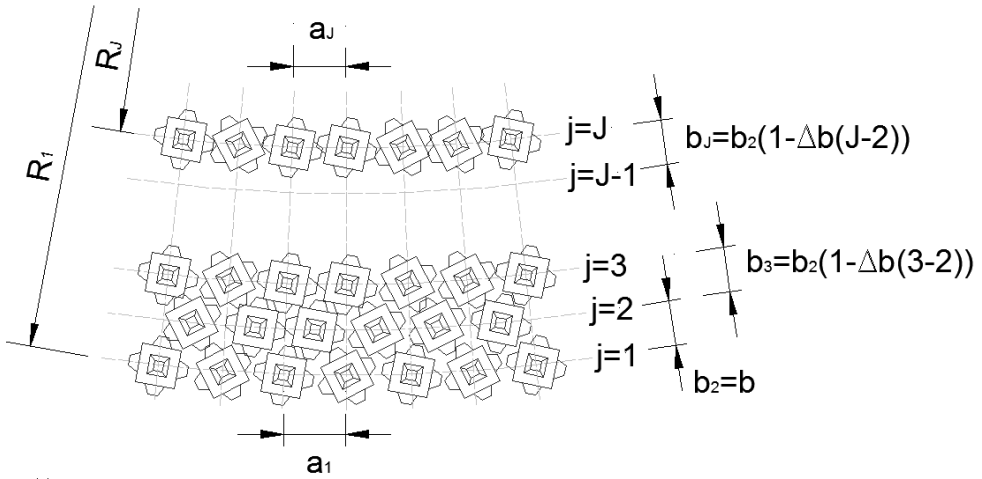


Figura 3.8. Esquema de la malla de colocación progresiva para tramos curvos de baja curvatura de mantos principales. (Fuente: propia)

donde:

- b_j es la distancia entre c.d.g. de las piezas de la fila j y de la fila $j-1$, con $j(j = 2, 3, 4, \dots, J)$, medida sobre el plano horizontal en dirección del pie a la coronación, donde:

$$b_j = b_2 \cdot [1 - \Delta b \cdot (j - 2)]$$

Fórmula 3.6. Fórmula para obtener la distancia entre filas de elementos en la malla progresiva para tramos curvos de baja curvatura de mantos principales.

La obtención de la porosidad teórica se puede realizar mediante la Fórmula 3.5, pero teniendo en cuenta el efecto de la malla progresiva sobre el parámetro R_j .

$$R_j = R_1 - \sum_{j=2}^{j=J} b_j$$

Fórmula 3.7. Fórmula para obtener el radio de la última fila de elementos a colocar utilizando la malla progresiva de tramos curvos de baja curvatura.

3.3.4. Colocación en morros y tronco curvo de alta curvatura

En el caso de morros y troncos curvos de alta curvatura, la problemática que se plantea es la de colocar piezas sobre una superficie cónica donde el radio disminuye rápidamente a medida que se colocan filas de elementos en el manto. Por lo que la distancia entre elementos de una fila decrece significativamente con respecto a la de la

fila siguiente; esta reducción es dada por la Fórmula 3.4. Esta reducción ocasiona que en una determinada fila los c.d.g. de los elementos estén tan juntos que no sea posible colocar la fila siguiente, ya que se producirían cabalgamientos (piezas colocadas unas encima de otras).

Para resolver este problema se plantea expandir la malla de colocación inicial en la fila a partir de la cual no se pueden disponer elementos por estar demasiado juntos. De esta manera la malla de colocación del morro se convierte en una serie de mallas estáticas de colocación de tramo curvo de baja curvatura encadenadas, expandiendo tantas veces como sea necesario la malla inicial. Todas y cada una de las mallas tienen las mismas características que la inicial (mismo valor de parámetros a_1 y b), pero adaptadas a los radios iniciales de cada una.

En las filas de unión entre mallas (cada fila de elementos pertenece a una malla de colocación encadenada distinta) ya no es posible seguir la regla general de las mallas tipo forma de diamante, en la que cada elemento debe colocarse en el hueco que dejan dos piezas de la fila inferior. Sin embargo, como punto de partida de la siguiente malla encadenada, el primer elemento de la primera fila de ésta si debe seguir esta regla general.

La figura siguiente muestra un esquema de malla de colocación estática para morros y tramos curvos de alta curvatura de mantos principales, en la que las filas de elementos están agrupadas en anillos independientes correspondientes a cada una de las mallas encadenadas empleadas.

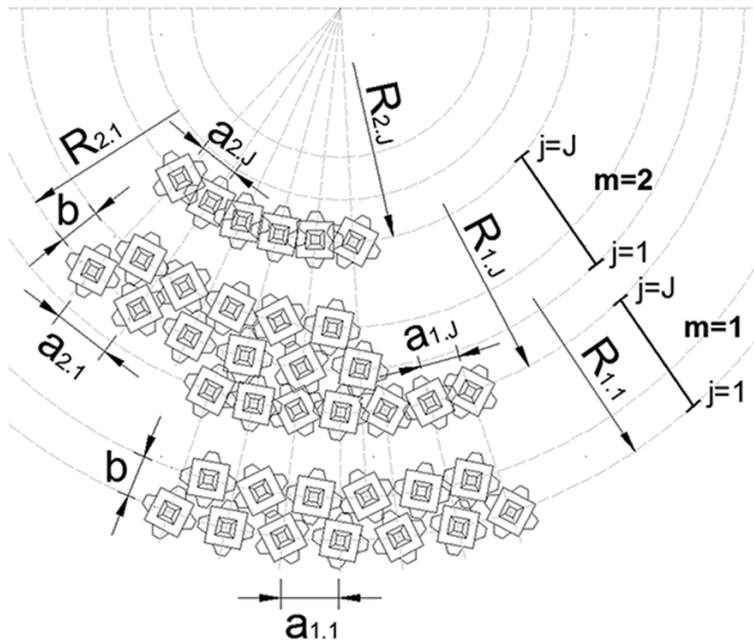


Figura 3.9. Esquema de malla de colocación estática para morros y tramos curvos de alta curvatura de mantos principales. (Fuente: Pardo et al., 2014)

donde:

- $a_{m,j}$ es la distancia entre c.d.g. de dos piezas contiguas de la fila j ($j = 1, 2, 3, \dots, J$) de la malla m ($m = 1, 2, 3, \dots, M$) en la dirección del pie del talud. Esta distancia se mide sobre el arco de circunferencia. La distancia entre los elementos de la primera fila, $a_{m,1}$, es siempre la misma para todas las mallas encadenadas; y la distancia entre elementos de la última fila de cada malla encadenada debe cumplir $a_{m,J} \geq a_{mín}$ y $a_{m,J+1} \leq a_{mín}$.
- b es la distancia entre c.d.g. de dos piezas contiguas medida sobre el plano horizontal en dirección del pie a la coronación. Esta distancia se mide sobre el radio que une el c.d.g. del elemento con el centro de la circunferencia, y es igual para todas las filas de todas las mallas encadenadas.
- $R_{m,j}$ es el radio de la circunferencia correspondiente a la fila j ($j = 1, 2, 3, \dots, J$) de elementos de la malla m ($m = 1, 2, 3, \dots, M$); y se obtiene como $R_{m,j} = R_{m,1} - (j-1)b$.

Tanto $a_{m,j}$, b y $R_{m,j}$ se miden sobre el plano horizontal, no sobre el talud.

De forma teórica se puede obtener la porosidad de este tipo de malla ponderando la porosidad teórica de cada malla curva encadenada por el número de piezas empleadas, según la siguiente expresión:

$$P_{teórica} = \sum_{m=1}^{m=M} P_{teórica.m} \cdot \frac{N_m}{N_{total}}$$

Fórmula 3.8. Fórmula para obtener la porosidad teórica de la malla de colocación estática para morros y tramos curvos de alta curvatura de mantos principales.

donde:

- $P_{teórica.m}$ es la porosidad teórica de la malla m ($m = 1, 2, 3, \dots, M$) que forma parte del conjunto de mallas encadenadas; y ha sido obtenida mediante la formulación para malla de tramo curvo de baja curvatura, Fórmula 3.5.
- N_m es el número de piezas colocadas en la malla m ($m = 1, 2, 3, \dots, M$).
- N_{total} es el número total de piezas colocadas con el conjunto de mallas encadenadas.

En la colocación de elementos en morro o tronco curvo de alta curvatura mediante el uso de mallas encadenadas debe marcarse el valor de la separación mínima entre c.d.g. de piezas de una misma fila ($a_{m,J,mín}$) a partir de la cual se dice que no se pueden colocar piezas, para proceder a ampliar esta separación mediante la siguiente malla encadenada.

La relación entre los c.d.g. de las piezas de la primera fila ($a_{m,1}$) y la de la última fila ($a_{m,J}$) de cada malla encadenada viene dada por la siguiente expresión (ver Figura 3.10):

$$a_{m,J} = a_{m,1} \frac{R_{m,J}}{R_{m,1}} = a_{m,1} \frac{R_{m,1} - (J-1)b}{R_{m,1}} = a_{m,1} \left[1 - (J-1) \frac{b}{R_{m,1}} \right]$$

Fórmula 3.9. Relación entre los c.d.g. de las piezas de la primera y última fila de cada malla encadenada que conforman la malla de colocación estática para morros y tramos curvos de alta curvatura de mantos principales.

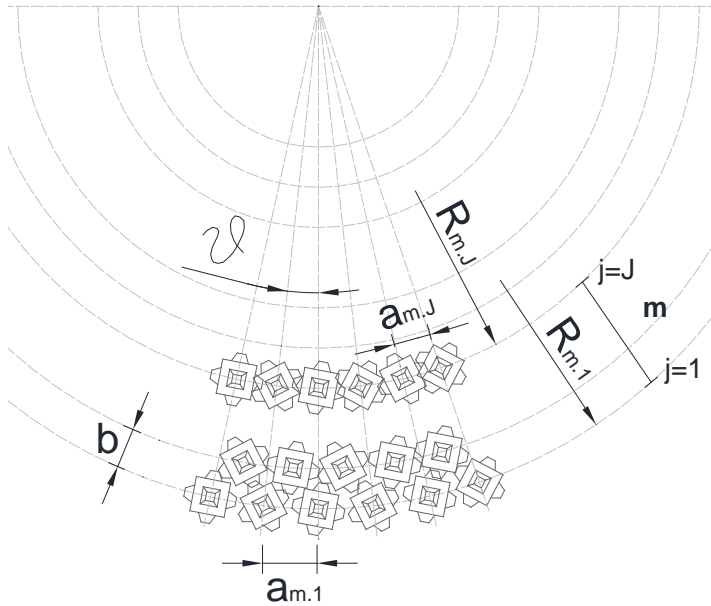


Figura 3.10. Esquema de funcionamiento de una de las mallas encadenadas que conforman la malla de colocación estática para morros y tramos curvos de alta curvatura de mantos principales. (Fuente: propia)

Esta metodología puede aplicarse a cada una de las mallas encadenadas que forman la malla del morro de manera independiente. De forma que fijando la separación mínima entre c.d.g. de piezas de una misma fila ($a_{m,J,mín}$) y conociendo el radio inicial de cada malla ($R_{m,1}$), se puede obtener el número máximo de filas de elementos a colocar con cada malla encadenada ($Q_{m,máx}$) mediante la siguiente formulación. Este número máximo de filas no tiene por qué ser igual en todas las mallas encadenadas que conforman el manto del morro.

$$Q_{m,máx} = \frac{R_{m,1}}{b} \left(1 - \frac{a_{m,J,mín}}{a_{m,1}} \right) + 1$$

Fórmula 3.10. Máximo número de filas a colocar con cada una de las mallas encadenadas que conforman la malla de colocación estática para morros y tramos curvos de alta curvatura.

3.3.5. Colocación en arranques

Los arranques de los diques en talud son casos particulares en la construcción de mantos principales, por ello deben estudiarse en detalle y de forma concreta para cada caso. Suele ser habitual que un nuevo dique parta de un dique existente, formando entre sí un ángulo determinado.

En el caso de que sólo en el nuevo dique sea necesario colocar Cubípodos en el manto principal, éstos se dispondrán según la malla de colocación correspondiente, definiendo está para que se coloquen piezas en la línea de intersección entre el dique existente (sobre su filtro o manto, en función de si se retira o no el último) y el filtro del nuevo dique.

Puede darse el caso que sea necesario colocar Cubípodos en el tramo de dique existente también. En este caso deben establecerse las mallas de colocación de cada tramo de manera independiente, partiendo ambas de la posición del Cubípodo de la intersección de la primera fila. Desde ésta pieza se extiende la malla de cada tramo con las características que le corresponda y se intersectan gráficamente para definir una línea que vaya desde el pie del manto a la coronación. Esta línea de intersección no tiene por qué formar parte de ninguna de las mallas, sino que define la posición de unos Cubípodos colocados uno encima de otro (en posiciones parecidas a las que prefijaban cada malla por separado para la intersección), de forma que permiten independizar el avance de cada uno de los tramos. Esta manera de proceder puede llevarse a cabo siempre y cuando la pendiente de la línea que define la intersección sea aceptable por ambas mallas, de lo contrario el sistema no funcionaría bien (se producirían cabalgamientos).

El proceso constructivo en estos casos consiste en colocar una serie de piezas de cada una de las filas de cada tramo por separado dejando como último elemento por colocar el correspondiente a la intersección, como si se tratase de la clave de un arco romano. Cada tramo se comienza a colocar desde el elemento colindante al de la intersección avanzando en dirección contraria a ésta.

Los arranques desde la línea de costa con manto de Cubípodos no suelen ser habituales, en estos casos es normal construir un manto de escollera hasta alcanzar ciertos calados que proporcionen alturas de ola de diseño para las cuales la escollera no sea suficiente, realizándose una transición a manto de Cubípodos.

3.3.6. Colocación en transiciones

Las mallas de colocación de piezas descritas anteriormente, resuelven las situaciones más frecuentes de la construcción del manto de un dique. Sin embargo, existen otras situaciones que afectan relativamente a pocas piezas pero que suelen ser habituales en los diques en talud, como son el cambio en el tamaño de los elementos del manto y el cambio de espesor de este. En estos casos se deben definir correctamente las transiciones para no provocar comportamientos inadecuados de la estructura. En cuanto a la longitud de estos tramos de transición suele ser habitual fijarla en el entorno de los 50 metros.

Puesto que el tamaño de los elementos depende principalmente del oleaje y de la batimetría de la zona, es habitual distinguir tramos diferentes en un dique en talud, lo cuales cuentan con tamaños de piezas adecuados para cada tramo. Una distinción muy habitual en el tamaño de piezas sería en arranque, tronco y morro de un dique. Esta discretización de tamaños de piezas adaptadas a los oleajes de cada tramo debe realizarse con criterio, en general, no es rentable construir un dique con muchos tamaños de elementos diferentes, puesto que esto incrementa los costes logísticos al aumentar la necesidad de número de encofrados, de útiles de manipulación, y de la complejidad del parque de fabricación y almacenamiento, entre otros. Como regla general, un ligero aumento del peso de algunas piezas para disminuir el número de tamaños distintos suele tener ventajas económicas frente a la construcción con multitud de tamaños de elementos.

Otra cosa habitual es sustituir los elementos prefabricados de tamaños más pequeños por escolleras de un tamaño mayor y la misma estabilidad hidráulica, por disponer normalmente de un coste de suministro menor. Por ello, en un dique de Cubípodos es habitual pasar de tramos de manto principal de escollera bicapa a mantos monocapa o bicapa de Cubípodos de tamaños reducidos, de mantos de Cubípodos pequeños a otros de mayor tamaño (un mayor tamaño de las piezas del manto implica normalmente un mayor tamaño de los elementos de las capas de filtro, y por lo tanto de su espesor), o de mantos monocapa a bicapa de Cubípodos. En todos estos casos el espesor del manto, y posiblemente el de las capas de filtro, de un tramo varía con respecto al siguiente y debe asegurarse que se diseña una transición entre secciones apropiada. Para ello hay que tener en cuenta varios factores: es conveniente que el perfil exterior del manto no sufra variaciones bruscas, ya que las corrientes longitudinales y las ondas correderas pueden ocasionar daños en las zonas donde haya un salto hacia fuera de las piezas del manto; entre contactos de elementos diferentes es necesario apoyar siempre las piezas de menor resistencia sobre las de mayor resistencia, mientras que en el casos de contactos entre elementos del mismo tipo pero diferente tamaño es necesario apoyar siempre las piezas pequeñas sobre las de mayor tamaño; y una construcción eficiente de un dique en talud implica avanzar a sección completa con las diferentes capas que lo forman a 45°, con las capas más interiores por delante, primero el núcleo, seguido de las capas de filtro y por último el manto.

3.3.6.1. Transición entre mantos moncapa y bicapa de Cubípodos

En el caso de transiciones de mantos monocapa a bicapa de Cubípodos, la variación entre los espesores de los mantos es muy significativa. En estos casos es aconsejable aumentar progresivamente en espesor de la capa de filtro hasta que se alcance la diferencia entre espesores del manto que se tiene que compensar. La siguiente figura muestra una transición entre manto monocapa y bicapa con el mismo tamaño de Cubípodos.

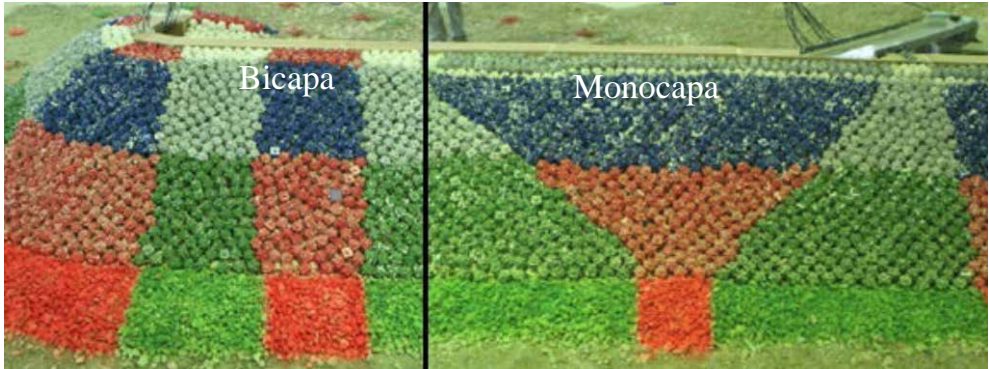


Figura 3.11. Transición entre manto monocapa y bicapa de Cubípodos. (Fuente: Manual del Cubípodo 2015)

Para conseguir que los elementos más pequeños se apoyen sobre los más grandes (escollera sobre Cubípodos), no solo es necesario que la protección monocapa avance en cuña de 45° aproximadamente (con un filtro de mayor espesor) sobre el bicapa, sino que también la protección bicapa debe avanzar en cuña de unos 45° sobre el monocapa. Cuando se alcancen la primera capa del bicapa y la monocapa, se procede a rellenar con piedra de filtro la cuña superior y continuar la colocación del manto monocapa sobre el filtro y primera capa de Cubípodos. La figura siguiente muestra el avance de la protección monocapa sobre la primera capa, ya colocada, del tramo bicapa. Exteriormente, el manto monocapa forma un plano sin discontinuidades hasta cubrir la primera capa y constituir con ella un manto bicapa; si se retirara esa protección exterior monocapa de Cubípodos, se podría ver un filtro bicapa de escollera apoyado sobre un manto monocapa de Cubípodos.



Figura 3.12. Avance de la protección monocapa sobre filtro de Cubípodos. (Fuente: Manual del Cubípodo 2015)

Al realizar de este modo la transición entre monocapa y bicapa se cumplen las condiciones básicas: la piedra se dispone avanzando en cuña de unos 45° ; los Cubípodos se colocan apoyándose en los de las filas inferiores y generando un avance

en cuña de unos 45°; la piedra de filtro se apoya en los Cubípodos y no al revés; y se mantiene la continuidad del plano exterior del manto de Cubípodos.

3.3.6.2. Transición entre mantos bicapa de escollera y monocapa de Cubípodos

Este tipo de transiciones se resuelven aumentando el espesor de la capa de filtro del manto monocapa de Cubípodos y apoyando la escollera sobre los Cubípodos, al ser éstos más resistentes. Para cumplir esta regla es necesario colocar una cuña de Cubípodos con unos 45° de inclinación hacia el manto de escollera y rellenar la cuña superior entre ambos de escollera apoyada en los Cubípodos.

3.3.6.3. Transición entre mantos de Cubípodos de distinto tamaño

En el caso de transiciones por cambios de tamaño de Cubípodos debe actuarse de forma similar a la anteriormente descrita. Debe aumentarse el espesor de la capa de filtro del tramo con Cubípodos de menor tamaño, de forma que se consiga un plano exterior del manto continuo. Además, el manto de Cubípodos de mayor tamaño debe avanzar en cuña hacia el manto de Cubípodos de menor tamaño, para así asegurar un apoyo de las piezas más pequeñas sobre las más grandes.

3.3.7. Relación entre primera y segunda capa de Cubípodos

Como ya se ha comentado anteriormente, se recomienda apoyar el manto de Cubípodos en una berma de pie, especialmente para el caso de mantos monocapa. En el caso de mantos bicapa de Cubípodos, la relación entre los elementos de la primera y la segunda capa son función del tamaño de las piezas que componen el manto y del ángulo interior de la berma de pie.

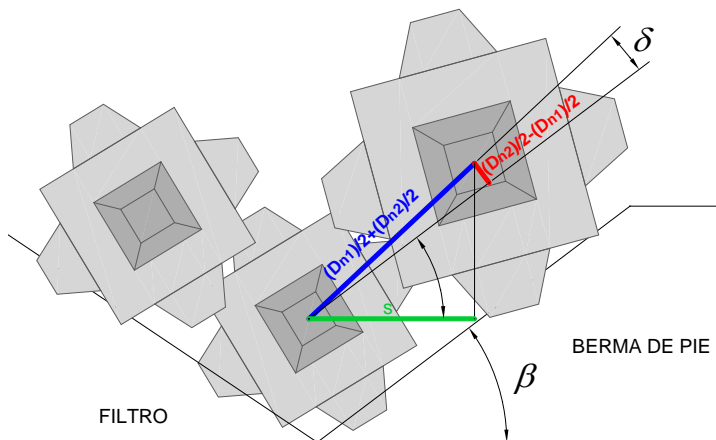


Figura 3.13. Relación entre la posición de los Cubípodos de la primera y la segunda capa. (Fuente: propia)

De la anterior figura se puede deducir la expresión que proporciona la separación en horizontal entre la primera fila de elementos de la primera capa y la primera fila de elementos de la segunda capa (s), distancia necesaria para la construcción de mantos bicapa.

$$s = \cos(\delta + \beta) \left(\frac{D_{n1}}{2} + \frac{D_{n2}}{2} \right) \quad \text{con} \quad \delta = \arcseno \left[\frac{(D_{n2}/2) - (D_{n1}/2)}{(D_{n2}/2) + (D_{n1}/2)} \right]$$

Fórmula 3.11. Fórmula para relacionar la posición de los Cubípodos de la primera y la segunda capa.

donde:

- D_{n1} es el diámetro nominal de los Cubípodos de la primera capa.
- D_{n2} es el diámetro nominal de los Cubípodos de la segunda capa.
- δ es el ángulo entre los c.d.g. del primer Cubípodo de la primera y segunda capa.
- β es el ángulo interior de la berma de pie.

Capítulo 4

Metodología Experimental

4.1. Introducción

Los ensayos en modelo reducido son algo habitual en las obras marítimas, sin embargo estos estudios suelen centrarse en la estabilidad, remonte y rebase de las estructuras o en las condiciones de operatividad de dársenas, entre otros. Sin embargo, los ensayos en modelo reducido de procesos constructivos como puede ser la colocación de piezas en el manto principal de un dique en talud son bastante inusuales.

En la presente Tesis Doctoral se ha planteado la necesidad de llevar a cabo un amplio estudio experimental sobre la colocación realista del elemento Cubípodo en el manto principal de diques en talud. Para ello se han realizado numerosos ensayos en el tanque de oleajes del LPC-UPV para abarcar una casuística suficientemente amplia que incluya las secciones más habituales que se dan en la construcción de un dique en talud.

En este capítulo, se describen las características de los modelos físicos ensayados y las metodologías seguidas para la construcción de los mantos así como para el tratamiento de los resultados de los ensayos.

4.2. Descripción de las instalaciones

4.2.1. Tanque de ensayos

Todos los ensayos relativos a la presente Tesis Doctoral se han realizado en el canal construido dentro del tanque de oleaje 3D del LPC-UPV, el cual cuenta con unas dimensiones de 15x7.5x0.47m.

El canal de oleaje está formado por dos muros de 12.80m de longitud separados 3.5m entre ellos, que corresponde a la longitud de la pala generadora de oleaje. Cada muro consta de un total de siete contrafuertes para evitar un posible movimiento de estos a causa del oleaje. Además, la parte interior de los muros del canal tiene una terminación lisa para que no afecte al oleaje.

Para la colocación de los sensores de oleaje se dispusieron unas estructuras metálicas móviles apoyadas en las paredes exteriores del tanque, lo que permitía su posicionamiento en cualquier punto del mismo sin interferir en los ensayos realizados.

En el lado opuesto a la generación de oleaje del tanque se construyó una playa de grava con una talud $H/V=4/1$ para absorber la energía del oleaje y conseguir una menor reflexión del mismo. En la figura siguiente se puede observar el tanque de ensayos durante uno de los ensayos de colocación realista. En ella se puede apreciar el sistema de generación de oleaje, la playa de grava, el sistema de iluminación y captación de imágenes, uno de los modelos ensayados y una de las grúas a escala reducida empleada.



Figura 4.1. Vista del tanque de ensayos. (Fuente: propia)

4.2.2. Generador de oleaje

En uno de los extremos del tanque se ubica el generador de oleaje constituido por una central óleo-hidráulica que suministra aceite a presión a un pistón de doble efecto que actúa sobre la pala que transmite el movimiento al agua.

La central óleo-hidráulica está formada por una bomba y un calderín o cámara de presión, que trabaja a unas 100 atmósferas de presión.

El movimiento del pistón está gobernado por una servoválvula cuyos desplazamientos son medidos por un sensor de posición potenciométrico que cierra el lazo de control.

La generación de oleaje por parte de la pala es controlada por un programa informático, que toma los datos de la secuencia teórica preparada, bien sea una serie regular o una serie irregular (para los ensayos de construcción realista sólo se ha empleado oleaje irregular). Aplicando la correspondiente función de transferencia clásica para el movimiento del pistón (Goda, 1985), con una función de transición lineal adicional en el dominio del tiempo para prevenir aceleraciones excesivas de la pala al principio y final de cada ensayo, los datos de oleaje se traducen en movimientos de la pala que son comunicados al sistema hidráulico de generación mediante impulsos eléctricos. Puesto que un sistema hidráulico presenta variaciones en su comportamiento en el transcurso del tiempo (la temperatura del fluido cambia su viscosidad, existencia de pequeñas fugas, etc.), es decir, no es estacionario, el sensor de posición de la pala generadora permite efectuar las correcciones necesarias en tiempo real restaurando la posición de ésta a la teórica deseada.

La servoválvula permite la inyección del fluido en ambas caras del émbolo (para impulsarlo en uno u otro sentido) y con caudal variable (que determinará el tiempo). Su ventaja principal es la gran capacidad de regulación del movimiento, dada la alta calidad de las servoválvulas existentes. Para grandes potencias es el sistema más recomendable.

La pala es una paleta de traslación horizontal, formada por una chapa metálica vertical unida a un bastidor metálico. Dicho bastidor se mueve gracias al movimiento del pistón, y se desliza entre unos rodillos de nylon ubicados en una estructura metálica apoyada sobre el fondo del tanque. Para evitar el movimiento de la estructura metálica soporte de la pala, se lastra con sacos de arena. El recorrido máximo de la pala es de 0.40 metros y su sistema de control de generación ha sido desarrollado en el LPC-UPV. Para que la pala acople perfectamente tanto a las paredes de los muros como a la superficie de la solera del tanque lleva incorporado un mecanismo ajustable compuesto por unas placas metálicas y unas gomas. De esta forma, la pala en su movimiento de avance y retroceso acopla en todo su perímetro con las superficies colindantes.

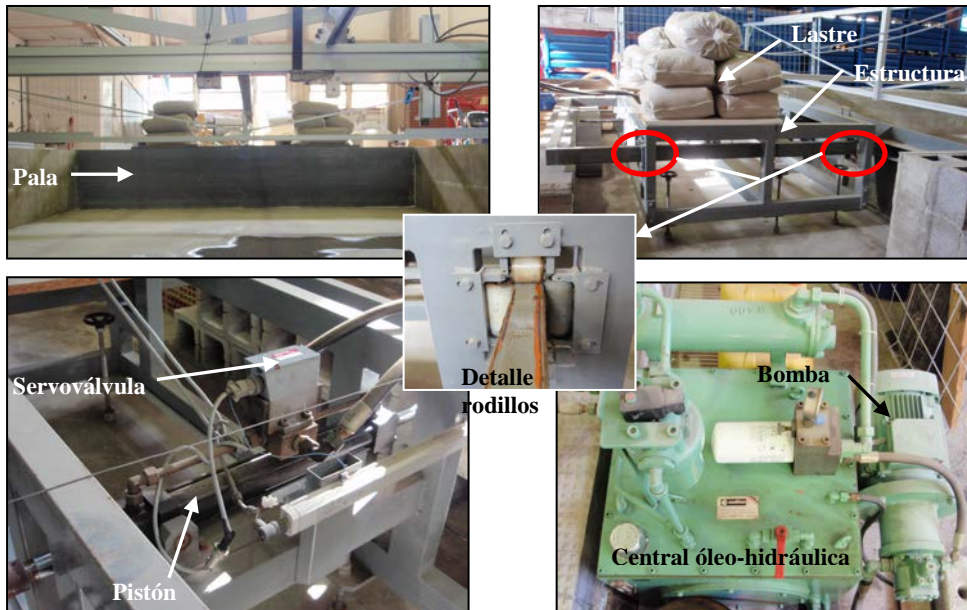


Figura 4.2. Sistema generador de oleaje. (Fuente: propia)

4.2.3. Control informático

El ordenador de control se encarga por una parte de simular la secuencia de datos de oleaje que se quiere modelizar y la manda a los aparatos generadores del oleaje y, por otra, de recoger y almacenar los datos medidos por los sensores ópticos instalados en el tanque.

En el caso de oleaje regular (no utilizado en estos ensayos) el programa permite controlar directamente el movimiento de la pala, para lo que se precisa dar el desplazamiento y el tiempo requerido para el mismo. La entrada de datos requiere que se facilite la altura y período de ola, bien en las proximidades de la pala o bien en el modelo, y la altura de calado en el generador y en las proximidades del modelo. Para ello se requieren dos funciones de transferencia que relacionen el desplazamiento de la pala con la altura y periodo de ola en sus proximidades y estas características con las mismas en el modelo.

En el caso de oleaje irregular se ha programado una rutina a parte de la del programa principal de control y adquisición de datos, de manera que en primer lugar se generan diferentes trenes de ondas en función del espectro deseado para caracterizar el oleaje irregular, y después el programa principal toma estos datos desde una carpeta adicional en la que han sido guardados.

Por otro lado, el sistema informático recibe las señales de entrada de las distintas sondas que se ubican en el tanque, mediante una tarjeta de adquisición de datos PCLab. Estos datos, junto con los anteriores, se recogen en un archivo tipo texto (.txt), desde donde pueden ser posteriormente tratados.



Figura 4.3. Vista del programa informático generador de oleaje. (Fuente: propia)

4.2.4. Instrumentación

4.2.4.1. Sensores ópticos.

En los ensayos llevados a cabo con oleaje se dispusieron sensores ópticos para caracterizar y comprobar los oleajes que se querían lanzar sobre los distintos modelos analizados. De forma que una vez obtenida la secuencia de generación de estos oleajes se podía prescindir de los sensores.

Los sensores ópticos determinan el nivel del agua a través de ultrasonidos por vía aérea. Sus principales características son: gran exactitud de medida, resolución extrema de la superficie del agua, rapidez de medida, no hace falta su calibración y no producen interferencia entre sensores.

Dichos sensores se conectan con equipos electrónicos que posibilitan el envío de los datos al ordenador de control, que los transforma en medida de altura de ola en centímetros respecto del nivel medio establecido en el ensayo.



Figura 4.4. Sensor óptico y módulo de control. (Fuente: propia)

4.2.4.2. Soporte audiovisual.

Durante la realización de todos los ensayos se contó con material audiovisual para documentarlos gráficamente y para servir de base del cálculo de la porosidad del manto principal obtenida en cada ensayo. Dicho material audiovisual consta de una cámara de vídeo, una cámara fotográfica y un ordenador que controla de forma remota la cámara.

Todos los ensayos de colocación se grabaron íntegramente en vídeo. Además, se realizaban fotografías del manto tras colocar cada uno de los elementos de protección y varias fotografías al finalizar el ensayo.

4.3. Descripción de los modelos ensayados

Durante el desarrollo de esta línea de investigación se han llevado a cabo numerosos ensayos de construcción de mantos principales sobre distintos modelos a escala reducida. A continuación se detallan las características de los modelos ensayados, incluyendo el proyecto de investigación al que pertenecen, geometría de las secciones ensayadas y características de los materiales y de los oleajes empleados. En el Anejo 2 se muestran las plantas de los modelos ensayados con la finalidad de mostrar su disposición con respecto a la dirección del oleaje que incide sobre ellos.

4.3.1. Modelo ensayado por Pardo (2009)

El primer modelo sobre el que se realizaron ensayos de construcción de mantos principales fue el utilizado para el desarrollo del Proyecto Final de Carrera del autor, titulado *Análisis de la colocación de bloques cúbicos y cubípodos en el manto principal de diques en talud. Aplicación a la ampliación del Puerto de Valencia*, presentado en septiembre de 2009 en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (ETSICCP) de la UPV. Sobre este modelo se realizaron en primer lugar los ensayos con el sistema cartesiano de colocación ciega, y después con ensayos de construcción realista de mantos con grúas a escala reducida.

El modelo era un dique en talud con espaldón en la coronación, de pendiente $H/V=1.5/1$ en la cara expuesta al oleaje y de pendiente $H/V=1.25/1$ en la cara no expuesta (lado abrigado) en la zona del tronco del dique, y de pendiente $H/V=1.5/1$ en todo el morro, estableciéndose entre ambas secciones una zona de transición.

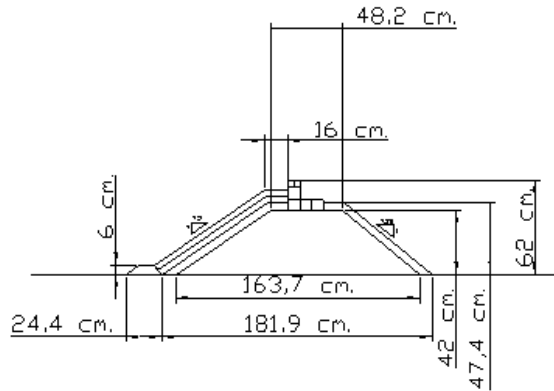


Figura 4.5. Sección tipo tronco del dique de Cubípodos ensayada por Pardo (2009). Cotas en centímetros.

Se trataba de un dique que no estaba escalado para representar a ningún prototipo en concreto. El filtro era de grava de $D_{50}=1.80$ cm, mientras que el núcleo estaba compuesto por un material de $D_{50}=0.70$ cm, ambos con una densidad de 2.70 g/cm^3 . Para la construcción del manto se emplearon Cubípodos de resina de distintos colores con un $D_n=3.82$ cm y una densidad de 2.29 g/cm^3 .



Figura 4.6. Cubípodos de $D_n= 3.82$ cm utilizados en los ensayos de colocación de Pardo (2009).

Se realizaron ensayos en seco y bajo distintas condiciones de oleaje irregular (espectro JONSWAP y $\gamma=3.3$). Para escalar las características del oleaje, mediante la semejanza de Froude, se establecieron dos escalas distintas en función de la zona del litoral español que se tratase, así para la cornisa cantábrica se escogió una escala de modelo reducido E: 1/100 con un oleaje moderado de $H_s=2.00$ cm y $T_p=1.15$ s y un oleaje fuerte de $H_s=4.00$ cm y $T_p=1.60$ s; y para la vertiente mediterránea una escala E: 1/50 con un oleaje moderado de $H_s=2$ cm y $T_p=0.80$ s y un oleaje fuerte de $H_s=4.00$ cm y $T_p=1.15$ s. Para todos ellos el calado se estableció en $d=30$ cm (escala de modelo).

4.3.2. Modelo ensayado dentro del Proyecto CLIOMAR

Como una de las tareas del Proyecto CLIOMAR se ensayaron las mallas de colocación de Cubípodos sobre una sección tipo tronco Punta Langosteira a escala de referencia E: 1/100, con talud $H/V=2/1$ en la cara expuesta al oleaje, talud $H/V=1.5/1$ en la cara no expuesta, coronado con un espaldón y bajo distintas condiciones de oleaje irregular. Estos ensayos fueron presentados en la Tesis Final de Máster del autor, titulada *Ensayos 3D de construcción realista de mantos de diques en talud. Porosidad del manto y mallas de colocación de cubos y cubípodos*, presentada en septiembre de 2011 en la ETSICCP de la UPV.

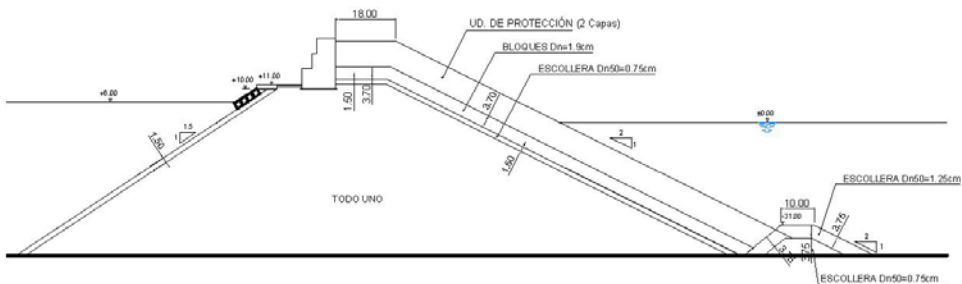


Figura 4.7. Sección tipo tronco del dique de Cubípodos ensayada en el Proyecto CLIOMAR. Cotas en metros. (Fuente: Pardo, 2011)

La sección estaba compuesta por un núcleo y filtro del mismo tamaño con un $D_{50}=0.72$ cm y una densidad de 2.70 g/cm³; la berma de pie contaba con piedras de diámetro nominal entre 1.04 cm y 1.23 cm, con una densidad de 2.70 g/cm³; y el manto secundario se componía de bloques cúbicos de $D_n=1.87$ cm y una densidad de 2.35 g/cm³. Para la construcción del manto se emplearon los mismos Cubípodos de resina de distintos colores que en Pardo (2009), $D_n=3.82$ cm y una densidad de 2.29 g/cm³.

Se plantearon dos estados de mar distintos, con oleajes irregulares (espectro JONSWAP y $\gamma=3.3$) de $H_s=1.5$ y 2.5 cm, y con periodos pico $T_p=1.0$ y 1.2 s, respectivamente. Estos rangos se corresponden a alturas de ola de 1.5 y 2.5 metros y periodos pico de 10 y 12 segundos en prototipo (E: 1/100). De esta forma se obtuvieron datos de la repercusión de las características del oleaje sobre la construcción del manto al representar distintos estados de mar, que van desde los que acontecen en el periodo primavera-verano, en el que se suelen realizar las construcciones de los diques por ser este el período que presenta oleajes más suaves, hasta oleajes más energéticos fuera de dicho período. En cuanto al calado se estableció en $d=40$ cm (escala de modelo).

4.3.3. Modelo ensayado dentro del Proyecto del Dique de San Andrés

Para la obra de ejecución del dique de San Andrés del Puerto de Málaga se realizaron ensayos de construcción realista de mantos de Cubípodos bicapa de 6 t sobre un modelo a escala E: 1/36 de dicho dique completo con talud $H/V=2/1$ en la cara

expuesta al oleaje, relleno en la cara no expuesta y coronado por un espaldón. Los ensayos se realizaron sin oleaje y en los tramos característicos del dique: arranque, tronco curvo, tronco recto y morro. En el arranque se ensayó la construcción de una primera capa de Cubípodos de 6 t y una segunda capa de Cubípodos de 15 t.

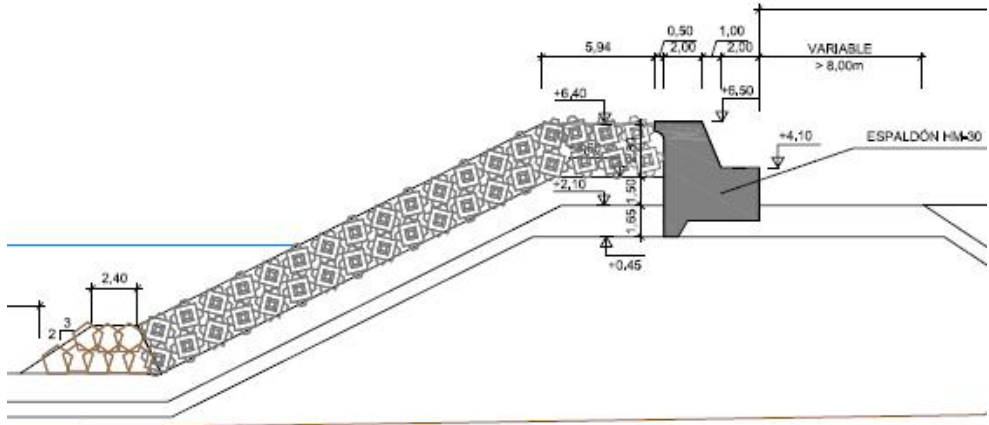


Figura 4.8. Sección tipo tronco del dique de Cubípodos ensayado para el dique de San Andrés del Puerto de Málaga. Cotas en metros. (Fuente: LPC-UPV)

El tramo de tronco curvo y el morro quedaban definidos por el radio de la circunferencia definida por la intersección del talud exterior de la capa de filtro con el talud interior de la berma de pie. Para el tramo de tronco curvo el valor de dicho radio a escala de modelo era de 415.11 cm ($R/D_n = 109.2$), mientras que para el morro era de 72.0 cm ($R/D_n = 18.9$).

La sección estaba compuesta por un núcleo y filtro del mismo tamaño con un $D_{50} = 2.00$ cm y una densidad de 2.70 g/cm³; la berma de pie contaba con piedras de $D_{50} = 3.60$ cm, con una densidad de 2.70 g/cm³. Para la construcción del manto de todos los tramos se emplearon Cubípodos de resina blanca pintados de distintos colores, con un $D_n = 3.80$ cm y una densidad de 2.14 g/cm³. Además, para la segunda capa del tramo de arranque también se emplearon Cubípodos de diámetro nominal $D_n = 5.17$ cm y una densidad de 2.28 g/cm³.



Figura 4.9. Cubípodos de $D_n = 3.80$ cm utilizados en los ensayos de colocación del dique de San Andrés del Puerto de Málaga. (Fuente: propia)

4.3.4. Modelos ensayados dentro del Proyecto MMONOCAPA

El proyecto MMONOCAPA es el proyecto con mayor número de ensayos de construcción realista de mantos de Cubípodos, en él se ensayaron varias secciones de diques en talud.

En primer lugar, se continuaron los ensayos sobre las secciones de tronco recto y curvo del modelo a escala del dique de San Andrés anteriormente descrito, pero en este caso bajo distintas condiciones de oleaje (descritas más adelante) y manteniendo la relación $R/D_n = 109.2$. Además, se reformó dicho modelo para estudiar la colocación de un tramo de tronco curvo con talud $H/V = 1.5/1$, con un radio inicial (definido de manera idéntica al anterior modelo) de 413.1 cm ($R/D_n = 108.7$).

En segundo lugar, y como parte principal del proyecto, se construyó un nuevo modelo con una sección tipo convencional con talud $H/V = 1.5/1$ en la cara expuesta al oleaje, a escala de referencia E: 1/36, asimilable a la del dique de San Andrés del Puerto de Málaga y empleando los mismos materiales para formarlo (núcleo, filtro, berma y manto).

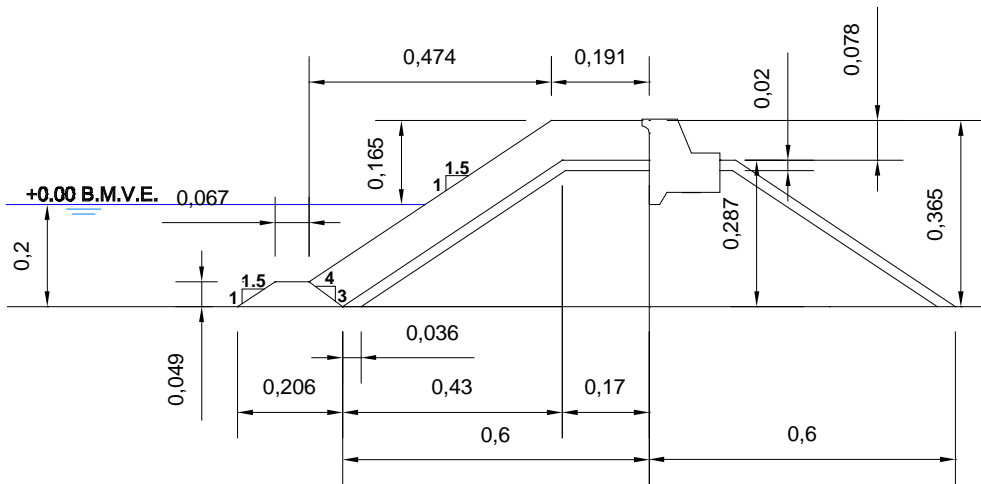


Figura 4.10. Sección tipo tronco del dique de Cubípodos ensayada en MMONOCAPA. Cotas en metros. (Fuente: propia)

Este proyecto se centró principalmente en la obtención de las mallas de colocación de Cubípodos, monocapa y bicapa, en secciones de morro. Para ello se construyeron tres morros de talud $H/V = 1.5/1$ con tres radios distintos de 60, 70 y 80 cm a escala de modelo (definido de manera idéntica al anterior modelo), con valores adimensionalizados de $R/D_n = 15.8$, $R/D_n = 18.4$ y $R/D_n = 21.1$, respectivamente.

Inicialmente, los ensayos se realizaron en seco con el fin de ver la malla de colocación que mejor ajustaba, para posteriormente repetir la construcción bajo condiciones de oleaje irregular. Se plantearon dos estados de mar distintos, correspondientes a oleajes irregulares (espectro JONSWAP y $\gamma=3.3$) en modelo con $H_s= 1.5$ cm y 2.5 cm y periodos pico $T_p= 1.0$ s y 1.2 s, que a escala de prototipo se corresponden con $H_s= 0.54$ m y 0.9 m y periodos pico $T_p= 6.0$ s y 7.2 s. El calado ensayado fue de $d= 19$ cm a escala de modelo, que a escala de prototipo se correspondía con $d= 6.84$ m.

4.4. Sistemas de colocación empleados

El objetivo principal de estos ensayos fue reproducir lo más fielmente posible el proceso que se da en la realidad para la construcción de los mantos principales de un dique en talud, en especial para el uso del Cubípedo como elemento de protección.

Como ya se ha comentado en el capítulo anterior, en prototipo se emplean grúas de gran capacidad para la colocación individual de cada una de las piezas, normalmente posicionadas en la coronación del dique, aunque también es posible realizarla por medios marítimos.

Durante el desarrollo de esta investigación se emplearon dos sistemas de colocación distintos: el denominado Sistema Cartesiano de Colocación Ciega o CBPS (*Cartesian Blind Placement System*) y el sistema 3D de colocación realista mediante grúas radiales, ambos descritos a continuación.

4.4.1. Sistema Cartesiano de Colocación Ciega o CBPS

Como una fase temprana de desarrollo de esta investigación, se quiso simular la construcción del manto principal de un dique en talud mediante el que se denominó como Sistema Cartesiano de Colocación Ciega (CBPS). En este sistema el oleaje no afectaba a la construcción al realizarse en seco; sin embargo, este método de colocación es más parecido al real que la colocación a mano habitual en ensayos de laboratorio, pero no tanto como la colocación realista con grúa radial a escala reducida que se describe en el siguiente apartado. La principal ventaja de este sistema de colocación radica en su menor consumo de tiempo para ensayar una determinada malla de colocación, el cual dispone los elementos en el talud a razón de 6 unidades/minuto, frente a 1 unidades/minuto necesarios en la colocación realista con grúa radial a escala.

Dicho sistema se fundamentaba en una pinza a modo de grúa, denominada grúa cartesiana, que se deslizaba sobre un travesaño apoyado en los laterales del tanque. Tanto en el travesaño, que se movía en sentido paralelo a la disposición del modelo, como en los laterales donde apoyaba éste se dispusieron cintas métricas que servían para referenciar la posición de la grúa a un sistema de coordenadas cartesianas. Se tomó como origen de coordenadas el pie de la berma del dique, como dirección positiva de coordenadas X la del arranque del dique hacia el morro y como dirección positiva de coordenadas Y la que va de la berma de pie hacia la coronación.

En las figuras siguientes se puede observar la pinza empleada, así como su sistema de movimientos y la disposición del primer modelo ensayado en el tanque, el de Pardo (2009).



Figura 4.14. Pinza empleada en el CBPS. (Fuente: propia)

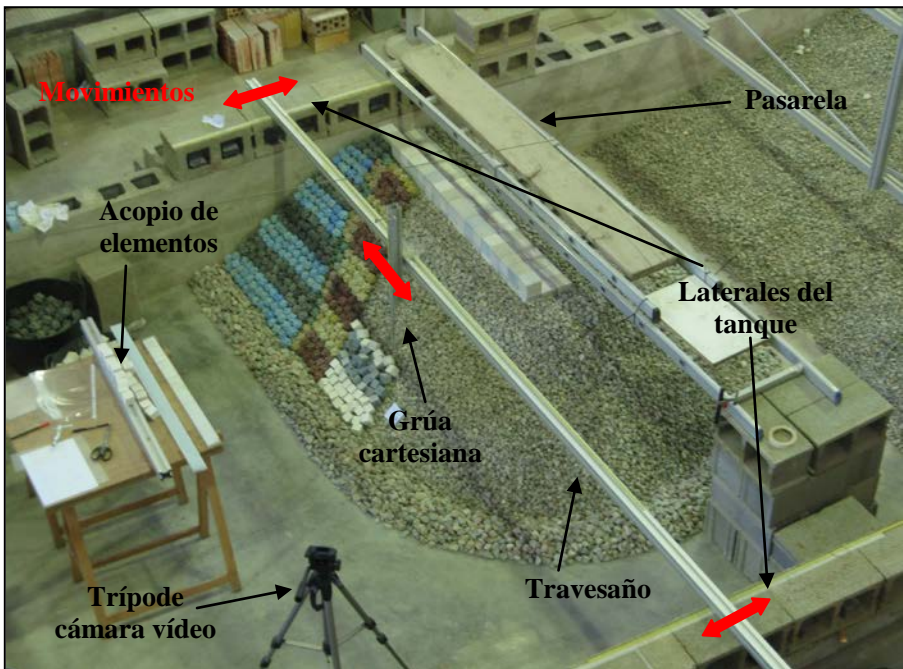


Figura 4.15. Vista general del funcionamiento del CBPS. (Fuente: propia)

Como se observa en las figuras anteriores, la pinza consta de dos brazos, uno fijo y uno articulado, y está dispuesta sobre un perfil que sirve de guía. El funcionamiento de la grúa cartesiana es muy sencillo, basta con colocar en ella una pieza y llevarla hasta las coordenadas X e Y correspondientes, en ese momento se desbloquea la palometa que presiona la pinza contra el perfil guía, con lo que se libera el movimiento vertical de la pinza pudiéndose bajar ésta hasta que el elemento toque el talud del dique, donde quedará depositado después de abrir la pinza.

Para la realización de estos ensayos eran necesarias dos personas, una que operaba con la grúa cartesiana y otra que indicaba las coordenadas donde se debía posicionar la pinza para colocar las piezas. Cabe mencionar que el operador, una vez dispuesta la pinza en la posición correspondiente, realizaba la maniobra de liberación de la pieza sin seguir visualmente la operación, es decir, a ciegas, ya que así se simulaba el efecto del agua en condiciones reales de construcción que impide al operador de grúa ver exactamente lo que está pasando bajo la superficie. En la siguiente figura se puede ver como el operador no sigue la maniobra de colocar la pieza en su sitio, sino que mira al infinito.



Figura 4.16. Operador de pinza del CBPS. (Fuente: propia)

Inicialmente se colocó una parte de la primera capa de Cubípodos a mano para que sirviese de apoyo a los elementos dispuestos con la pinza cartesiana. Se dispusieron 22 filas de Cubípodos, con 20 piezas en la primera fila y 9 en la última. A partir del último Cubípodos dispuesto a mano de la primera fila se montaron las mallas de colocación estática a construir.



Figura 4.17. Primera capa de Cubípodos dispuestos a mano para apoyo en el CBPS. (Fuente: propia)

El principal objetivo de los ensayos con el CBPS fue la obtención del rango de porosidades con las que se podían colocar Cubípodos en el manto de un dique. Para ello se ensayaron multitud de mallas de colocación con un procedimiento prueba-error, según el cual se iban ampliando o reduciendo los parámetros de las mallas ensayadas.

4.4.2. Sistema 3D de colocación realista

Como cuerpo central de esta investigación se planteó obtener las mallas de colocación del Cubípodos para distintos tramos de diques y dos pendientes del manto $H/V=1.5/1$ y $H/V=2/1$. Para ello se ensayaron multitud de mallas de colocación sobre cada una de las secciones de ensayo definidas en el apartado anterior. En estos ensayos se pretendió representar lo más fielmente posible el proceso real de construcción de mantos principales de Cubípodos de diques en talud. Para ello se llevaron a cabo ensayos con condiciones de oleaje y mar en calma (sin agua), empleando grúas radiales y pinzas de presión a escala de las utilizadas en la realidad. Durante la investigación llegaron a emplearse 3 grúas radiales a escala reducida diferentes.



Figura 4.18. Grúas radiales a escala empleadas en los ensayos de construcción realista de mantos. (Fuente: propia)

Las pinzas de presión utilizadas mantienen el elemento agarrado al ser izadas, ya que las cuatro patas que poseen tienden a cerrarse al ser elevadas por la grúa, y al encontrarse con la pieza la aprisionan impidiendo que se suelte. Esta pinza es sostenida por dos cables laterales situados en un bastidor central; un tercer cable, ubicado entre los dos de sostenimiento, es el encargado de liberar el mecanismo de agarre de la pieza.



Figura 4.19. Pinza doble de colocación de Cubípodos. A escala (izq.) y real (der.). (Fuente: propia)

Para cada tramo de dique se ensayaba la malla de colocación correspondiente, para ello la grúa se posicionaba en la coronación de la estructura asegurando que en esta posición se alcanzaba a colocar todas las piezas que se quería. Con las características definitorias de las mallas se obtenían las coordenadas donde colocar cada pieza. Las mallas de colocación refieren sus coordenadas a un plano horizontal sobre el talud, para poder colocar los elementos con la grúa radial se hizo necesario transformar estas coordenadas a un sistema de coordenadas esférico con centro en el eje de giro de la grúa y brazo la longitud de la pluma. De esta forma las coordenadas de posicionamiento de cada elemento venían definidas por dos ángulos, uno horizontal y otro vertical. De forma que con la ayuda de los transportadores colocados en las grúas a escala (ver Figura 4.20) se hacía posible la referenciación del posicionamiento de las piezas.

Al igual que en el CBPS, el operador colocaba la grúa según las coordenadas fijadas por la malla de colocación, luego bajaba la pieza hasta que notaba que la grúa ya no soportaba ningún peso y la liberaba, todo ello sin seguir visualmente la maniobra. Esta operación se realizaba de la misma forma tanto si el ensayo se realizaba con o sin agua.

En los ensayos de tronco recto de construcción realista se ha contado con elementos dispuestos a mano para que sirvan de apoyo a las piezas a colocar. En los tramos curvos y morros no fueron necesarias estas piezas de apoyo debido a la especial geometría de estas secciones.



Figura 4.20. Transportadores de ángulos colocados en una de las grúas a escala empleada durante los ensayos. (Fuente: propia)

4.5. Análisis de los resultados

En cuanto a los resultados obtenidos de los ensayos llevados a cabo son básicamente los extraídos de las fotografías que se realizaban tras concluir la construcción del manto de cada ensayo, aspecto general del manto y su porosidad real.

Sin embargo, durante los ensayos con oleaje se contó con el registro del oleaje mediante los sensores ópticos anteriormente mencionados. Por eso, aunque la presente Tesis Doctoral se centre en los resultados extraídos de la construcción del manto, también se ha analizado el oleaje que se generaba en pala y llegaba al modelo, ya que al tratarse de un ensayo 3D de diques en talud se producen numerosas reflexiones, difracciones, asomeramientos y demás procesos que pueden influir en el oleaje realmente incidente sobre la estructura, el cual es necesario tener acotado.

4.5.1. Aspecto general del manto

Al finalizar cada ensayo de colocación se analizaba cualitativamente la calidad del manto construido, basándose en su apariencia general. Se comprobaban dos aspectos fundamentalmente: que las filas de elementos construidas conservaran su horizontalidad, en caso contrario era indicativo de mallas con separaciones entre elementos muy amplias; y que no se produjesen excesivos cabalgamientos, piezas de la misma capa unas encima de otras, indicativo de mallas muy apretadas con poca separación entre piezas.

En el caso de que se apreciara un excesivo desmoronamiento de las filas, donde se perdiese la horizontalidad de las mismas, no siendo posible diferenciar que pieza pertenecía a cada fila o se perdiesen numerosos elementos como consecuencia de los

cabalgamientos se daban estas mallas de colocación como no aptas para su uso en la construcción real.

4.5.2. Cálculo de la porosidad

Para cada uno de los ensayos de colocación hay que diferenciar claramente dos porosidades, una es la porosidad teórica de la malla de colocación, cuyas fórmulas se dan en el Capítulo 3, y otra es la porosidad real obtenida tras construir el manto de cada ensayo. Estas dos porosidades no tienen por qué coincidir, ya que las piezas una vez liberadas sobre el talud no tienen por qué quedarse en la posición teórica que fija la malla para ellas. Por ello, la porosidad teórica sólo debe tomarse como un valor orientativo de la porosidad real del manto.

Para obtener la porosidad real de cada uno de los mantos de protección contruidos se contabilizaba las unidades cuyo c.d.g. quedaban dentro de un área de referencia conocida superpuesta en el talud. Así, mediante la siguiente fórmula, en la que se ha tomado como espesor del manto el valor del diámetro nominal de las piezas, se obtiene el valor de dicha porosidad:

$$Porosidad\ real(FOTO) = 1 - \frac{Volumen\ ocupado}{Volumen\ total} = 1 - \frac{n^{\circ}\ unid.\ en\ marco \cdot D_n^3}{Área\ marco \cdot D_n}$$

Fórmula 4.1. Fórmula para el cálculo de la porosidad real.

donde:

- D_n es el diámetro nominal de las piezas.
- $n^{\circ}\ unid.\ en\ marco$ es la media del número de piezas contabilizadas en el marco según el criterio abajo expuesto.
- $Área\ marco$ es el área del marco utilizado para el conteo de las unidades.

Para los tramos de tronco recto y curvo de baja curvatura se dibuja sobre la fotografía final de ensayo del manto un marco de área conocida para el conteo de piezas cuyo c.d.g. quedan dentro de él. Para evitar el efecto de borde se establece el área de referencia en una zona central del manto construido y se desplaza cinco veces en las cuatro direcciones del plano del talud a razón de $D_n/5$. Estas 20 posiciones junto con la posición inicial hacen un total de 21 posiciones en las que se calcula el número de piezas; con la media de los 21 valores se obtiene el $n^{\circ}\ unid.\ en\ marco$, y con él la porosidad de cada uno de los mantos de protección.



Figura 4.21. Desplazamiento del área de referencia para el conteo de unidades. Tramo recto (izq.) y tramo curvo (dcha.). (Fuente: propia)

En el caso particular de los morros no era posible dibujar y mover un área de referencia virtual sobre la fotografía final de ensayo del manto debido a su especial geometría. Por ello, se procedió a colocar un acetato transparente con la forma curva del morro y sobre ésta se contaban el número de unidades dentro de dos marcos reales, uno que comprendía la totalidad del morro construido y otro rectangular de la parte central del mismo (ver figura siguiente).



Figura 4.22. Áreas de referencia empleada para el cálculo de la porosidad en morros. (Fuente: propia)

4.5.3. Análisis del oleaje incidente y reflejado

La estimación del oleaje incidente y reflejado es un problema de difícil solución que afecta a los resultados de los experimentos físicos de laboratorio y al propio conocimiento del comportamiento de las obras marítimas. La dificultad principal del problema radica en la necesidad de estimar el oleaje incidente a partir de registros de campo de oleaje total, que incluyen una reflexión desconocida de la estructura, y en nuestro caso en particular se le suma el oleaje producido por la difracción del oleaje incidente en los morros de las estructuras ensayadas, que a su vez produce que se

genere otra reflexión desconocida en los muros del tanque. Así pues, es necesario estimar el oleaje incidente a partir de unas observaciones que contienen esa respuesta desconocida (oleaje reflejado).

No es posible determinar con fiabilidad el oleaje incidente si no se determina con fiabilidad también el oleaje reflejado; el oleaje incidente es la base de cálculo de la mayoría de los procedimientos de diseño actuales y el oleaje reflejado parece ser muy importante en algunas técnicas innovadoras recientemente desarrolladas. Como ya se ha comentado, separar correctamente el campo de oleaje incidente y reflejado suele afectar directamente a la fiabilidad de los modelos de respuesta estructural resultantes de los experimentos físicos.

En el tipo de ensayos que se estudian en esta Tesis Doctoral la repercusión de la correcta separación de ambos oleajes no tiene una importancia tan relevante como si se tratase de ensayos de estabilidad de un dique en talud, donde conocer el oleaje incidente en la estructura es de vital importancia para cuantificar la estabilidad del modelo en concreto. De todos modos esta separación se lleva a cabo para saber que oleaje está incidiendo sobre la estructura, y por lo tanto, a qué tipo de oleaje nos enfrentamos durante los ensayos de construcción realista.

Para llevar a cabo la separación del oleaje incidente del reflejado en este estudio se ha utilizado el método LASA-V (Medina 2001 y Figueres y Medina 2004), el cual ha sido probado frente a otros métodos (Kimura y 2-point), dando excelentes resultados en el análisis de oleaje regular no estacionario (MSE relativo < 3%). Cuando se aplica a oleaje irregular no estacionario con multirreflexiones, los resultados obtenidos indican $4\% < \text{MSE relativo} < 16\%$.

Después de separar el oleaje registrado en oleaje incidente y reflejado mediante el programa LASA-V, las alturas de ola registradas y sus respectivas partes incidentes y reflejadas se analizan con una herramienta informática desarrollada en el LPC, el LPCLab 1.0. Este programa analiza el oleaje en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo, y genera un informe con todos los parámetros relevantes de dicho oleaje.

4.5.3.1. Método LASA.

El método LASA (*Local Approximation using Simulated Annealing*) fue desarrollado por el profesor Medina (2001) y mejorado por Figueres y Medina (2004), para que pudiese trabajar con oleaje no estacionario y no lineal.

Este método está basado en un modelo local, de onda tipo lineal y de Stokes II (no lineal) y utiliza la cristalización simulada para optimizar los parámetros del modelo en cada ventana temporal.

Figueres y Medina optimizaron el LASA, basado en componentes lineales y no lineales Stokes-II, dando lugar al LASA-V, usando un modelo de onda no lineal aproximado de tipo Stokes-V. Este modelo permite analizar experimentos con olas marcadamente no lineales.

El método LASA ha sido contrastado con el “2-point” de Goda y Suzuki (1976) y el de Kimura (1985) resultando el método más robusto en los experimentos numéricos y el más consistente en los experimentos físicos tanto con oleaje regular como irregular.

Este método puede aplicarse directamente al análisis de oleaje regular e irregular 2D, no excesivamente peraltado y con cualquier número de sensores de nivel. Se caracteriza por poder aplicarse a experimentos físicos, usando ondas irregulares y no estacionarias, lo cual supone una gran ventaja si tenemos en cuenta que realmente es la manera en que se presenta el oleaje en la naturaleza y en los experimentos de laboratorio, y que los métodos usados hasta ahora no son capaces de dar una estimación aceptable de las componentes incidente y reflejada en estos casos y ola a ola.

El LASA-V conserva las ventajas del LASA original, en cuanto a que es poco sensible al ruido, permite el análisis de oleaje no estacionario, no lineal y es un modelo de onda en el dominio del tiempo, pero presenta una mejora sustancial que consiste en la posibilidad de analizar oleajes muy peraltados. Además, se ha demostrado la posibilidad de aplicar el concepto LASA de Medina (2001) con diferentes modelos de onda. En esta línea, el desarrollo de modelos de onda que relacionen el oleaje medido en superficie con el campo de velocidades y presiones del fluido permitirá nuevos métodos de análisis de oleaje I+R y el diseño de métodos de absorción de la reflexión, empleando sensores de presión y velocidad, además de los sensores de nivel. Del mismo modo, el empleo de modelos de onda para campos de oleaje en 3D, permitirá la aplicación del método a ensayos de oleaje direccional.

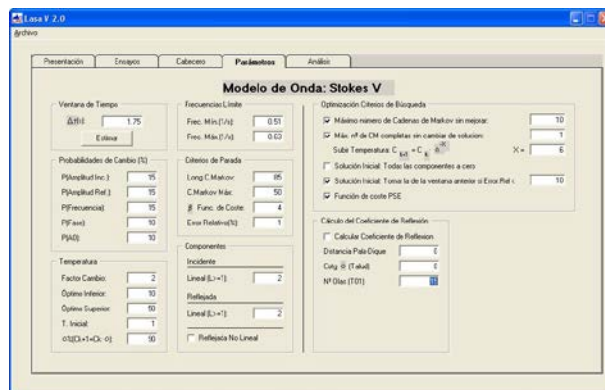


Figura 4.23. Ventana del programa LASA-V. (Fuente: propia)

4.5.3.2. LPCLab 1.0.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, este programa analiza el oleaje en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo, y genera un informe con todos los parámetros relevantes de dicho oleaje, así como gráficos que permiten controlar si la separación del oleaje ha sido suficientemente precisa.

Los parámetros más importantes en este informe, para el actual estudio, son las alturas de ola y los valores de los periodos. Para ensayos con oleaje irregular, el empleado, puede ser cualquiera de las alturas significantes $H_s = H_{1/3}$ (análisis temporal) o H_{m0} (análisis espectral). Estas características del oleaje real difieren de los valores teóricos, dependiendo de varios parámetros como la generación del oleaje, la propagación y la reflexión. Para un correcto análisis del comportamiento del dique bajo una determinada acción del oleaje, es fundamental que las características del oleaje real sean tenidas en cuenta correctamente.

- Análisis en el dominio del tiempo.

En el análisis en el dominio del tiempo, cada altura de ola individual de las series incidente y reflejada se define como sucesivos pasos descendentes por cero. Entonces, la altura de ola media H_m se calcula a partir de estas series de olas individuales, tanto para las series del oleaje incidente como del reflejado. El coeficiente de reflexión (Cr) se define como $H_{m,r} / H_{m,i}$, donde $H_{m,r}$ y $H_{m,i}$ son la altura de ola media del oleaje reflejado e incidente, respectivamente.

- Análisis en el dominio de la frecuencia.

Además del análisis en el dominio del tiempo, se calcula el espectro del oleaje de los ensayos realizados mediante la Transformada de Fourier Directa de la superficie del agua discretizada.

El LPCLab proporciona la posibilidad de dividir el oleaje total registrado en ventanas separadas, cuyo ancho y porcentaje de solape puede ser determinado por el propio usuario. La Transformada Rápida de Fourier actúa sobre cada ventana de forma separada y los resultados parciales se suman al final. Las opciones para el análisis espectral son: el ancho de ventana, el número de puntos para representar el espectro y el porcentaje de solape entre las ventanas. Otro dato de entrada importante es el rango de frecuencias que se introduce con la finalidad de eliminar frecuencias registradas poco útiles.

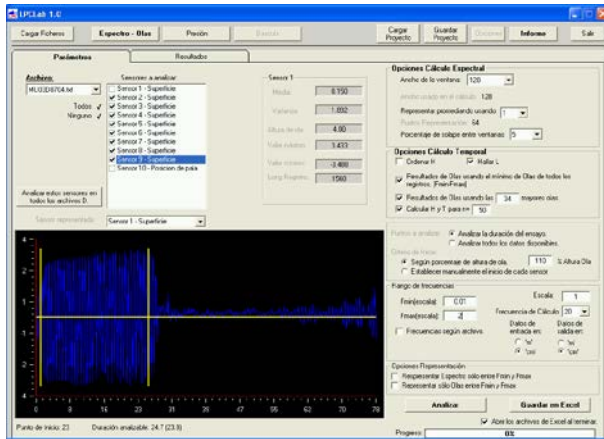


Figura 4.24. Ventana del programa LPCLab.

Capítulo 5

Resultados Experimentales

5.1. Introducción

En el presente capítulo se han recogido los resultados de los ensayos experimentales llevados a cabo en el tanque de oleajes del LPC-UPV para estudiar las mallas de colocación del elemento Cubípodo para distintos tramos de mantos principales de diques en talud de pendiente expuesta al oleaje $H/V=1.5/1$ y $H/V=2/1$.

Los resultados se han ordenado en función de los distintos tramos de manto de protección estudiado: tronco recto, tronco curvo de baja curvatura, morro y tronco curvo de alta curvatura y arranques. Dentro de cada uno de éstos, se han dividido los resultados en función del proyecto de investigación al que pertenecen.

Al final del capítulo se realiza un breve resumen en formato tablas de las mallas de colocación del Cubípodo consideradas como las más apropiadas para construir los mantos principales de cada tramo característico de un dique en talud.

5.2. Rango de porosidades construibles de un manto de Cubípodos

Como ya se ha comentado en el capítulo anterior, en una fase inicial de la investigación se quiso establecer el rango de porosidades con las que se podía construir un manto de Cubípodos. Para ello se empleó el sistema de colocación CBPS sobre el modelo de Pardo (2009), el cual contaba con un talud $H/V=1.5/1$ en la cara expuesta al oleaje.

Para obtener dicho rango se ensayaron 13 de mallas de colocación estáticas para tronco recto distintas, colocando en cada uno de los ensayos 72 Cubípodos en una sola capa. Según estos ensayos el rango de porosidades con el que se pueden construir mantos de Cubípodos sobre un talud $H/V=1.5/1$ es del 37% al 51%. En el Anejo 3 puede verse la secuencia completa de ensayos así como los parámetros de la malla de colocación empleada en cada uno de ellos.

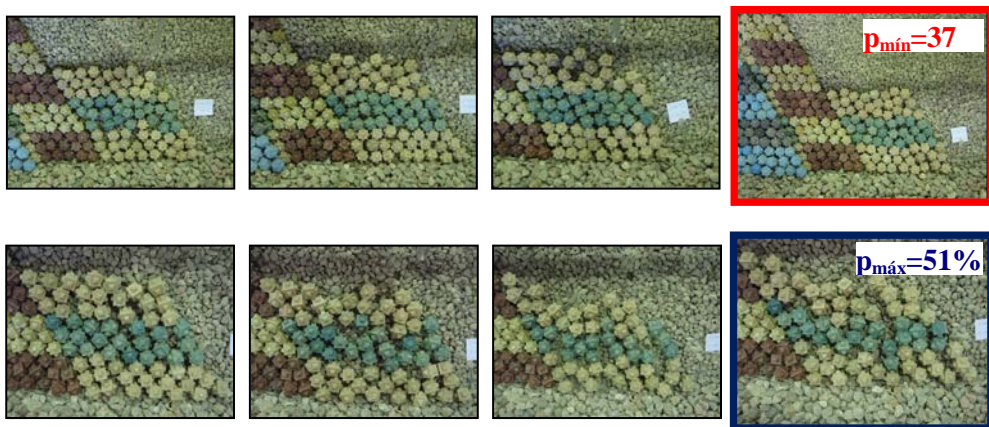


Figura 5.1. Ensayos de obtención del rango de porosidades realmente construibles para mantos de Cubípodos en talud $H/V=1.5/1$. (Fuente: propia)

La apariencia visual del manto construido tras cada ensayo (cabalgamientos o desmoronamientos) se usó como criterio cualitativo para discriminar entre mantos aceptables o inaceptables desde el punto de vista de calidad de acabado.

5.3. Mallas de colocación del Cubípedo en tronco recto

Las mallas de colocación del elemento Cubípedo en tronco recto se han tratado en todos los proyectos de investigación que engloban esta Tesis Doctoral, a continuación se presentan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos de colocación realista.

5.3.1. Ensayos de colocación de Pardo (2009)

A partir de las distintas mallas de colocación del Cubípodo ensayadas con el método del CBPS se obtuvo la malla estática que más se acercaba a la porosidad objetivo del Cubípodo, 41%, cuyos parámetros eran $a/D_n = 1.565$ y $b/D_n = 1.018$. Dicha malla se ensayó en seco y bajo los distintos oleajes definidos en el Capítulo 4, mediante el uso de la grúa radial y las pinzas de presión a escala. Los ensayos se llevaron a cabo sobre un talud $H/V=1.5/1$.

Durante el ensayo en seco se colocaron 72 piezas en una sola capa, y se obtuvo una porosidad del 40.4%, muy cercana a la porosidad objetivo del 41%. Por lo que se comprobó que esta malla de colocación era la apropiada para la construcción de un manto de Cubípodos en un talud $H/V=1.5/1$. En la figura siguiente puede verse el aspecto general del manto monocapa tras el ensayo.



Figura 5.2. Manto construido con la malla de colocación estática para tronco recto $a/D_n = 1.565$ y $b/D_n = 1.018$ de Pardo (2009) en seco. (Fuente: propia)

Como segunda parte de este ensayo se pretendió establecer si la malla anterior era o no realmente construible bajo condiciones de oleaje. Para ello, se llevaron a cabo 4 ensayos de construcción realista de manto monocapa bajo distintas condiciones de oleaje. Durante estos ensayos se colocaron 144 piezas en cada test.

En la Tabla 5.1 se pueden contemplar las características y resultados de los ensayos llevados a cabo con la malla estática de parámetros $a/D_n = 1.565$ y $b/D_n = 1.018$, incluyendo la porosidad real obtenida y el porcentaje de elementos perdidos (los que se salen de la capa en construcción).

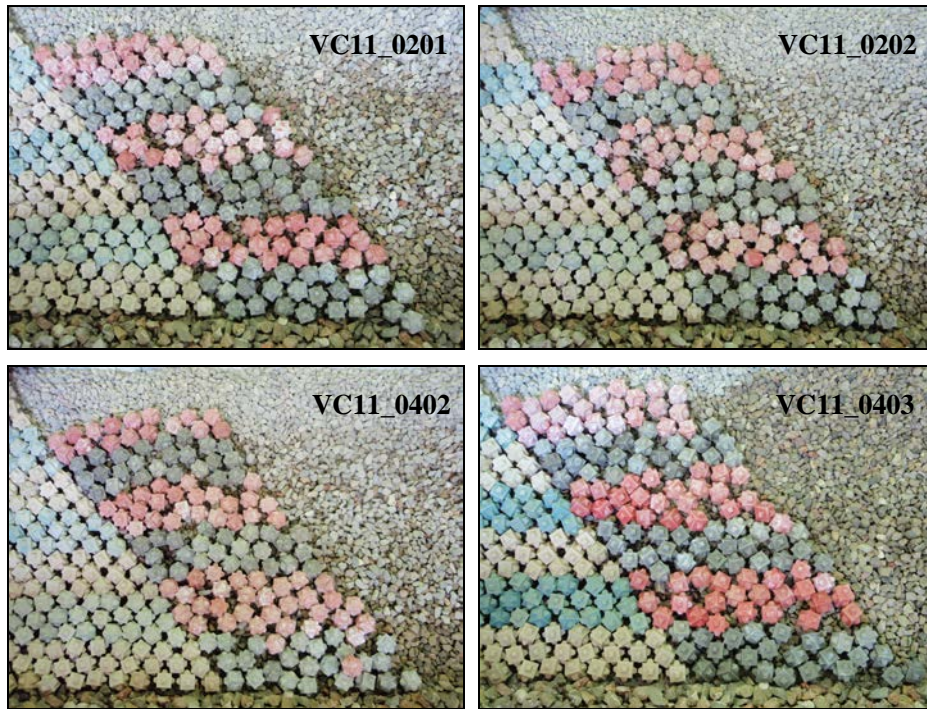


Figura 5.3. Mantos construidos con la malla de colocación estática para tronco recto $a/D_n = 1.565$ y $b/D_n = 1.018$ de Pardo (2009) bajo distintas condiciones de oleaje. (Fuente: propia)

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
VC11_seco	TR estática	1/100 1/50	1.5/1	1ª	1.565	1.018	–	–	–	–	0.404	0
VC11_0201	TR estática	1/100 1/50	1.5/1	1ª	1.565	1.018	2	0.8	30	Aprox. 90°	0.466	0
VC11_0202	TR estática	1/100 1/50	1.5/1	1ª	1.565	1.018	2	1.15	30	Aprox. 90°	0.466	0
VC11_0402	TR estática	1/100 1/50	1.5/1	1ª	1.565	1.018	4	1.15	30	Aprox. 90°	0.460	0
VC11_0403	TR estática	1/100 1/50	1.5/1	1ª	1.565	1.018	4	1.6	30	Aprox. 90°	0.434	0

Tabla 5.1. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco recto en talud $H/V=1.5/1$ de Pardo (2009). (Fuente: propia)

De estos resultados se puede concluir que la malla ensayada proporciona unos mantos con una apariencia bastante homogénea, en los cuales todos los elementos colocados permanecen en la capa en construcción, no produciéndose ningún cabalgamiento o pérdida de elementos. Como se aprecia en la tabla anterior, los valores de porosidad real obtenida en los ensayos con oleaje son superiores a los conseguidos durante el ensayo en seco, por lo que queda clara la influencia del estado de mar en la colocación.

5.3.2. Ensayos de colocación del Proyecto CLIOMAR

Durante los ensayos de construcción realista englobados en el Proyecto CLIOMAR se desarrolló el concepto de malla progresiva para troncos rectos de diques en talud con el objetivo de absorber el efecto de la compactación de las filas inferiores del manto que se puede producir durante la construcción.

Se ensayaron varias mallas progresivas sobre una estructura con talud $H/V=2/1$ y bajo distintas condiciones de oleaje irregular, tanto para primera como segunda capa. En cada uno de los ensayos se colocaron 144 Cubípodos.

Tras varias pruebas de la malla progresiva se fijó el porcentaje de decremento de la distancia entre filas en el 1% del parámetro b ($\Delta b = 1\%b$), adoptándose este valor para todos los ensayos con este tipo de malla de colocación.

En la siguiente figura pueden verse los resultados finales de la construcción realista del manto mediante la malla de colocación progresiva de parámetros $a/D_n = 1.597$, $b/D_n = 1.047$ y $\Delta b = 1\%b$, para la primera y la segunda capa, y bajo unas condiciones de oleaje de $H_s = 2.5$ cm y $T_p = 1.2$ s. La totalidad de las fotografías finales de los ensayos llevados a cabo pueden verse en el Anejo 3.

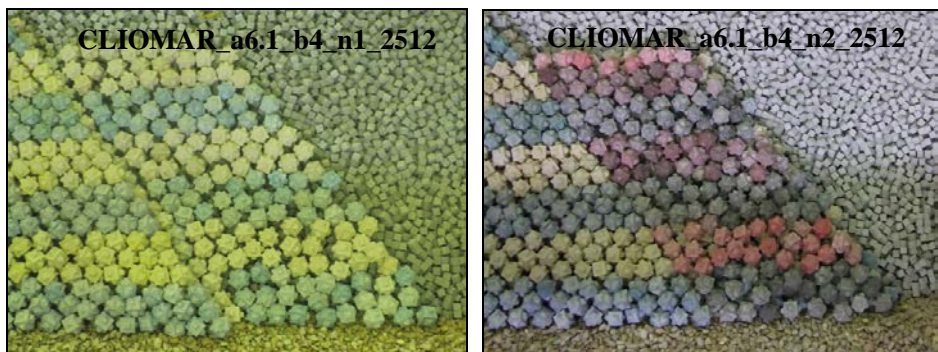


Figura 5.4. Manto construido con la malla de colocación progresiva para tronco recto $a/D_n = 1.597$, $b/D_n = 1.047$ y $\Delta b = 1\%b$ del Proyecto CLIOMAR. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)

A continuación se pueden ver las características y resultados de cada uno de los ensayos de construcción de mantos de tronco recto llevados a cabo en el Proyecto CLIOMAR.

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Δb	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
CLIOMAR_a6_b4_n1_1510	TR progresiva	1/100	2/1	1ª	1.571	1.047	1%b	1.5	1	40	Aprox. 90°	0.432	2.1
CLIOMAR_a6_b4_n1_2512	TR progresiva	1/100	2/1	1ª	1.571	1.047	1%b	2.5	1.2	40	Aprox. 90°	0.430	2.8
CLIOMAR_a7_b4_n1_1510	TR progresiva	1/100	2/1	1ª	1.832	1.047	1%b	1.5	1	40	Aprox. 90°	0.422	2.8
CLIOMAR_a7_b4_n1_2512	TR progresiva	1/100	2/1	1ª	1.832	1.047	1%b	2.5	1.2	40	Aprox. 90°	0.423	0.7
CLIOMAR_a5.7_b4_n1_1510	TR progresiva	1/100	2/1	1ª	1.492	1.047	1%b	1.5	1	40	Aprox. 90°	0.469	3.5
CLIOMAR_a5.7_b4_n2_1510	TR progresiva	1/100	2/1	2ª	1.492	1.047	1%b	1.5	1	40	Aprox. 90°	0.404	4.2
CLIOMAR_a6.1_b4_n1_1510	TR progresiva	1/100	2/1	1ª	1.597	1.047	1%b	1.5	1	40	Aprox. 90°	0.422	1.4
CLIOMAR_a6.1_b4_n2_1510	TR progresiva	1/100	2/1	2ª	1.597	1.047	1%b	1.5	1	40	Aprox. 90°	0.404	2.8
CLIOMAR_a6.1_b4_n1_2512	TR progresiva	1/100	2/1	1ª	1.597	1.047	1%b	2.5	1.2	40	Aprox. 90°	0.433	0.0
CLIOMAR_a6.1_b4_n2_2512	TR progresiva	1/100	2/1	2ª	1.597	1.047	1%b	2.5	1.2	40	Aprox. 90°	0.404	0.0

Tabla 5.2. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco recto en talud $H/V=2/1$ del Proyecto CLIOMAR. (Fuente: propia)

Se ensayaron cuatro mallas de colocación progresiva distinta siguiendo un proceso de prueba-error hasta encontrar la malla que proporcionara un manto homogéneo con una porosidad cercana al 41-42%. Dicha malla fue la de parámetros $a/D_n = 1.597$, $b/D_n = 1.047$ y $\Delta b = 1\%b$, la cual proporcionó valores de porosidad del 42.2-43.3% para la primera capa y del 40.4% para la segunda, lo que constituye un manto con una porosidad del 41.6% en su conjunto. Además, los mantos construidos con esta malla presentaron un bajo porcentaje de elementos perdidos, estando por debajo del 2.8% del total.

5.3.3. Ensayos de colocación del dique de San Andrés

En los ensayos de construcción realista del tronco recto del dique de San Andrés se ensayaron varias mallas de colocación, estáticas y progresivas, sobre un talud $H/V=2/1$, en seco y para la primera y segunda capa del manto. Al igual que en el Proyecto CLIOMAR, para las mallas progresivas se fijó el porcentaje de decremento de la distancia entre filas como el 1% del parámetro b ($\Delta b = 1\%b$). En cada uno de los ensayos se colocaron 96 Cubípodos.

En la Figura 5.5 pueden verse los resultados de la construcción realista del manto mediante la malla de colocación estática de parámetros $a/D_n = 1.500$ y $b/D_n = 1.053$, para la primera y la segunda capa, en seco. La totalidad de las fotografías finales de los ensayos pueden verse en el Anejo 3.

En la Tabla 5.3 se pueden ver las características y resultados de cada uno de los ensayos llevados a cabo, incluyendo la porosidad real obtenida y el porcentaje de elementos perdidos.



Figura 5.5. Manto construido con la malla de colocación estática para tronco recto $a/D_n = 1.500$ y $b/D_n = 1.053$ del dique de San Andrés. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/D_n	b/D_n	Δb	Hs (cm)	T p(s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
TR_P_a6.1_b4_n1	TR progresiva	1/36	2/1	1ª	1.605	1.053	1%b	—	—	—	—	0.387	0.0
TR_P_a6.1_b4_n2	TR progresiva	1/36	2/1	2ª	1.605	1.053	1%b	—	—	—	—	0.397	1.0
TR_P_a5.9_b4_n1	TR progresiva	1/36	2/1	1ª	1.553	1.053	1%b	—	—	—	—	0.413	0.0
TR_P_a5.9_b4_n2	TR progresiva	1/36	2/1	2ª	1.553	1.053	1%b	—	—	—	—	0.399	3.1
TR_E_a6.1_b4_n1	TR estática	1/36	2/1	1ª	1.605	1.053	—	—	—	—	—	0.453	0.0
TR_E_a6.1_b4_n2	TR estática	1/36	2/1	2ª	1.605	1.053	—	—	—	—	—	0.422	0.0
TR_E_a5.7_b4_n1	TR estática	1/36	2/1	1ª	1.500	1.053	—	—	—	—	—	0.378	0.0
TR_E_a5.7_b4_n2	TR estática	1/36	2/1	2ª	1.500	1.053	—	—	—	—	—	0.431	1.0

Tabla 5.3. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco recto sobre talud $H/V=2/1$ del dique de San Andrés. (Fuente: propia)

En el estudio de las mallas de tronco recto del dique de San Andrés también se estudiaron cuatro mallas distintas bajo el mismo proceso de prueba-error, dos progresivas y dos estáticas.

Durante los ensayos las mallas progresivas no obtuvieron una ventaja sustancial con respecto a las estáticas. Este hecho puede ser debido a que el talud $H/V=2/1$ es más tendido que el de los ensayos a partir de los que se diseñó la malla progresiva, con talud $H/V=1.5/1$, y por ello la compactación de las filas inferiores a medida que avanza la construcción del manto no es tan clara.

La malla estática de colocación $a/D_n = 1.500$ y $b/D_n = 1.053$ consiguió muy buenos resultados, valores de porosidad del 37.8% para la primera capa y del 43.1% para la segunda, lo cual proporciona un manto con una porosidad del 40.5% en su conjunto. La malla estática $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.053$ también proporcionó resultados aceptables, con valores de porosidad del 45.3% para la primera capa y del 42.2% para la segunda, con una porosidad global de 43.8%. Ambas mallas presentaron un porcentaje de elementos perdidos por debajo del 1%.

5.3.4. Ensayos de colocación del Proyecto MMONOCAPA

Dentro del Proyecto MMONOCAPA se quiso validar las dos mallas estáticas de tronco recto obtenidas en los ensayos del dique de San Andrés con los dos tipos de oleaje irregular definidos en el Capítulo 4, para primera y segunda capa sobre talud $H/V=2/1$. Las mallas ensayadas fueron $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.053$, y $a/D_n = 1.500$ y $b/D_n = 1.053$. En cada uno de los ensayos se colocaron 80 Cubípodos.

En las siguientes figuras pueden verse los resultados finales de la construcción realista de la primera y segunda capa del manto mediante las dos mallas anteriores, para un oleaje de $H_s = 1.5$ cm y $T_p = 1$ s. La totalidad de las fotografías finales de los ensayos llevados a cabo pueden verse en el Anejo 3.



Figura 5.6. Manto construido con la malla de colocación estática para tronco recto $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.053$ del Proyecto MMONOCAPA. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)



Figura 5.7. Manto construido con la malla de colocación estática para tronco recto $a/D_n = 1.500$ y $b/D_n = 1.053$ del Proyecto MMONOCAPA. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)

A continuación se pueden ver las características y resultados de los ensayos de construcción realista de mantos de tronco recto con oleaje realizados en el Proyecto MMONOCAPA.

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
TR_2_1510_a6.1_b4_n1	TR estatica	1/36	2/1	1ª	1.605	1.053	1.5	1	19	Aprox. 0º	0.395	0.0
TR_2_1510_a6.1_b4_n2	TR estatica	1/36	2/1	2ª	1.605	1.053	1.5	1	19	Aprox. 0º	0.398	0.0
TR_2_2512_a6.1_b4_n1	TR estatica	1/36	2/1	1ª	1.605	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 0º	0.391	0.0
TR_2_2512_a6.1_b4_n2	TR estatica	1/36	2/1	2ª	1.605	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 0º	0.359	1.4
TR_2_1510_a5.7_b4_n1	TR estatica	1/36	2/1	1ª	1.500	1.053	1.5	1	19	Aprox. 0º	0.419	0.0
TR_2_1510_a5.7_b4_n2	TR estatica	1/36	2/1	2ª	1.500	1.053	1.5	1	19	Aprox. 0º	0.443	1.4
TR_2_2512_a5.7_b4_n1	TR estatica	1/36	2/1	1ª	1.500	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 0º	0.479	1.3
TR_2_2512_a5.7_b4_n2	TR estatica	1/36	2/1	2ª	1.500	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 0º	0.382	2.5

Tabla 5.4. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco recto en talud $H/V=2/1$ del Proyecto MMONOCAPA. (Fuente: propia)

La malla $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.053$ obtuvo buenos resultados bajo las dos condiciones de oleaje establecidas durante la construcción. Las porosidades globales del manto, incluyendo las dos capas que lo forman, fueron de 39.7% para el oleaje menos energético y de 37.5% para el de mayor energía, ambos un poco por debajo del objetivo del 41-42%, pero con un bajo porcentaje de elementos perdidos.

La segunda malla ensayada, $a/D_n = 1.500$ y $b/D_n = 1.053$, logró una porosidad global de 43.1% para ambos oleajes. Sin embargo, para el oleaje de mayor energía, se apreció una primera capa del manto muy porosa, 47.9%. Esto fue ocasionado por estar los elementos muy juntos en el talud y al ser golpeados por el oleaje hacía que sufrieran movimientos con respecto a su localización teórica, lo que influía en el resto de elementos a colocar.

5.4. Mallas de colocación del Cubípodo en tronco curvo de baja curvatura

La sección de tronco curvo de baja curvatura se estudió en los proyectos del dique de San Andrés y MMONOCAPA, a continuación se detallan los resultados obtenidos.

5.4.1. Ensayos de colocación del dique de San Andrés

En los ensayos de construcción realista del tronco curvo del dique de San Andrés se ensayaron varias mallas de colocación estáticas, sobre un talud $H/V=2/1$, en seco y para la primera y segunda capa del manto curvo con radio adimensionalizado $R/D_n=109.2$. En un principio se probó a construir el tramo de tronco curvo con mallas estáticas idénticas a las empleadas en el tramo recto, pero puesto que éstas no se adaptaban a la geometría del tramo curvo se desarrolló una malla específica para este tipo de tramo. En los ensayos de tronco curvo se colocaron entre 84 y 150 Cubípodos por capa del manto.

En la siguiente figura pueden verse los resultados finales de la construcción realista del manto mediante la malla de colocación estática de parámetros $a/D_n = 1.605$

y $b/D_n = 1.053$, para la primera y la segunda capa, en seco. En el Anejo 3 se encuentran el resto de las fotografías de los ensayos realizados.



Figura 5.8. Manto construido con la malla de colocación estática para tronco curvo $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.053$ del dique de San Andrés. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)

En la siguiente tabla pueden verse las características y resultados obtenidos de los ensayos llevados a cabo para este proyecto.

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/D_n	b/D_n	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
TCv1_seco_a6.1_b3.8_n1	TR estática	1/36	2/1	1ª	1.605	1.000	—	—	—	—	0.448	0.0
TCv1_seco_a6.1_b3.8_n2	TR estática	1/36	2/1	2ª	1.605	1.000	—	—	—	—	0.422	0.0
TCv2_seco_a6.1_b4_n1	TC estática	1/36	2/1	1ª	1.605	1.053	—	—	—	—	0.390	0.0
TCv2_seco_a6.1_b4_n2	TC estática	1/36	2/1	2ª	1.605	1.053	—	—	—	—	0.451	0.0
TCv2_seco_a6.4_b4_n1	TC estática	1/36	2/1	1ª	1.684	1.053	—	—	—	—	0.421	0.9
TCv2_seco_a6.4_b4_n2	TC estática	1/36	2/1	2ª	1.684	1.053	—	—	—	—	0.480	0.0

Tabla 5.5. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco curvo sobre talud $H/V=2/1$ del dique de San Andrés. (Fuente: propia)

Además de la malla de tronco recto se probaron dos mallas de tronco curvo. La primera, $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.053$, proporcionó un valor de porosidad global del 42.1% y ningún elemento perdido; mientras que la segunda, $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.053$, obtuvo un 45.1% de porosidad global y un porcentaje de elementos perdidos menor del 1%. La segunda capa de esta última malla presentaba una porosidad elevada, 48.0%, muy alejada del objetivo 41-42%.

5.4.2. Ensayos de colocación del Proyecto MMONOCAPA

Al igual que para el caso de tronco recto, en el Proyecto MMONOCAPA se quiso validar los ensayos de las mallas estáticas de tronco curvo obtenidas en los ensayos del dique de San Andrés con los dos tipos de oleaje irregular definidos en el Capítulo 4, para primera y segunda capa sobre talud $H/V=2/1$ con radio adimensionalizado $R/D_n=109.2$. La malla curva ensayada fue la recomendada para la construcción del dique de

San Andrés, de parámetros $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.053$. En cada uno de los ensayos se colocaron 95 Cubípodos en la primera capa del manto y 81 en la segunda.

En las siguientes figuras pueden verse los resultados finales de los ensayos de primera y segunda capa del manto mediante la malla ensayada para un oleaje $H_s = 2.5$ cm y $T_p = 1.2$ s. La totalidad de las fotografías finales de los ensayos llevados a cabo pueden verse en el Anejo 3.



Figura 5.9. Manto construido con la malla de colocación estática para tronco curvo $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.053$ del Proyecto MMONOCAPA sobre talud $H/V=2/1$. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)

En la siguiente tabla se pueden ver las características y resultados obtenidos de los ensayos llevados a cabo para este proyecto sobre talud $H/V=2/1$.

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
TC_2_1510_6.1_4_n1	TC estática	1/36	2/1	1ª	1.605	1.053	1.5	1	19	Aprox. 80°	0.420	0.0
TC_2_1510_6.1_4_n2	TC estática	1/36	2/1	2ª	1.605	1.053	1.5	1	19	Aprox. 80°	0.446	0.0
TC_2_2512_6.1_4_n1	TC estática	1/36	2/1	1ª	1.605	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 80°	0.393	2.1
TC_2_2512_6.1_4_n2	TC estática	1/36	2/1	2ª	1.605	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 80°	0.471	1.2
TC_2_2512_6.1_4_n1_rep	TC estática	1/36	2/1	1ª	1.605	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 80°	0.425	0.0
TC_2_2512_6.1_4_n2_rep	TC estática	1/36	2/1	2ª	1.605	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 80°	0.449	0.0

Tabla 5.6. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco curvo sobre talud $H/V=2/1$ del Proyecto MMONOCAPA. (Fuente: propia)

En los ensayos bajo las condiciones del oleaje de menor entidad se obtuvo una porosidad global del manto de 43.3% con un porcentaje nulo de elementos perdidos. Para el caso del oleaje mayor se realizaron ensayos de repetición de todo el manto, ya que la primera vez que se llevaron a cabo se apreció que la construcción del manto podía haber sido influenciada por un mal perfilado de la berma de pie. En los ensayos de repetición la malla ensayada proporcionó un valor de porosidad global de 43.7%. Para ambos oleajes se consiguió una porosidad un poco por encima de la obtenida en condiciones secas, 42.1%.

Sobre el mismo modelo de tronco curvo de San Andrés, pero recreciendo el talud para conseguir una relación $H/V=1.5/1$ (con $R/D_n=108.7$), se ensayaron distintas

mallas de colocación curvas con y sin oleaje, y para primera y segunda capa. Para este talud también se ensayaron mallas de colocación curvas progresivas, las cuales al igual que para tronco recto, modifican el parámetro b con el objetivo de absorber el efecto de la compactación de las filas inferiores del manto. En todas las mallas progresivas ensayadas el porcentaje de decremento de la distancia entre filas se tomó como el 1% del parámetro b ($\Delta b = 1\%b$). En cada uno de los ensayos se colocaron 81 Cubípodos.

A continuación pueden verse los resultados finales de la construcción realista de la primera y segunda capa del manto mediante la malla progresiva de tronco curvo $a/D_n = 1.605$, $b/D_n = 1.018$ y $\Delta b = 1\%b$ para un oleaje $H_s = 2.5$ cm y $T_p = 1.2$ s.

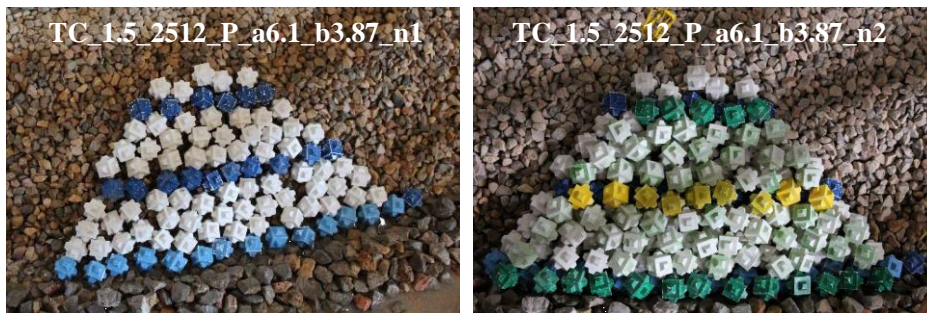


Figura 5.10. Manto construido con la malla de colocación progresiva para tronco curvo $a/D_n = 1.605$, $b/D_n = 1.018$ y $\Delta b = 1\%b$ del Proyecto MMONOCAPA sobre talud $H/V=1.5/1$. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)

En la siguiente tabla se pueden ver las características y resultados obtenidos de los ensayos llevados a cabo para este proyecto sobre talud $H/V=1.5/1$, incluyendo la porosidad real obtenida y el porcentaje de elementos perdidos.

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/D_n	b/D_n	Δb	H_s (cm)	T_p (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
TC_1.5_seco_6.1_4	TCestática	1/36	1.5/1	1ª	1.605	1.053	—	—	—	—	—	0.438	0.0
TC_1.5_seco_6.1_3.87	TCestática	1/36	1.5/1	1ª	1.605	1.018	—	—	—	—	—	0.407	0.0
TC_1.5_seco_P_6.1_3.87	TC progresiva	1/36	1.5/1	1ª	1.605	1.018	1%b	—	—	—	—	0.400	0.0
TC_1.5_1510_P_6.1_3.87_n1	TC progresiva	1/36	1.5/1	1ª	1.605	1.018	1%b	1.5	1	19	Aprox. 80°	0.424	0.0
TC_1.5_1510_P_6.1_3.87_n2	TC progresiva	1/36	1.5/1	2ª	1.605	1.018	1%b	1.5	1	19	Aprox. 80°	0.453	0.0
TC_1.5_2512_P_6.1_3.87_n1	TC progresiva	1/36	1.5/1	1ª	1.605	1.018	1%b	2.5	1.2	19	Aprox. 80°	0.401	0.0
TC_1.5_2512_P_6.1_3.87_n2	TC progresiva	1/36	1.5/1	2ª	1.605	1.018	1%b	2.5	1.2	19	Aprox. 80°	0.429	0.0

Tabla 5.7. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco curvo sobre talud $H/V=1.5/1$ del Proyecto MMONOCAPA. (Fuente: propia)

En los ensayos para talud $H/V=1.5/1$, se parte de la misma malla obtenida en los ensayos de talud $H/V=2/1$, la de parámetros $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.053$. Durante los ensayos se apreció que los elementos colocados sobre el talud, una vez liberados por la pinza, rodaban hasta juntarse con la fila inferior, por ello se decidió reducir el valor del parámetro b en las siguientes mallas a ensayar.

La malla curva $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.018$, tanto su variante estática como la progresiva, dieron buenos resultados en los ensayos con unas porosidades en los ensayos en seco de 40.7% y 40.0%, respectivamente. Ambas sin ningún elemento perdido. Bajo condiciones de oleaje sólo se ensayó la malla progresiva, la cual obtuvo unas porosidades globales de 43.9% para el oleaje menor y de 41.5% para el oleaje mayor.

5.5. Mallas de colocación del Cubípodo en morros y tronco curvo de alta curvatura

Al igual que las secciones anteriores, las zonas de morro y tronco curvo de alta curvatura se ensayaron en los proyectos del dique de San Andrés y MMONOCAPA.

Para estos tramos se ensayó el tipo de malla denominada como encadenadas, y se siguió el proceso constructivo descrito a continuación.

1. En el caso del laboratorio se parte de un primer elemento dispuesto a mano en la primera fila, a partir de las coordenadas de este elemento se monta la primera malla encadenada. En prototipo este elemento se correspondería con el último dispuesto según la malla del tramo inmediatamente anterior al morro.
2. Se colocan filas de elementos con esta primera malla hasta que la relación $a_{m.}/D_n$ ya no permite colocar correctamente una siguiente fila de piezas al estar muy juntas dentro de la misma fila (si se colocara esta fila se producirían multitud de cabalgamientos).
3. Se coloca el primer elemento de la siguiente fila utilizando las coordenadas de la primera malla para él, y a partir de éste se monta la segunda malla encadenada, la cual restablece el valor inicial de la separación entre c.d.g. de las piezas de la primera fila.
4. Se repite el proceso tantas veces como sea necesario hasta construir todo el manto.

En la siguiente secuencia de imágenes se puede ver el proceso de construcción de este tipo de secciones.

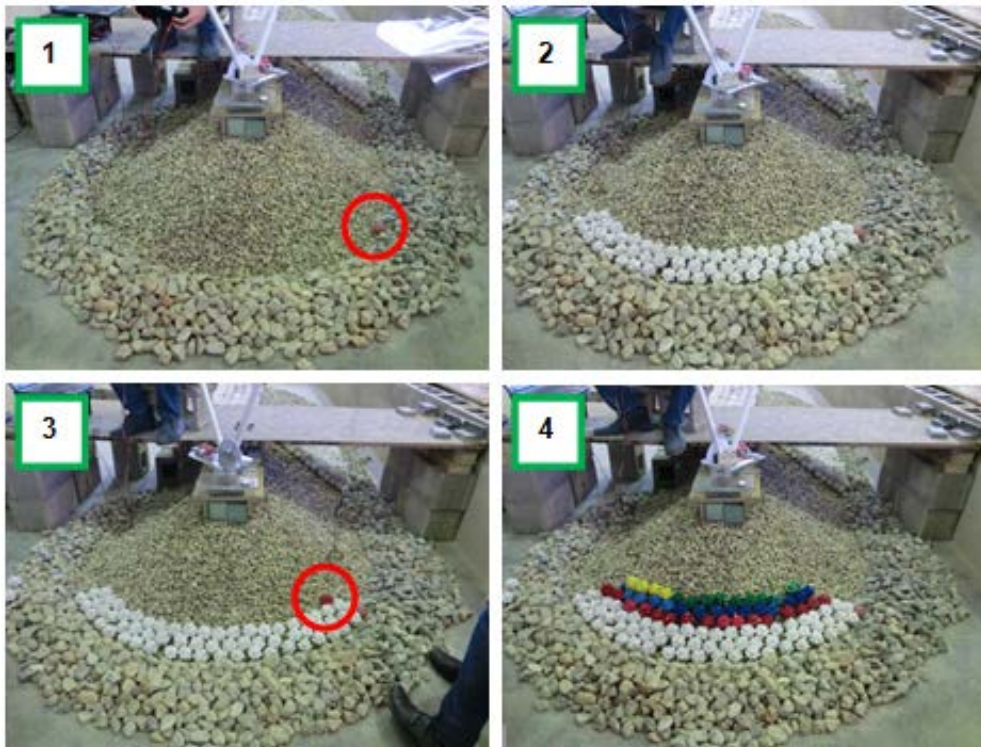


Figura 5.11. Proceso constructivo del morro paso a paso mediante mallas encadenadas. (Fuente: propia)

5.5.1. Ensayos de colocación del dique de San Andrés

Sobre el modelo del dique de San Andrés de talud $H/V=2/1$ se ensayaron varias mallas encadenadas en condiciones sin oleaje para construir la primera y segunda capa del manto de un morro de radio 415.1 cm y relación $R/D_n= 18.9$. En estos ensayos se colocaron entre 125 y 151 Cubípodos por capa del manto.

En la siguiente figura pueden verse los resultados finales de la construcción realista del manto mediante la malla de colocación para morro de parámetros $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.053$, para la primera y la segunda capa, en seco. El resto de las fotografías finales de los ensayos pueden verse en el Anejo 3.

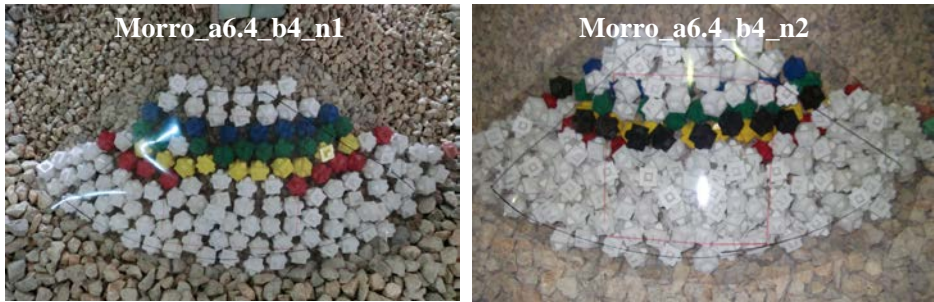


Figura 5.12. Manto construido con la malla de colocación encadenada para morro $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.053$ del dique de San Andrés. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)

En la siguiente tabla se pueden ver las características y resultados de cada uno de los ensayos realizados, incluyendo la porosidad real obtenida y el porcentaje de elementos perdidos.

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
Morro_a6.1_b4_n1	Morro	1/36	2/1	1ª	1.605	1.053	—	—	—	—	0.427	0.0
Morro_a6.1_b4_n2	Morro	1/36	2/1	2ª	1.605	1.053	—	—	—	—	0.481	0.0
Morro_a6.1_b4_n1_rep1	Morro	1/36	2/1	1ª	1.605	1.053	—	—	—	—	0.414	0.0
Morro_a6.1_b4_n2_rep1	Morro	1/36	2/1	2ª	1.605	1.053	—	—	—	—	0.499	0.1
Morro_a6.4_b4_n1	Morro	1/36	2/1	1ª	1.684	1.053	—	—	—	—	0.433	0.0
Morro_a6.4_b4_n2	Morro	1/36	2/1	2ª	1.684	1.053	—	—	—	—	0.475	0.0

Tabla 5.8. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de morro del dique de San Andrés. (Fuente: propia)

En esta sección se ensayaron dos mallas de colocación. La primera de ellas partía de los mismos valores de separación entre elementos probados en otros tramos del dique, $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.053$. Pese a que dicha malla proporcionaba resultados de porosidad del manto, calidad de acabado del mismo y porcentaje de elementos perdidos admisibles, durante los ensayos se observó que la distancia entre elementos de la misma fila se reducía rápidamente al avanzar la construcción talud arriba, por ello en ensayos posteriores se procedió a ampliar la distancia inicial entre piezas. La malla $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.053$ consiguió muy buenos resultados, valores de porosidad del 43.3% para la primera capa y del 47.5% para la segunda, lo cual proporciona un manto con una porosidad del 45.4% en su conjunto. Ambas mallas ensayadas presentaron un porcentaje de elementos perdidos prácticamente nulos.

Para este valor de radio adimensionalizado $R/D_n = 18.9$ y talud $H/V = 2/1$, se colocaron con éxito Cubípodos mientras la separación entre elementos de la misma fila era mayor de $a_{m,j}/D_n > 1.342$. Para valores menores el espaciamiento entre piezas es demasiado pequeño y no se pueden colocar los Cubípodos correctamente. Una vez fijado el espaciamiento mínimo entre c.d.g. de las piezas de la misma fila ($a_{m,j,min}$) y conociendo el radio inicial de cada malla encadenada ($R_{m,i}$), se puede obtener el número máximo de filas de elementos a colocar con cada malla encadenada ($n_{m,máx}$)

mediante la Fórmula 3.7 del Capítulo 3. Este número máximo de filas no tiene por qué ser igual en todas las mallas encadenadas con los mismos parámetros, ya que depende del valor del radio inicial.

5.5.2. Ensayos de colocación del Proyecto MMONOCAPA

Sobre el modelo del dique de San Andrés de talud $H/V=1.5/1$ se ensayaron varias mallas encadenadas en condiciones secas y con oleaje para construir tres morros con radios de 60, 70 y 80 cm y relaciones $R/D_n= 15.8$, $R/D_n= 18.4$ y $R/D_n= 21.1$, respectivamente. En estos ensayos se colocaron entre 75 y 92 Cubípodos por capa del manto para los de menor radio, entre 114 y 177 para los de radio intermedio y entre 161 y 178 para los de mayor radio.

En la siguiente figura pueden verse los resultados finales de la construcción realista del manto mediante la malla de colocación para morro R60 de parámetros $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.018$, para la primera y la segunda capa, para un oleaje $H_s = 1.5$ cm y $T_p = 1.0$ s. El resto de las fotografías finales de los ensayos pueden verse en el Anejo 3.

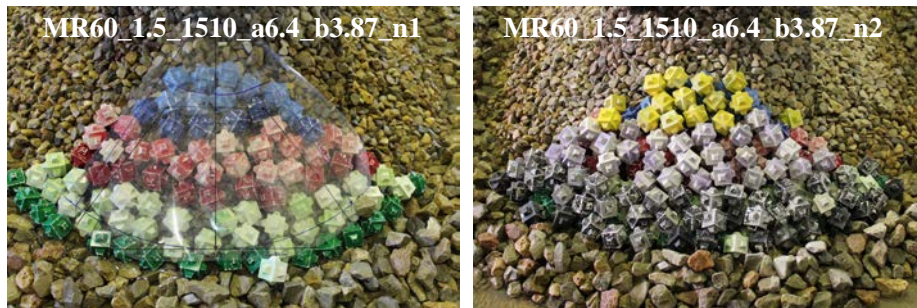


Figura 5.13. Manto construido con la malla de colocación encadenada para morro $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.018$ del Proyecto MMONOCAPA sobre morro R60. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)

En la siguiente tabla se pueden ver las características de cada uno de los ensayos llevados a cabo para el morro de radio 60 cm ($R/D_n= 15.8$).

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
MR60_1.5_seco_6.1_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.605	1.018	—	—	—	—	—	—
MR60_1.5_seco_6.4_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.684	1.018	—	—	—	—	0.367	0.0
MR60_1.5_seco_6.7_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.763	1.018	—	—	—	—	0.416	1.3
MR60_1.5_1510_6.4_3.87_n1	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.684	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0º	0.416	1.1
MR60_1.5_1510_6.4_3.87_n2	Morro	1/36	1.5/1	2ª	1.684	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0º	0.416	0.0
MR60_1.5_2512_6.4_3.87_n1	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.684	1.018	2.5	1.2	19	Aprox. 0º	0.416	4.6

Tabla 5.9. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de morro del Proyecto MMONOCAPA sobre morro R60. (Fuente: propia)

El primero de los ensayos se llevó a cabo con la malla para morros $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.018$, dicho ensayo se detuvo a mitad de construcción por estar los elementos demasiado juntos, por lo que no se obtuvo el valor de porosidad real.

Tras los resultados anteriores se ensayaron las malla $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.018$ y $a/D_n = 1.763$ y $b/D_n = 1.018$. Aunque el valor de porosidad de la segunda malla se ajustaba más a las porosidades objetivo se percibió durante los ensayos que esta malla hacía que los elementos cayeran un poco separados, por lo que finalmente se optó por ensayar bajo los oleajes de diseño la malla $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.018$. Para ambos oleajes se consiguió una porosidad superior a la obtenida en condiciones secas y muy cercana a la objetivo, 41.6%.

Para los ensayos construidos sobre morros de radio 60 cm ($R/D_n = 15.8$), se dispusieron 9 filas de elementos mediante tres mallas encadenadas de tres filas de elementos cada una. Para este radio, talud $H/V = 1.5/1$ y la malla de morro $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.018$ se colocaron con éxito Cubípodos mientras la separación entre elementos de la misma fila era mayor de $a_{m,j}/D_n > 1.330$.

A continuación se pueden ver los mantos finales de la construcción realista mediante la malla de colocación para morro R70 de parámetros $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.018$, para la primera y la segunda capa, para un oleaje $H_s = 1.5$ cm y $T_p = 1.0$ s.

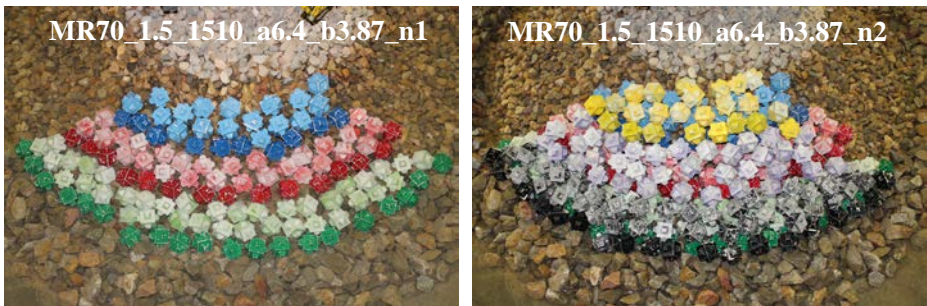


Figura 5.14. Manto construido con la malla de colocación encadenada para morro $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.018$ del Proyecto MMONOCAPA sobre morro R70. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)

En la siguiente tabla se pueden ver las características de cada uno de los ensayos llevados a cabo para el morro de radio 70 cm ($R/D_n = 18.4$).

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
MR70_1.5_seco_6.1_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.605	1.018	—	—	—	—	0.391	0.8
MR70_1.5_seco_6.4_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.684	1.018	—	—	—	—	0.406	0.0
MR70_1.5_seco_6.7_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.763	1.018	—	—	—	—	0.422	0.0
MR70_1.5_1510_6.4_3.87_n1	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.684	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0º	0.414	0.0
MR70_1.5_1510_6.4_3.87_n2	Morro	1/36	1.5/1	2ª	1.684	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0º	0.437	0.0
MR70_1.5_2512_6.4_3.87_n1	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.684	1.018	2.5	1.2	19	Aprox. 0º	0.414	0.8
MR70_1.5_2512_6.4_3.87_n2	Morro	1/36	1.5/1	2ª	1.684	1.018	2.5	1.2	19	Aprox. 0º	0.437	3.5

Tabla 5.10. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de morro del Proyecto MMONOCAPA sobre morro R70. (Fuente: propia)

Para los ensayos realizados sobre el morro de radio 70 cm, se probaron las mismas mallas en seco que para el morro de 60 cm. Finalmente, se optó también por la malla $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.018$, la cual proporcionó una porosidad de la primera capa del 40.6% en condiciones sin oleaje. Esta malla se ensayó con los dos oleajes propuestos, obteniendo en ambos casos para la primera capa una porosidad del 41.4%. Para el oleaje menor se construyó también la segunda capa del manto, obteniendo una porosidad de 43.7%, lo que proporciona una porosidad global del manto de 42.6%. Dicha malla presentó un bajo porcentaje de elementos perdidos.

En los ensayos de morros de radio 70 cm ($R/D_n = 18.4$), se colocaron 9 filas de elementos mediante tres mallas encadenadas de tres filas de elementos cada una. Para este radio, talud $H/V = 1.5/1$ y la malla de morro $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.018$ se dispusieron elementos correctamente mientras la separación entre elementos de la misma fila era mayor de $a_{m,j}/D_n > 1.406$.

Seguidamente se pueden ver los mantos finales de la construcción realista mediante la malla de colocación para morro R80 de parámetros $a/D_n = 1.763$ y $b/D_n = 1.018$, para la primera y la segunda capa, y un oleaje $H_s = 1.5$ cm y $T_p = 1.0$ s.

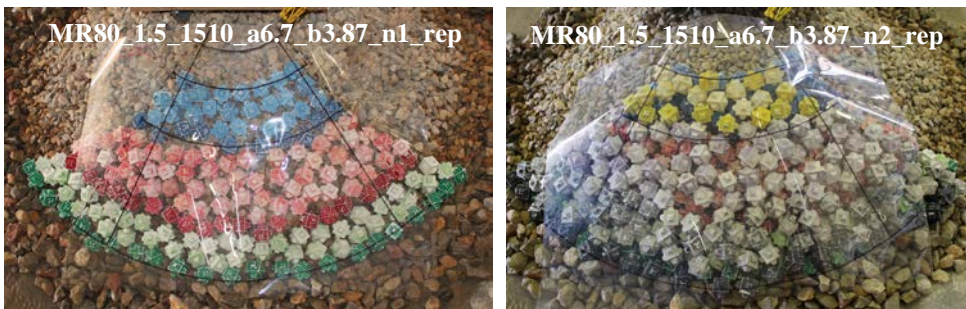


Figura 5.15. Manto construido con la malla de colocación encadenada para morro $a/D_n = 1.763$ y $b/D_n = 1.018$ del Proyecto MMONOCAPA sobre morro R80. Primera capa (izq.) y segunda capa (dcha.). (Fuente: propia)

En la siguiente tabla se pueden ver las características de cada uno de los ensayos llevados a cabo para el morro de radio 80 cm ($R/D_n = 21.1$).

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
MR80_1.5_seco_6.1_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.605	1.018	—	—	—	—	0.436	0.0
MR80_1.5_seco_6.4_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.684	1.018	—	—	—	—	0.467	0.6
MR80_1.5_seco_6.4_3.87_rep	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.684	1.018	—	—	—	—	0.436	0.0
MR80_1.5_seco_6.7_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.763	1.018	—	—	—	—	0.430	0.6
MR80_1.5_1510_6.7_3.87_n1	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.763	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0º	0.436	0.0
MR80_1.5_1510_6.7_3.87_n2	Morro	1/36	1.5/1	2ª	1.763	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0º	0.523	5.6
MR80_1.5_1510_6.7_3.87_n1_rep	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.763	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0º	0.448	0.0
MR80_1.5_1510_6.7_3.87_n2_rep	Morro	1/36	1.5/1	2ª	1.763	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0º	0.504	0.0
MR80_1.5_2512_6.7_3.87_n1	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.763	1.018	2.5	1.2	19	Aprox. 0º	0.461	2.3
MR80_1.5_2512_6.7_3.87_n1_rep	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.763	1.018	2.5	1.2	19	Aprox. 0º	0.461	0.6
MR80_1.5_2512_6.7_3.87_n2	Morro	1/36	1.5/1	2ª	1.763	1.018	2.5	1.2	19	Aprox. 0º	0.492	1.2

Tabla 5.11. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de morro del Proyecto MMONOCAPA sobre morro R80. (Fuente: propia)

En el caso de los ensayos realizados en el morro de radio 80 cm, se probaron las mismas mallas en seco que para los morros de 60 y 70 cm, pero con tres filas más de Cubípodos por ensayo. En este caso, puesto que el radio del morro era mayor, la reducción de la distancia entre piezas al ir ascendiendo por el talud de la estructura no resultó tan grande.

Inicialmente se llevaron a cabo una serie de ensayos en seco. Primero se probó la malla de $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.018$, obteniendo una porosidad para la primera capa de 43.6%. Posteriormente, se probó la malla de $a/D_n = 1.684$ y $b/D_n = 1.018$, obteniendo una porosidad de 46.7%. Puesto que se tenían dudas de que el estado de la berma de pie podía haber influido en el resultado se realizó una repetición del ensayo, obteniéndose una porosidad del 43.6%. Finalmente, se ensayó la malla de $a/D_n = 1.763$ y $b/D_n = 1.018$, dando valores de porosidad del 43.0%. En este caso, la combinación de valores del radio inicial (80 cm) y del espaciamiento de la primera fila ($a/D_n = 1.763$) permitieron disponer una fila más de elementos por malla encadenada.

A raíz de estos resultados previos se decidió estudiar la malla de $a/D_n = 1.763$ y $b/D_n = 1.018$ bajo condiciones de oleaje, ya que dicha malla proporcionó valores de porosidad menores y su proceso constructivo era más simple, puesto que al disponer más filas de Cubípodos por cada malla, el número de mallas encadenadas necesarias era inferior.

Para el oleaje menor se obtuvieron valores de porosidad del 43.6% para la primera capa y de 52.3% para la segunda. Puesto que este último valor resultó un poco grande se repitió el ensayo completo obteniendo valores de porosidad del 44.8% y 50.4% respectivamente. Para el oleaje mayor se obtuvo un valor de porosidad para la primera capa de 46.1% y de 49.2% para la segunda. Para ambos oleajes los valores de porosidad obtenidos fueron notablemente superiores al ensayado en condiciones en seco, 43.0%.

En los ensayos realizados sobre morros de radio 80 cm, se colocaron 12 filas de elementos. Para las mallas con $a/D_n = 1.605$ y $a/D_n = 1.684$, se dispusieron cuatro mallas encadenadas de tres filas de elementos cada malla, mientras que para la malla de $a/D_n = 1.763$ se colocaron tres mallas de cuatro filas de elementos. Para esta última se

dispuso piezas correctamente mientras la separación entre elementos de la misma fila era mayor de $a_m./Dn > 1.346$.

5.6. Mallas de colocación del Cubípodo en entronque

En cuanto a la situación especial que se puede dar en la construcción de un manto principal de Cubípodos en una sección de arranque o entronque con otro dique existente sólo se tiene la experiencia adquirida en los ensayos del dique de San Andrés. Este dique arrancaba perpendicularmente a otro dique existente de escollera, a ello se sumaba la dificultad de que el tramo inicial del nuevo dique era en curva. Una de las posibles soluciones para este entronque consistía en retirar parte de la escollera del dique existente y realizar un manto de Cubípodos que conectara con el de tramo curvo del nuevo dique, ambos con talud $H/V=2/1$.

Para resolver este problema, antes de comenzar con los ensayos de construcción realista, se realizaron pruebas de construcción a mano y se llevó a cabo la intersección gráfica de las mallas de ambos tramos, dichas mallas fueron las estudiadas anteriormente para el dique de San Andrés, $a/D_n = 1.500$ y $b/D_n = 1.053$ para tronco recto y $a/D_n = 1.605$ y $b/D_n = 1.053$ para tronco curvo de baja curvatura. Al dibujar ambas mallas gráficamente se define una línea que une el punto interior de la intersección de las bermas de pie y el punto de intersección de las bermas de coronación. Las conclusiones obtenidas del análisis previo fueron que puesto que ambas mallas tenían el mismo valor de parámetro b/D_n y se colocaban sobre el mismo talud, si se colocaba un Cubípodo para cada fila en esta línea de intersección la construcción de cada tramo podría realizarse con una malla independiente.

Las mallas de colocación de cada tramo se diseñaron a partir de las coordenadas del Cubípodo a colocar en la primera fila en el punto de intersección de la parte interior de las bermas de pie de ambos tramos. Los posteriores Cubípodos a colocar sobre la línea de intersección que une la berma de pie y la de coronación no tienen por qué pertenecer a ninguna de las mallas que independiza, siendo necesario que guarden una distancia similar a sus vecinas a la establecida por ambas mallas.

En las imágenes siguientes se puede ver el proceso constructivo seguido, el cual consistía en colocar cada una de las filas de cada tramo por separado dejando como último elemento por colocar el correspondiente a la intersección, como si se tratase de la clave de un arco romano, donde cada tramo se empezaba a colocar desde el elemento colindante al de la intersección avanzando en dirección contraria a la intersección.

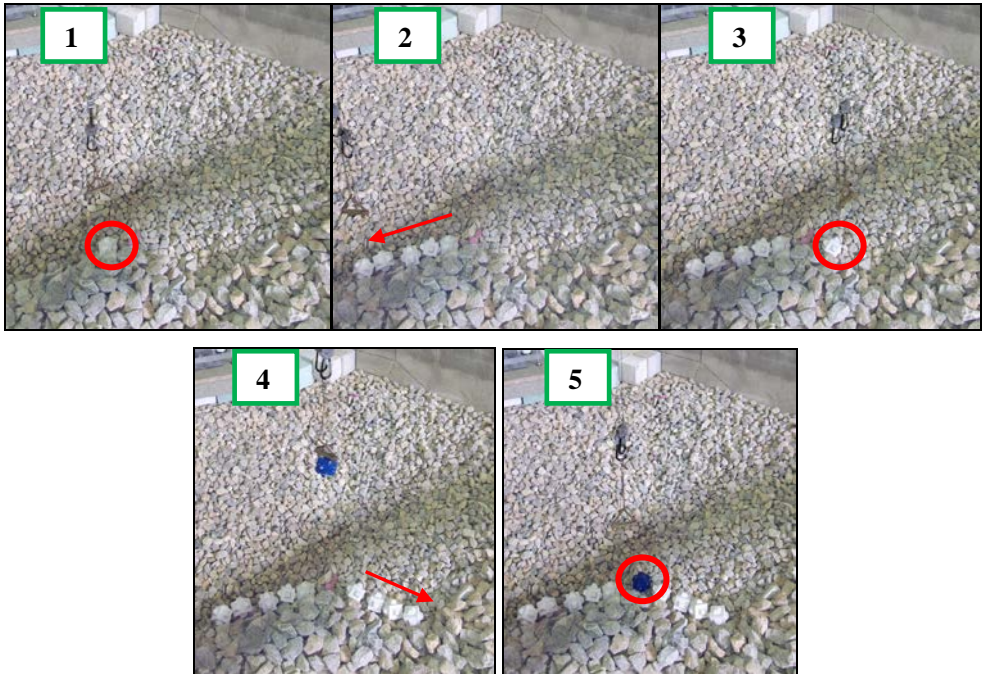


Figura 5.16. Proceso constructivo de la primera fila del entronque del dique de San Andrés.

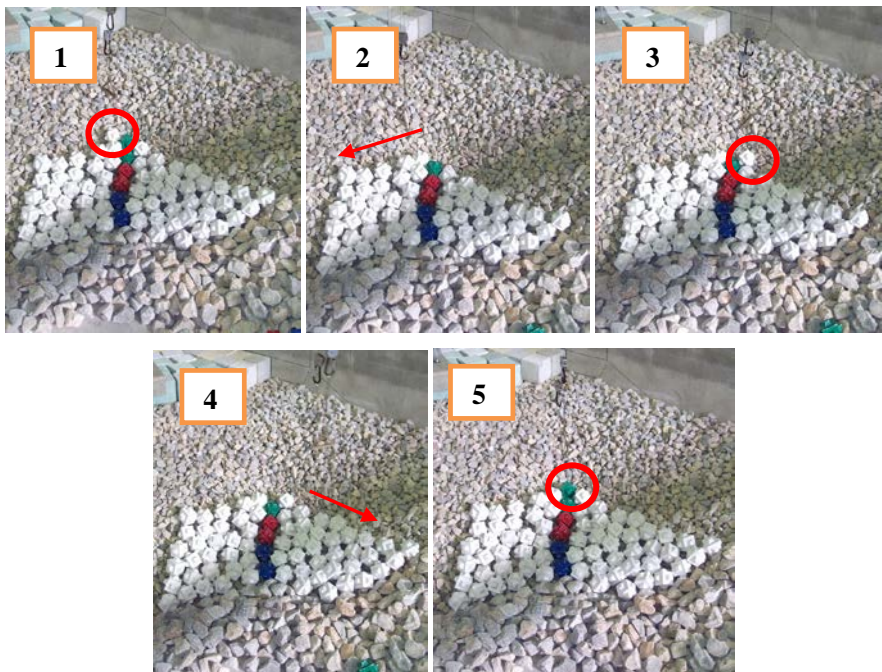


Figura 5.17. Proceso constructivo de la sexta fila del entronque del dique de San Andrés.

Esta manera de proceder puede utilizarse siempre y cuando la pendiente de la línea que define la intersección de los taludes sea aceptable por ambas mallas, de lo contrario el sistema no funcionaría bien. Durante los ensayos se observó que el Cubípodo se adaptaba perfectamente a los pequeños errores de posición que representa esta forma de colocarlos.

Esta solución planteaba una segunda capa de Cubípodos de 15 t en la zona del entronque sobre la primera capa de Cubípodos de 6 t. Para su colocación se empleó la misma técnica de construcción anteriormente explicada. En la figura siguiente se puede ver el aspecto final de ambas capas.



Figura 5.18. Mantos ensayados en el entronque del dique de San Andrés. Primera capa de 6 t (izq.) y segunda capa de 15 t (dcha.). (Fuente: propia)

5.7. Resumen de los resultados experimentales

Durante los ensayos incluidos en la presente Tesis Doctoral se ha estudiado la colocación del elemento Cubípodo en las secciones más comunes de los mantos principales de diques en talud de pendientes expuestas al oleaje $H/V=1.5/1$ y $H/V=2/1$. En este proceso se han probado mallas de colocación estáticas y progresivas en un total de 93 ensayos, de los cuales 13 se han realizado mediante el sistema CBPS y 80 mediante el sistema de construcción realista con grúa y pinzas de presión a escala.

Las mallas progresivas han dado buenos resultados para los mantos más inclinados, los de talud $H/V=1.5/1$, mientras que para el talud $H/V=2/1$ no ha proporcionado mejoras significativas con respecto a las mallas estáticas. Las mallas progresivas suponen un mayor grado de complejidad en la construcción del manto, y puesto que las mejoras que proporcionan no distan mucho de las que dan las mallas estáticas, no se recomiendan para la construcción real en ninguno de los taludes ensayados.

A continuación se expone un breve resumen, en formato ficha, de las mallas a emplear para cada talud y tramo de dique, incluyendo los parámetros de la malla (medidas sobre plano horizontal), una imagen del aspecto del manto construido y la porosidad obtenida, tanto para un manto monocapa como bicapa, donde la porosidad

de este último se calcula como la media de las porosidades de cada una de las capas que lo constituyen.

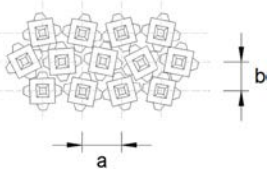

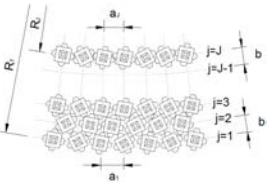

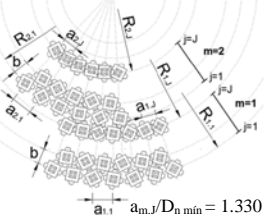

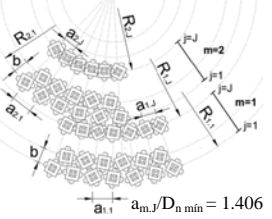

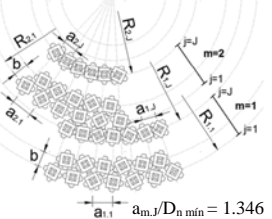

TALUD $H/V=1.5/1$					
TRAMO	PARÁMETROS MALLA		ESQUEMA MALLA	POROSIDAD REAL	ASPECTO MANTO MONOCAPA
	a/D_n	b/D_n			
Tronco Recto	1.565	1.018		Monocapa 40.4%	
Tronco Curvo ($R/D_n = 108.7$)	1.605	1.018		Monocapa 40.7%	
Morro ($R/D_n = 15.8$)	1.684	1.018		Monocapa 41.6% Bicapa 41.6%	
Morro ($R/D_n = 18.4$)	1.684	1.018		Monocapa 41.4% Bicapa 42.6%	
Morro ($R/D_n = 21.1$)	1.763	1.018		Monocapa 44.2% Bicapa 47.8%	

Figura 5.19. Ficha resumen de las mallas a emplear en mantos de Cubípodos en talud $H/V=1.5/1$.
(Fuente: propia)

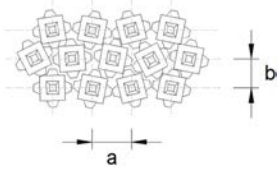

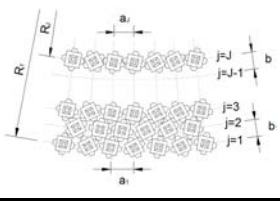

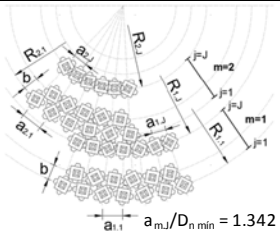

TALUD $H/V=2/1$					
TRAMO	PARÁMETROS MALLA		ESQUEMA MALLA	POROSIDAD REAL	ASPECTO MANTO MONOCAPA
	a/D_n	b/D_n			
Tronco Recto	1.605	1.053		Monocapa 39.5% Bicapa 39.7%	
Tronco Curvo ($R/D_n=109.2$)	1.605	1.053		Monocapa 42% Bicapa 43.3%	
Morro ($R/D_n=18.9$)	1.684	1.053		Monocapa 43.3% Bicapa 45.4%	

Figura 5.20. Ficha resumen de las mallas a emplear en mantos de Cubípodos en talud $H/V=2/1$.
(Fuente: propia)

Capítulo 6

Resumen y Conclusiones

Los diques en talud son estructuras ampliamente utilizadas para proporcionar áreas de abrigo en la costa donde los buques puedan refugiarse y realizar operaciones de carga y descarga. Debido al aumento de calado de los buques, se hace necesaria la construcción de diques cada vez más profundos y resistentes. A esta necesidad se une la exigencia de optimizar los recursos para conseguir el mayor rendimiento de la inversión. Actualmente, los recursos a los que se hacen referencia en la construcción de un dique no sólo son los económicos, también se tienen en cuenta los aspectos relacionados con el medio ambiente, especialmente en lo relativo a las huellas ecológica, energética y del carbono.

La característica más importante de un dique en talud es el tamaño de las piezas que conforman el manto principal. El peso de estos elementos condiciona el tamaño de las piedras de las capas inferiores y tiene una gran importancia en el coste económico del total de la estructura. Por ello, desde mediados del s.XX se han diseñado multitud de piezas de protección con la finalidad de optimizar la construcción de diques. Muchas de estas nuevas piezas han basado su diseño en geometrías complejas que aumentan la resistencia frente al oleaje por trabazón entre piezas, lo que permite reducir el volumen de hormigón de las mismas. Sin embargo, este tipo de piezas

presentan una serie de inconvenientes, como son la mayor fragilidad de los elementos y la mayor dificultad de construcción y reparación de los mantos formados con ellas.

Un aspecto relevante en el diseño de un dique en talud es la porosidad de su manto principal. Esta porosidad influye considerablemente en la estabilidad hidráulica de la estructura. En general, se le presta poca atención a este parámetro de diseño, tanto en prototipo como en modelo a escala reducida, especialmente para mantos de piezas de colocación aleatoria. Los efectos de modelo causados por las diferencias de las porosidades del manto entre prototipo y ensayos a escala reducida pueden alterar la estabilidad hidráulica, el remonte, el rebase y las fuerzas sobre el espaldón; además de producir desviaciones en las necesidades de materiales durante la construcción.

La porosidad del manto es relativamente fácil de controlar en ensayos de laboratorio, los cuales se construyen a mano, en condiciones ideales y con una perfecta visibilidad. Sin embargo, es difícil de controlar a escala de prototipo, donde las piezas se colocan mediante grúas de gran tonelaje, bajo condiciones de oleaje y viento, y unas condiciones de baja visibilidad debajo del agua. Diferentes manuales de ingeniería recomiendan valores de porosidad nominal del manto principal para cada tipo de pieza de protección asociada a un coeficiente de capa, k_d . Los diferentes criterios utilizados para definir dicho coeficiente pueden conducir a malentendidos. Para evitar estas confusiones, en el caso de elementos masivos de colocación aleatoria, se recomienda utilizar un *packing density*, Φ , y una porosidad, $p = (1 - \Phi/n)$, correspondientes con un valor de coeficiente de capa de $k_d=1.00$; además de un espesor de capa una o dos veces el diámetro nominal de la pieza para mantos monocapa y bicapa, respectivamente.

La presente Tesis Doctoral trata sobre el Cubípodo, elemento prefabricado de hormigón para la construcción de mantos principales de diques en talud. Las características principales del Cubípodo son su alta estabilidad hidráulica, su elevada resistencia estructural y su sencillez de colocación de forma aleatoria en una o varias capas. Estando todo ello en línea con la optimización de recursos y reducción de las huellas ecológica, energética y del carbono.

El Cubípodo ha probado su buen comportamiento hidráulico, por lo que este trabajo ha profundizado en su método de colocación, especialmente en lo relativo a la mallas de colocación para conseguir una porosidad similar a la ensayada en laboratorio para evitar los posibles efectos de modelo. Para ello se han llevado a cabo casi un centenar de ensayos de construcción realista con grúas y pinzas de presión a escala reducida y bajo distintas condiciones de oleaje en el tanque de ensayos del LPC-UPV. Se han diseñado cuidadosamente las mallas a emplear para la colocación de Cubípodos en las secciones más habituales que se pueden dar en un dique en talud, como son: tronco recto, tronco curvo de baja curvatura, morros o tramos curvos de alta curvatura y entronques. Además se han dado las reglas básicas a seguir en las transiciones entre mantos monocapa y bicapa de Cubípodos, entre mantos bicapa de escollera y monocapa de Cubípodos, y entre mantos de Cubípodos de distinto tamaño.

El elemento Cubípodo puede colocarse en los tramos de tronco recto usando mallas de colocación homogéneas, donde la distancia entre elementos de la misma fila permanece constante; por el contrario, en secciones curvas o de morro se requieren

mallas de colocación curvas no homogéneas para adaptarse a la especial geometría de estas zonas, donde la distancia entre elementos de la misma fila decrece a medida que la construcción avanza talud arriba.

Los ensayos a escala reducida han permitido obtener las mallas de colocación para cada tramo estudiado sobre taludes $H/V=1.5/1$ y $H/V=2/1$ (ver fichas resumen del Capítulo 5), y para cualquier tipo de tamaño de Cubípodo al definir los parámetros de las mallas adimensionalizados por el diámetro nominal de las piezas. Por norma general, las mallas de colocación para tramos curvos y morros proporcionan valores de porosidad superiores a los de los troncos rectos. La porosidad del manto depende entre otros de la malla de colocación y del tamaño de los elementos de la capa sobre la que se asienta, por ello, en mantos bicapa de Cubípodos la porosidad es mayor en la segunda capa que en la primera.

La berma de pie y la colocación de la primera fila del manto requieren un cuidado especial, su mala ejecución puede ocasionar irregularidades que afecten a la totalidad del manto principal. Este aspecto cobra mayor importancia en el caso de mantos monocapa, donde la calidad de acabado del manto debe ser mayor.

Se ha estimado el rango de porosidades con las que se pueden colocar los Cubípodos de manera aceptable en tramos de tronco recto de talud $H/V=1.5/1$, del 37% al 51%, lo que proporciona un orden de magnitud de la porosidad construible en otras zonas y taludes. El rango de porosidad del 40% al 43% es el más fácil de conseguir con colocación manual en el laboratorio. De esta forma queda probado que la porosidad de un manto está altamente condicionada por el método de colocación de las piezas que lo forman. El planteamiento de porosidad nominal que fijan algunos manuales de ingeniería para cada tipo de pieza es poco razonable; la porosidad del manto debe considerarse como una variable de diseño con un valor recomendado, no como una constante.

Esta investigación se planteó desde un principio para que sirviera de guía para la construcción de mantos principales de Cubípodos. Con las mallas desarrolladas en el presente trabajo de investigación se han obtenido las mallas de colocación de Cubípodos para formar el manto principal del Dique de San Andrés (Puerto de Málaga) y el contradique de Punta Langosteira (Puerto exterior de A Coruña), quedando probada su valía en prototipo. En la actualidad se están construyendo la segunda fase del contradique de Punta Langosteira (Dique Oeste) y las obras del cierre de la dársena de La Esfinge (Puerto de las Palmas de Gran Canaria) donde también se están empleando las mallas estudiadas para conformar los mantos principales de Cubípodos.

El método para determinar las mallas de colocación diseñadas en este estudio puede ser empleado para otros tipos de elementos masivos de colocación aleatoria distintos del Cubípodo, principalmente de forma cúbica, como son los bloques cúbicos y los bloques Antifer. Únicamente sería necesario realizar los ensayos pertinentes para definir los parámetros característicos de las mallas.

Como futuras líneas de investigación se plantea seguir profundizando en la colocación de Cubípodos en los distintos tramos de los diques en talud, en lo referente a: estudiar secciones con radios distintos de los planteados en este trabajo,

especialmente en el caso de morros con relaciones R/D_n mayores de las ensayadas; ajustar mejor los valores mínimos de la separación entre los c.d.g. de las piezas de la última fila de cada malla encadenada; analizar la naturaleza del filtro y su influencia en el proceso de construcción del manto; examinar el efecto que producen distintos taludes interiores de la berma de pie sobre la colocación de las primeras filas de elementos del manto; estudiar el efecto de la oblicuidad del oleaje durante la construcción; entre otros. Para ello es necesario realizar un mayor número de ensayos de construcción realista, siendo además conveniente llevar a cabo más ensayos de repetición de los ya realizados para todas las zonas estudiadas con el fin de contrastar los resultados obtenidos.

Referencias

Ali, A.M. y Diwedat, A.S.I. (2014). Double layer armor breakwater stability (case study: El Dikheila Port, Alexandria, Egypt). *Ain Shams Engineering Journal* 5, pp. 681-689.

Anastasaki, E., Xiang, J. y Latham, J.P. (2013). Building concrete unit armoured breakwaters in a numerical model environment - a new placement technique. *Proceedings of the Conference on Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2013*. Edimburgo, UK.

Bayram, A., Pappas, B., Burchett, S.M., Knox, P., Ostrovsky, O. y Oren, N. (2013). Hydraulic stability model testing for new marine container terminal at Haifa, Israel. *Proceedings of the Conference on Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2013*. Edimburgo, UK.

Besley, P. y Denechere, M. (2009). Single layer armour systems - toe, crest and roundhead details. *Proceedings of the Conference on Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2009*. Edimburgo, UK.

Bruce T., van der Meer, J.W., Franco, L. y Pearson, J.M. (2009). Overtopping performance of different armour units for rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering* 56, pp. 166–179.

Bruun, P. (1978). Common reasons for damage or breakdown of mound breakwaters, *Coastal Engineering* 3, Vol. 2, pp. 261- 273.

Carver, R.D. (1976). Stability of rubble-mound breakwater Lahaina Harbor, Hawaii. Department of the Army. Waterways Experiments Station, Corps of Engineers. PO Box 631. Vicksburg, Miss, USA.

Carver, R.D. y Davidson, D.D. (1978) Dolos-armored breakwaters: special considerations. *Coastal Engineering* 1978, pp. 2263-2284.

CIRIA, CUR, CETMEF (2007). *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering* (2nd Edition). C683, CIRIA, London.

Coastal Engineering Manual (2006). U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, USA.

Concret Layer Innovations (CLI, 2011a). Abstract of Accropode™. Technical Specifications. Versión A 28-01-2011.

Concret Layer Innovations (CLI, 2011b). Abstract of Core-Loc™. Technical Specifications. Versión A 23-08-2011.

Danel, P, y Greslou, L. (1962). The Tetrapod. *Coastal Engineering* 1962, pp 469-481.

Delta Marine Consultants (2014). *Guidelines for Xbloc® concept designs*. Edición marzo 2014.

Dupray, S. y Roberts, J. (2009). Review of the use of concrete in the manufacture of concrete armour units. *Proceedings of the Conference on Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2009*. Edimburgo, UK.

Fabiao, J. (2013). Hydraulic stability of Tetrapod armour layer - physical model study. 6th International Short Course/Conference on Applied Coastal Research. LNEC. Lisboa, Portugal.

Figueres, M. y Medina J.R. (2004). Estimation of incident and reflected waves using a fully non-linear wave model. *Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering*, Coastal Engineering Research Council, ASCE, pp. 594-603.

Freitas, P. (2013). Hydraulic stability of antifer block armour layers. 6th International Short Course/Conference on Applied Coastal Research. LNEC. Lisboa, Portugal.

Frens, A.B. (2007). The impact of placement method on Antifer-block stability. Master of Science Thesis, Delft University of Technology, Delft, Países Bajos.

Frens, A.B., van Gent, M.R.A. y Olthof, J. (2008). Placement methods for antifer armour units. *Proceedings of the 30rd International Conference on Coastal Engineering*, Coastal Engineering Research Council, ASCE, Vol.4, pp. 3337-3345.

Gelderen, P. y Auld, S. (2009) Innovative technique for single layer armour unit placement. An Example of Increased Production Efficiency whilst Improving Health and Safety. *Proceedings of the Conference on Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2009*. Edimburgo, UK.

Goda, Y. (1985). *Random seas and design of maritime structures*. University of Tokyo, Tokyo, Japan.

Goda, Y. y Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves. *Coastal Engineering* 1976, pp. 828-845.

Gómez-Martín, M.E. y Medina, J.R. (2008). Erosion of cube and Cubipod armor layers under wave attack. Proceedings of the 31st International Conference on Coastal Engineering, Coastal Engineering Research Council, ASCE, pp. 3461-3473.

Gürer, S., Cevik, Y. y Günbak, A.R. (2005). Stability of Tetrapod breakwaters for different placing methods. Journal of Coastal Research. Vol. 21, núm. 3. pp. 464-471.

Hald, T., Tørum, A. y Holm-Karlsen, T. (1998). Design of rock armoured single layer rubble mound breakwaters. Proceedings of the 26th International Conference on Coastal Engineering, Coastal Engineering Research Council, ASCE, pp. 1800-1813.

Hald, T. y Burcharth, H.F. (2000). An alternative stability equation for rock armoured rubble mound breakwaters. Billy L. Edge (Editor). Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering, Coastal Engineering Research Council, ASCE, vol. 2, pp. 1921-1934.

Hudson, R. Y. (1959). Laboratory investigations of rubble-mound breakwaters, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, Waterways and Harbors Division. Vol. 85, N° WW3, Paper N° 2171, 1959.

Iribarren, R. (1938). Una fórmula para el cálculo de diques de escollera. Ed. M. Bermejillo Usabiaga, Pasajes, España.

Kimura, A. (1985). The decomposition of incident and reflected randomwave envelopes. Coastal Engineering in Japan, 28, pp. 59-69.

Maciñeira Alonso, E. (2004). Determinación de una fórmula para el cálculo de la estabilidad del morro de un dique en talud. Análisis de los distintos factores que intervienen. Tesis Doctoral. Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación, Universidad de A Coruña, A Coruña, España.

Manly Hydraulics Laboratory (1997). Ballina AccropodeTM breakwater flume testing. Report MHL 795. PW Report 96126. ISBN 0 7310 6852 1. MHL File IN0075.

Medina, J.R. (2001). Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, vol. 127, pp. 213-221.

Medina, J.R., Gómez-Martín, M. y Corredor, A. (2010). Influence of armor unit placement on armor porosity and hydraulic stability. Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering, Coastal Engineering Research Council, ASCE, structures.41.

Medina, J.R., Gómez-Martín, M.E., Corredor, A., Torres, R., Miñana, J.V., Fernández, E., Menéndez, C.F., y Santos, M. (2011). Prototype drop tests of cube and Cubipod armor units. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, vol. 137(2), pp. 54-63.

Medina, J.R., Pardo, V., Molines, J. y Gómez-Martín, M. (2014). Armor porosity and hydraulic stability of mound breakwaters. Proceedings of the 34th International Conference on Coastal Engineering, Seoul, Korea. Structures.11.

Medina, J.R. y Gómez-Martín (2015). Manual del Cubípodo® 2015. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia. ISBN: 978-84-9048-379-4.

Muttray, M., Reedijk, J., Vos-Rovers, I. y Bakker, P. (2005). Placement and structural strength of Xbloc® and other single layer armour units. N.W.H: Allsop (Editor). Coastlines, Structures and Breakwaters 2005. UK. pp. 556-568.

Muttray, M. y Reedijk, B. (2009). Design of concrete armour layers. Hansa, International Maritime Journal, Vol. 146, Núm. 6, pp. 111-118.

Najafi-Jilani, A. y Monshizadeh, M. (2010). Laboratory investigations on wave run-up and transmission over breakwaters covered by Antifer units. Civil Engineering, Vol. 17, Núm. 6, pp. 457-470. Sharif University of Technology.

Negro, V., Varela, O., del Campo, J.M. y Santos, J. (2009). Cubo o bloque. Modo de fallo, comportamiento y análisis histórico. X Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Santander, España.

Nik Mohd Kamel, N.A. (2007). Experimental study on Xbloc® placements for breakwater curvature sections. Master of Science Thesis. Delft University of Technology, Delft, Países Bajos.

Nurmohamed, S., Steendam, G.J. y van der Meer, J.W. (2006). Weight and stability assessment of single layers of orderly placed or pitched natural rock. Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering, San Diego, California, USA.

Oever, E., Verhagen, H., Klabbers, M. y Reedijk, B. (2006). Theoretical and experimental study on the placement of Xbloc® armour units. Jane Mckee Smith (Editor). Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering. Vol. 5. San Diego, California, USA.

Özkan Cevik, Y., Cihan, K. y Yüksel, Y. (2005). Stability for structures armored with Core-Loc™. Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences. Vol. 29, pp. 225-233.

Pardo, V. (2009). Análisis de la colocación de bloques cúbicos y cubípodos en el manto principal de diques en talud. Aplicación a la ampliación del Puerto de Valencia. Proyecto Fin de Carrera, ETSI Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politècnica de Valencia, Valencia, España.

Pardo, V., Molines, J., y Medina, J.R. (2010). Experimental analysis of the influence of armor unit placement method on armor porosity. Proceedings on the 3rd International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 25.1-25.10.

Pardo, V. (2011). Ensayos 3D de construcción realista de mantos de diques en talud. Porosidad del manto y mallas de colocación de cubos y cubípodos. Tesis Final de Máster, ETSI Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politècnica de Valencia, Valencia, España.

Pardo, V., Molines, J., y Medina, J.R. (2011). Las mallas de colocación de cubos y cubípodos y la porosidad del manto principal de los diques en talud. XI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Las Palmas de Gran Canaria, España.

Pardo, V., Herrera, M.P., Molines, J., y Medina, J.R. (2012). Placement grids, porosity and randomness of armor layers. Proceedings of the 33rd International Conference on Coastal Engineering, Coastal Engineering Research Council, ASCE.

Pardo, V., Herrera, M.P., Molines, J., y Medina, J.R. (2014). Placement test, porosity and randomness of cube and Cubipod armor layers. Journal of Waterway, Ports, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, vol. 140, núm. 5.

Price, W.A. (1979). Static stability of rubble mound breakwaters. The dock and harbour authority. Vol. 60, núm. 702.

Puertos del Estado. Ministerio de Fomento (2008). "Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas". 1ª Edición. España: Puertos del Estado. ISBN 978-84-88975-68-6.

Reedijk, J.S., Bakker, P., van der Vorm-Hoek, C.V.A. y Vos-Rovers, I. (2005). Development and application of an innovative breakwater armour unit. 1st International Conference on Coastal Zone Management and Engineering in the Middle East. Dubai.

Smolka, E. (2008). Estudio experimental del remonte y rebase de un dique en talud de Cubípodos: Aplicación al nuevo dique de abrigo de Punta Langosteira (A Coruña). Proyecto Fin de Carrera, ETSI Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Sollitt, C. K., y DeBok, D. H. (1976). Large scale model study of placed stone breakwaters. Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering, Honolulu, Hawaii, USA, pp .2572-2588.

Turk, G.F. y Melby, J.A. (1997). Core-LocTM concrete armor units: technical guidelines. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, MS 391 80-61 99. Miscellaneous Paper CHL-97-6.

U.S. Army Corps of Engineers (1975). Shore Protection Manual. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS, USA .

U.S. Army Corps of Engineers (1984). Shore Protection Manual. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS, USA.

Van den Berge, A., Reedijk, J.S. y van Tonder, A. (2007). Xbase[®] development and application of a special concrete toe unit for extreme conditions. Proceedings of the Coastal Structures 2007, Venecia, Italia.

VandenBosch, A., Verhagen, H., d'Angremond, K. y Olthof, J. (2002). Influence of the density of placement on the stability of armour layers on breakwaters. Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering. Cardiff, Wales. Vol. 2, pp. 1537-1549.

Van der Meer, J.W. (1999). Design of concrete armour layers. Proceedings of the Coastal Structures 1999. Santander, España. pp. 213-221.

Verhagen, H., d'Angremond, K. y Vliet, K. (2002). Positioning of cubes on a breakwater slope. Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering. Cardiff, Wales. Vol. 2, pp. 1550-1560.

Wang, H. y Peene, S.J. (1990) A probabilistic model of rubble mound armour stability. Coastal Engineering 1990. Vol. 14, pp. 307-331.

Yagci, O. y Kapdasli, S. (2003). Alternative placement technique for Antifer Blocks used on breakwaters. Ocean Engineering 30, pp. 1433-1451.

Yagci, O., Kapdasli, S. y Cigizoglu, H.K. (2004). The stability of the antifer units used on breakwaters in case of irregular placement. Ocean Engineering 31, pp 1111-1127.

Zwamborn, J.A. (1978). Dolos packing density and effect of relative block density. Proceedings of the 17th International Conference on Coastal Engineering, Coastal Engineering Research Council, ASCE, pp. 2285-2303.

Anejo 1

Referencias del Autor

A1.1. Introducción

A continuación se presentan las referencias propias del autor relacionadas con la presente Tesis Doctoral.

A1.2. Experimental analysis of the influence of armor unit placement method on armor porosity (Pardo et al., 2010).

Ponencia presentada en la *International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection* celebrada en Barcelona en el año 2010.

A1.3. Las mallas de colocación de cubos y cubípodos y la porosidad del manto principal de los diques en talud (Pardo et al., 2011).

Ponencia presentada en las *XI Jornadas Nacionales de Costas y Puertos* celebradas en Las Palmas de Gran Canaria en el año 2011.

A1.4. Placement grids, porosity and randomness of armor layers (Pardo et al., 2012).

Ponencia presentada en la *33rd International Conference on Coastal Engineering* celebrada en Santander en el año 2012.

A1.5. Placement Test, Porosity and Randomness of Cube and Cubipod Armor Layers (Pardo et al., 2014).

Artículo publicado en la revista *Journal of Waterway, Ports, Coastal, and Ocean Engineering* de la *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, volumen 140, número 5, ISSN 0733-950X/04014017. A continuación se adjunta el documento definitivo sin los formatos de impresión de la revista por temas de Copyright.

Anejo 2

Modelos Ensayados

A2.1. Introducción

En el presente anejo se muestran las plantas de los modelos ensayados dentro del tanque de oleajes del LPC-UPV, con la finalidad de mostrar su disposición con respecto a la dirección del oleaje que incide sobre ellos.

A.2.2. Planta de los modelos de Pardo (2009), CLIOMAR y MMONOCAPA.

La disposición de los modelos ensayados en Pardo (2009), y los proyectos CLIOMAR y MMONOCAPA fue similar. Los tres se basaban en un modelo que arrancaba desde una de las paredes laterales del tanque de manera perpendicular. Por lo que el oleaje incidía sobre ellos con un ángulo de 90° . A continuación se puede ver una imagen de la disposición de estos modelos dentro del tanque del LPC-UPV.

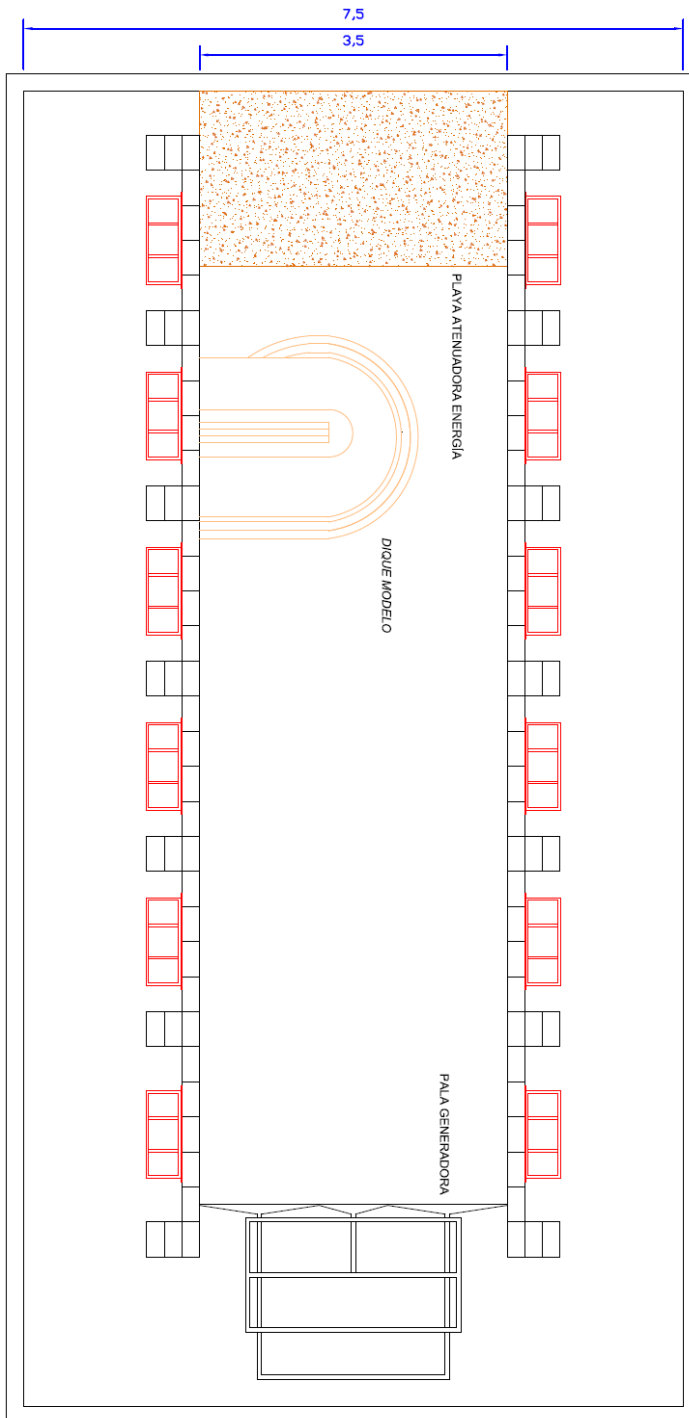


Figura A2.1. Disposición de los modelos de Pardo (2009), CLIOMAR y MMONOCAPA en el tanque de oleaje del LPC-UPV. (Fuente: propia)

A.2.3. Planta del modelo del dique de San Andrés (Puerto de Málaga).

El modelo ensayado del dique de San Andrés se construyó de manera íntegra dentro del tanque de oleaje del LPC-UPV. Dicho modelo se orientó con respecto a la pala de generación de forma que se representase la dirección de ataque real sobre el mismo. A continuación se puede ver una imagen de la disposición del modelo en el tanque del LPC-UPV.

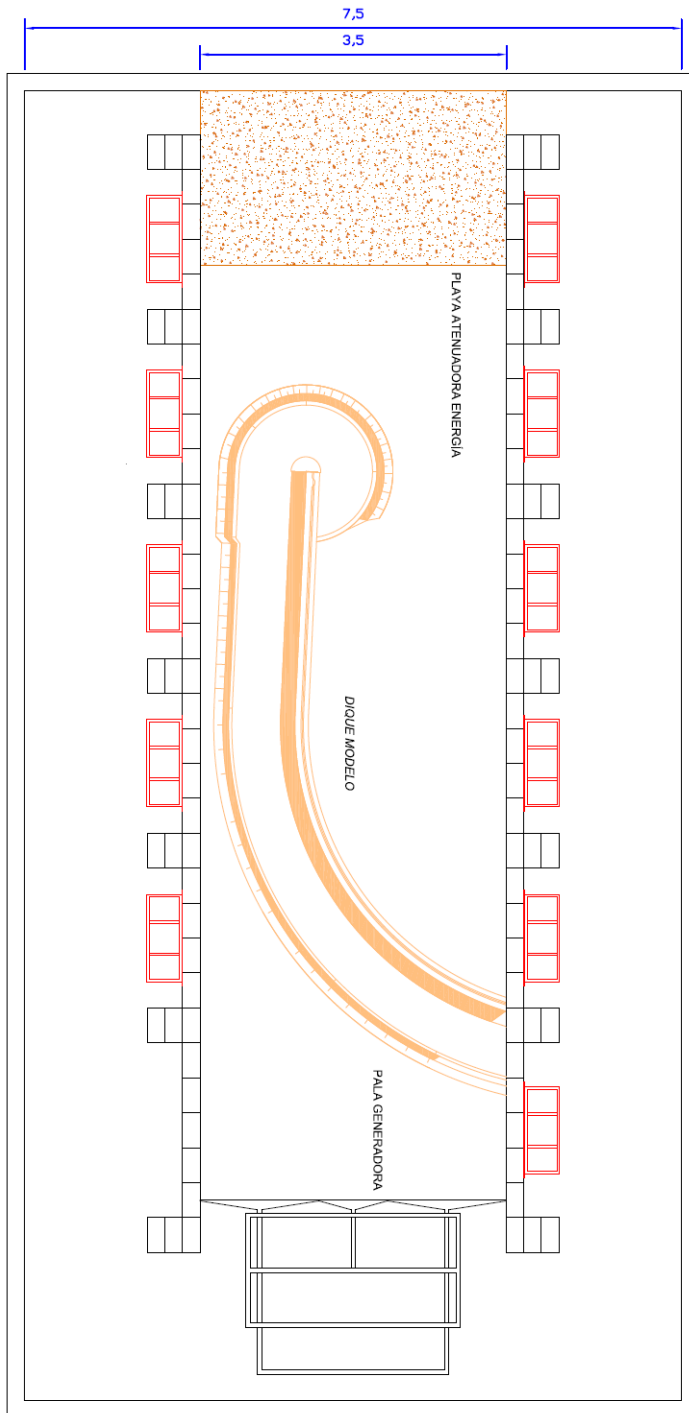


Figura A2.2. Disposición del modelo del dique de San André en el tanque de oleaje del LPC-UPV.
(Fuente: propia)

Anejo 3

Resultados de los Ensayos

A3.1. Introducción

En el presente anejo se presentan las fotografías del manto terminado y la porosidad real obtenida para cada uno de los ensayos realizados.

A3.2. Rango de porosidades construibles de un manto de Cubípodos

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados con el CBPS para la obtención del rango de porosidades con el que el Cubípodo puede colocarse sobre un talud $H/V=1.5/1$.

En primer lugar se exponen las fotografías finales de los ensayos llevados a cabo para obtener la porosidad mínima:

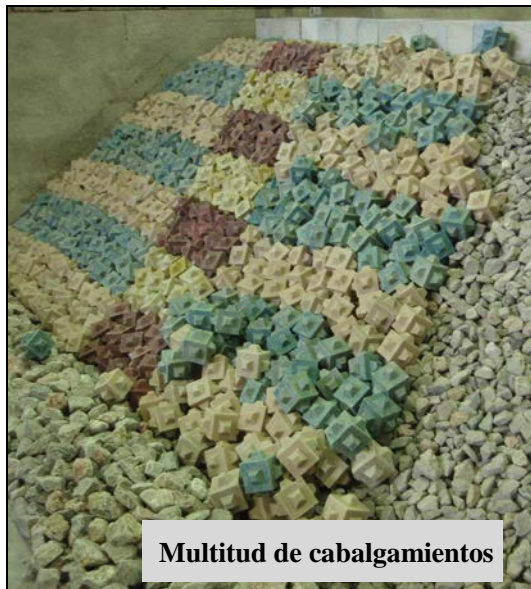


Figura A3.1. Resultado ensayo Malla 1 obtención mínima porosidad Cubípodos. (Fuente: propia)

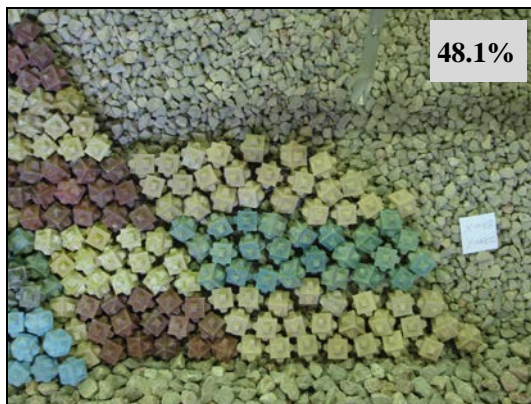


Figura A3.2. Resultado ensayo Malla 2 obtención mínima porosidad Cubípodos. (Fuente: propia)



Figura A3.3. Resultado ensayo Malla 3 obtención mínima porosidad Cubípodos. (Fuente: propia)

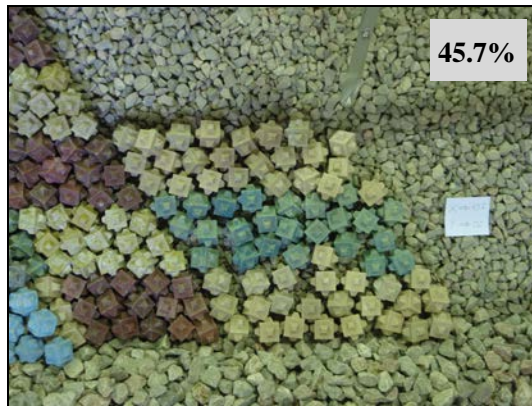


Figura A3.4. Resultado ensayo Malla 4 obtención mínima porosidad Cubípodos. (Fuente: propia)

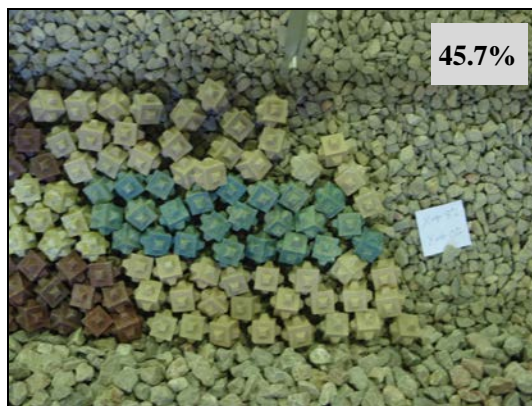


Figura A3.5. Resultado ensayo Malla 5 obtención mínima porosidad Cubípodos. (Fuente: propia)

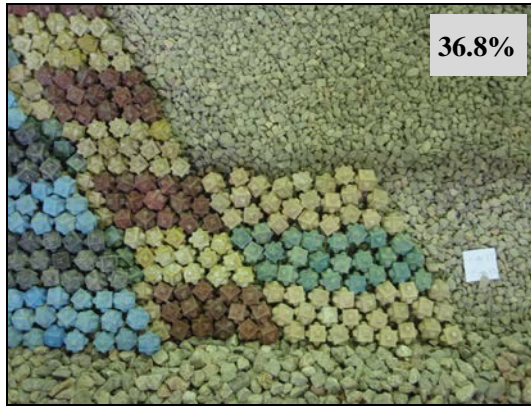


Figura A3.6. Resultado ensayo Malla 6 obtención mínima porosidad Cubípodos. (Fuente: propia)

A continuación se expone la tabla resumen de los ensayos realizados con el CBPS para obtener el manto de mínima porosidad de Cubípodos:

Ensayo	Tipo malla	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real
Malla 1	TR	1.5/1	1ª	1.366	1.183	—	—	—	—	—
Malla 2	TR	1.5/1	1ª	1.505	1.304	—	—	—	—	0.481
Malla 3	TR	1.5/1	1ª	1.505	1.246	—	—	—	—	0.475
Malla 4	TR	1.5/1	1ª	1.505	1.183	—	—	—	—	0.457
Malla 5	TR	1.5/1	1ª	1.476	1.183	—	—	—	—	0.457
Malla 6	TR	1.5/1	1ª	1.463	1.223	—	—	—	—	0.368

Tabla A3.1. Ensayos de construcción con CBPS para obtener el valor de mínima porosidad construible con Cubípodos en talud $H/V=1.5/1$. (Fuente: propia)

Seguidamente se exponen las fotografías finales de los ensayos llevados a cabo para obtener la porosidad máxima. Para ello se partió de la malla de mínima porosidad obtenida (Malla 6) y se fueron expandiendo sus parámetros.

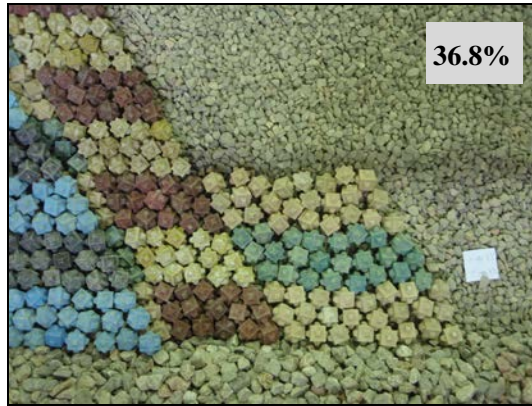


Figura A3.7. Resultado ensayo Malla 6 obtención máxima porosidad Cubípodos. (Fuente: propia)



Figura A3.8. Resultado ensayo Malla 7 obtención máxima porosidad Cubípodos. (Fuente: propia)



Figura A3.9. Resultado ensayo Malla 8 obtención máxima porosidad Cubípodos. (Fuente: propia)

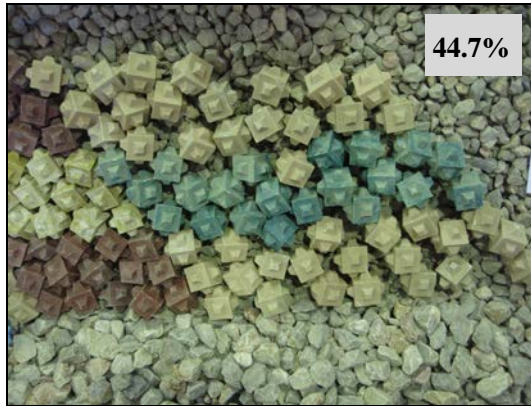


Figura A3.10. Resultado ensayo Malla 9 obtención máxima porosidad Cubípodos. (Fuente: propia)

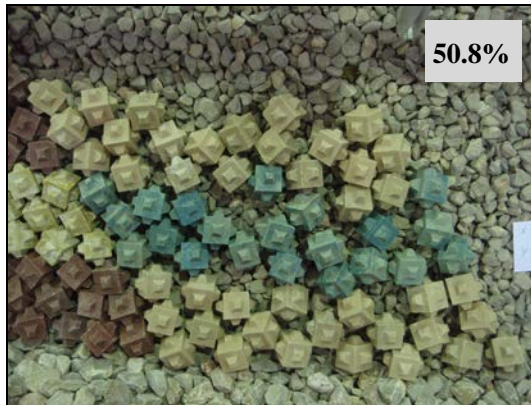


Figura A3.11. Resultado ensayo Malla 10 obtención máxima porosidad Cubípodos. (Fuente: propia)



Figura A3.12. Resultado ensayo Malla 11 obtención máxima porosidad Cubípodos. (Fuente: propia)



Figura A3.13. Resultado ensayo Malla 12 obtención máxima porosidad Cubípodos. (Fuente: propia)

A continuación se expone la tabla resumen de los ensayos realizados con el CBPS para obtener el manto de máxima porosidad de Cubípodos:

Ensayo	Tipo malla	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real
Malla 6	TR	1.5/1	1 ^a	1.463	1.223	—	—	—	—	0.368
Malla 7	TR	1.5/1	1 ^a	1.727	1.259	—	—	—	—	0.456
Malla 8	TR	1.5/1	1 ^a	1.873	1.259	—	—	—	—	0.428
Malla 9	TR	1.5/1	1 ^a	2.034	1.259	—	—	—	—	0.447
Malla 10	TR	1.5/1	1 ^a	2.195	1.259	—	—	—	—	0.508
Malla 11	TR	1.5/1	1 ^a	2.341	1.259	—	—	—	—	0.477
Malla 12	TR	1.5/1	1 ^a	2.502	1.259	—	—	—	—	0.538

Tabla A3.2. Ensayos de construcción con CBPS para obtener el valor de máxima porosidad construible con Cubípodos en talud $H/V=1.5/1$. (Fuente: propia)

A3.3. Mallas de colocación del Cubípedo en tronco recto

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados para tronco recto.

A3.3.1. Ensayos de colocación de Pardo (2009)



Figura A3.14. Resultado ensayo VC11_seco. (Fuente: propia)

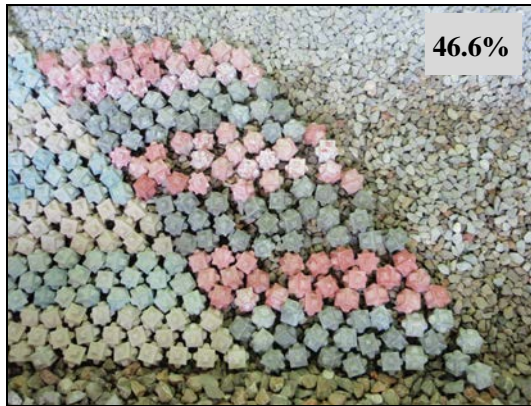


Figura A3.15. Resultado ensayo VC11_0201. (Fuente: propia)

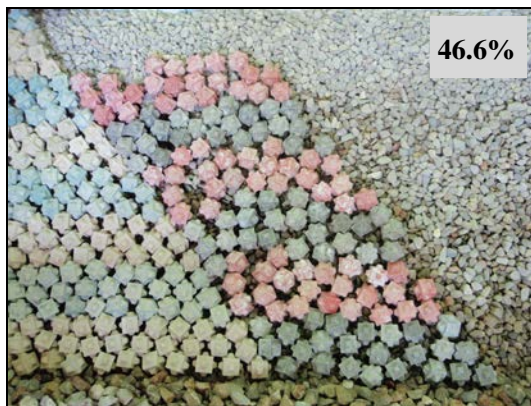


Figura A3.16. Resultado ensayo VC11_0202. (Fuente: propia)

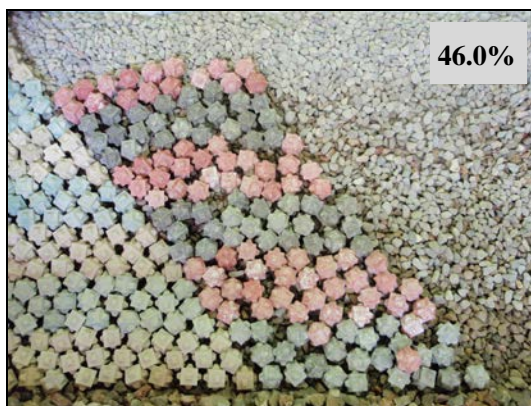


Figura A3.17. Resultado ensayo VC11_0402. (Fuente: propia)



Figura A3.18. Resultado ensayo VC11_0403. (Fuente: propia)

A continuación se expone la tabla resumen de los ensayos de Pardo (2009) para tronco recto:

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
VC11_seco	TR estatica	1/100 1/50	1.5/1	1ª	1.565	1.018	–	–	–	–	0.404	0
VC11_0201	TR estatica	1/100 1/50	1.5/1	1ª	1.565	1.018	2	0.8	30	Aprox. 90º	0.466	0
VC11_0202	TR estatica	1/100 1/50	1.5/1	1ª	1.565	1.018	2	1.15	30	Aprox. 90º	0.466	0
VC11_0402	TR estatica	1/100 1/50	1.5/1	1ª	1.565	1.018	4	1.15	30	Aprox. 90º	0.460	0
VC11_0403	TR estatica	1/100 1/50	1.5/1	1ª	1.565	1.018	4	1.6	30	Aprox. 90º	0.434	0

Tabla A3.3. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco recto en talud $H/V=1.5/1$ de Pardo (2009). (Fuente: propia)

A3.3.2. Ensayos de colocación del Proyecto CLIOMAR

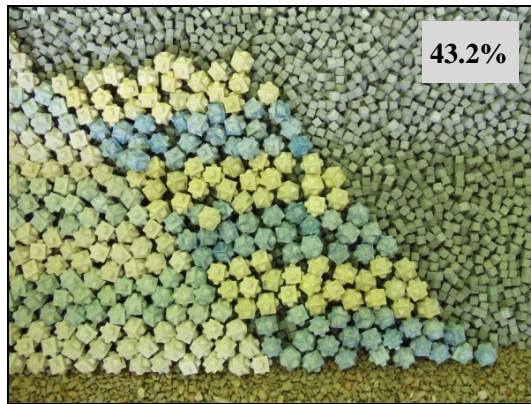


Figura A3.19. Resultado ensayo CLIOMAR_a6_b4_n1_1510. (Fuente: propia)

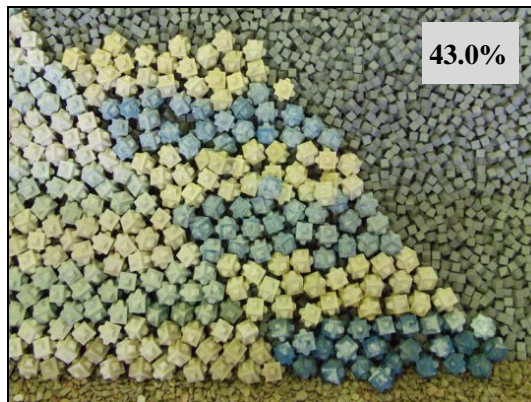


Figura A3.20. Resultado ensayo CLIOMAR_a6_b4_n1_2512. (Fuente: propia)

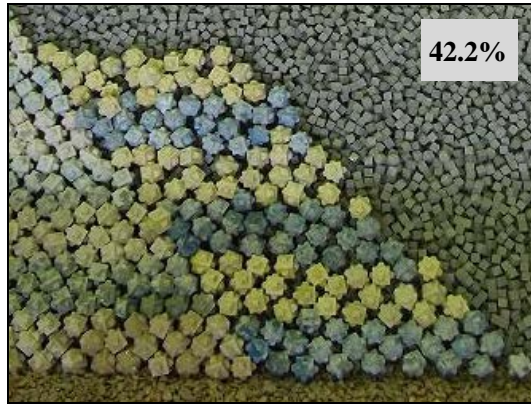


Figura A3.21. Resultado ensayo CLIOMAR_a7_b4_n1_1510. (Fuente: propia)

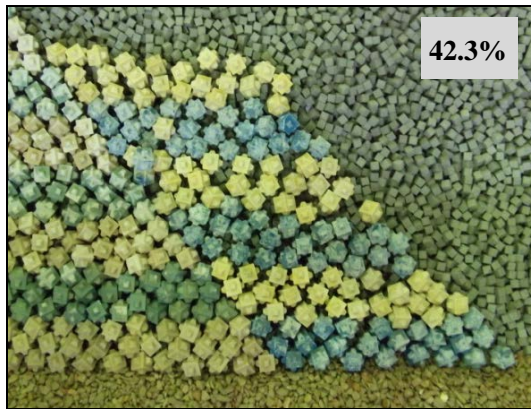


Figura A3.22. Resultado ensayo CLIOMAR_a7_b4_n1_2512. (Fuente: propia)



Figura A3.23. Resultado ensayo CLIOMAR_a5.7_b4_n1_1510. (Fuente: propia)

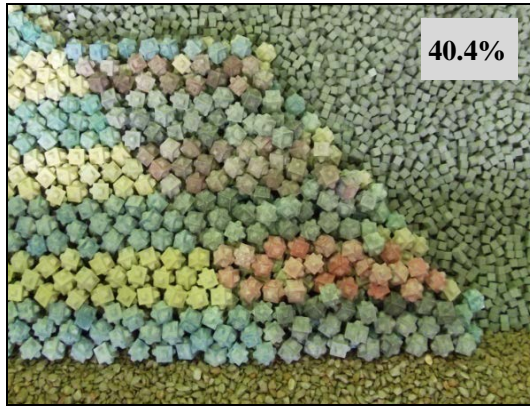


Figura A3.24. Resultado ensayo CLIOMAR_a5.7_b4_n2_1510. (Fuente: propia)

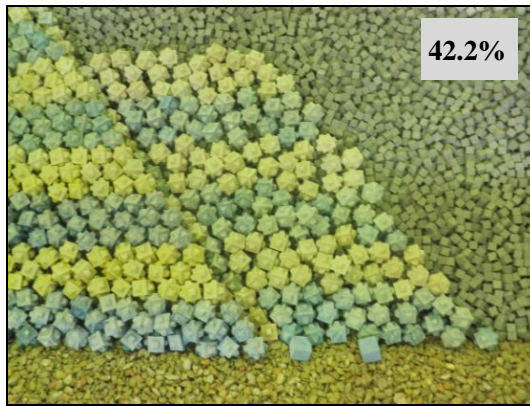


Figura A3.25. Resultado ensayo CLIOMAR_a6.1_b4_n1_1510. (Fuente: propia)



Figura A3.26. Resultado ensayo CLIOMAR_a6.1_b4_n2_1510. (Fuente: propia)

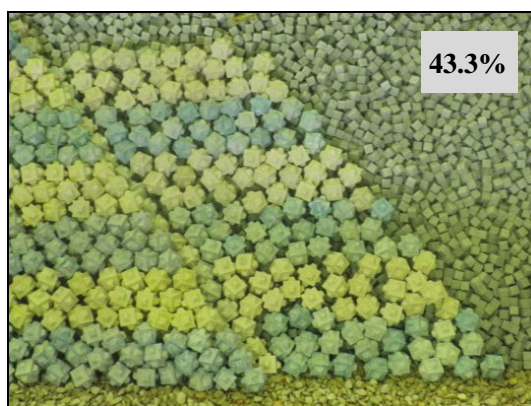


Figura A3.27. Resultado ensayo CLIOMAR_a6.1_b4_n1_2512. (Fuente: propia)

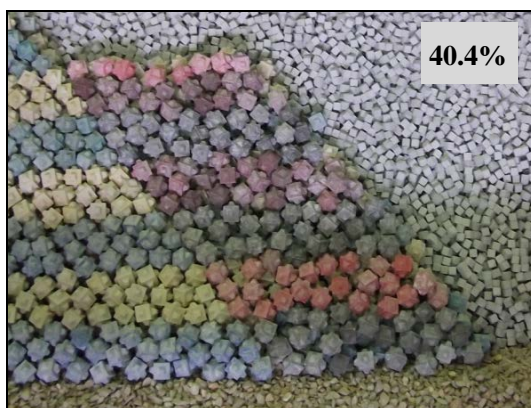


Figura A3.28. Resultado ensayo CLIOMAR_a6.1_b4_n2_2512. (Fuente: propia)

A continuación se expone la tabla resumen de los ensayos de CLIOMAR para tronco recto:

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Δb	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
CLIOMAR_a6_b4_n1_1510	TR progresiva	1/100	2/1	1ª	1.571	1.047	1%b	1.5	1	40	Aprox. 90°	0.432	2.1
CLIOMAR_a6_b4_n1_2512	TR progresiva	1/100	2/1	1ª	1.571	1.047	1%b	2.5	1.2	40	Aprox. 90°	0.430	2.8
CLIOMAR_a7_b4_n1_1510	TR progresiva	1/100	2/1	1ª	1.832	1.047	1%b	1.5	1	40	Aprox. 90°	0.422	2.8
CLIOMAR_a7_b4_n1_2512	TR progresiva	1/100	2/1	1ª	1.832	1.047	1%b	2.5	1.2	40	Aprox. 90°	0.423	0.7
CLIOMAR_a5.7_b4_n1_1510	TR progresiva	1/100	2/1	1ª	1.492	1.047	1%b	1.5	1	40	Aprox. 90°	0.469	3.5
CLIOMAR_a5.7_b4_n2_1510	TR progresiva	1/100	2/1	2ª	1.492	1.047	1%b	1.5	1	40	Aprox. 90°	0.404	4.2
CLIOMAR_a6.1_b4_n1_1510	TR progresiva	1/100	2/1	1ª	1.597	1.047	1%b	1.5	1	40	Aprox. 90°	0.422	1.4
CLIOMAR_a6.1_b4_n2_1510	TR progresiva	1/100	2/1	2ª	1.597	1.047	1%b	1.5	1	40	Aprox. 90°	0.404	2.8
CLIOMAR_a6.1_b4_n1_2512	TR progresiva	1/100	2/1	1ª	1.597	1.047	1%b	2.5	1.2	40	Aprox. 90°	0.433	0.0
CLIOMAR_a6.1_b4_n2_2512	TR progresiva	1/100	2/1	2ª	1.597	1.047	1%b	2.5	1.2	40	Aprox. 90°	0.404	0.0

Tabla A3.4. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco recto en talud $H/V=2/1$ del Proyecto CLIOMAR. (Fuente: propia)

A3.3.3. Ensayos de colocación del dique de San Andrés



Figura A3.29. Resultado ensayo TR_P_a6.1_b4_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.30. Resultado ensayo TR_P_a6.1_b4_n2. (Fuente: propia)



Figura A3.31. Resultado ensayo TR_P_a5.9_b4_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.32. Resultado ensayo TR_P_a5.9_b4_n2. (Fuente: propia)

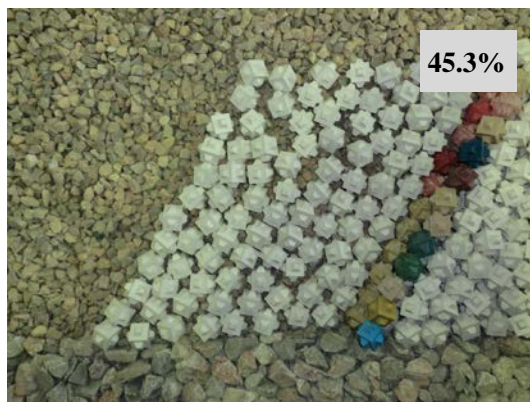


Figura A3.33. Resultado ensayo TR_E_a6.1_b4_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.34. Resultado ensayo TR_E_a6.1_b4_n2. (Fuente: propia)



Figura A3.35. Resultado ensayo TR_E_a5.7_b4_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.36. Resultado ensayo TR_E_a5.7_b4_n2. (Fuente: propia)

A continuación se expone la tabla resumen de los ensayos del Proyecto del dique de San Andrés para tronco recto:

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Δb	Hs (cm)	T p(s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
TR_P_a6.1_b4_n1	TR progresiva	1/36	2/1	1*	1.605	1.053	1%b	—	—	—	—	0.387	0.0
TR_P_a6.1_b4_n2	TR progresiva	1/36	2/1	2*	1.605	1.053	1%b	—	—	—	—	0.397	1.0
TR_P_a5.9_b4_n1	TR progresiva	1/36	2/1	1*	1.553	1.053	1%b	—	—	—	—	0.413	0.0
TR_P_a5.9_b4_n2	TR progresiva	1/36	2/1	2*	1.553	1.053	1%b	—	—	—	—	0.399	3.1
TR_E_a6.1_b4_n1	TR estatica	1/36	2/1	1*	1.605	1.053	—	—	—	—	—	0.453	0.0
TR_E_a6.1_b4_n2	TR estatica	1/36	2/1	2*	1.605	1.053	—	—	—	—	—	0.422	0.0
TR_E_a5.7_b4_n1	TR estatica	1/36	2/1	1*	1.500	1.053	—	—	—	—	—	0.378	0.0
TR_E_a5.7_b4_n2	TR estatica	1/36	2/1	2*	1.500	1.053	—	—	—	—	—	0.431	1.0

Tabla A3.5. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco recto en talud $H/V=2/1$ del Proyecto del dique de San Andrés. (Fuente: propia)

A3.3.4. Ensayos de colocación del Proyecto MMONOCAPA



Figura A3.37. Resultado ensayo TR_2_1510_a6.1_b4_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.38. Resultado ensayo TR_2_1510_a6.1_b4_n2. (Fuente: propia)



Figura A3.39. Resultado ensayo TR_2_2512_a6.1_b4_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.40. Resultado ensayo TR_2_2512_a6.1_b4_n2. (Fuente: propia)



Figura A3.41. Resultado ensayo TR_2_1510_a5.7_b4_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.42. Resultado ensayo TR_2_1510_a5.7_b4_n2. (Fuente: propia)



Figura A3.43. Resultado ensayo TR_2_2512_a5.7_b4_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.44. Resultado ensayo TR_2_2512_a5.7_b4_n2. (Fuente: propia)

A continuación se expone la tabla resumen de los ensayos del Proyecto MMONOCAPA para tronco recto:

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
TR_2_1510_a6.1_b4_n1	TR estatica	1/36	2/1	1ª	1.605	1.053	1.5	1	19	Aprox. 0°	0.395	0.0
TR_2_1510_a6.1_b4_n2	TR estatica	1/36	2/1	2ª	1.605	1.053	1.5	1	19	Aprox. 0°	0.398	0.0
TR_2_2512_a6.1_b4_n1	TR estatica	1/36	2/1	1ª	1.605	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 0°	0.391	0.0
TR_2_2512_a6.1_b4_n2	TR estatica	1/36	2/1	2ª	1.605	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 0°	0.359	1.4
TR_2_1510_a5.7_b4_n1	TR estatica	1/36	2/1	1ª	1.500	1.053	1.5	1	19	Aprox. 0°	0.419	0.0
TR_2_1510_a5.7_b4_n2	TR estatica	1/36	2/1	2ª	1.500	1.053	1.5	1	19	Aprox. 0°	0.443	1.4
TR_2_2512_a5.7_b4_n1	TR estatica	1/36	2/1	1ª	1.500	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 0°	0.479	1.3
TR_2_2512_a5.7_b4_n2	TR estatica	1/36	2/1	2ª	1.500	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 0°	0.382	2.5

Tabla A3.6. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco recto en talud $H/V=2/1$ del Proyecto MMONOCAPA. (Fuente: propia)

A3.4. Mallas de colocación del Cubípodo en tronco curvo de baja curvatura

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados para tronco curvo de baja curvatura.

A3.4.1. Ensayos de colocación del dique de San Andrés



Figura A3.45. Resultado ensayo TCV2_seco_a6.1_b4_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.46. Resultado ensayo TCV2_seco_a6.1_b4_n2. (Fuente: propia)

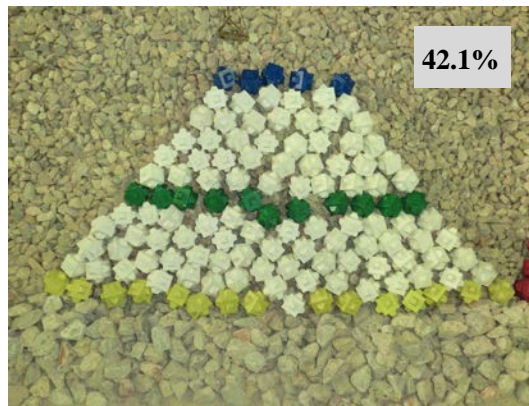


Figura A3.47. Resultado ensayo TCV2_seco_a6.4_b4_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.48. Resultado ensayo TCV2_seco_a6.4_b4_n2. (Fuente: propia)

A continuación se expone la tabla resumen de los ensayos del dique de San Andrés para tronco curvo de baja curvatura:

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
TCv1_seco_a6.1_b3.8_n1	TR estática	1/36	2/1	1*	1.605	1.000	—	—	—	—	0.448	0.0
TCv1_seco_a6.1_b3.8_n2	TR estática	1/36	2/1	2*	1.605	1.000	—	—	—	—	0.422	0.0
TCv2_seco_a6.1_b4_n1	TC estática	1/36	2/1	1*	1.605	1.053	—	—	—	—	0.390	0.0
TCv2_seco_a6.1_b4_n2	TC estática	1/36	2/1	2*	1.605	1.053	—	—	—	—	0.451	0.0
TCv2_seco_a6.4_b4_n1	TC estática	1/36	2/1	1*	1.684	1.053	—	—	—	—	0.421	0.9
TCv2_seco_a6.4_b4_n2	TC estática	1/36	2/1	2*	1.684	1.053	—	—	—	—	0.480	0.0

Tabla A3.7. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco curvo de baja curvatura en talud $H/V=2/1$ del Proyecto del dique de San Andrés. (Fuente: propia)

A3.4.2. Ensayos de colocación del Proyecto MMONOCAPA



Figura A3.49. Resultado ensayo TC_2_1510_a6.1_b4_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.50. Resultado ensayo TC_2_1510_a6.1_b4_n2. (Fuente: propia)



Figura A3.51. Resultado ensayo TC_2_2512_a6.1_b4_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.52. Resultado ensayo TC_2_2512_a6.1_b4_n2. (Fuente: propia)



Figura A3.53. Resultado ensayo TC_2_2512_a6.1_b4_n1_rep. (Fuente: propia)



Figura A3.54. Resultado ensayo TC_2_2512_a6.1_b4_n2_rep. (Fuente: propia)

A continuación se expone la tabla resumen de los ensayos del dique del Proyecto MMONOCAPA para tronco curvo de baja curvatura y talud $H/V=2/1$:

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
TC_2_1510_6.1_4_n1	TC estática	1/36	2/1	1*	1.605	1.053	1.5	1	19	Aprox. 80°	0.420	0.0
TC_2_1510_6.1_4_n2	TC estática	1/36	2/1	2*	1.605	1.053	1.5	1	19	Aprox. 80°	0.446	0.0
TC_2_2512_6.1_4_n1	TC estática	1/36	2/1	1*	1.605	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 80°	0.393	2.1
TC_2_2512_6.1_4_n2	TC estática	1/36	2/1	2*	1.605	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 80°	0.471	1.2
TC_2_2512_6.1_4_n1_rep	TC estática	1/36	2/1	1*	1.605	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 80°	0.425	0.0
TC_2_2512_6.1_4_n2_rep	TC estática	1/36	2/1	2*	1.605	1.053	2.5	1.2	19	Aprox. 80°	0.449	0.0

Tabla A3.8. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco curvo de baja curvatura en talud $H/V=2/1$ del Proyecto MMONOCAPA. (Fuente: propia)



Figura A3.55. Resultado ensayo TC_1.5_seco_a6.1_b4. (Fuente: propia)



Figura A3.56. Resultado ensayo TC_1.5_seco_a6.1_b3.87. (Fuente: propia)



Figura A3.57. Resultado ensayo TC_1.5_seco_P_a6.1_b3.87. (Fuente: propia)



Figura A3.58. Resultado ensayo TC_1.5_1510_P_a6.1_b3.87_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.59. Resultado ensayo TC_1.5_1510_P_a6.1_b3.87_n2. (Fuente: propia)



Figura A3.60. Resultado ensayo TC_1.5_2512_P_a6.1_b3.87_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.61. Resultado ensayo TC_1.5_2512_P_a6.1_b3.87_n2. (Fuente: propia)

A continuación se expone la tabla resumen de los ensayos del dique del Proyecto MMONOCAPA para tronco curvo de baja curvatura y talud $H/V=1.5/1$:

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Δb	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
TC_1.5_seco_6.1_4	TC estatica	1/36	1.5/1	1ª	1.605	1.053	—	—	—	—	—	0.438	0.0
TC_1.5_seco_6.1_3.87	TC estatica	1/36	1.5/1	1ª	1.605	1.018	—	—	—	—	—	0.407	0.0
TC_1.5_seco_P_6.1_3.87	TC progresiva	1/36	1.5/1	1ª	1.605	1.018	1%b	—	—	—	—	0.400	0.0
TC_1.5_1510_P_6.1_3.87_n1	TC progresiva	1/36	1.5/1	1ª	1.605	1.018	1%b	1.5	1	19	Aprox. 80°	0.424	0.0
TC_1.5_1510_P_6.1_3.87_n2	TC progresiva	1/36	1.5/1	2ª	1.605	1.018	1%b	1.5	1	19	Aprox. 80°	0.453	0.0
TC_1.5_2512_P_6.1_3.87_n1	TC progresiva	1/36	1.5/1	1ª	1.605	1.018	1%b	2.5	1.2	19	Aprox. 80°	0.401	0.0
TC_1.5_2512_P_6.1_3.87_n2	TC progresiva	1/36	1.5/1	2ª	1.605	1.018	1%b	2.5	1.2	19	Aprox. 80°	0.429	0.0

Tabla A3.9. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de tronco curvo de baja curvatura en talud $H/V=1.5/1$ del Proyecto MMONOCAPA. (Fuente: propia)

A3.5. Mallas de colocación del Cubípodo en morros y tronco curvo de alta curvatura

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados para morros y tronco curvo de alta curvatura.

A3.5.1. Ensayos de colocación del dique de San Andrés



Figura A3.62. Resultado ensayo Morro_a6.1_b4_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.63. Resultado ensayo Morro_a6.1_b4_n2. (Fuente: propia)



Figura A3.64. Resultado ensayo Morro_a6.1_b4_n1_rep. (Fuente: propia)

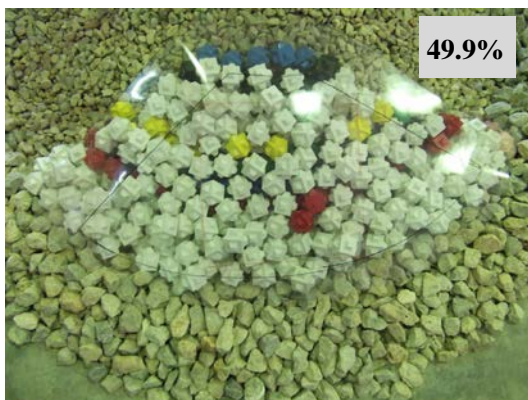


Figura A3.65. Resultado ensayo Morro_a6.1_b4_n2_rep. (Fuente: propia)



Figura A3.66. Resultado ensayo Morro_a6.4_b4_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.67. Resultado ensayo Morro_a6.4_b4_n2. (Fuente: propia)

A continuación se expone la tabla resumen de los ensayos del dique de San Andrés para morro y tronco curvo de alta curvatura:

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
Morro_a6.1_b4_n1	Morro	1/36	2/1	1ª	1.605	1.053	—	—	—	—	0.427	0.0
Morro_a6.1_b4_n2	Morro	1/36	2/1	2ª	1.605	1.053	—	—	—	—	0.481	0.0
Morro_a6.1_b4_n1_rep1	Morro	1/36	2/1	1ª	1.605	1.053	—	—	—	—	0.414	0.0
Morro_a6.1_b4_n2_rep1	Morro	1/36	2/1	2ª	1.605	1.053	—	—	—	—	0.499	0.1
Morro_a6.4_b4_n1	Morro	1/36	2/1	1ª	1.684	1.053	—	—	—	—	0.433	0.0
Morro_a6.4_b4_n2	Morro	1/36	2/1	2ª	1.684	1.053	—	—	—	—	0.475	0.0

Tabla A3.10. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de morro y tronco curvo de alta curvatura en talud $H/V=2/1$ del Proyecto del dique de San Andrés. (Fuente: propia)

A3.5.2. Ensayos de colocación del Proyecto MMONOCAPA

A continuación se exponen los resultados de los ensayos realizados sobre el morro de radio 60 cm ($R/D_n= 15.8$).



Figura A3.68. Resultado ensayo MR60_1.5_seco_6.4_b3.87. (Fuente: propia)



Figura A3.69. Resultado ensayo MR60_1.5_seco_6.7_b3.87. (Fuente: propia)

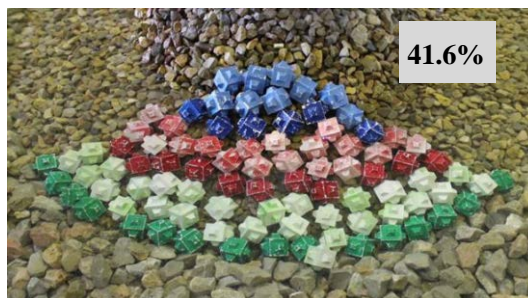


Figura A3.70. Resultado ensayo MR60_1.5_1510_6.4_b3.87_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.71. Resultado ensayo MR60_1.5_1510_6.4_b3.87_n2. (Fuente: propia)

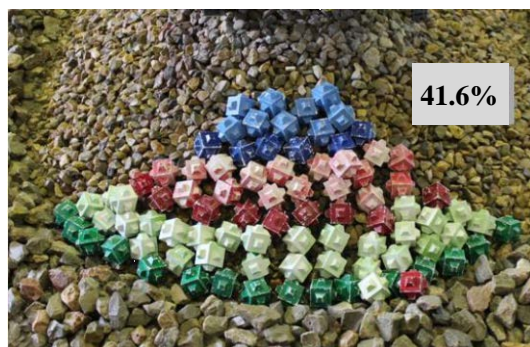


Figura A3.72. Resultado ensayo MR60_1.5_2512_6.4_b3.87_n1. (Fuente: propia)

Seguidamente se presenta la tabla resumen de los ensayos del Proyecto MMONOCAPA para morro de radio 60 cm ($R/D_n = 15.8$):

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
MR60_1.5_seco_6.1_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1*	1.605	1.018	—	—	—	—	—	—
MR60_1.5_seco_6.4_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1*	1.684	1.018	—	—	—	—	0.367	0.0
MR60_1.5_seco_6.7_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1*	1.763	1.018	—	—	—	—	0.416	1.3
MR60_1.5_1510_6.4_3.87_n1	Morro	1/36	1.5/1	1*	1.684	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0°	0.416	1.1
MR60_1.5_1510_6.4_3.87_n2	Morro	1/36	1.5/1	2*	1.684	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0°	0.416	0.0
MR60_1.5_2512_6.4_3.87_n1	Morro	1/36	1.5/1	1*	1.684	1.018	2.5	1.2	19	Aprox. 0°	0.416	4.6

Tabla A3.11. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de morro en talud $H/V=1.5/1$ y radio R60 del Proyecto del dique de San Andrés. (Fuente: propia)

A continuación se exponen los resultados de los ensayos realizados sobre el morro de radio 70 cm ($R/D_n = 18.4$).



Figura A3.73. Resultado ensayo MR70_1.5_seco_6.1_b3.87. (Fuente: propia)



Figura A3.74. Resultado ensayo MR70_1.5_seco_6.4_b3.87. (Fuente: propia)



Figura A3.75. Resultado ensayo MR70_1.5_seco_6.7_b3.87. (Fuente: propia)



Figura A3.76. Resultado ensayo MR70_1.5_1510_6.4_b3.87_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.77. Resultado ensayo MR70_1.5_1510_6.4_b3.87_n2. (Fuente: propia)



Figura A3.78. Resultado ensayo MR70_1.5_2512_6.4_b3.87_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.79. Resultado ensayo MR70_1.5_2512_6.4_b3.87_n2. (Fuente: propia)

Seguidamente se presenta la tabla resumen de los ensayos del Proyecto MMONOCAPA para morro de radio 70 cm ($R/D_n= 18.4$):

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
MR70_1.5_seco_6.1_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.605	1.018	—	—	—	—	0.391	0.8
MR70_1.5_seco_6.4_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.684	1.018	—	—	—	—	0.406	0.0
MR70_1.5_seco_6.7_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.763	1.018	—	—	—	—	0.422	0.0
MR70_1.5_1510_6.4_3.87_n1	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.684	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0º	0.414	0.0
MR70_1.5_1510_6.4_3.87_n2	Morro	1/36	1.5/1	2ª	1.684	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0º	0.437	0.0
MR70_1.5_2512_6.4_3.87_n1	Morro	1/36	1.5/1	1ª	1.684	1.018	2.5	1.2	19	Aprox. 0º	0.414	0.8
MR70_1.5_2512_6.4_3.87_n2	Morro	1/36	1.5/1	2ª	1.684	1.018	2.5	1.2	19	Aprox. 0º	0.437	3.5

Tabla A3.12. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de morro en talud $H/V=1.5/1$ y radio R70 del Proyecto del dique de San Andrés. (Fuente: propia)

A continuación se exponen los resultados de los ensayos realizados sobre el morro de radio 80 cm ($R/D_n= 21.1$).



Figura A3.80. Resultado ensayo MR80_1.5_seco_6.1_b3.87. (Fuente: propia)



Figura A3.81. Resultado ensayo MR80_1.5_seco_6.4_b3.87. (Fuente: propia)



Figura A3.82. Resultado ensayo MR80_1.5_seco_6.4_b3.87_rep. (Fuente: propia)



Figura A3.83. Resultado ensayo MR80_1.5_seco_6.7_b3.87. (Fuente: propia)



Figura A3.84. Resultado ensayo MR80_1.5_1510_6.7_b3.87_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.85. Resultado ensayo MR80_1.5_1510_6.7_b3.87_n2. (Fuente: propia)



Figura A3.86. Resultado ensayo MR80_1.5_1510_6.7_b3.87_n1_rep. (Fuente: propia)



Figura A3.87. Resultado ensayo MR80_1.5_1510_6.7_b3.87_n2_rep. (Fuente: propia)



Figura A3.88. Resultado ensayo MR80_1.5_2512_6.7_b3.87_n1. (Fuente: propia)



Figura A3.89. Resultado ensayo MR80_1.5_2512_6.7_b3.87_n1_rep. (Fuente: propia)



Figura A3.90. Resultado ensayo MR80_1.5_2512_6.7_b3.87_n2. (Fuente: propia)

Seguidamente se presenta la tabla resumen de los ensayos del Proyecto MMONOCAPA para morro de radio 80 cm ($R/D_n=21.1$):

Ensayo	Tipo malla	Escala	Talud	Capa	a/Dn	b/Dn	Hs (cm)	Tp (s)	h (cm)	Ángulo inc. oleaje	P real	elem. perd.(%)
MR80_1.5_seco_6.1_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1*	1.605	1.018	—	—	—	—	0.436	0.0
MR80_1.5_seco_6.4_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1*	1.684	1.018	—	—	—	—	0.467	0.6
MR80_1.5_seco_6.4_3.87_rep	Morro	1/36	1.5/1	1*	1.684	1.018	—	—	—	—	0.436	0.0
MR80_1.5_seco_6.7_3.87	Morro	1/36	1.5/1	1*	1.763	1.018	—	—	—	—	0.430	0.6
MR80_1.5_1510_6.7_3.87_n1	Morro	1/36	1.5/1	1*	1.763	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0°	0.436	0.0
MR80_1.5_1510_6.7_3.87_n2	Morro	1/36	1.5/1	2*	1.763	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0°	0.523	5.6
MR80_1.5_1510_6.7_3.87_n1_rep	Morro	1/36	1.5/1	1*	1.763	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0°	0.448	0.0
MR80_1.5_1510_6.7_3.87_n2_rep	Morro	1/36	1.5/1	2*	1.763	1.018	1.5	1	19	Aprox. 0°	0.504	0.0
MR80_1.5_2512_6.7_3.87_n1	Morro	1/36	1.5/1	1*	1.763	1.018	2.5	1.2	19	Aprox. 0°	0.461	2.3
MR80_1.5_2512_6.7_3.87_n1_rep	Morro	1/36	1.5/1	1*	1.763	1.018	2.5	1.2	19	Aprox. 0°	0.461	0.6
MR80_1.5_2512_6.7_3.87_n2	Morro	1/36	1.5/1	2*	1.763	1.018	2.5	1.2	19	Aprox. 0°	0.492	1.2

Tabla A3.13. Ensayos de construcción realista de mantos en zona de morro en talud $H/V=1.5/1$ y radio R80 del Proyecto del dique de San Andrés. (Fuente: propia)

