



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

DESARROLLO DE UNA NUEVA TIPOLOGÍA DE DIQUE SUMERGIDO A PARTIR
DE PIEZAS HOMOGÉNEAS

MODALIDAD DE GRADUACIÓN: TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JESÚS EDUARDO MONROY BARRALES

TUTOR (ES) PRINCIPAL(ES)
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

MÉXICO, D. F., OCTUBRE, 2013

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Rafael Bernardo Carmona Paredes

Secretario: Dr. Rodolfo Silva Casarín

Vocal: Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

1er. Suplente: Dr. Adrián Pedrozo Acuña

2do. Suplente: Dr. Carlos A. Escalante Sandoval

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS

DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

*A mi padre Mario Monroy, mi madre Patricia Barrales y mi hermano Mario
Monroy Barrales.
Les debo todo.*

A mis tías, Georgina y Beatriz.

*Toda una vida apoyándome, principalmente con su cariño, lo cual es
invaluable.*

- *“¿Encontraría a la Maga?..”*
- *“...convencida como yo de que un encuentro casual era lo menos
casual en nuestras vidas...”*
- *“Andábamos sin buscarnos pero sabiendo que andábamos para
encontrarnos.”*
- *“Como si se pudiese elegir en el amor, como si no fuera un rayo que
te parte los huesos y te deja estaqueado en la mitad del patio. Vos
dirás que la eligen porque-la-aman, yo creo que es al verse. A Beatriz
no se la elige, a Julieta no se la elige. Vos no elegís la lluvia que te va
a calar los huesos cuando salís de un concierto.”*

Extractos de Rayuela, Julio Cortázar.

*Dedicada a ti, Daniela Barbosa, por llenar de luz mi vida. Has inspirado lo
más hermoso en mi vida y me has motivado a crecer y a mejorar en cada
aspecto de mi vida. Siempre estuviste ahí donde lejos de elegirte, te encontré
y te vi. Gracias a ti he dado pasos que han sido los más importantes en mi
vida. Gracias a ti, cada esfuerzo ha valido la pena. Es para ti. Es por ti.*

- *“Pero el amor, esa palabra...”*
- *“Total parcial: te quiero. Total general: te amo.”*

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por el apoyo que he recibido durante estos 3 años.

Al Dr. Rodolfo Silva por permitirme formar parte del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos. Por la confianza que ha depositado en mi persona, su apoyo, enseñanzas y por permitirme crecer en lo personal y en lo académico.

Al Dr. Edgar Mendoza por todas las enseñanzas, el apoyo y la paciencia brindada desde que llegué a este grupo para realizar mi servicio social. Por ser un tutor con quien he podido contar en todo momento y porque su labor para-con nosotros, sus alumnos, es incansable.

Al Dr. Adrián Pedrozo por el apoyo y la confianza que me brindó.

Al señor Don Modesto, quien nunca nos ha negado su ayuda.

A mis compañeros del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, especialmente a: Alejandro Ruiz, Carlos Armenta, Cesia Cruz, Itxaso Odériz, Iván García, Jaime Arriaga, Jesús Pinedo, José Hoil, Nely Sánchez y Xavier Chávez quienes han sido más que una segunda familia para mí. Sin ellos, mi estancia en este Instituto no habría sido lo mismo. Gracias por todo el apoyo que me brindaron durante las clases y durante el desarrollo de esta tesis, pero sobre todo gracias por su amistad y por los momentos que lejos de ser buenos, han sido inolvidables.

Agradecer nuevamente a Alejandro, Carlos, Jesús, José, Iván y Xavi quienes me apoyaron durante la fabricación de las piezas y durante el desarrollo de los ensayos. Sin ellos habría sido imposible realizar este trabajo.

A mis amigos Adrián Silva, Carlos Prieto, Dalila Ruiz, Javier Villegas, Leticia Pérez, Omar Backhoff, Rocío Ortega y Sandra Chávez quienes nunca han dejado de apoyarme, y han estado al pendiente de este trabajo siempre motivándome. Y está de más decir que les agradezco por formar parte de mi vida, porque además de la amistad, han aportado muchísimo a mi crecimiento académico y personal.

Nuevamente a Daniela Barbosa, quien además de llenar de luz mi vida, me apoyó cuanto pudo. Más allá de la paciencia y de soportarme durante la realización de este trabajo (y más tiempo), no dejó de alentarme, pero sobre todo: no dejó de motivarme e inspirarme a seguir. Gracias por esto y por todo. Gracias por darle un significado a estos logros que ahora son nuestros.

Resumen

En este trabajo se presenta una nueva tipología de elementos prefabricados para la construcción de diques rompeolas sumergidos. El diseño de esta nueva tipología tiene como propósito crear un elemento con una alta capacidad modular que permita un fácil acoplamiento entre sí, ofreciendo así facilidad en la construcción de diques rompeolas sumergidos, con todo lo que ésta implica: fabricación de las piezas, transporte, colocación y mantenimiento.

Finalmente, después de realizar diferentes bocetos de lo que sería el nuevo elemento, se llegó a una geometría muy similar a la de un barco de papel, pero que en conjunto forman un dique en talud con una pendiente aproximada de 1:2 y cuya superficie presenta cierta irregularidad, lo cual haría suponer que podría contribuir a la disipación de la energía por medio de la fricción. De esta geometría surgen dos elementos tipo, denominados PR-B y PR-T, siendo los primeros los que sirven como base del dique y los segundos los que forman el cuerpo del dique.

Estos elementos se construyeron a escala en el laboratorio del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, del Instituto de Ingeniería de la UNAM y se construyeron dos configuraciones diferentes de dique, una de ellas a dos escalas (1:10 y 1:15).

Los diques construidos fueron sometidos a diferentes condiciones de oleaje para medir la reflexión, transmisión y disipación del oleaje inducida por la estructura; así como para verificar bajo qué condiciones la estructura podría presentar alguna falla. Se realizó también un análisis descriptivo donde se detalla lo observado durante los experimentos en la interacción oleaje estructura.

Abstract

A new type of prefabricated elements for construction of submerged breakwaters is presented in this work. The design of this new typology aims to create an element with a high modular capacity to allow easy coupling between them, offering ease of submerged breakwater construction, with all that it implies: parts manufacturing, transportation, placement and maintenance.

Finally, after performing different sketches of the new item, it has obtained a geometry that is so similar to a paper boat, but, when this pieces are placed, form a mound breakwater with a slope of 1:2, and whose surface shows some irregularities, which would suggest that the structure could contribute to energy dissipation through friction. In this geometry there are two type elements, called PR-B (base element) and PR-T (type element).

These items were constructed in the laboratory of Port and Coastal Engineering Group, of the National Autonomous University of Mexico; and two different breakwaters were constructed: one of them at two scales (1:10 and 1:15).

The breakwaters were tested under different wave conditions to: measure the reflection, transmission and dissipation of waves, induced by the structure; and to verify the conditions that causes the structure failure, as well. An analysis was performed to describe the phenomenon observed during experiments in wave-structure interaction.

ÍNDICE

Introducción.....	19
Objetivos y organización del trabajo	21
Capítulo 1. Protección de playas.....	23
1.1 Morfología de playas	23
1.1.1 Forma en perfil de las playas.....	23
1.1.2 Forma en planta de las playas.....	26
1.1.3 Playas en equilibrio.....	26
1.1.4 Transporte de sedimentos	28
1.1.5 Erosión de playas.....	29
1.2 Medios tradicionales de protección de las playas	30
1.2.1 Relleno de playas	30
1.2.2 Espigones	32
1.2.3 Rompeolas	34
1.2.4 Seawalls	36
1.2.5 Revestimientos.....	37
1.2.6 Drenado de playas	37
Capítulo 2. Diques rompeolas	39
2.1 Estructuras rompeolas sumergidos	39
2.1.1 Principio de funcionamiento: fricción.....	40
2.1.2 Principio de funcionamiento: rompiente.....	55
2.1.3 Discusión de las alternativas.....	61
2.1.4 Bases de la propuesta del nuevo elemento prefabricado.....	64
2.2 Diseño del elemento propuesto	65
2.2.1 Características geométricas de elemento base.....	66
2.2.2 Características geométricas del segundo elemento.....	67
2.2.3 Armado del dique.....	69
Capítulo 3. Base teórica.....	73
3.1 Reflexión	73
3.1.1 Método de Goda y Suzuki (1976)	74
3.1.2 Método de Mansard y Funke (1980).....	76
3.2 Transmisión.....	79

3.2.1 Factores que alteran la transmisión del oleaje	79
Capítulo 4. Modelo experimental	83
4.1 Modelo a escala.....	83
4.1.1 Escalas utilizadas	84
4.1.2 Fabricación.....	86
4.2 Diseño del experimento	88
4.2.1 Instrumentación	89
4.2.2 Análisis de datos.....	94
4.2.3 Condiciones modeladas.....	95
4.3 Experimentos	97
4.3.1 Escala 1:15, primera configuración (altura de estructura de 16 cm).....	98
4.3.2 Escala 1:15, segunda configuración (altura de estructura de 12 cm).....	99
4.3.3 Escala 1:10, tercera configuración (altura de estructura de 18 cm)	101
Capítulo 5. Resultados.....	105
5.1 Análisis descriptivo	105
5.2 Metodología propuesta.....	114
5.2.1 Dique 1	116
5.2.2 Dique 2.....	127
Capítulo 6. Conclusiones y futuras líneas de investigación	131
Conclusiones	131
Futuras líneas de investigación	135
Anexo A.....	141
A.1 Dique 1	141
Anexo B	145

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1. Zonificación y partes del perfil de playa. Modificado de USACE (1984).....	24
Figura 1. 2. Perfil dinámico de la playa.....	25
Figura 1. 3. Formaciones típicas de una playa, vista en planta.	27
Figura 1. 4. Relleno de playa por bombeo de arena.....	31
Figura 1. 5. Función de un espigón, visto en planta.....	32
Figura 1. 6. Espigones en Sitges, España (izq.) y comportamiento típico de un grupo de espigones (der.).....	33
Figura 1. 7. Estructuras rompeolas y las salientes generadas.....	34
Figura 1. 8. Estructuras rompeolas y tómbolos generados.....	34
Figura 1. 9. Draga gánguil para la construcción de estructuras rompeolas.	35
Figura 1. 10. Corte transversal de un rompeolas.	36
Figura 1. 11. Seawall en Japón.....	36
Figura 1. 12. Revestimiento de playa, utilizando material rocoso.	37
Figura 2. 1. Rompeolas permeable (diseño de Harvey J. Humphrey).....	40
Figura 2. 2. Bloque modular.	41
Figura 2. 3. Bloque para la construcción de rompeolas.....	41
Figura 2. 4. Bloque para la construcción de rompeolas y control de la erosión y ejemplo de su colocación.....	42
Figura 2. 5. Rompeolas permeable (diseño de F. Atkinson).....	42
Figura 2. 6. Arrecife modular artificial, y ejemplo de dique.....	43
Figura 2. 7. Bloque modular para estructuras rompeolas y ejemplo de dique. ...	43
Figura 2. 8. Reef Ball.	44
Figura 2. 9. “WADs”.....	44
Figura 2. 10. Colocación de tetrápodos.....	45
Figura 2. 11. Modelos a escala de “A-Jacks” para pruebas en canal de oleaje....	46
Figura 2. 12. Coeficiente de reflexión para una estructura formada por A-Jacks.	46
Figura 2. 13. Coeficiente de transmisión para una estructura formada por A-Jacks.....	47
Figura 2. 14. Estructuras tipo “Dolos”.....	47
Figura 2. 15. Bloques tipo “Haro”.....	48
Figura 2. 16. Colocación de bloques Antifer (izq.) y dique formado por bloques Antifer (der.)	48
Figura 2. 17. Disposición arbitraria de bloques Antifer.	49
Figura 2. 18. Modelo de bloque L (izq.) y estructura formada por bloques L a escala (der.)	49
Figura 2. 19. Esquema del sistema rompeolas diseñado por Hulsemann.....	50
Figura 2. 20. Arrecife modular artificial.....	50
Figura 2. 21. Elemento diseñado para la construcción de un rompeolas sumergido.....	51

Figura 2. 22. Colocación de bloques "Aquareef" (izq.) y vista en perfil de la estructura final (der.)	52
Figura 2. 23. Parámetros de diseño de estructura a base de "Aquareef"	52
Figura 2. 24. Bloques prediseñados "XBloc".	53
Figura 2. 25. Rompeolas sumergido, diseñado por S. Myungkil.....	54
Figura 2. 26. Flujo forzado a través del rompeolas sumergido.	54
Figura 2. 27. Oysterbreak.	55
Figura 2. 28. Elemento diseñado como rompeolas por Frank E. Creter.	55
Figura 2. 29. Muro prefabricado para la prevención de la erosión.	56
Figura 2. 30. Rompeolas modular, diseñado por Frederick E. Weir.	56
Figura 2. 31. Barrera de arrecife artificial (1992).	57
Figura 2. 32. Barrera de arrecife artificial (1993)	57
Figura 2. 33. Modelo de la estructura (izq.) y su funcionamiento como pie de relleno (der.)	58
Figura 2. 34. Bloques para la construcción de un dique modular.....	58
Figura 2. 35. Configuraciones elegidas para los experimentos.....	59
Figura 2. 36. Porcentajes de energía reflejada y transmitida, en función del parámetro F/d.	60
Figura 2. 37. Rompeolas de absorción.	61
Figura 2. 38. Desglose de los defectos del diseño.	63
Figura 2. 39. Elemento base.....	66
Figura 2. 40. Esquema del elemento PR-B.....	67
Figura 2. 41. Armado de la base del dique.	67
Figura 2. 42. Elemento prefabricado.....	68
Figura 2. 43. Esquema del elemento PR-T.	68
Figura 2. 44. Esquema del proceso de colocación de los elementos.	69
Figura 2. 45. Esquema del dique construido a partir de las piezas diseñadas....	70
Figura 2. 46. Vista en perfil del dique.	70
Figura 2. 47. Vista frontal del dique.	70
Figura 2. 48. Vista en planta del dique.	71
Figura 4. 1. Dimensiones de los elementos propuestos. Perfil (izq.) y sección transversal (der.). Anotaciones en cm.	83
Figura 4. 2. Dimensiones de los elementos propuestos, escala 1:10. Perfil (izq.) y sección transversal (der.). Anotaciones en cm.	84
Figura 4. 3. Dimensiones de los elementos propuestos, escala 1:15. Perfil (izq.) y sección transversal (der.). Anotaciones en cm.	85
Figura 4. 4. Secciones de las cimbras.	86
Figura 4. 5. Cimbra armada (der.) y modelo 3D de los elementos dentro de la cimbra.	87
Figura 4. 6. Cortadora de unícel armada (izq.) y cortes de unícel (der.).....	87
Figura 4. 7 Piezas coladas.	88
Figura 4. 8. Canal de oleaje de del laboratorio del GICyP	90

Figura 4. 9. Sensores de nivel.	92
Figura 4. 10. Acomodo de los sensores (anotaciones en centímetros).....	93
Figura 4. 11. Primera configuración de la estructura (escala 1:15).	98
Figura 4. 12. Segunda configuración de la estructura (escala 1:15).....	100
Figura 4. 13. Armado de la estructura, escala 1:10.....	102
Figura 5. 1. Reflexión del oleaje vista en planta.	105
Figura 5. 2. Reflexión del oleaje inducido por la estructura. $H = 16$ cm, $T = 2.58$ s.	106
Figura 5. 3. Corrientes de retorno en la interacción oleaje-estructura ($h = 30$ cm).	107
Figura 5. 4. Vórtices entre las crestas de las piezas.	108
Figura 5. 5. Oleaje incidiendo sobre estructura coronada al nivel medio del agua.	108
Figura 5. 6. Oleaje peraltado. $H=4$ cm, $h=30$ cm, $T=1.549$ s.	109
Figura 5. 7. Ola rompiendo cuando incide sobre la estructura. $H=9$ cm, $h=30$ cm.	109
Figura 5. 8. Ola rompiendo sobre el talud de la estructura. $H=4$ cm, $h=26$ cm.	110
Figura 5. 9. Oleaje rompiendo con nivel máximo de sumergencia, $h=40$ cm, $fb=18$ cm.	110
Figura 5. 10. Rotura del oleaje vista a detalle.	111
Figura 5. 11. Rotura deformada por la forma de la estructura.....	112
Figura 5. 12. Rotura de la ola deformada por la estructura (vista posterior). ...	113
Figura 5. 13. Rotura de la ola deformada por la estructura (vista frontal).	113
Figura 5. 14. Superficie libre influida por la forma de la estructura.	114
Figura 5. 15. Dique 1 (escala 1:10).	116
Figura 5. 16. Esquema del dique 1, visto en planta.....	116
Figura 5. 17. Coeficiente de reflexión a partir de la altura de ola incidente significante obtenida por el método de Mansard y Funke (1994) para el dique 1.	118
Figura 5. 18. Coeficientes de reflexión para ambas escalas, con su respectiva función de ajuste.	120
Figura 5. 19. Coeficiente de transmisión a partir de la altura de ola incidente significante obtenida por el método de Mansard y Funke (1994) para el dique 1.	121
Figura 5. 20. Coeficiente de transmisión a partir de la altura de ola incidente significante obtenida por el método de Mansard y Funke (1994) para el dique 1.	123
Figura 5. 21. Comparación entre los coeficientes de transmisión, experimental y teórico.	123
Figura 5. 22. Comparación entre los coeficientes de transmisión, experimentales y teóricos (diferentes autores).	125
Figura 5. 23 Coeficiente de disipación para el dique 1.....	126

Figura 5. 24. Dique 2, visto en perfil (izq.) y visto en planta (der.).....	127
Figura 5. 25. Coeficiente de reflexión a partir de la altura de ola incidente significante obtenida por el método de Mansard y Funke (1994) para el dique 2.	128
Figura 5. 26. Coeficiente de transmisión a partir de la altura de ola incidente significante obtenida por el método de Mansard y Funke (1994) para el dique 2.	129
Figura 5. 27. Coeficiente de disipación para el dique 2.....	130
Figura B. 1. Coeficiente de reflexión a partir de la altura de ola incidente significante obtenida por el método de Goda y Suzuki (1976) para el dique 1. .	145
Figura B. 2. Coeficiente de reflexión a partir de la altura de ola incidente significante obtenida por el método de Goda y Suzuki (1976) para los diques 1 y 2.....	145
Figura B. 3. Coeficiente de transmisión a partir de la altura de ola incidente significante obtenida por el método de Goda y Suzuki (1976) para el dique 1. .	146
Figura B. 4. Coeficiente de transmisión a partir de la altura de ola incidente significante obtenida por el método de Goda y Suzuki (1976) para los diques 1 y 2.....	146
Figura B. 5. Coeficiente de disipación a partir de los coeficientes de transmisión y reflexión obtenidos por el método de Goda y Suzuki (1976) para el dique 1.	147
Figura B. 6. Coeficiente de disipación a partir de los coeficientes de transmisión y reflexión obtenidos por el método de Goda y Suzuki (1976) para los diques 1 y 2.	147

LISTA DE TABLAS

Tabla 4. 1. Número de datos escrito para diferentes periodos de onda.....	94
Tabla 4. 2. Periodos y alturas de ola reales y ensayadas.	97
Tabla 4. 3. Condiciones ensayadas para la escala 1:15 y altura de la estructura de 16 cm.....	99
Tabla 4. 4 Condiciones ensayadas para la escala 1:15 y altura de la estructura de 12 cm.	101
Tabla 4. 5. Condiciones ensayadas para la escala 1:10 y altura de la estructura de 18 cm.....	103
Tabla A. 1. Condiciones y resultados, para el dique 1, escala 1:10.	141
Tabla A. 2. Condiciones y resultados, para el dique 1, escala 1:15.	142
Tabla A. 3 Condiciones y resultados, para el dique 2, escala 1:15.	143

Introducción

La importancia que han adquirido las playas en el sector turismo, recreativo y deportivo, han vuelto a estas zonas parte fundamental de la economía de los países que cuentan con zona costera.

Inherente a esta importancia que han cobrado las playas, existe una necesidad de conservarlas y hacer un buen uso de ellas, pues estas zonas pueden pasar de ser una fuente de ingresos a absorber gastos por mantenimiento, o peor aún, pueden desaparecer poniendo en riesgo la integridad física de la población.

Muchos de los problemas que se presentan en una playa se pueden evitar mediante la prevención, regulando la construcción de edificaciones dentro de la zona móvil de una playa; pero también, cuando se tienen zonas con altos índices de oleaje se puede prevenir y proteger una playa mediante la construcción de estructuras rompeolas, cuyo propósito es el de disipar la energía del oleaje para que éste no tenga la capacidad de desprender el material de una playa.

Estas estructuras rompeolas normalmente son construidas a partir de material rocoso que es depositado cerca de la zona de rompientes para formar un dique con talud que induzca la rotura del oleaje. Sin embargo, en muchas zonas no se cuenta con el material suficiente, o éste se encuentra muy lejos, lo que aumenta los costos de acarreo y hace económicamente insostenible la obra. Por esto último se han ideado diferentes tipologías para la construcción de diques rompeolas, que van desde los más simples como lo son los cubos de concreto, hasta formas complejas como pueden llegar a ser los denominados Reef Ball, que tienen como propósito, además de disipar la energía del oleaje, hacer las veces de arrecife artificial, favoreciendo la acumulación de vida dentro de ellos.

A pesar de que existen muchas tipologías disponibles para la construcción de diques rompeolas, todas con sus respectivas ventajas y desventajas, resulta complicado encontrar piezas que hayan sido diseñadas para tener una alta capacidad modular, que permitan contar con diques rompeolas “flexibles”, cuya forma pueda ser modificada, aumentando o reduciendo dimensiones, o simplemente cambiando su forma. Este tipo de piezas modulares para la construcción de diques sumergidos podría traer beneficios tales como facilidad en la construcción, transporte, manejo y colocación de estructuras rompeolas.

En este trabajo se propone una nueva tipología para la construcción de diques sumergidos, que cuenta con una alta capacidad modular, lo que permite la fácil colocación de una gran cantidad de piezas y permite modificar la forma del dique. Esta nueva tipología es de una geometría sencilla, muy semejante a la de un barco de papel, y permite una fácil fabricación de cada pieza.

Objetivos y organización del trabajo

El objetivo principal de este trabajo es alcanzar un diseño de una nueva tipología para la construcción de diques rompeolas sumergidos, que tenga una alta capacidad modular, es decir, haciendo una semejanza, que funcione como piezas de Lego®, tal que permita la fácil colocación de las piezas.

El propósito principal de esta nueva tipología es el de disipar la energía del oleaje, con esto, se tiene otro objetivo principal: determinar la capacidad de disipación que tendría el dique construido a partir de las piezas propuestas. Para ello, se determinarán los coeficientes de reflexión, transmisión y finalmente se obtendrá un coeficiente de disipación para determinar si la estructura cumple con su propósito principal.

Otros objetivos adicionales, y que complementan el objetivo central, se enlistan a continuación:

- Estudiar la interacción oleaje-estructura que se presenta para evaluar posibles modificaciones al diseño original;
- Verificar que el dique construido no presente fallas cuando sea sometido a condiciones fuertes de oleaje;
- Obtener una ecuación de diseño, que permita estimar la transmisión del oleaje que se tendría utilizando una cierta configuración de la estructura, y con ello;
- Obtener información suficiente sobre la reflexión, transmisión y disipación del oleaje para patentar el diseño propuesto.

Para alcanzar los objetivos planteados, el trabajo se ha organizado de la siguiente manera:

Capítulo 1. Protección de playas

Se presentan y describen las estructuras que existen para la protección de la playa, partiendo de la definición de playa, morfología, descripción por su forma en perfil y planta.

Capítulo 2. Diques rompeolas

Se hace una descripción más detallada sobre los diques rompeolas, especialmente de los rompeolas sumergidos, y se presenta una clasificación de éstos. Además, se presentan las diferentes tipologías propuestas para su construcción.

Capítulo 3. Base teórica

Se presentan los coeficientes de reflexión, partiendo de los métodos de separación de ondas propuestos por Goda y Suzuki (1976) y por Mansard y Funke (1994). También se presentan el cálculo de los coeficientes de transmisión y de disipación.

Capítulo 4. Modelo experimental

Se detalla el diseño de las piezas diseñadas, y se describen los experimentos a realizar: condiciones a utilizar y casos a modelar.

Capítulo 5. Resultados

A modo de resultados, se presenta una metodología de diseño utilizando esta nueva tipología, mostrando los valores de reflexión, transmisión y disipación que se tendría utilizando diferentes configuraciones; y presentando una ecuación de diseño que permita estimar la transmisión del oleaje a partir de una configuración determinada de las piezas.

Capítulo 6. Conclusiones y futuras líneas de investigación

Se presentan las conclusiones a las que se llega después de realizar este trabajo y se proponen algunas de las futuras líneas de trabajo sobre este tema.

Capítulo 1. Protección de playas

La costa es la zona donde existe colindancia de la tierra con el mar, siendo la línea de costa una línea imaginaria que divide al medio marino del medio terrestre. Sin embargo, es complicado establecer límites bien definidos a la zona costera, pues su extensión comprende el área de plataforma continental y tierra adentro en la que los procesos morfodinámicos estén determinados por la dinámica del mar.

En muchas costas existen zonas cubiertas de material suelto no consolidado como gravas, arenas o limos y, sujetas a la acumulación de sedimentos, a estas zonas se les conoce como playas. El sedimento, que proviene de distintas fuentes como pueden ser formaciones rocosas o sistemas arrecifales, es arrastrado por ríos, corrientes marinas o el viento y depositado en la costa; son estos mismos agentes los encargados de transportar el sedimento y acomodarlo a lo largo de la costa.

A pesar de la variabilidad de climas en diferentes regiones del planeta, muchas playas comparten composiciones, comportamientos y formas.

1.1 Morfología de playas

La palabra morfología (del griego μορφη, forma y λογία', estudio) define la disciplina que se encarga del estudio de la forma y estructura de un sistema.

En el estudio de los sistemas costeros, la morfología de playas tiene como propósito entender el comportamiento de una playa a lo largo del tiempo, permitiendo así describirla a partir de su forma; en ese sentido, una playa puede definirse por su forma en perfil y su forma en planta, y esta descripción dependerá, en gran medida, del comportamiento que tenga la playa en cierto periodo. De este modo, habrá playas en las cuales fenómenos de corta duración tendrán gran influencia sobre la forma de la misma generando alteraciones importantes a su perfil; en este caso, la playa será descrita, precisamente, por su forma en perfil. Así mismo, habrá playas cuya forma en perfil no presente cambios significantes, y sin embargo sí presente alteraciones en planta, después de un periodo largo; estas playas estarán definidas por su forma en planta.

1.1.1 Forma en perfil de las playas

Haciendo un corte transversal, perpendicular a la línea de costa, en cualquier punto de una playa, se pueden identificar tres secciones dadas por los procesos hidrodinámicos que ahí ocurren:

- Zona de rompientes: es la zona en la cual el oleaje proveniente de aguas más profundas, se peralta y finalmente rompe.

- Zona de transición: es la zona comprendida entre la zona de rompientes y la zona de *swash* (zona de lavado). En esta zona predomina la turbulencia generada por la rotura de las olas.
- Zona de *swash* (zona de lavado o “lamido”). Es la zona de la playa que se encuentra alternativamente mojada y seca por el ascenso y descenso del oleaje sobre el perfil.

En la figura 1.1 se puede observar el perfil más representativo de una playa.

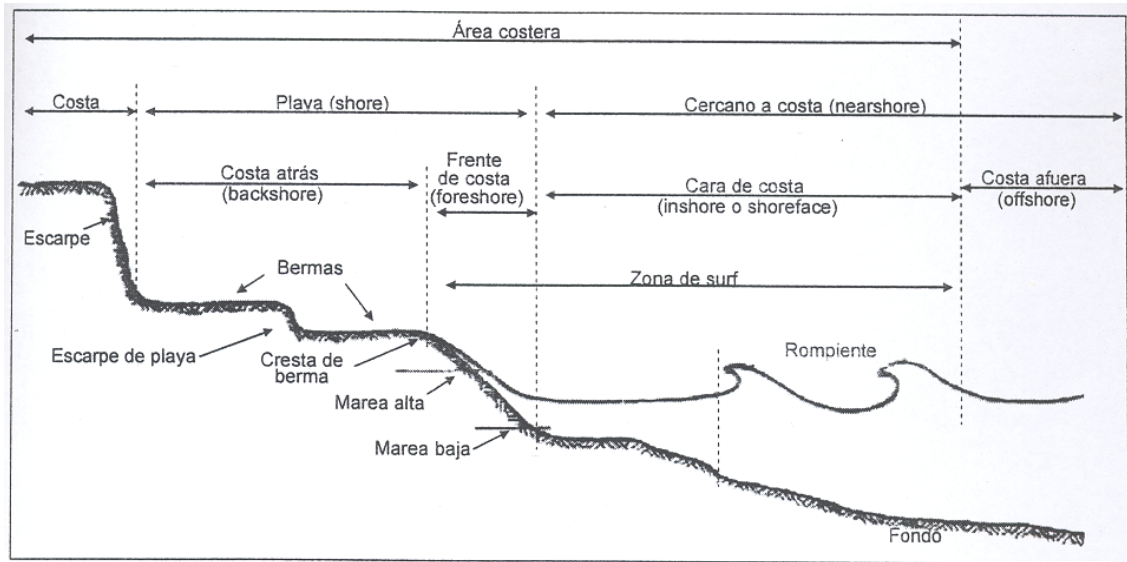


Figura 1. 1. Zonificación y partes del perfil de playa. Modificado de USACE (1984).

1.1.1.1 Variaciones del perfil: playas disipativas y reflejantes

El perfil de una playa puede adquirir un sinnúmero de formas, aunque existen dos extremas que llevan el nombre de perfil disipativo y perfil reflejante.

El perfil disipativo es característico de las playas compuestas por sedimentos finos y en las cuales el nivel de energía del oleaje es elevado. En general, la playa presenta una pendiente muy suave la cual tiene una alta capacidad para disipar el oleaje (de ahí el nombre del perfil). Las bermas no se distinguen del frente de playa y tienden a formarse barras longitudinales con crestas no muy marcadas.

El perfil reflejante se presenta en playas compuestas por arenas medias a gruesas, y en las cuales el nivel de energía del oleaje es bajo. La berma marca claramente el inicio del frente de playa, y en la playa seca se pueden llegar a observar restos de bermas y escarpes correspondientes a perfiles más retrasados, creados bajo condiciones de oleaje más fuertes.

1.1.1.2 Perfil dinámico de las playas

La interacción entre el medio marino y el medio terrestre tiene una influencia directa sobre la forma en perfil de la playa, la cual será producto de las diferentes fuerzas que actúan sobre el sedimento que compone la playa. De no existir el

oleaje, la playa tendría un perfil lineal cuya pendiente correspondería al ángulo de reposo de la arena. Sin embargo, en la realidad y bajo la acción del oleaje, la playa presenta concavidades hacia arriba y pendientes más suavizadas respecto al ángulo de reposo de la arena.

Durante una tormenta se presenta un estado de mar inestable dentro de la zona de rompientes y el oleaje llega a la playa desde diferentes direcciones. Cuando el oleaje alcanza la superficie de la playa, una gran cantidad de sedimento es removido y arrastrado mar adentro, favoreciendo la generación de barras en aguas relativamente profundas. Conforme estas barras van creciendo, la zona de rompientes se traslada mar adentro; de este modo, las olas rompen cada vez más lejos de la costa disipando así una cantidad considerable de energía antes de llegar a la playa. Esta pérdida de material continúa hasta que, eventualmente, se alcanza un pseudo-equilibrio. Una vez que la tormenta ha pasado, los depósitos de arena que han sido arrastrados mar adentro para la formación de barras regresan, por la acción de un oleaje con niveles de energía más moderados, a su ubicación inicial.

En la figura 1.2 se puede observar, de forma esquemática, los perfiles de playa correspondientes a tormenta y estado de mar en calma.

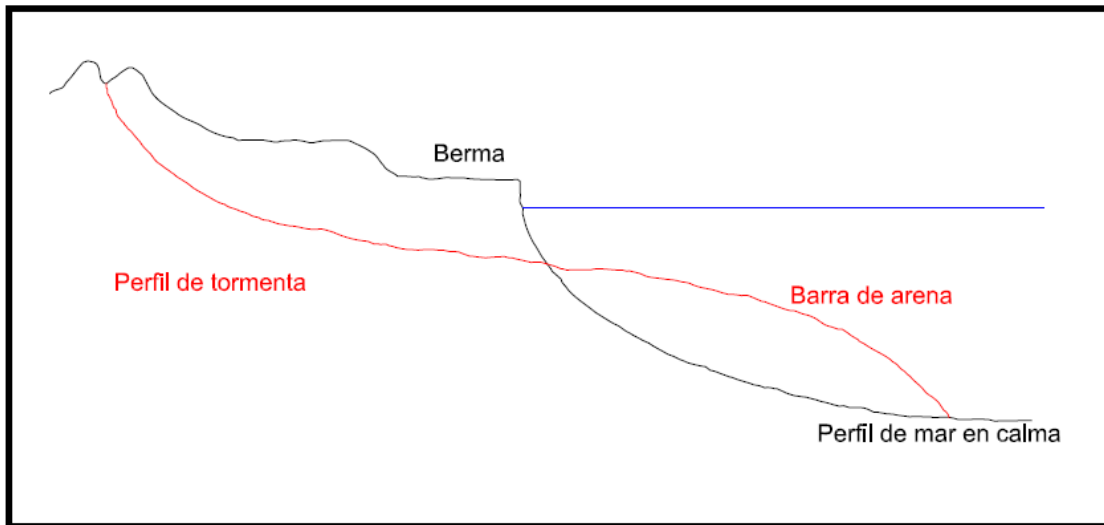


Figura 1. 2. Perfil dinámico de la playa.

Cuando la zona de playa seca queda temporalmente lejos del oleaje, la arena se seca por la acción del sol y es removida tierra adentro formando dunas o regresa a la playa, en ambos casos, por acción del viento.

Durante los procesos anteriores intervienen diferentes fuerzas que se mantienen en balance y a su vez, mantienen un perfil de playa correspondiente al estado de equilibrio. Sin embargo, dicho estado puede verse afectado si se alteran las condiciones hidrodinámicas tales como incrementos en el nivel medio del mar, o

cambios en la altura y periodo de ola; así como alteraciones en el transporte de sedimentos. Bajo estas circunstancias, la playa sufrirá cambios continuos hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio.

1.1.2 Forma en planta de las playas

Como se mencionó anteriormente, una playa puede ser descrita por su forma en planta cuando lo que se pretende es observar los cambios que ha tenido la línea de costa en un periodo considerablemente largo.

Las diferentes formaciones de una playa en planta pueden tener lugar principalmente en pequeña, media, o gran escala de tiempo y espacio, como se describe a continuación:

- Formas de pequeña escala: Estas formas serán resultado de la dinámica en escalas de tiempo de segundos a minutos, y escalas de longitud del orden de decímetros a metros.
- Formas de mediana escala: Su longitud característica va del orden de las decenas a las centenas de metros y tiempos de evolución entre horas y años.
- Formas de gran escala: Son formaciones en planta con escalas que van de los cientos a los miles de metros, y escalas de tiempo con variaciones desde estaciones hasta años.

En la descripción en planta de una playa, destacan procesos que tienden a alinear la línea de costa y procesos que tienden a mantenerla irregular. Dentro de los primeros se encuentran: formación de barreras en los cambios bruscos de orientación, formación de barreras en la entrada de bahías que eventualmente la cerrarán, erosión de salientes y relleno de curvaturas, relleno de sinuosidades formando planicies, y formación de cadenas de islas y relleno de la laguna asociada. Por otro lado, los procesos que tienden a mantener una línea de costa irregular son: formación de salientes, tómbolos y sinuosidades en zona de abrigo de estructuras, bajos o islas (principalmente cuando existen dos direcciones distintas de oleaje); y acumulación de material como respuesta a la variación en la dirección de incidencia del oleaje. Estas formaciones se pueden observar en la figura 1.3.

1.1.3 Playas en equilibrio

El término de playa en equilibrio corresponde al estado morfodinámico idealizado que alcanza una playa en planta y perfil bajo la acción de un oleaje, constante en el tiempo, que actúa sobre una geometría de playa inicial. Una playa consigue su estado de equilibrio a partir del momento en que no presenta cambios significativos en su forma de perfil ni planta.

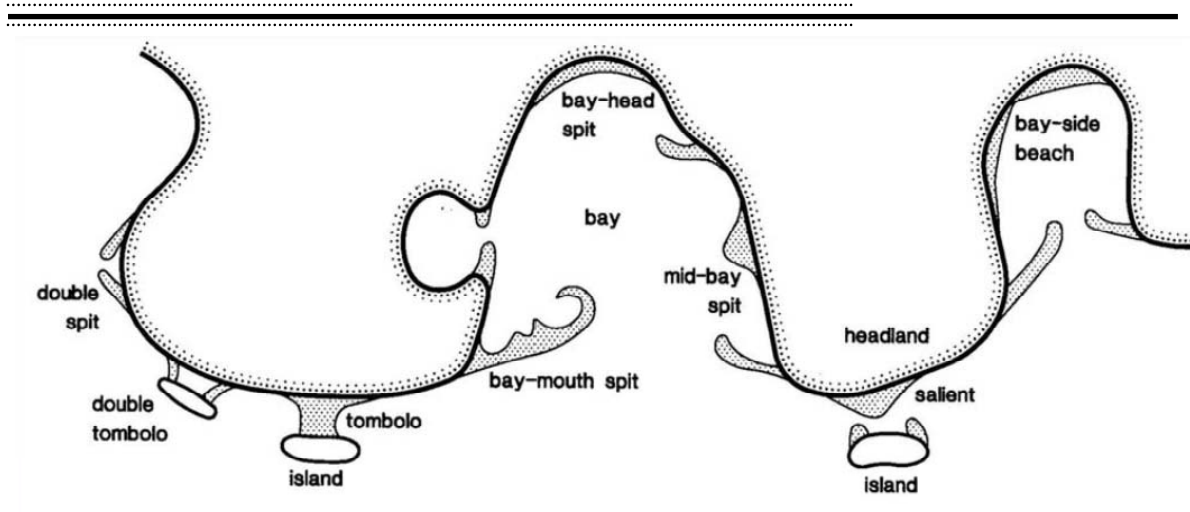


Figura 1. 3. Formaciones típicas de una playa, vista en planta.

El oleaje y la marea son agentes dinámicos que afectan directamente a la playa, cuyo perfil también será dinámico y presentará variaciones en su forma; es por ello que se puede admitir la existencia de una playa en equilibrio aún cuando su forma presente variaciones en función del clima marítimo existente.

Perfil de equilibrio

Como se mencionó anteriormente, un perfil de playa en equilibrio es el resultado de las diferentes interacciones que existen en la línea de costa. Si en un laboratorio se monta una playa de arena y se le aplica un oleaje constante durante largo tiempo y sin variaciones en el nivel medio del agua, al final de la prueba se tendría un nuevo perfil correspondiente a la condición de oleaje modelado y que no cambiará si se mantienen las mismas condiciones.

Sin embargo en la naturaleza, el perfil de equilibrio es un concepto dinámico, pues las condiciones del oleaje y marea se encuentran en constante cambio.

En este estado de equilibrio existen algunas relaciones conocidas entre la forma del perfil y las condiciones hidrodinámicas:

- Tamaño del sedimento. El sedimento más fino tendrá una mayor movilidad, ya sea en dirección a la playa o mar adentro; mientras que el sedimento más grueso pondrá mayor resistencia a los forzamientos hidrodinámicos, especialmente al oleaje.
- Altura de ola. En zonas donde la altura de las olas es elevada, la playa tenderá a una pendiente más suave, pues una altura elevada ejercerá mayor fuerza y ésta sólo podrá ser disipada con una pendiente suave para llegar a un estado de equilibrio. La zona de “surf” también tenderá a ser mayor, propagando la energía del oleaje sobre una región más amplia.
- Periodo de ola. Cuando el periodo de ola es elevado, el sedimento tiende a ser transportado hacia la playa, por lo que la línea de costa avanza hacia el

mar, generando una pendiente más pronunciada en el perfil de playa. En cambio, con un periodo de ola menor, la pendiente de la playa es más suavizada y la línea de costa tiende a avanzar tierra adentro.

- Nivel de marea. Cuando el nivel de marea es elevado, el sedimento puede ser transportado mar adentro con mayor facilidad. Un incremento en el nivel medio del mar necesitará un nuevo perfil de equilibrio para la nueva condición.

Planta de equilibrio

Debido a que la forma en planta se define a través del transporte longitudinal de sedimento, es necesario establecer dos tipos de equilibrio: equilibrio estático y equilibrio dinámico.

Equilibrio estático

Se define la planta en equilibrio estático cuando la forma permanece constante en el tiempo, y el transporte litoral es nulo. Para que esto ocurra es necesario que las corrientes longitudinales se anulen.

Este tipo de playas se encuentran frecuentemente en zonas donde la energía incidente del oleaje tiene una dirección bien definida. Dichas playas muestran una orientación perpendicular a la dirección de incidencia produciéndose la rotura simultánea del oleaje a lo largo de la playa, lo que no implica la formación de una única línea de rotura.

Equilibrio dinámico

Se define la planta en equilibrio dinámico cuando la forma de la playa se mantiene invariable, bajo la presencia de transporte longitudinal de arena pero sin cambio en el volumen global de arena.

1.1.4 Transporte de sedimentos

Como se mencionó al inicio de este capítulo, la playa es una zona cuya dinámica está íntimamente ligada a la acumulación de sedimento. El material que compone una playa proviene de diferentes fuentes como pueden ser: descargas fluviales, desintegración de formaciones rocosas, erosión eólica, erosión en los arrecifes de coral o material transportado desde mar adentro por efectos del oleaje, corrientes o mareas. Una vez que el sedimento ha sido transportado y depositado, éste no permanece estático, sino que se moverá sobre la playa como respuesta a las condiciones hidrodinámicas, bajo los cuales esté sometida.

El transporte del sedimento se da por tres procesos básicos, que son: incorporación, transporte y deposición (Masselink y Hughes, 2003). Se puede presentar predominantemente en dos direcciones: transporte transversal y transporte longitudinal de sedimentos; y puede ser de tres modos: transporte por fondo, transporte por suspensión o transporte por saltación.

1.1.4.1 Transporte longitudinal de sedimentos

En este tipo de transporte, el sedimento se mueve en una dirección que tiende a ser paralela a la línea de costa, bajo la acción del oleaje y corrientes litorales.

El transporte longitudinal puede darse en dos direcciones, dependiendo de la dirección del oleaje y la dirección que adquieran las corrientes. Por convención, un observador mirando hacia el mar, considerará como transporte positivo si el sedimento se mueve hacia la derecha, y como negativo si el sedimento se mueve hacia la izquierda.

1.1.4.2 Transporte transversal de sedimentos

En este tipo de transporte, el sedimento se mueve en una dirección que tiende a ser perpendicular a la línea de costa. La arena se mueve hacia el mar a causa de olas de gran altura típicas de tormenta. La arena que es transportada en grandes volúmenes se deposita mar adentro, formando barras de arena fuera de la zona litoral, generando así cambios en la línea de costa durante la tormenta.

1.1.5 Erosión de playas

Como se ha mencionado en este capítulo, la forma en una playa estará en constante cambio, pues está bajo el constante influjo de las condiciones hidrodinámicas presentes en la zona. A pesar de que, por temporadas, la playa parece perder volúmenes de arena, ésta, bajo condiciones normales, se regenera por sí sola y es un ciclo que sigue a lo largo del tiempo.

Sin embargo, este equilibrio puede verse alterado por factores externos que pueden ocasionar un daño a la playa. Estos cambios pueden ser consecuencia de procesos naturales, como son los cambios en el nivel medio del mar; o por la intervención del hombre.

La explotación del sector turismo, especialmente en zonas costeras, ha traído un aumento en la cantidad de construcciones dentro de la zona de playa. Una mala planeación de este tipo de edificaciones podría estar interrumpiendo el transporte transversal de sedimento. Así mismo, la expansión de las zonas urbanas hacia la costa favorece la construcción de estructuras para la creación de zonas de abrigo para embarcaciones; igualmente, una mala planeación de estas estructuras, podría favorecer la acumulación de sedimento en lagunas costeras, impidiendo que éste regrese hacia la playa. Otras acciones que podrían alterar el equilibrio de una playa pueden ser: construcción de represas aguas arriba que impidan el transporte de sedimento en los ríos, extracción de arena, contaminación del agua que extermine posibles fuentes de sedimento orgánico, entre otros.

Lo ideal sería evitar los problemas de erosión causados por la intervención del hombre llevando a cabo una buena planeación y regulación de las construcciones realizadas en la zona costera. Sin embargo, es un hecho que los procesos que se

presentan en la playa son de largo plazo, por lo que los efectos de la erosión comienzan a ser evidentes cuando el daño ya es avanzado.

Históricamente, la protección de las playas es un aspecto que ha interesado al hombre. Anteriormente, los aspectos que tenían una mayor importancia dentro de las zonas costeras eran: comercio, exploración y guerras. Actualmente, el uso de la playa con fines turísticos, recreativos y deportivos ha adquirido una mayor fuerza convirtiéndose en una de las principales actividades económicas. Es por ello que la sociedad cada vez se ha preocupado más en la protección, estabilidad y desarrollo sustentable de las zonas costeras, especialmente en las playas, que son las que están más expuestas a los problemas de erosión.

Con la intención de prevenir y dar solución al problema de erosión de las playas, se han ideado diferentes obras ingenieriles construidas dentro de la costa. A continuación se mencionan las principales, su funcionamiento y se hace una breve descripción del método constructivo.

1.2 Medios tradicionales de protección de las playas

1.2.1 Relleno de playas

Cuando la arena es removida de la playa para ser transportada a zonas cercanas, y ésta no tiene la capacidad de regresar a causa de algún obstáculo, puede ser transportada por medios artificiales como son: acarreo y bombeo. El material puede ser transportado desde la zona costa afuera, la zona intermareal, desde lagunas costeras que han sido azolvadas por la acumulación de sedimento o desde paleodunas.

El uso de relleno de playas como medio de protección de la costa contra tormentas suele ser subvalorado. Cuando se rellena una playa, el material que se pierde durante una tormenta corresponderá al relleno, protegiendo así el material original de la playa; además, el material no se pierde, sino que es transportado mar adentro para formar barras de arena, y es regresado por la acción de olas más moderadas y redistribuido a lo largo de la playa.

Un problema significativo asociado con el diseño de relleno de playas es plantear un proyecto a largo plazo. Durante la planeación y la ejecución del relleno la playa continúa erosionándose y, lo más probable, es que el relleno sólo sea una forma de volver a un estado anterior de la playa, por lo que tenderá a alcanzar su estado actual, y la erosión continuará; esta situación hace necesario saber cuánto tiempo llevará este proceso.

Para la realización del relleno, es necesario conocer las propiedades del sedimento de la playa, con la intención de que éste tenga el mismo comportamiento de la playa original bajo las condiciones hidrodinámicas de la zona. De no hacerse así,

la arena podría ser transportada con mayor facilidad acelerando la erosión del relleno y de la playa protegida.

Para que la playa alcance el equilibrio normalmente toma un tiempo del orden de años, mientras que, para algunos proyectos, la pérdida de material puede ocurrir en tiempos del orden de décadas si es que la causa no es un evento meteorológico extremo.

Construcción

La colocación de arena en la playa puede hacerse de forma mecánica o hidráulica. La transportación mecánica desde un banco de material hasta el área a rellenar implica que el material sea transportado en camiones de carga. En el banco de material, la arena es colocada en el camión con equipos tradicionales de movimiento de tierras como son palas mecánicas o retroexcavadoras. En general, este método es utilizado para rellenos en playas pequeñas debido al costo del transporte y al impacto en las superficies a causa de las cargas elevadas.

Para los bancos de material que se encuentran costa afuera o en lagunas costeras, la arena es llevada desde el fondo mediante una draga y bombeada a través de tuberías hasta el sitio de relleno para descargarla finalmente sobre la playa.

En el relleno de playas, la arena normalmente se coloca con una pendiente mayor a la de su perfil en equilibrio, para que una vez que ha sido colocada, las olas comiencen a equilibrar la playa en perfil y planta, cambiando también la forma de la línea de costa. En la figura 1.4 se muestra una bomba en funcionamiento para crear un relleno de playa.



Figura 1. 4. Relleno de playa por bombeo de arena.

Para lograr la redistribución de la arena a lo largo de la playa, el material puede ser depositado cerca de la zona de rompientes y así esperar una distribución

natural por la acción de olas moderadas. Este método puede resultar en beneficios económicos, sin embargo, existe la probabilidad de que el transporte no se realice de forma natural (por los constantes cambios del clima marítimo) lo que haría inviable este método.

Otra forma para distribuir la arena es depositar el material en la zona de playa seca o distribuirla directamente a lo largo del perfil.

1.2.2 Espigones

Un espigón es una barrera vertical que se construye perpendicular a la línea de costa, o formando un ángulo con la misma. Estas estructuras generan cambios considerables en los patrones de las corrientes litorales y su función principal es la de prevenir la erosión de la línea de costa en zonas donde existe un transporte longitudinal de sedimentos considerable.

Con este tipo de estructuras, una franja de arena queda atrapada corriente arriba de la estructura (considerando la dirección y sentido de las corrientes longitudinales) provocando un déficit de material corriente abajo de la estructura (figura 1.5). La tasa de acumulación de material en el espigón corriente arriba corresponde a la tasa de erosión corriente abajo, por lo que estas estructuras deben utilizarse con mucho cuidado. Los espigones no deben exceder cierto tamaño en altura y longitud, para que no impidan la libre circulación de las corrientes longitudinales, lo que alteraría por completo los procesos en la zona costera.

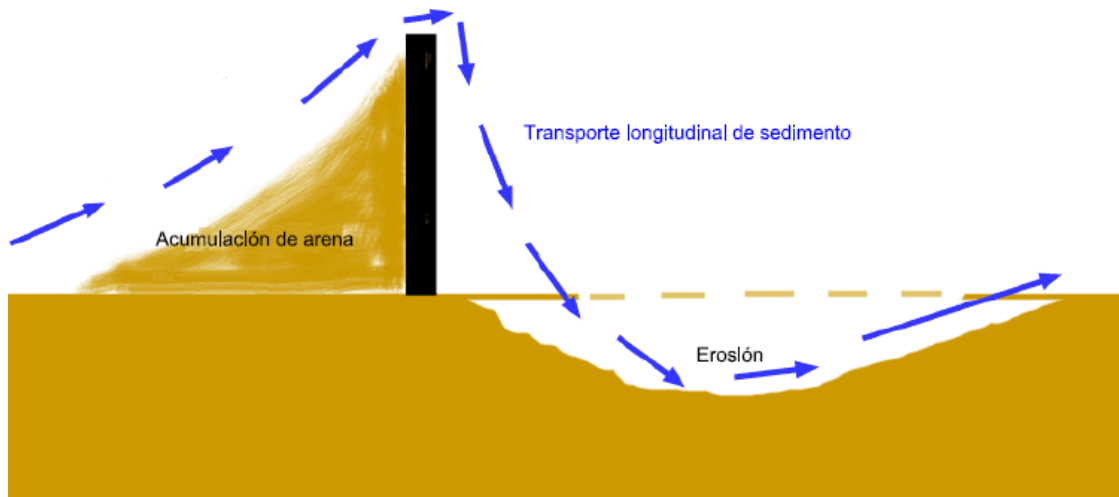


Figura 1. 5. Función de un espigón, visto en planta.

Para aminorar la erosión asociada a un solo espigón, a menudo se construye una serie de espigones a lo largo de la playa. Su separación está dada de tal forma que parte de la arena acumulada corriente arriba del espigón pueda extenderse y depositarse corriente arriba del siguiente espigón, como se muestra en la figura

1.6. La correcta utilización y separación de múltiples espigones obliga que la erosión sea desplazada hasta el último espigón.

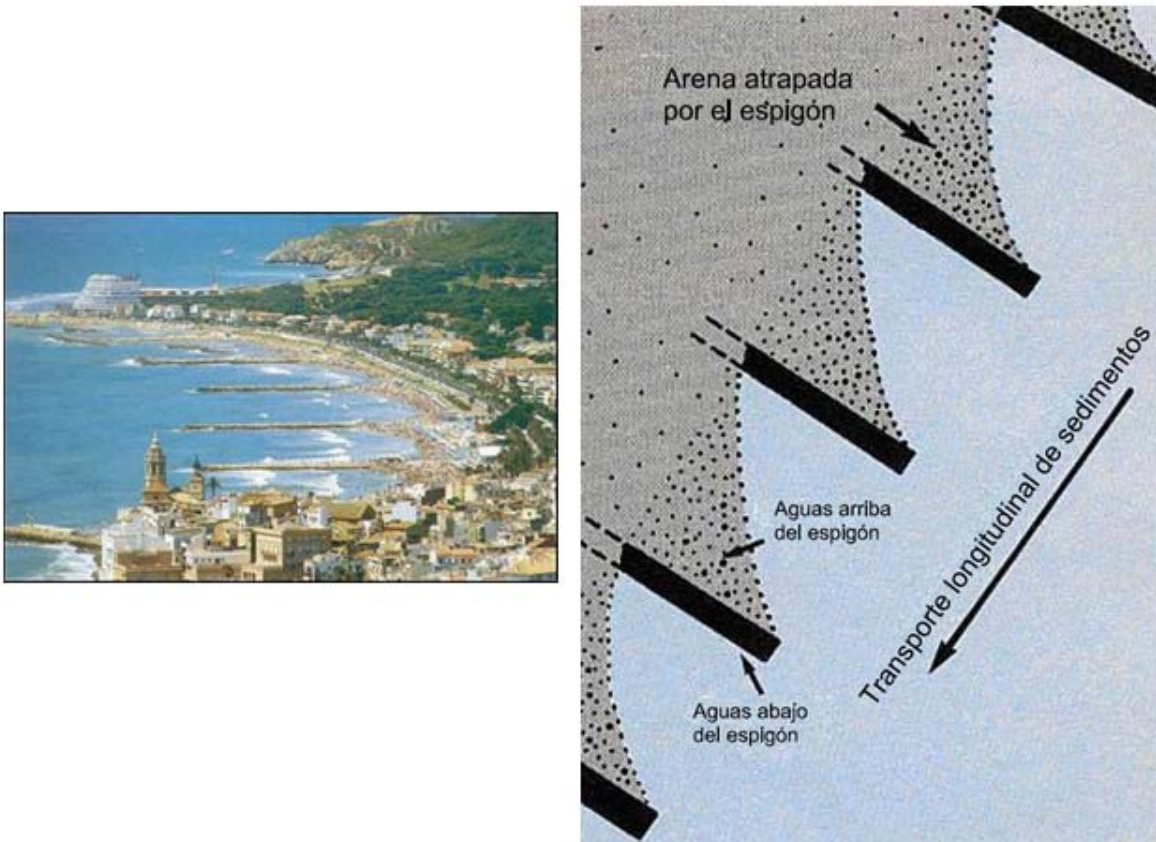


Figura 1. 6. Espigones en Sitges, España (izq.) y comportamiento típico de un grupo de espigones (der.)

El diseño de espigones, incluyendo dimensiones y cantidad, se apoyará en registros referentes al transporte de sedimentos, así como en la función que se espera que tenga la estructura.

Su uso se recomienda para playas con suficiente transporte longitudinal que aminore la erosión, para la creación de canales de acceso, o como estructuras de cierre para puertos. Sin embargo, no son recomendables en zonas donde el rango de marea sea elevado, en playas cortas o donde el transporte neto sea bajo, ni en playas con perfiles reflejantes (USACE, 2002).

Construcción

Generalmente los espigones son construidos en playas de arena, aunque también pueden construirse en costas rocosas con el objeto de crear playas artificiales. Su construcción consiste en el apilamiento vertical de material suelto, ya sean rocas o piezas prefabricadas, mediante el uso de maquinaria como son grúas, retroexcavadoras o bulldozers.

Para evitar la erosión de las superficies en las que se construirá el espigón, puede colocarse una o varias capas de rocas o geotextil que sirvan como base de la estructura.

1.2.3 Rompeolas

En esta sección se hará únicamente una breve descripción de las estructuras rompeolas, pues más adelante se hablará con mayor detalle, especialmente de los rompeolas sumergidos.

Las estructuras rompeolas son barreras verticales, construidas paralelas a la línea de costa, y tienen como propósito principal disminuir la energía incidente del oleaje, además de servir como pie de rellenos de arena, y favorecer la formación de salientes (figura 1.7) o tómbolos (figura 1.8).

Existen dos tipos de rompeolas: emergidos, que son aquellos que sobresalen del nivel medio del mar; y los sumergidos, que se encuentran coronados por debajo del nivel medio del mar.



Figura 1. 7. Estructuras rompeolas y las salientes generadas.



Figura 1. 8. Estructuras rompeolas y tómbolos generados.

Construcción

Al igual que los espigones, las estructuras rompeolas consisten básicamente en la disposición vertical de material rocoso y en algunas ocasiones de bloques de concreto. La colocación del material se puede llevar a cabo mediante el uso de grúas si el rompeolas se localiza relativamente cerca de la costa, o utilizando embarcaciones especiales conocidas como “draga-gánguil” (figura 1.9) o simplemente “gánguil”. La construcción de los rompeolas deberá realizarse durante los periodos de mar en calma.

En el caso de las embarcaciones, con ayuda de los camiones de volteo se carga el material en el gánguil. Los gánguiles son posicionados satelitalmente en el sitio donde se encontrará la estructura, depositan el material y regresan al puerto para reabastecerse de material.



Figura 1. 9. Draga gánguil para la construcción de estructuras rompeolas.

Haciendo un corte transversal, se observa que la estructura rompeolas consta de 3 partes (figura 1.10):

- Núcleo, construido a base de gravas o arenas si se requiere baja transmisión,
- Capa interior construida a base de roca con un tamaño de no más de 90 centímetros en su lado largo;
- Capa exterior, también conocida como capa principal de protección, construida a base de roca con tamaños que van desde los 90 hasta los 130 centímetros en su lado más largo. Esta capa también puede estar constituida por bloques de concreto.

Existen casos en los que las estructuras rompeolas únicamente son conformadas por bloques prefabricados de concreto, siguiendo el mismo proceso constructivo.

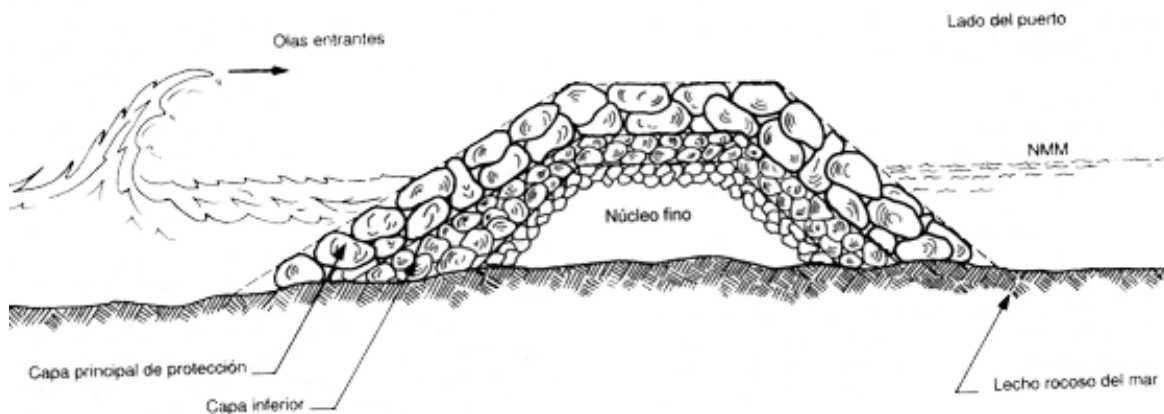


Figura 1. 10. Corte transversal de un rompeolas.

1.2.4 Seawalls

El término seawalls no tiene una traducción exacta al español, se les pueden llamar “muros marinos” o “diques marinos”; y son estructuras verticales cuyo objetivo es proteger el área tierra adentro de la playa cuando la erosión de la línea de costa ya es muy grande.

Sin embargo, el uso de estas estructuras ha causado gran controversia ya que pueden favorecer la erosión de la playa en lugar de prevenirla. Incluso una mala ubicación de la estructura (construyéndola muy cerca del mar) podría desaparecer la playa de arena.



Figura 1. 11. Seawall en Japón.

Construcción

Para la construcción de estas estructuras pueden usarse materiales como madera, concreto o láminas de acero, posicionadas verticalmente delante de la zona que se quiere proteger.

1.2.5 Revestimientos

Los revestimientos son construidos en zonas donde se tiene un interés específico de mantener una línea de costa, evitando así su erosión debida al oleaje.

A diferencia de los seawalls, lo que se busca con los revestimientos es limitar al máximo la reflexión del oleaje que hay en la costa, evitando así dañar playas cercanas.

Construcción

Su construcción consiste en la disposición de varias capas de material rocoso al pie de las dunas o a lo largo del frente de playa, y formando una pendiente idéntica a la que tiene la playa. Se pueden utilizar rocas o bloques prefabricados de concreto.



Figura 1. 12. Revestimiento de playa, utilizando material rocoso.

En algunos casos la playa puede ser cubierta por geotextil, que servirá como base para el revestimiento.

1.2.6 Drenado de playas

El drenado de playas consiste en la construcción de un sistema de tuberías que permitan disminuir la cantidad de agua atrapada en la arena. Las tuberías destinadas a captar el agua cuentan con perforaciones, permitiendo el libre flujo de agua la cual es conducida por la acción de la fuerza de gravedad hacia el mar.

Es un método muy similar al que se utiliza para el drenaje en taludes.

Capítulo 2. Diques rompeolas

Las estructuras rompeolas, también denominados diques rompeolas, son estructuras diseñadas y construidas con el propósito de disipar el oleaje, estableciendo así una zona de mar en calma incluso durante época de tormentas. Estas estructuras se utilizan comúnmente para proteger contra la erosión zonas costeras, o bien crear zonas de mar en calma que den seguridad a las embarcaciones ancladas en los puertos.

Existe una gran variedad de estructuras rompeolas, cuya tipología correcta dependerá de diferentes factores que pueden ser: accesibilidad al sitio de construcción; disponibilidad de material; tipo de batimetría; condiciones ambientales; disponibilidad de espacio para producir y almacenar el material; disponibilidad de maquinaria; y la más importante, el uso que tendrá la estructura, así como el tipo de zona que interesa proteger. Los tipos de rompeolas que se pueden encontrar son:

- En talud, verticales, berma, con espaldón, mixtos;
- Emergidos, rebasables y sumergidos.

En el presente trabajo se prestará especial atención en los rompeolas sumergidos, con el propósito de conocer su funcionamiento, ventajas y desventajas, y lo desarrollado hasta el momento en cuanto a propuestas de piezas para su construcción.

2.1 Estructuras rompeolas sumergidos

Los rompeolas sumergidos son diseñados con la intención de disipar el oleaje, ya sea mediante la rotura del mismo, o generando una pérdida de energía por la fricción que se genera cuando el oleaje pasa a través de la estructura, permitiendo así que exista una cierta transmisión de la energía sin que ésta sea significativa.

Este tipo de rompeolas tiene como ventaja principal la disminución del impacto visual que una estructura podría generar en una zona turística donde la estética juega un papel importante. Además, al ser estructuras coronadas por debajo del nivel medio del mar, requieren un menor volumen de material, situación que eventualmente reduciría los costos. Otra ventaja es que, al ser estructuras que permiten la transmisión del oleaje, disminuye la reflexión del mismo, situación que podría favorecer la protección de organismos que se encuentren cerca de la costa como es el caso de arrecifes de coral.

Sin embargo, tienen la desventaja de que al ser poco visibles, podrían generar problemas a las embarcaciones, por lo cual su ubicación debe estar

perfectamente señalizada. Así mismo, los rompeolas sumergidos tenderán a disipar menos energía en comparación con los emergidos, por lo que únicamente podrán ser construidos en sitios donde el daño a la costa no sea avanzado, o no exista una urgencia por proteger determinada región. A pesar de esto, son estructuras que debidamente utilizadas resultan una buena forma de protección de la costa.

Otro aspecto a considerar en la construcción de estructuras sumergidas es que hoy en día existe una gran variedad de piezas prefabricadas que ofrecen ventajas como agilizar el proceso de diseño, transporte y construcción de la estructura, y que además muchas veces resultan ser la única alternativa cuando no existen bancos de material, o el acceso a éstos es muy complicado en el sitio de construcción.

Estas estructuras prefabricadas pueden funcionar, como se mencionó anteriormente, disipando el oleaje por fricción, permitiendo cierta transmisión del oleaje; o bien, generando la rotura del oleaje disipando así su energía.

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo principal de este trabajo es obtener un elemento prefabricado para la construcción de un dique rompeolas sumergido y que cuente con una capacidad modular que ofrezca la posibilidad de aumentar o disminuir las dimensiones del dique mediante la colocación o el retiro de los elementos diseñados.

Para alcanzar dicho objetivo, se llevó a cabo una revisión de los tipos de estructuras prefabricadas que existen en el mercado o bien han sido patentadas. A continuación, se presentan estas estructuras clasificadas de acuerdo al tipo de disipación que inducen en el oleaje, junto con una breve descripción de las mismas.

2.1.1 Principio de funcionamiento: fricción

2.1.1.1 “Rompeolas permeable”. Harvey J. Humphrey (1949).

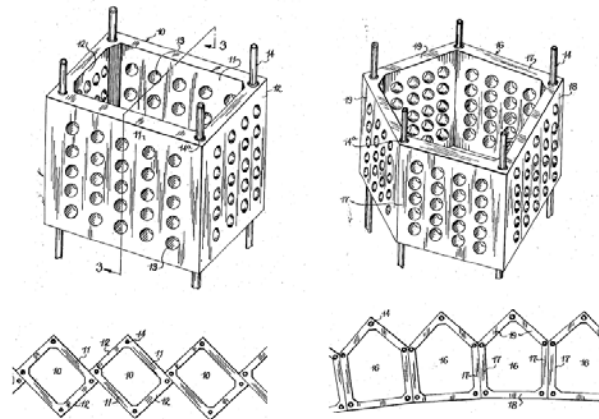


Figura 2. 1. Rompeolas permeable (diseño de Harvey J. Humphrey).

Se trata de dos bloques, uno de geometría pentagonal, el segundo con forma de paralelepípedo, de concreto monolítico, con perforaciones que permiten la transmisión del oleaje. Estos bloques son alineados paralelos a la costa. Aunque en un principio, podrían ser superpuestos para aumentar la elevación del rompeolas, esto le daría mucha esbeltez, convirtiéndola en una estructura frágil. En la figura 2.1 se muestra un esquema de la pieza.

2.1.1.2 “Sistema interconectado”. R. Pey (1977).

Se trata de diferentes piezas con formas triangular y circular que cuentan con extensiones para poder ser trabadas unas con otras, y así alcanzar una geometría deseada de la estructura. Este sistema permitiría eventualmente aumentar la altura de la estructura. En la figura 2.2 se puede observar de manera esquemática la pieza triangular.

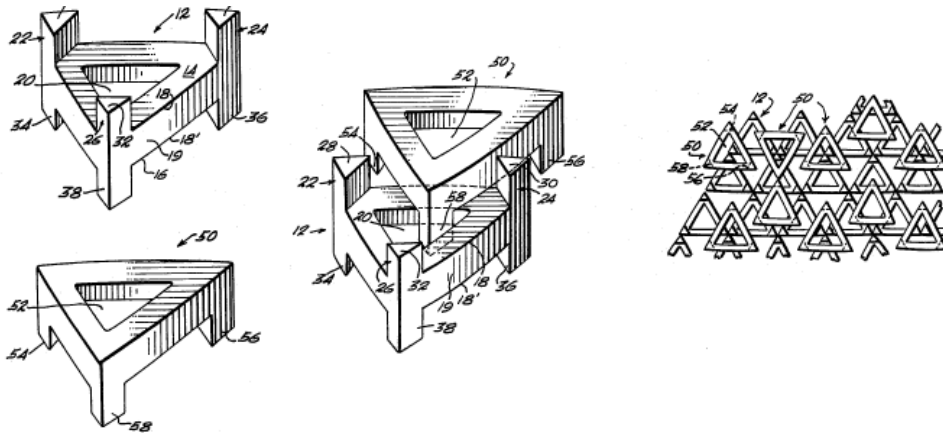


Figura 2. 2. Bloque modular.

2.1.1.3 “Bloque de protección costera”. A. Chevallier (1982).

Chevallier ideó una estructura con piezas que puedan formar trabazón entre ellas, para ello diseñó un elemento que consiste en un núcleo y dos “patas” de simetría similar a la del núcleo, aplanadas en los extremos como se muestra a continuación en la figura 2.3.

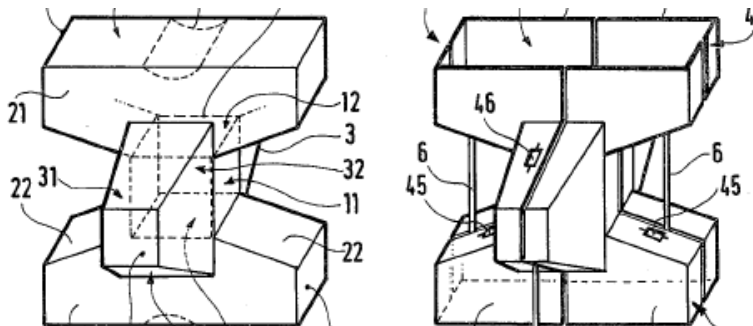


Figura 2. 3. Bloque para la construcción de rompeolas.

2.1.1.4 “Elemento para controlar la erosión”. W. Lenson (1990).

La idea consiste en un rompeolas modular, a base de elementos con sección trapezoidal con “patas” en las 4 esquinas inferiores que sirven para fijarse en el fondo marino y evitar que la estructura sea desplazada. Los elementos únicamente pueden ser alineados, y la estructura tendría una altura fija, pues estos elementos no están diseñados para colocar una estructura sobre otra. La cara expuesta al oleaje incidente forma un ángulo de 30° respecto a la horizontal, y cuenta con perforaciones que permiten cierta transmisión del oleaje y reducen el peso de la estructura. En la figura 2.4 se puede observar el elemento.

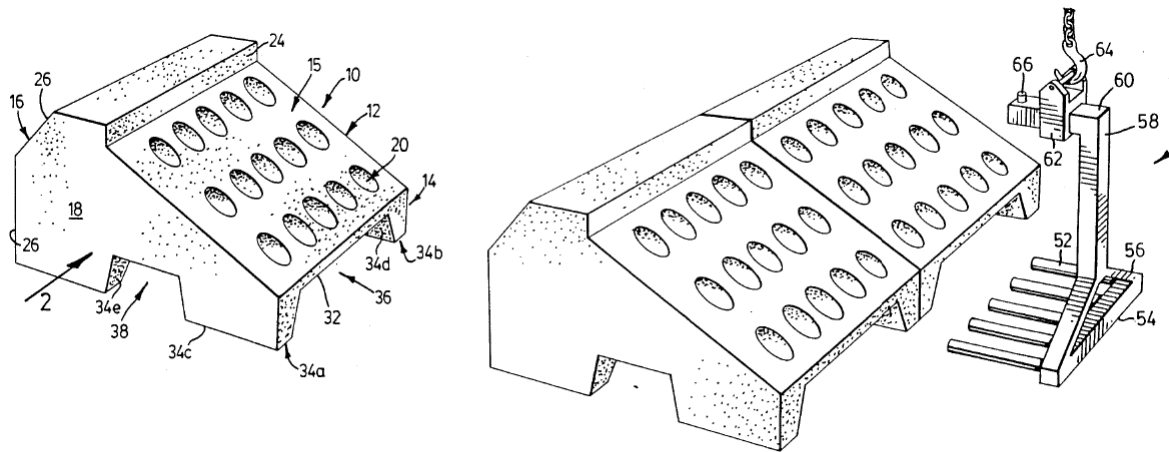


Figura 2. 4. Bloque para la construcción de rompeolas y control de la erosión y ejemplo de su colocación.

2.1.1.5 “Rompeolas permeable (2)”. F. Atkinson. (1991).

El diseño, ideado por F. Atkinson, plantea la construcción de un rompeolas permeable, formado por una serie de piezas triangulares unidas por sus tres ejes, y con uno de los lados extendido hacia la parte inferior para poder ser anclada al fondo marino. El oleaje es disipado al atravesar la estructura, pues ésta permite muy poca transmisión. Como se observa en la figura 2.5, se trata de una estructura que si bien podría incrementar su tamaño a lo largo, tiene una altura fija, lo cual le quita flexibilidad.

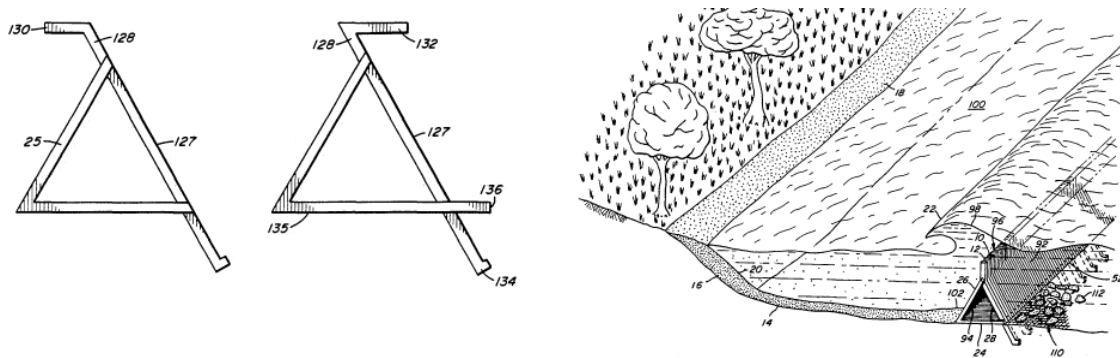


Figura 2. 5. Rompeolas permeable (diseño de F. Atkinson).

2.1.1.6 “Arrecife modular artificial”. M. Campbell (2011).

Una alternativa que se ha empezado a implementar en años más recientes consiste en diseñar y construir formas que simulen arrecifes artificiales, que además permiten la población de la fauna marina creando hábitats y disipando el oleaje. Esta propuesta, de M. Campbell consiste en un bloque modular, con forma de hexágono, que puede ensamblarse hasta que alcance una geometría deseada, por ejemplo, la de un dique en talud. Además, la estructura cuenta con huecos que eventualmente podrían albergar a la fauna marina. En la figura 2.6 se muestra un esquema del bloque modular.

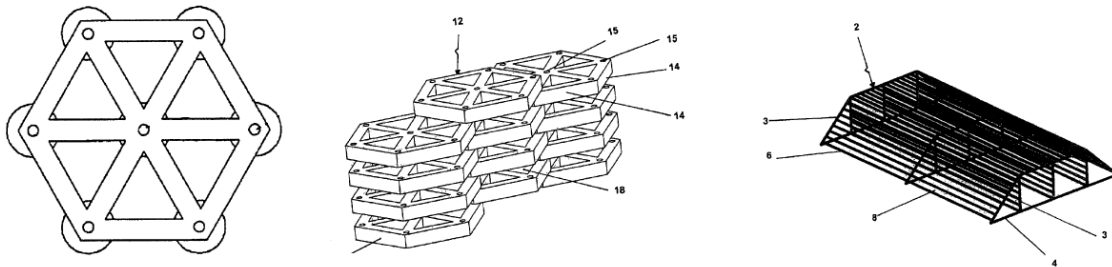


Figura 2. 6. Arrecife modular artificial, y ejemplo de dique.

2.1.1.7 “Bloque modular para estructuras rompeolas”. J. Sciortino (1985).

Se trata de una pieza modular de forma cilíndrica, que cuenta con una cavidad circular y del mismo diámetro que el cilindro, tal que puedan ensamblarse una con otra para formar una estructura disipadora. Adicionalmente, también se diseñó una pieza “hembra” que consiste en dos cavidades circulares que servirán de unión para dos cilindros; esta última pieza podría ser utilizada para dar uniformidad a la estructura en su parte superior. Las piezas y el dique se observan en la figura 2.7.

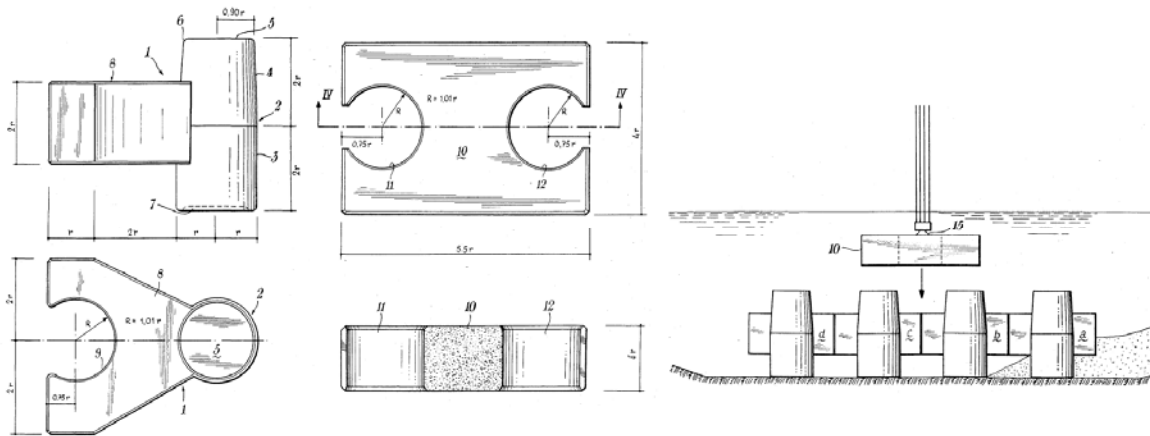


Figura 2. 7. Bloque modular para estructuras rompeolas y ejemplo de dique.

2.1.1.8 “Reef Balls”

Las denominadas “Reef Balls” (figura 2.8) son estructuras de concreto que simulan la forma de un arrecife. Son formas semi-circulares o semi-esféricas, huecas, y con una serie de cavidades que permiten la transmisión del oleaje, y la intrusión de diversas especies marinas. Estas estructuras han sido diseñadas con el propósito sí, de disipar el oleaje pero también genera hábitats artificiales para las especies marinas.

Estas estructuras únicamente pueden ser alineadas, mas no es posible apilarlas con el objeto de formar una estructura de mayor altura; para ello, sería necesario construir estructuras de mayor tamaño, situación que podría volverlas más frágiles y más propensas a fallar por tensión.



Figura 2. 8. Reef Ball.

2.1.1.9 “WADs (Wave Attenuation Device)”



Figura 2. 9. “WADs”.

Estas piezas prefabricadas han sido diseñadas bajo el mismo principio que las denominadas Reef Balls, son piezas huecas, con cavidades que permiten la

transmisión del oleaje; sin embargo, a diferencia de las Reef Balls, los WADs tienen una forma piramidal, ya sea con forma en planta triangular o de paralelepípedo (figura 2.9). La desventaja que tiene el uso de estas estructuras es, al igual que las Reef Balls, que no es posible colocar una sobre otra para tener una mayor altura, y únicamente se podría pensar en la construcción de estructuras más grandes para ganar altura.

2.1.1.10 “Tetrápodos”

Son estructuras dotadas de 4 ejes que le proporcionan forma de tetraedro (figura 2.10), y han sido diseñadas para la construcción de estructuras rompeolas, depositando cada pieza sobre otra hasta alcanzar la forma deseada. La forma de tetraedro que tienen estas estructuras les permite, en la mayoría de los casos, reposar sobre 3 de sus ejes, lo cual las provee de mayor estabilidad; así mismo, la utilización de los tetrápodos favorece la absorción de la energía del oleaje que incide sobre la estructura.



Figura 2. 10. Colocación de tetrápodos.

2.1.1.11 “A-Jacks”

Las estructuras tipo A-Jack son unidades prefabricadas de concreto dotadas de 6 ejes en forma de “T”, diseñadas principalmente para la estabilización de taludes o bancos de material, pero que eventualmente pueden ser utilizadas para la construcción de rompeolas, aprovechando la trabazón que puede formarse entre estos elementos. En la figura 2.11 se pueden ver estas piezas a escala.

En la Universidad de Oregon (1996) se realizaron pruebas en un canal de oleaje para conocer el comportamiento de estas piezas habilitadas como rompeolas sumergidos, bajo ciertas condiciones de oleaje. Los resultados se presentan de manera gráfica en las figuras 2.12 y 2.13, en las cuales se pueden observar el coeficiente de reflexión y transmisión, obtenidos como $Kr = Hr/Hi$ y $Kt = Ht/Hi$, donde el subíndice 'r' denota reflexión, 't' transmisión e 'i' denota incidencia.



Figura 2. 11. Modelos a escala de “A-Jacks” para pruebas en canal de oleaje.

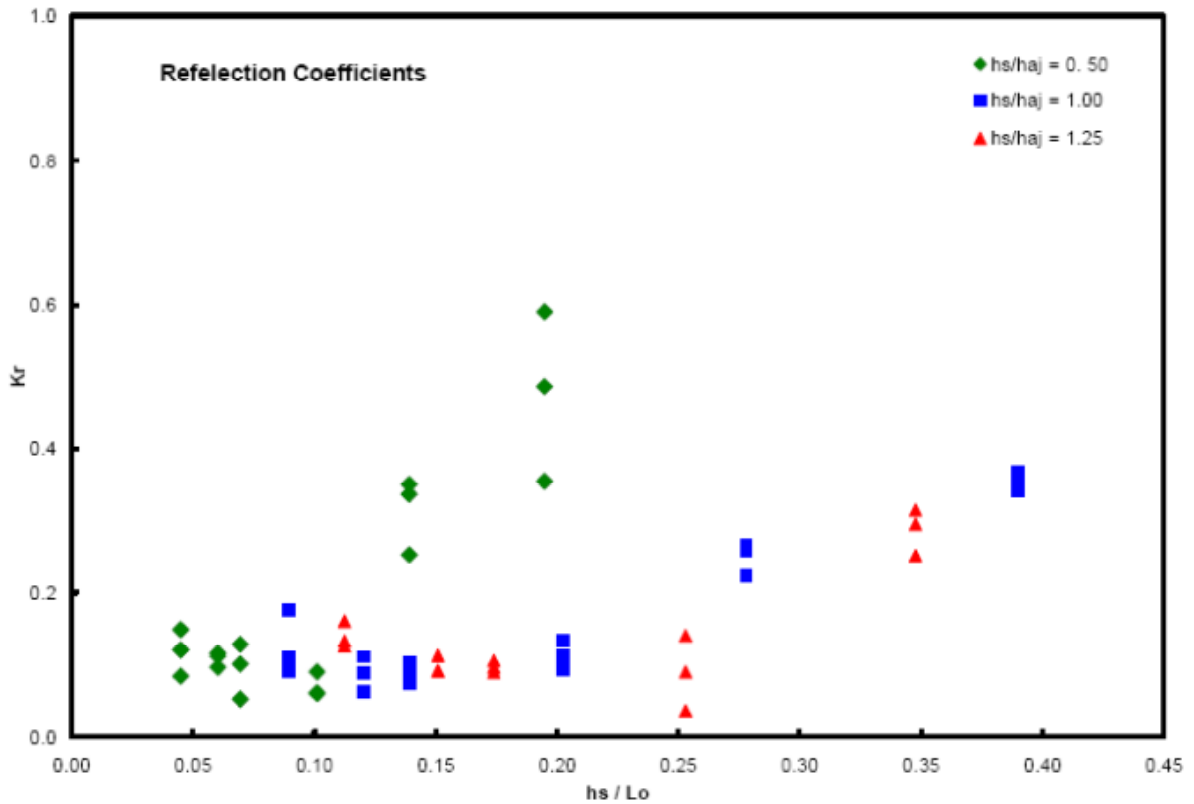


Figura 2. 12. Coeficiente de reflexión para una estructura formada por A-Jacks.

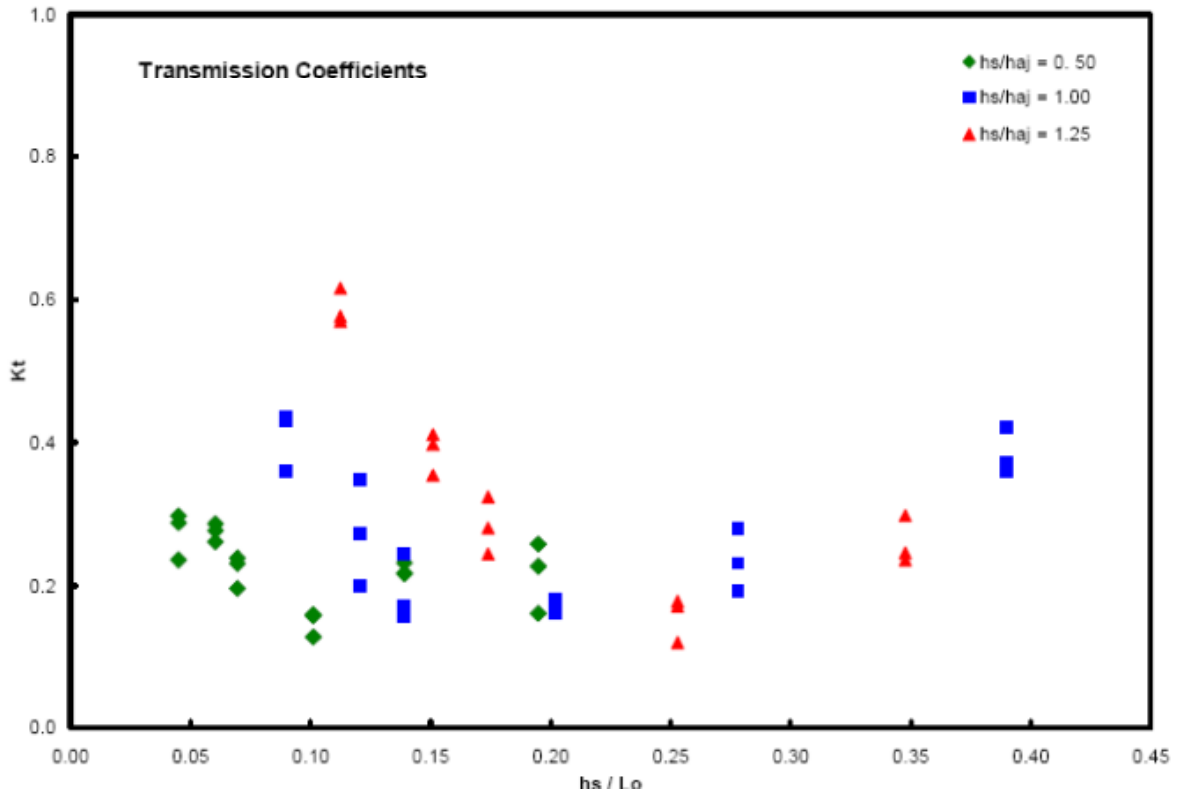


Figura 2. 13. Coeficiente de transmisión para una estructura formada por A-Jacks.

2.1.1.12 “Dolos”



Figura 2. 14. Estructuras tipo “Dolos”.

Se trata de una pieza de concreto reforzado, con 3 ejes, uno central y los extremos alineados perpendicularmente uno del otro (figura 2.14), utilizados para

la construcción de estructuras rompeolas mediante la superposición de elementos hasta alcanzar el talud deseado.

2.1.1.13 “Haro”

Las estructuras denominadas “Haro” (figura 2.15) son bloques semi-cúbicos, cuya base es más ancha que el resto de la estructura, y tiene una cavidad en el eje central del elemento. Aunque su uso más común es para el recubrimiento de taludes en estructuras rompeolas, también se pueden utilizar como piezas únicas en este tipo de estructuras de disipación.

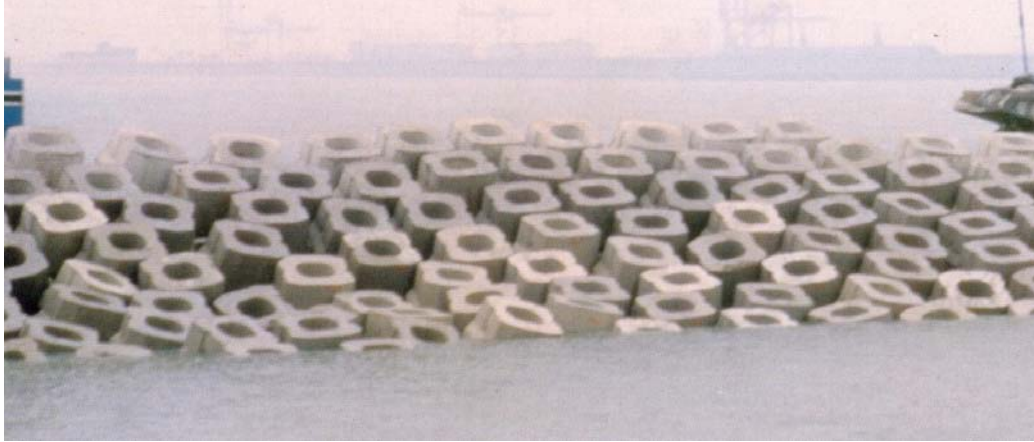


Figura 2. 15. Bloques tipo “Haro”.

2.1.1.14 “Bloques Antifer”

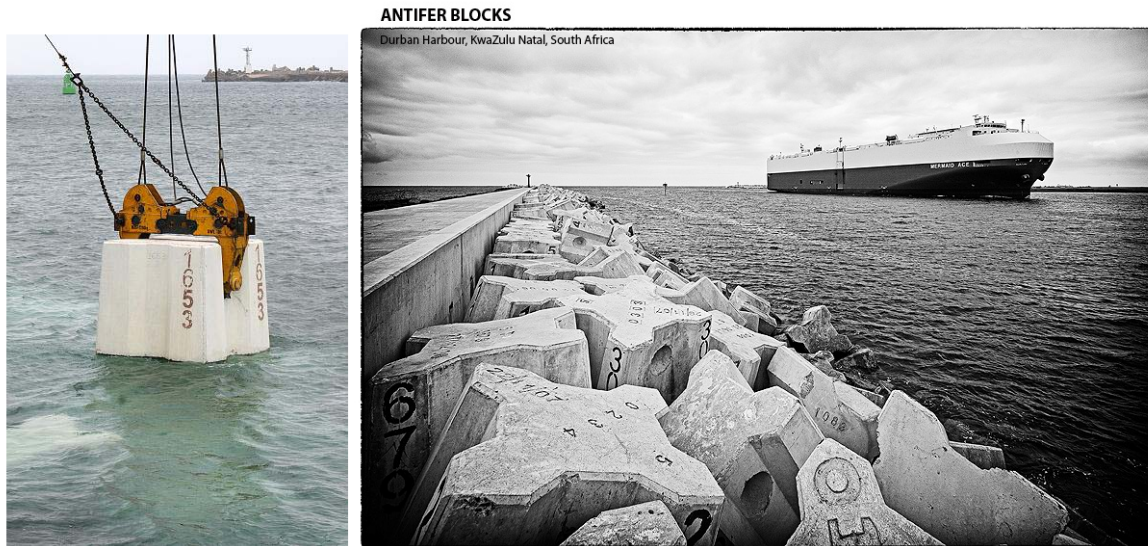


Figura 2. 16. Colocación de bloques Antifer (izq.) y dique formado por bloques Antifer (der.)

Los bloques Antifer son elementos cúbicos con canaletas verticales en sus 4 paredes laterales, como se muestran en la figura 2.16, que han sido diseñadas y utilizadas para la construcción de estructuras rompeolas a partir de la superposición de los elementos hasta alcanzar la forma deseada. La porosidad y

estabilidad que pueda alcanzar la estructura dependerá en gran parte de la forma en la que sean colocados los elementos; según O. Yagci *et al* (2002), si se colocan todos de una forma alineada, la estructura tendrá menor estabilidad, mientras que se alcanzará una mayor estabilidad cuando los elementos son colocados de forma irregular (como se muestra en la figura 2.17) y se utiliza una menor porosidad, es decir, los elementos se colocan más cercano el uno del otro.



Figura 2. 17. Disposición arbitraria de bloques Antifer.

2.1.1.15 “Bloques L”

Son elementos con forma de marco rectangular, que cuenta con 4 “patas” (un par de mayor longitud que el restante) cuya función es formar trabazón entre cada elemento (figura 2.18). Estas unidades han sido diseñadas para la construcción de estructuras rompeolas a partir de un núcleo de material fino.

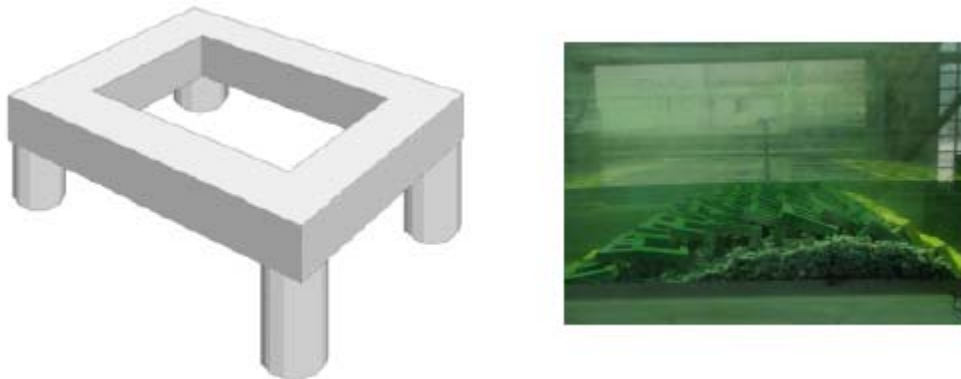


Figura 2. 18. Modelo de bloque L (izq.) y estructura formada por bloques L a escala (der.)

2.1.1.16 “Sistema rompeolas”. Jobst Hulsemann (1977).

La forma de estos elementos se asemeja a la de un tornillo (figura 2.19), pues son estructuras verticales que en su parte superior cuentan con una placa circular, las cuales van piloteadas en el lecho marino hasta una profundidad deseada.

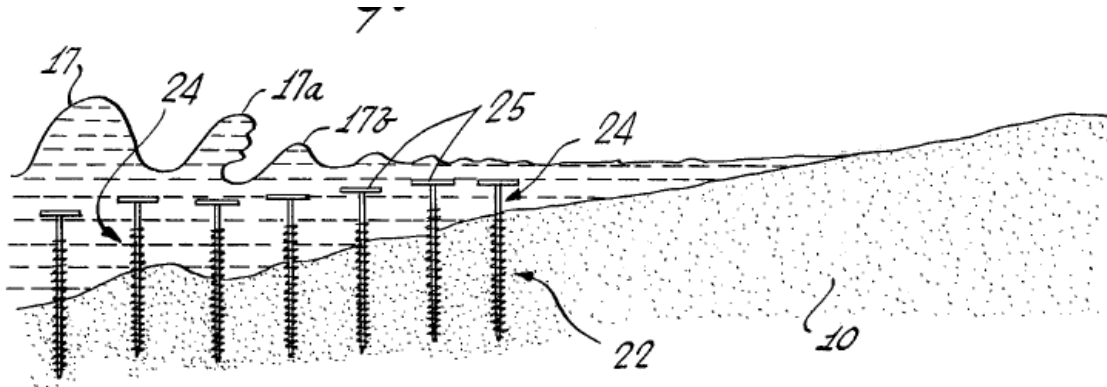


Figura 2. 19. Esquema del sistema rompeolas diseñado por Hulsemann.

2.1.1.17 “Arrecife modular artificial”. E. Engler (2005).

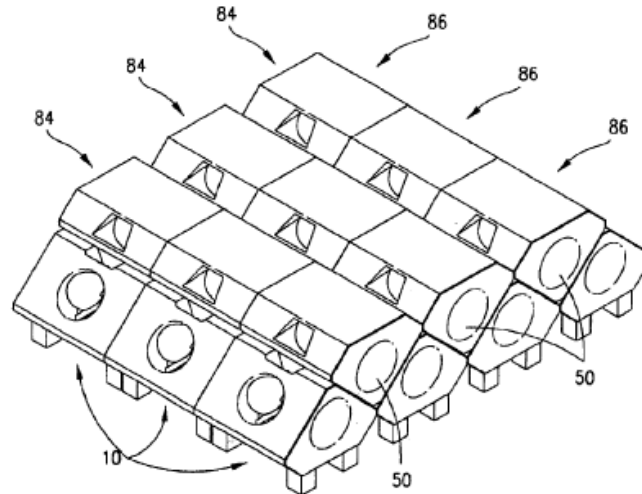


Figura 2. 20. Arrecife modular artificial.

Estos elementos de sección pentagonal “achatada” han sido diseñados principalmente para hacer la función de arrecife y albergar una gran variedad de especies marinas. Como se mencionó, son estructuras de concreto con forma de pentágono “achatado” y un hueco circular al centro; las estructuras que sirven como base y que son apoyadas en el lecho marino cuentan con dos “patas” que le darán sujeción a la estructura, mientras que el resto de los elementos prescinden de estas “patas” y son colocadas de forma invertida para alcanzar una altura deseada. En la figura 2.20 se puede observar un esquema de este tipo de estructuras.

2.1.1.18 “Rompeolas sumergido”. You Ok Yang (2011).

Estas piezas, diseñadas para la construcción de estructuras rompeolas a partir de su deposición en un sitio determinado, tienen una forma cúbica, son huecas y tienen perforaciones circulares que favorecen la transmisión del oleaje a través de la estructura. En cada una de sus esquinas tiene dos patas (que suman un total de 8) que tienen como objetivo formar trabazón entre cada elemento, de manera que no exista deslizamiento en la estructura final. En la figura 2.21 se puede observar un esquema de este elemento.

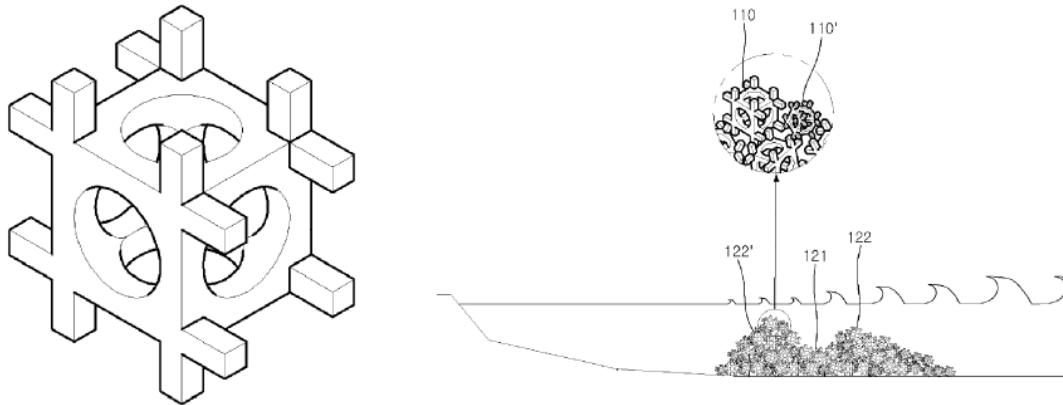


Figura 2. 21. Elemento diseñado para la construcción de un rompeolas sumergido

2.1.1.19 “Aquareef” (2002)

Las estructuras denominadas “Aquareef” han sido diseñadas con el mismo propósito de albergar vida marina al mismo tiempo que disipan una gran cantidad de la energía del oleaje incidente. Se trata de bloques cuya forma asemeja a la de un marco cuadrangular con una cavidad en su parte superior y una saliente en la parte inferior, tal que pueda ensamblarse una con otra de forma inclinada (figura 2.22). La ventaja de este tipo de bloques, es que pueden ser colocados uno sobre otro para alcanzar una altura mayor de la estructura, aunque siempre cuidando que el peso propio de cada unidad no afecte a las que se encuentran en la base, pues es bien sabido que el concreto no ofrece resistencia a la tensión.

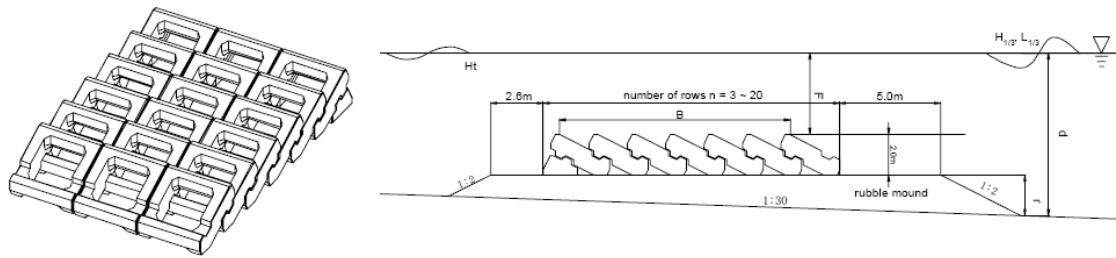


Figura 2. 22. Colocación de bloques "Aquareef" (izq.) y vista en perfil de la estructura final (der.)

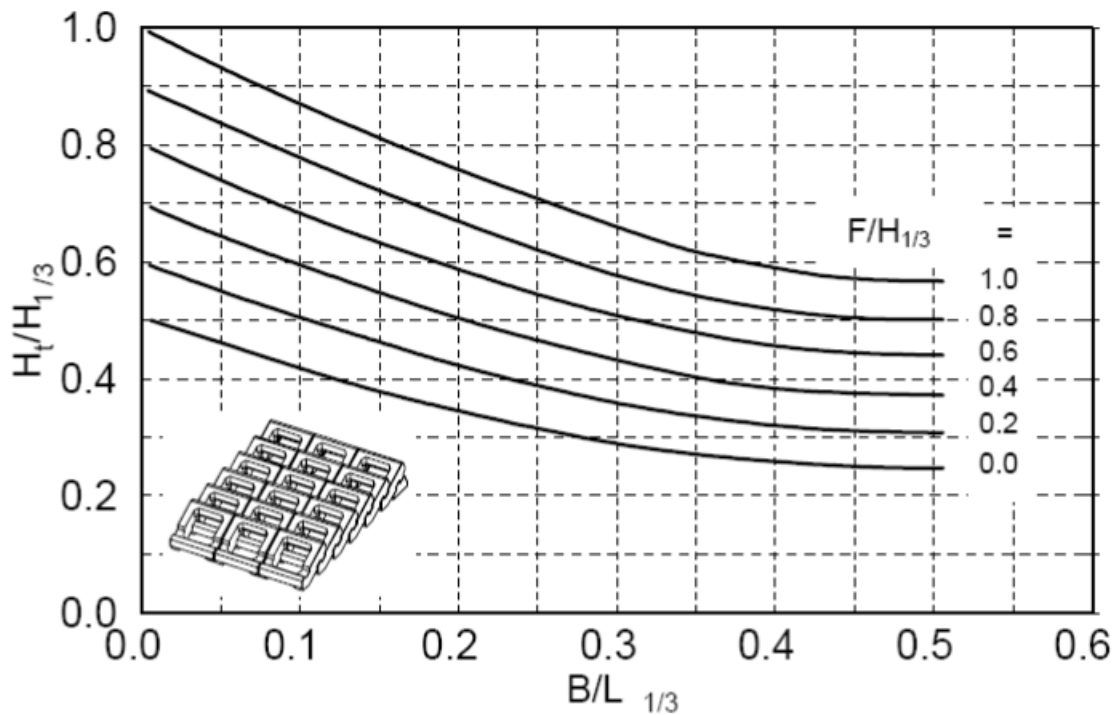


Figura 2. 23. Parámetros de diseño de estructura a base de "Aquareef".

La cantidad de unidades a colocar se determina a partir de la figura 2.23, en la que, en relación con la transmisión y el francobordo deseados, se determina el ancho de cresta a utilizar, y con ello, la cantidad de piezas.

2.1.1.20 "Xbloc" (2003)

Una idea desarrollada en los Países Bajos es una pieza de concreto, cuya forma es la de una 'X' atravesada por un prisma rectangular al centro. Esta pieza está diseñada para formar trabazón una con otra al momento de construir un dique rompeolas (figura 2.24).

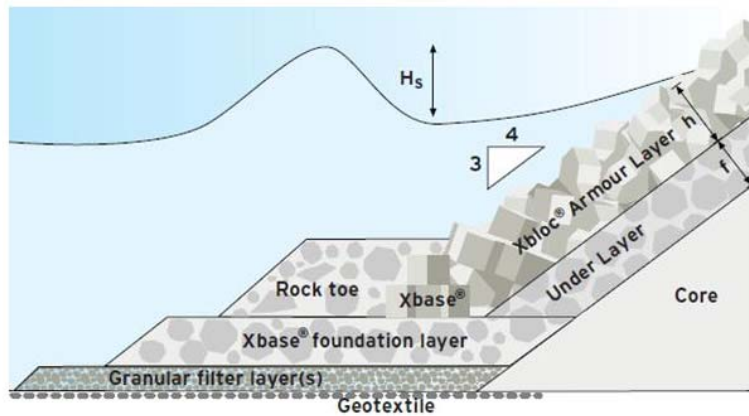
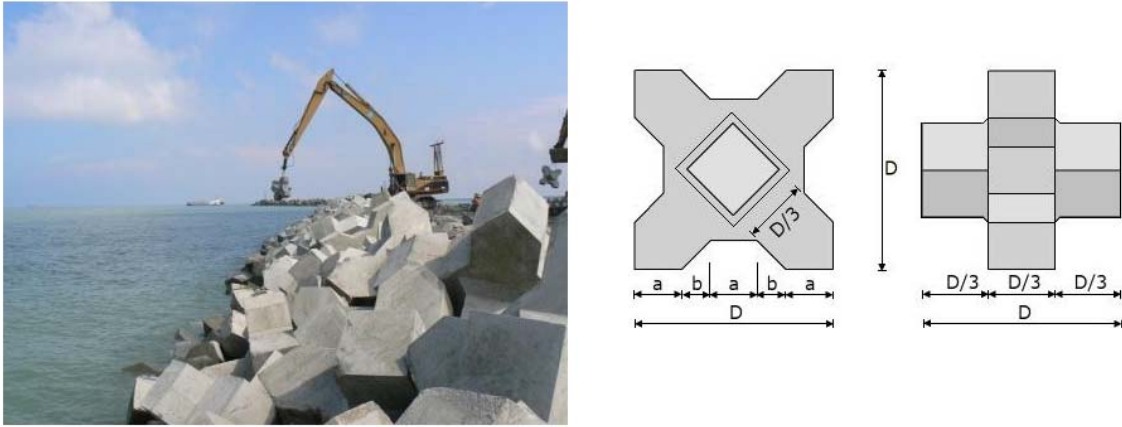


Figura 2. 24. Bloques prediseñados "XBloc".

2.1.1.21 “Rompeolas prefabricado”. S. Myungkil (2010).

Son piezas de concreto alargadas con extensiones que permiten engancharse una con otra de forma perpendicular, tal que al final se cuenta con un bloque rectangular entrelazado como se muestra en la figura 2.25. En principio, la estructura final está diseñada para disipar el oleaje por la fricción que se genera cuando el oleaje pasa a través de ella; adicionalmente, se pueden colocar paneles verticales con el objeto de forzar la transmisión del oleaje por ciertas zonas del rompeolas (figura 2.26).

La principal desventaja que tiene este tipo de estructuras es la esbeltez de cada elemento, que, al ser de concreto lo vuelven una pieza frágil. Por este motivo, la altura final del rompeolas también tendría una limitante, pues se necesitaría muy poco esfuerzo para quebrar un solo enlace de la estructura, situación que comprometería al rompeolas completo; sin considerar que, por su geometría vertical, también podría sufrir daños por volteo.

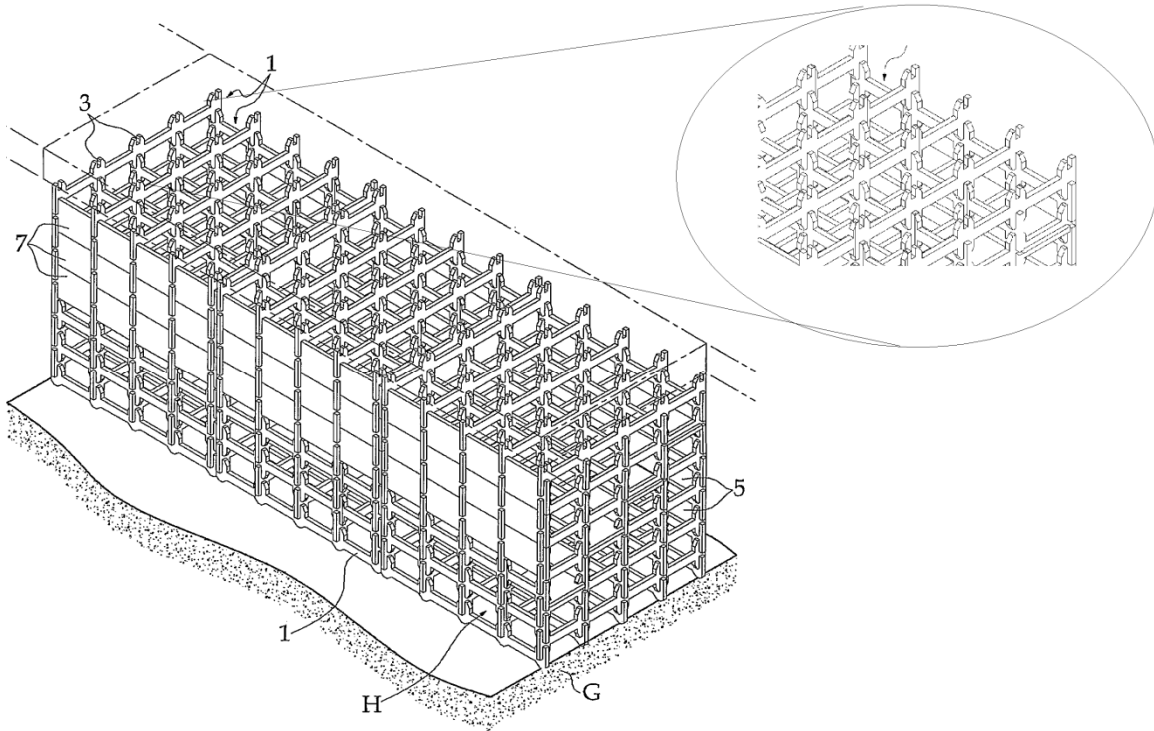


Figura 2. 25. Rompeolas sumergido, diseñado por S. Myungkil.

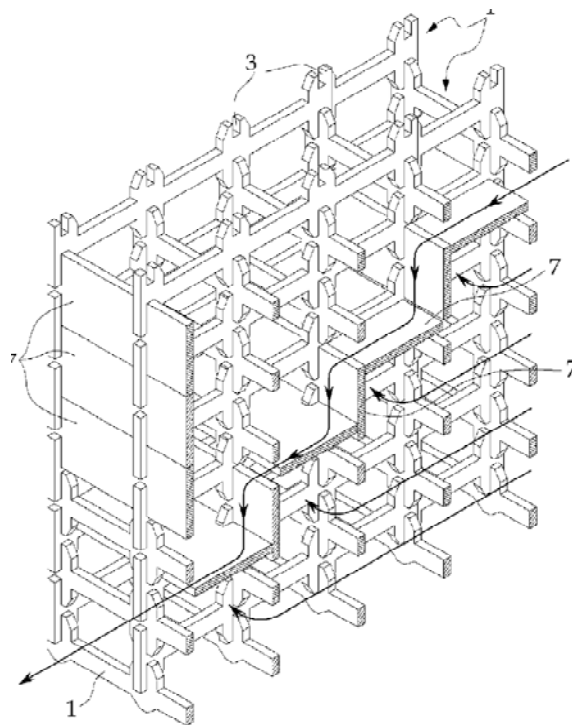


Figura 2. 26. Flujo forzado a través del rompeolas sumergido.

2.1.1.22 Oysterbreak.

Estas piezas de forma anular están diseñadas con la intención de funcionar como un sistema arrecifal artificial (figura 2.27). Son piezas de concreto que pueden ser dispuestas una sobre otra formando un talud hasta alcanzar una altura de estructura deseada.



Figura 2. 27. Oysterbreak.

2.1.2 Principio de funcionamiento: rompiente

2.1.2.1 “Rompeolas”. Frank E. Creter et al (1985).

Es una estructura única, de forma triangular con un ángulo de 28° con respecto a la horizontal, cuya cara expuesta tiene una superficie “escalonada” que favorece la pérdida de energía del oleaje por fricción (figura 2.28); sin embargo, la estructura está diseñada principalmente para generar la rotura del oleaje por peraltamiento.

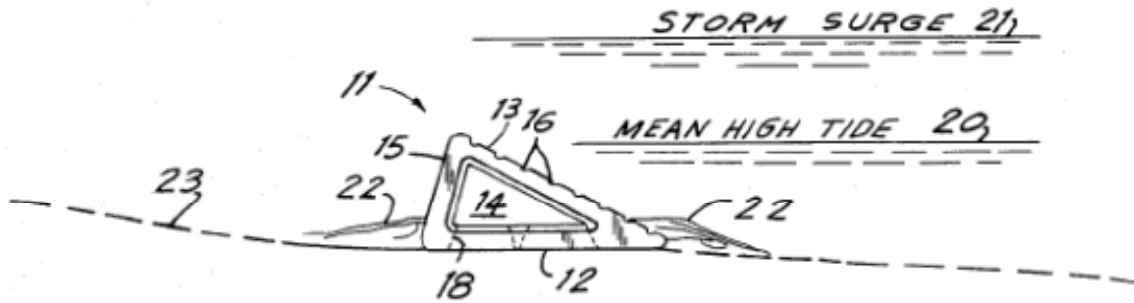


Figura 2. 28. Elemento diseñado como rompeolas por Frank E. Creter.

2.1.2.2 “Muro prefabricado para la prevención de la erosión”. Hans G. Rauch (1989).

Este elemento cuenta con una base horizontal unida a una pared curva que tiene la función de forzar la rotura del oleaje por peraltamiento (figura 2.29). Sin embargo, esta estructura ha sido diseñada principalmente para retener el sedimento de la playa, y puede servir como pie de apoyo para cualquier relleno de playa.

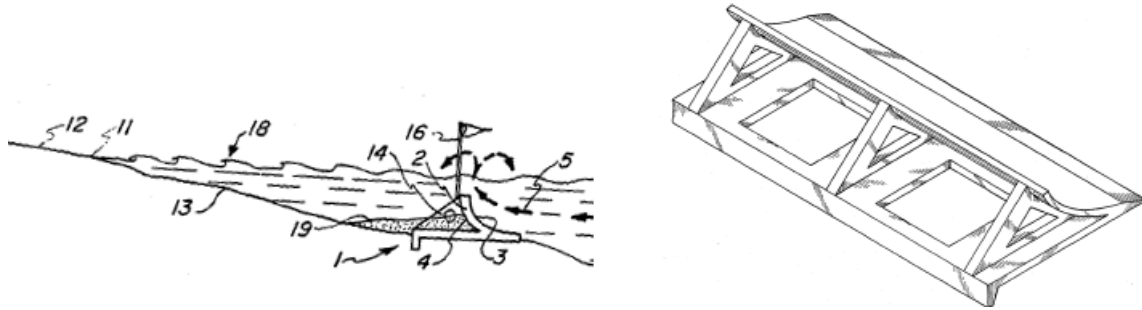


Figura 2. 29. Muro prefabricado para la prevención de la erosión.

2.1.2.3 “Rompeolas modular”. Frederick E. Weir (1985).

Esta idea, desarrollada por Frederick. E. Weir (1985), consiste en un bloque modular de concreto y de sección compuesta, que comienza con un ángulo de 45° respecto de la horizontal, descende en ángulo recto y da paso a una sección curvilínea como se muestra en la figura 2.30. La estructura cuenta con diferentes perforaciones: en la pared frontal cuenta con un par de perforaciones cuyo propósito es tener espacio para el tendido de cables; en la parte superior frontal para permitir que el sedimento pase a través de ellas, y al circular hasta la parte vertical de la estructura regrese nuevamente a su lugar; y perforaciones verticales que se extienden hasta el fondo con los que se pretende lograr tracción con el fondo marino.

Estas piezas únicamente pueden ser alineadas una junto a otra, y no es posible lograr el aumento de la altura de la estructura por medio del apilamiento de estos módulos.

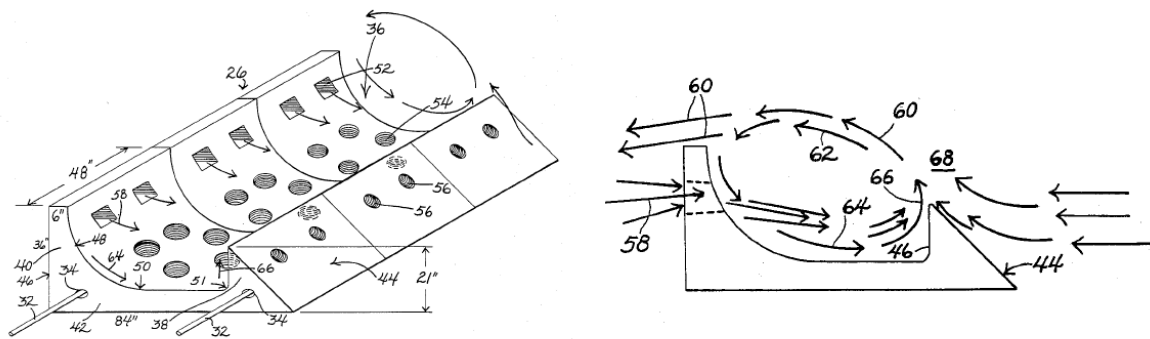


Figura 2. 30. Rompeolas modular, diseñado por Frederick E. Weir.

2.1.2.4 “Rompeolas sumergido (barrera de arrecife artificial)”. Hans G. Rauch (1992, 1993).

Hans G. Rauch presentó dos propuestas. La primera consiste en una estructura rompeolas, cuya cara expuesta se compone por tres pendientes diferentes, además de contar con una cresta que contiene dos perforaciones cuyo propósito es el de disminuir el gradiente de presión sobre la estructura (figura 2.31); a un costado inferior, la pieza tiene un elemento “macho” mientras que en el lado

opuesto tiene una cavidad del mismo tamaño, con el objeto de ensamblar las piezas y mantenerlas alineadas si la estructura final así lo demanda.

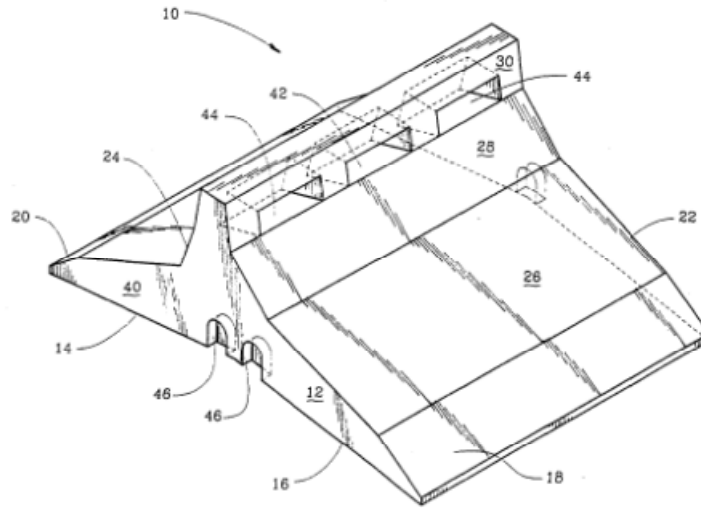


Figura 2. 31. Barrera de arrecife artificial (1992).

La segunda propuesta, presentada un año después, corresponde a la misma estructura. Esta segunda estructura (figura 2.32), a diferencia de la primera, presenta una modificación en su cara expuesta, a la cual se le agregaron oquedades en forma de “escamas” para aumentar la fricción que pueda generar la estructura sobre el oleaje, y así tener una mayor capacidad de disipación.

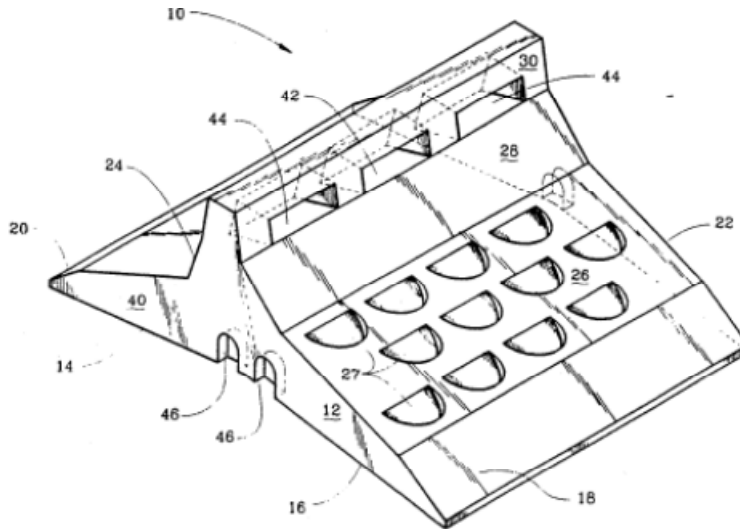


Figura 2. 32. Barrera de arrecife artificial (1993)

2.1.2.5 “Rompeolas sumergido para uso como pie de rellenos de playa”. Richard E. Creter (1993).

Esta pieza de sección triangular crestada cuenta con una superficie rugosa diseñada con la finalidad de disminuir la energía del oleaje por medio de la fricción generada con la estructura. La cara expuesta de esta pieza forma un ángulo de 45°, mientras que la cara costa adentro forma un ángulo de 60°, respecto de la horizontal. El propósito del diseño de esta estructura es sí, disipar el oleaje por medio de la rotura forzada en presencia de la estructura, sin embargo, también está diseñada para servir como pie de apoyo a rellenos de playa; para ello, la base está “dentada” para disminuir el deslizamiento que pueda presentarse por el empuje ejercido por la arena. Al ser una estructura diseñada para ser alineadas, cuenta con un elemento “macho” en un costado inferior, mientras que en el costado opuesto tiene la cavidad correspondiente para poder ensamblarse. En la figura 2.33 se observa un esquema de este elemento.

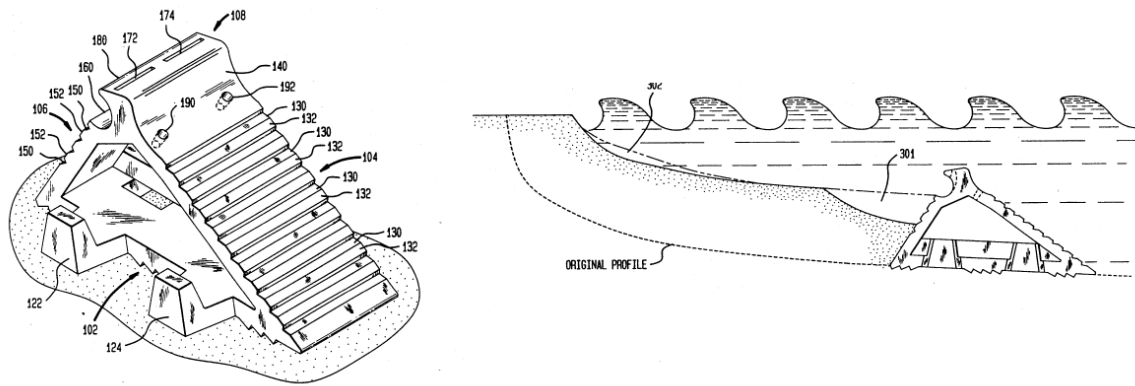


Figura 2. 33. Modelo de la estructura (izq.) y su funcionamiento como pie de relleno (der.)

2.1.2.6 “Dique modular”. J. Medina et al (2006).

Esta idea trata en sí misma sobre la construcción de un dique rompeolas a partir de 4 diferentes bloques de sección cuadrada, trapezoidal, y dos triangulares con ángulos de 36° y 24° respecto de la horizontal (figura 2.34). De esta manera es posible alcanzar una mayor altura de la estructura acomodando una pieza sobre otra. Además, con la adecuada disposición de las estructuras triangulares, y trapezoidal es posible alcanzar una pendiente más tendida en la cara expuesta del dique.

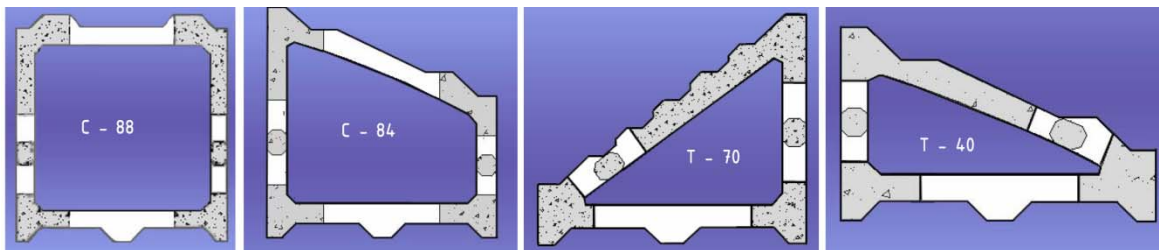


Figura 2. 34. Bloques para la construcción de un dique modular.

Las caras expuestas de las unidades tienen una cierta rugosidad que permitirían eventualmente, reducir la energía del oleaje por fricción.

La desventaja que presenta este tipo de estructuras es que por el peso propio de las mismas no pueden colocarse más de dos elementos verticalmente, pues como se sabe, el concreto ofrece muy poca resistencia a esfuerzos de tensión. Otra complicación que presentan este tipo de piezas es que el dique tiene que ser ensamblado y armado en tierra, por tal motivo, de requerir alguna modificación de la estructura final, ésta tendría que ser llevada a tierra, lo que dejaría desprotegida el área de interés. Además, para fijar las estructuras se necesitan cadenas, pues por sí mismas no pueden ser ensambladas, así, eventualmente los esfuerzos generados por las cadenas podrían generar problemas en las piezas. Sin embargo, el principio sobre el cual se basa la construcción de este dique puede ser útil para futuros trabajos.

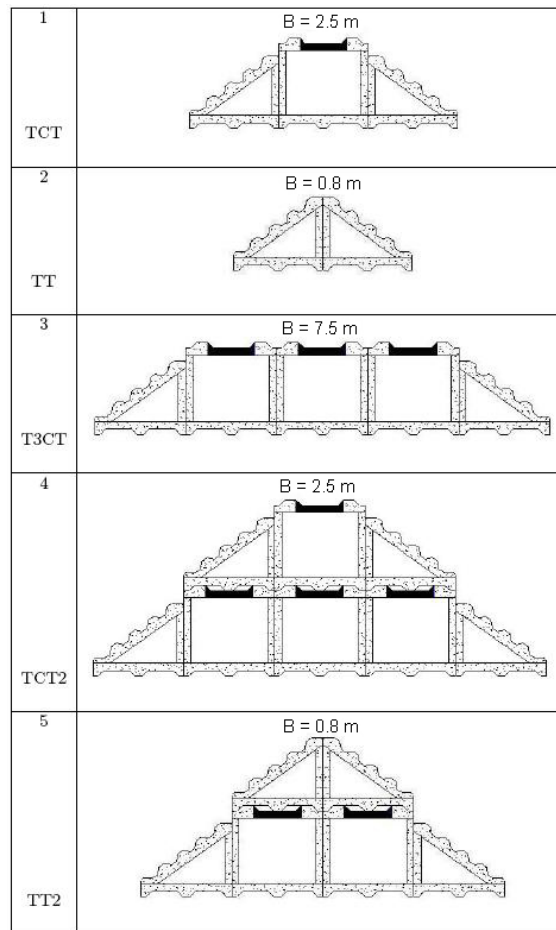


Figura 2. 35. Configuraciones elegidas para los experimentos.

Jonas Maertens (2007) realizó un estudio extenso sobre el comportamiento de estas estructuras bajo ciertas condiciones de oleaje para conocer la capacidad de

transmisión y reflexión de la energía del oleaje en 5 diferentes diques, con 3 anchos de cresta diferentes como se muestran en la figura 2.35.

En la figura 2.36, en la que el eje de las abscisas F/d denota la relación adimensional entre el francobordo de la estructura y la profundidad modelada, y en el eje de las ordenadas se encuentran las proporciones de energía reflejada y transmitida. Es posible observar que, cuando la relación F/d es menor (francobordo de estructura sumergida, mayor) evidentemente existe una mayor transmisión, y ésta desciende conforme el francobordo disminuye en el caso de las estructuras sumergidas, mientras que para una configuración en la cual la estructura se corona al nivel de la superficie libre o por encima de ella, la transmisión disminuye conforme el francobordo aumenta. Sin embargo, a partir de una relación F/d de -0.30 y un ancho de cresta $B= 7.5$ metros se observa que incluso menos de la mitad de la energía es transmitida, por lo que se puede decir que, con una adecuada configuración de los bloques se pueden alcanzar buenos resultados de protección de la costa.

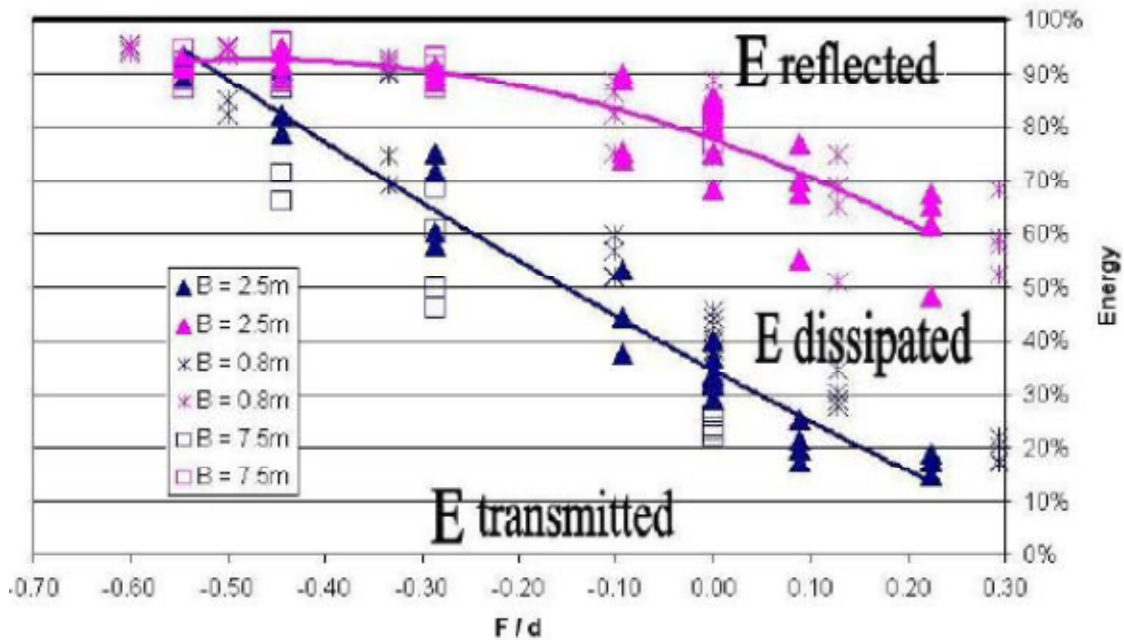


Figura 2. 36. Porcentajes de energía reflejada y transmitida, en función del parámetro F/d .

En lo que respecta a la reflexión del oleaje, es con parámetros F/d mayores a -0.60 que una parte de la energía es reflejada por la estructura, y esta tendencia disminuye conforme la estructura se acerca o sobrepasa la superficie libre del agua. De esto último se puede decir que gran parte de la energía es disipada sobre la estructura y el oleaje no tiene la capacidad de reflejar.

2.1.2.7 “Rompeolas de absorción”. I. Fainman et al (2006).

Consiste en bloques compuestos por un perfil tendido y un perfil pronunciado, con perforaciones longitudinales que permiten la transmisión del oleaje (figura 2.37). Al mismo tiempo, las estructuras funcionan induciendo la rotura del oleaje por el peraltamiento de la superficie libre del agua, disipando así su energía. En la base, cada bloque cuenta con dos pilotes que le permiten a la estructura tener fijación con el lecho marino.

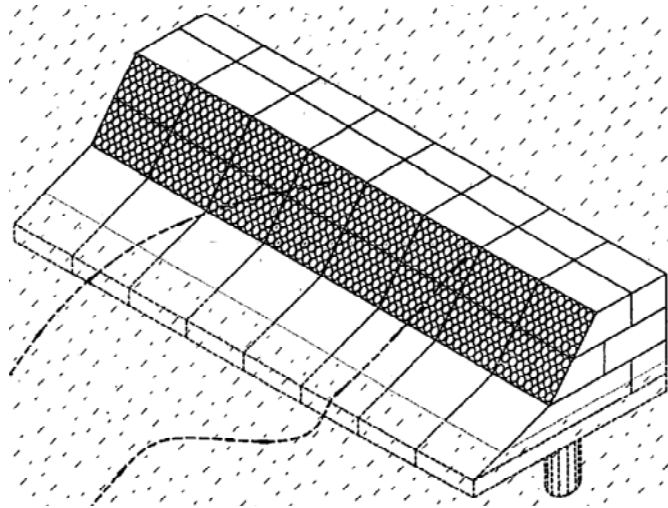


Figura 2. 37. Rompeolas de absorción.

2.1.3 Discusión de las alternativas

Los diseños descritos anteriormente, pueden presentar algunas ventajas y desventajas con relación a su funcionamiento, durabilidad y resistencia. A continuación se presentan algunos aspectos negativos que podrían poner en riesgo la integridad de la estructura; así mismo, se mencionan cuáles de las piezas descritas pueden presentar estos problemas. Esto con el objeto de identificar aquellos puntos débiles de cada estructura y descartarlos en el nuevo diseño que se busca en el presente trabajo.

Poca resistencia a la tensión. Una de los problemas inherentes al trabajar el concreto es su nula resistencia a esfuerzos de tensión, situación que podría evitarse diseñando elementos que únicamente trabajen bajo esfuerzos de compresión.

Sin embargo, se observó que en algunos diseños presentados en este trabajo, los elementos presentan geometrías que eventualmente harían trabajar bajo tensión a la estructura. Estas geometrías van desde paredes delgadas y grandes dimensiones; ejes o “patas” que al estar en trabazón podrían generar una falla cuando fuerzas externas intentan mover las piezas; y elementos alargados.

Generación de corrientes internas. Hay elementos cuyas formas presentan huecos, ya sea con el propósito de albergar vida simulando un sistema arrecifal, o

simplemente para ahorrar material de construcción y con ello costos; al alinear los elementos, estos huecos pueden coincidir de tal forma que se generen corrientes internas a lo largo de la estructura, situación que evitaría que éstas puedan guardar la fauna marina; o bien, se podría generar una tendencia a levantar los elementos por las mismas corrientes internas.

Poca capacidad modular. Muchas de las piezas revisadas en este trabajo están diseñadas para trabajar alineadas, no así para ser colocadas una sobre otra, situación que imposibilita aumentar de altura la estructura con un mismo tamaño de piezas.

En caso de requerir una altura de la estructura mayor, se tendría que solicitar directamente al fabricante la construcción de una pieza de mayor tamaño, sin embargo, al ser de concreto aumenta la posibilidad de que los elementos fallen al ser sometidos a esfuerzos de tensión.

Poca capacidad de anclaje con el fondo marino. La estabilidad e inmovilidad de la estructura dependerá, en algunos casos, únicamente del peso propio de la misma, así como de la fricción que pueda existir entre cada elemento y el lecho marino. No todos los diseños incluyen un método propio de cimentación con el fin de asegurar que la estructura no sufra desplazamientos.

Reacción negativa del concreto por ataque de los sulfatos. Si la mezcla de concreto de las estructuras construidas con dicho material, no es diseñada adecuadamente, las piezas podrían tener una reacción negativa al entrar en contacto con el agua marina, pues ésta contiene diferentes sales que podrían restar resistencia o erosionar prematuramente las piezas. En ese sentido, no se puede descartar la utilización del concreto para la construcción de los elementos, pero sí es importante remarcar que se debe realizar una mezcla adecuada que sea resistente al agua marina.

Así como se han resaltado algunos aspectos negativos de los elementos revisados en este trabajo, se encontraron tres diseños que destacan por su alta capacidad modular. En los trabajos presentados por J. Medina *et al* (2006), S. Myungkil (2010) y J. Sciortino (1985) los elementos están diseñados para ser ensamblados y alcanzar así un tamaño de estructura deseado.

A pesar de ser diseños destacados por su capacidad modular, también hay algunos aspectos positivos y negativos que deben considerarse, los cuáles se analizan a continuación.

“Bloque modular para estructuras rompeolas”. J. Sciortino (1985).

A pesar de que son estructuras que ofrecen la posibilidad de ensamblar una pieza con otra, el bloque cilíndrico provoca que exista un gran espaciamiento entre los bloques horizontales, donde lo ideal sería tener una mayor superficie de contacto entre cada elemento para evitar deslizamientos.

Además, estos espaciamientos entre bloques, podría provocar que cada elemento funcione prácticamente como voladizo, para lo cual es obligatorio implementar el uso de otros bloques para tener así elementos que funcionen como vigas simplemente apoyadas.

Esta misma unión que existe entre bloques cilíndricos, genera un elemento esbelto vertical que podría estar sometido a esfuerzos de tensión. En la base del mismo elemento cilíndrico se tiene un hueco con el fin de que la parte superior del elemento que va por debajo se introduzca, con la intención de generar un mejor ensamblaje. Sin embargo, es precisamente esta zona la que estaría eventualmente expuesta a fallar por la nula resistencia del concreto a la tensión, dejando a los elementos expuestos a un eventual deslizamiento y llevando así a la falla de la estructura.

Todo esto se desglosa en la figura 2.38.

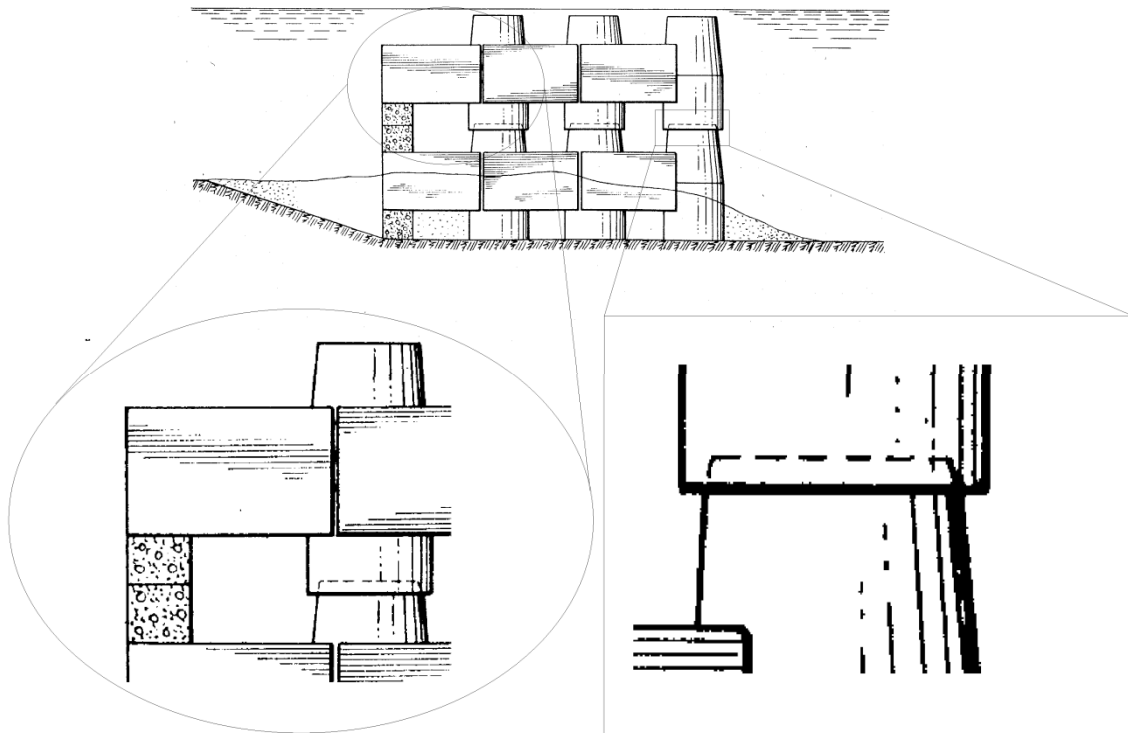


Figura 2. 38. Desglose de los defectos del diseño.

“Arrecife modular artificial”. E. Engler (2005).

El principal problema que presenta este tipo de elementos es el eventual deslizamiento de los elementos por la acción del oleaje, con lo cual habría que regresar el elemento desprendido o reponerlo con uno nuevo.

“Aquareef” (2002).

El principal defecto de estos elementos, considerando su uso, es la esbeltez de los lados que componen el marco, situación que, considerando la nula resistencia a

tensión del concreto, limitaría el número de piezas que puede colocarse una sobre otra.

“Rompeolas prefabricado”. S. Myungkil (2010).

Anteriormente se había mencionado que eran elementos muy delgados que por sí solos podrían poner en riesgo a la estructura rompeolas, teniendo como mecanismo de falla la ruptura del elemento debida a los esfuerzos de tensión a las que es sometido el concreto. Además, por la disposición de los elementos, la estructura podría tender a oscilar a causa del oleaje incidente, teniendo como puntos de flexión la unión entre elementos y, eventualmente, provocando la falla en una o más uniones.

“Dique modular”. J. Medina et al (2006).

Hasta el momento, con excepción de una, todas las desventajas que ofrecen los elementos prefabricados para estructuras rompeolas se refieren a la baja resistencia del concreto a esfuerzos de tensión. En ese sentido, es el mismo problema que presenta el dique modular presentado por J. Medina (2006); pues, por su construcción a base de concreto y geometría, la estructura rompeolas tendría una limitante en cuanto a sus dimensiones, pues las piezas de la base tendrían que soportar el peso de las estructuras superiores más la columna de agua que esté por encima de la estructura.

Sin embargo, el problema principal de esta estructura es que, si bien es modular, esta condición únicamente es aplicable a su construcción fuera del mar; es decir, una vez armada la estructura en tierra con los elementos elegidos, se sumerge para proteger una zona determinada. Sin embargo, una vez sumergida ya no se podrían realizar modificaciones y éstas tendrían que ser realizadas en tierra, dejando eventualmente la zona desprotegida.

Además, los elementos no cuentan por sí solos con un método de ensamblaje propio, y es necesario utilizar cadenas para mantener las piezas unidas.

2.1.4 Bases de la propuesta del nuevo elemento prefabricado

Con base en lo anterior, la propuesta del nuevo elemento prefabricado para la construcción de un rompeolas sumergido modular deberá tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Construcción a base de concreto, pues es un material que ofrece facilidad de fabricación y manejabilidad. Si bien se ha mencionado que no ofrece gran resistencia a esfuerzos de tensión, esta situación podría ser disminuida con una geometría adecuada, y utilizando materiales alternativos que aporten cierta resistencia a la tensión. Se pretende alcanzar un diseño cuya geometría disminuya al máximo los esfuerzos de tensión a los que serían sometidos los elementos, y encontrar aquellos puntos que estarían inminentemente sometidos a dichos esfuerzos para

reforzarlos con materiales como fibras de carbono. Es importante resaltar que no sería conveniente utilizar acero de refuerzo para aportar resistencia a la tensión al elemento, pues debido a la salinidad del agua de mar, el acero podría sufrir corrosión y con ello generar una reacción en el concreto que provocaría su expansión, agrietándolo y dejándolo expuesto a una falla.

Así mismo, con un diseño adecuado de la mezcla de concreto, la estructura puede ofrecer una alta resistencia a los materiales que contiene el agua de mar.

- Que ofrezca una alta capacidad modular, es decir, que una vez instalada la estructura, sea posible realizar modificaciones a la misma; especialmente, si se desea aumentar sus dimensiones. La idea es que la colocación de las nuevas piezas no requiera un mayor esfuerzo y se pueda realizar con la estructura en su lugar sin que ésta sea movida de su posición.
- Que induzca la rotura de las olas por peraltamiento, disipando así la energía incidente; sin descartar la posibilidad de disipar la energía por medio de la fricción, lo cual dependerá de la geometría de diseño.
- Portabilidad y facilidad de transportación, con el propósito de disminuir la cantidad de viajes que tendrían que realizarse para transportar las piezas al sitio de construcción; logrando transportar una gran cantidad de unidades en un solo viaje. Aunque bien, el concreto permite que los elementos sean construidos en el sitio de construcción, esto dependerá del espacio disponible para la fabricación y almacenaje de las piezas.
- Cimentación adecuada para evitar fallas por socavación, hundimiento del lecho marino; y un correcto anclaje de la estructura con el fondo para evitar que pueda ser deslizada a causa de la energía del oleaje incidente.
- Adicionalmente, y como complemento al funcionamiento de la estructura, sería ideal lograr un diseño que permita que el rompeolas adquiera un rol de arrecife artificial, con el propósito de albergar especies marinas y lograr un equilibrio con el entorno.

2.2 Diseño del elemento propuesto

Para alcanzar el diseño del nuevo elemento, se realizaron diferentes bocetos partiendo del principio de funcionamiento de algunas piezas presentadas en este trabajo, o bien, considerando el principio de funcionamiento de piezas plásticas interconectables utilizadas con fines lúdicos. Algunas propuestas fueron rechazadas porque presentaban los mismos problemas de tensión en puntos específicos de cada elemento, o se observó que su fabricación podría llegar a ser muy compleja.

Finalmente, después de analizar las diferentes propuestas y la evolución de las mismas, se llegó al diseño de dos elementos tipo, cuya forma en perfil asemeja mucho a un barco de papel, pero que en conjunto le da a la estructura una alta capacidad modular para facilitar el proceso de construcción de los diques.

2.2.1 Características geométricas de elemento base

El primer elemento, mostrado en la figura 2.39, presenta en la parte frontal una inclinación de 45° respecto a la horizontal, para posteriormente dar paso a una superficie plana sobre la cual se encuentra un trapecio con ángulos de 45° respecto a la horizontal, como se observa en la figura 2.40. En los costados cuenta con dos salientes las cuales servirán como guía para los elementos que se coloquen a los lados, y además formará una superficie que permitirá que las unidades de las capas superiores puedan reposar sobre ellas. La intención es alcanzar una configuración en forma de cuadrícula para formar una sola capa en el fondo que servirá como base del dique (figura 2.41).

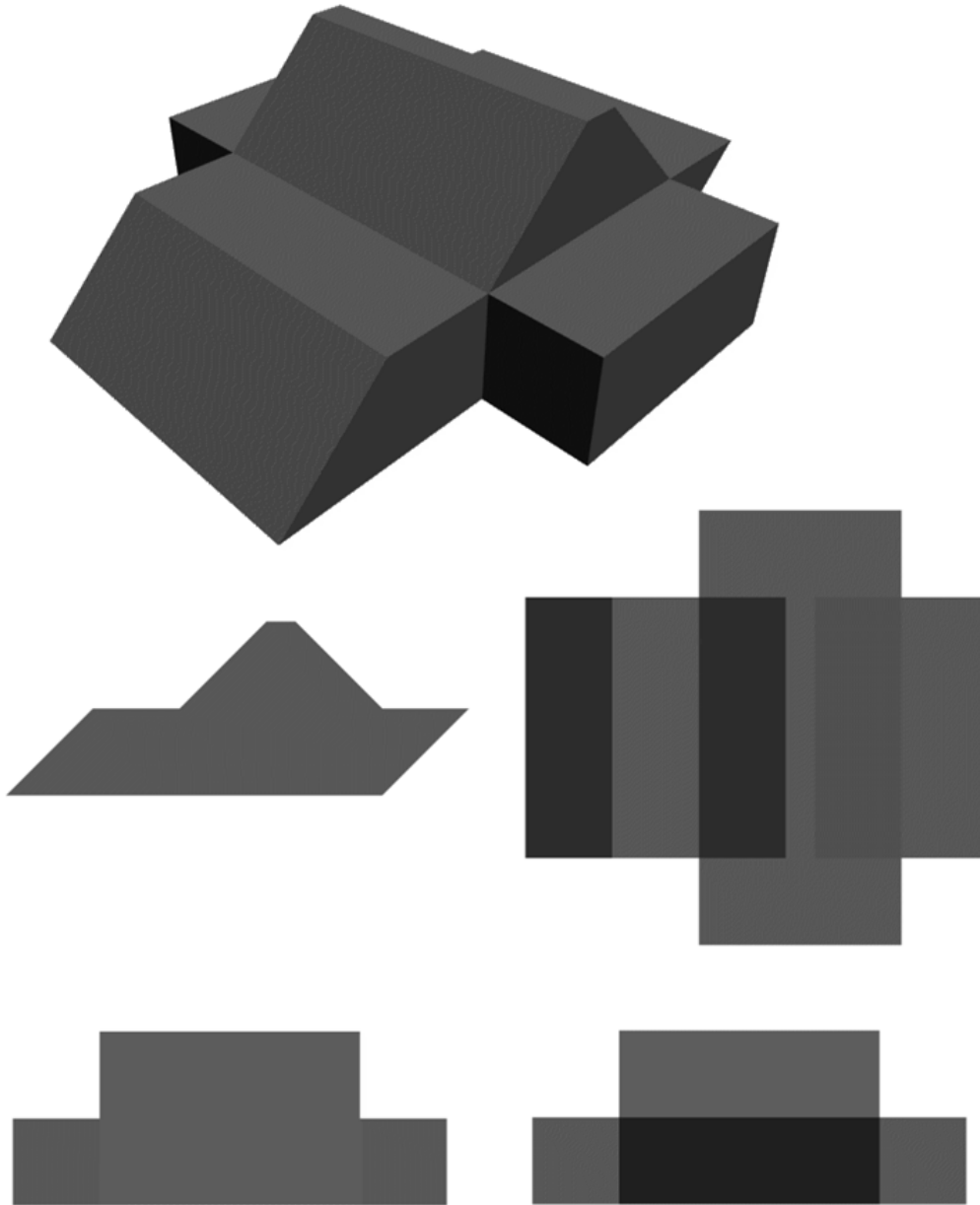


Figura 2. 39. Elemento base.

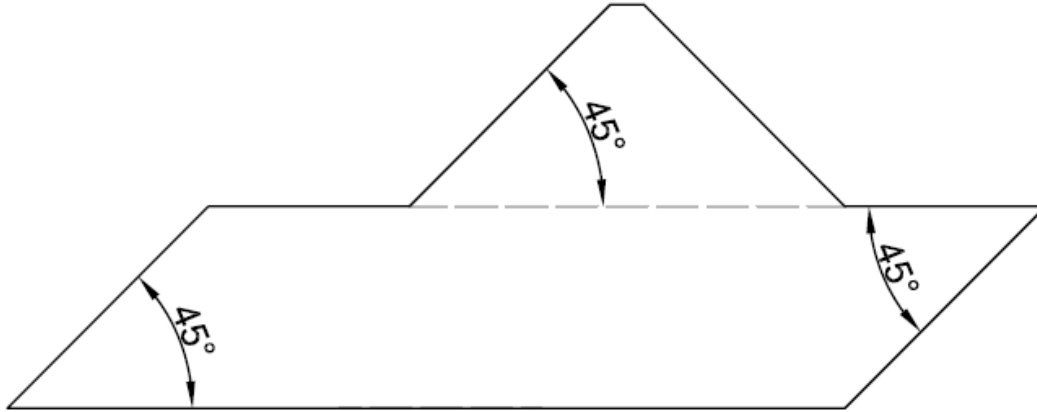


Figura 2. 40. Esquema del elemento PR-B.

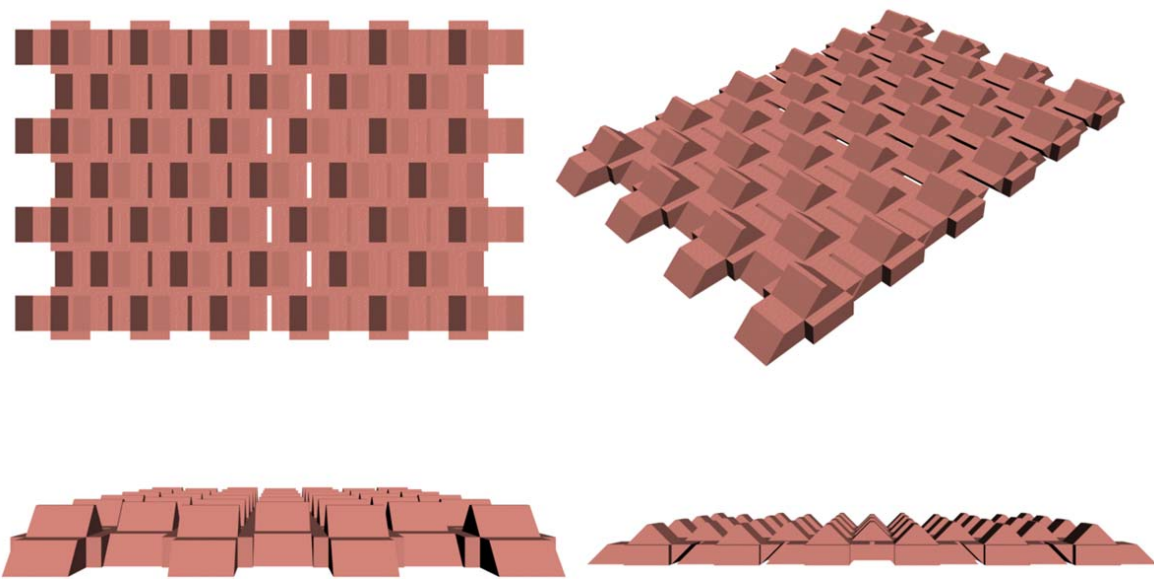


Figura 2. 41. Armado de la base del dique.

2.2.2 Características geométricas del segundo elemento

El segundo elemento (mostrado en la figura 2.42) tiene una forma en perfil que asemeja mucho a un barco de papel, sin embargo, no existe relación alguna entre este elemento y dicha figura; la geometría alcanzada es producto de las diferentes propuestas y la evolución de las mismas para encontrar un elemento de fácil construcción y de alta capacidad modular para la construcción de un dique rompeolas. Como resultado se obtuvo este elemento cuyas caras tienen una inclinación de 45° respecto a la horizontal (como se observa en la figura 2.43), y dos salientes en los costados las cuales permiten que exista trabazón entre los elementos aledaños. Este tipo de elemento, al ser colocado en conjunto con el resto forma un dique con talud 1:2 con una superficie irregular que genera fricción con la intención de contribuir a la disipación del oleaje.

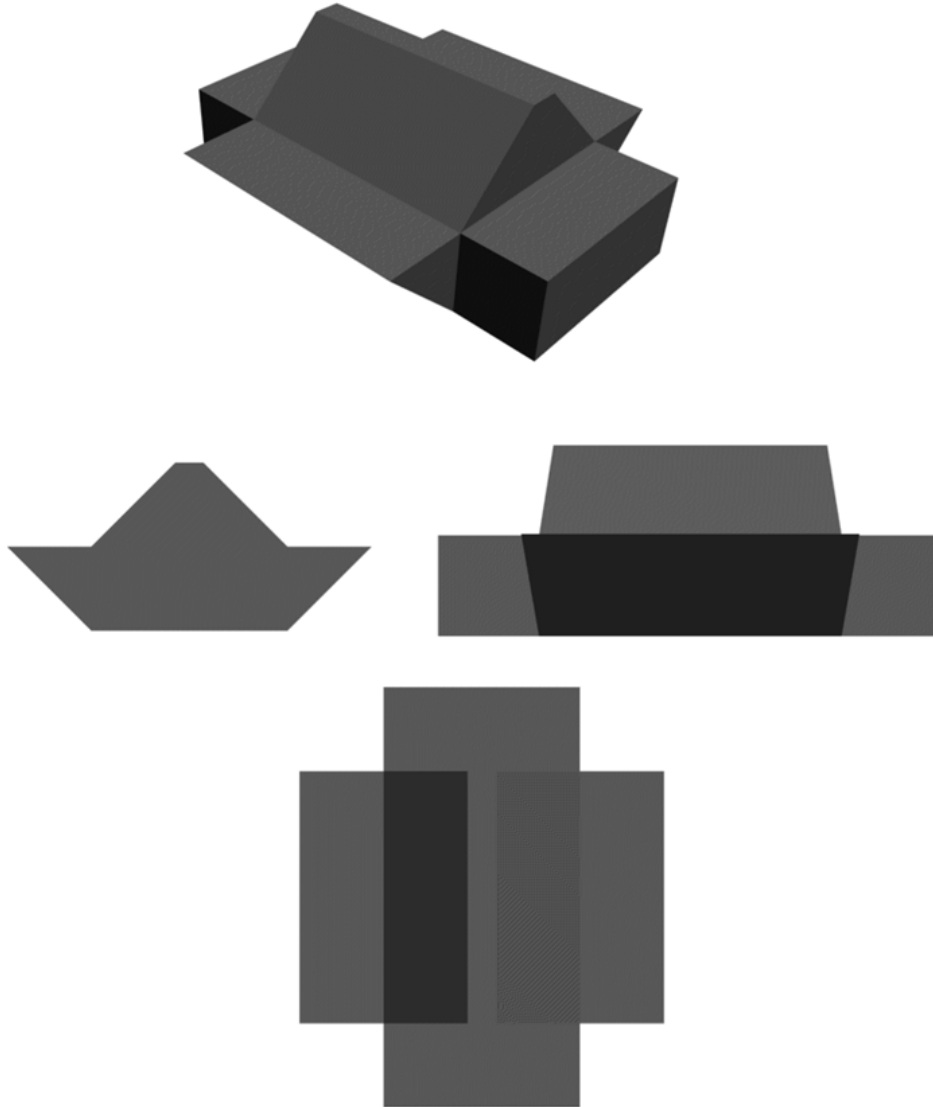


Figura 2. 42. Elemento prefabricado.

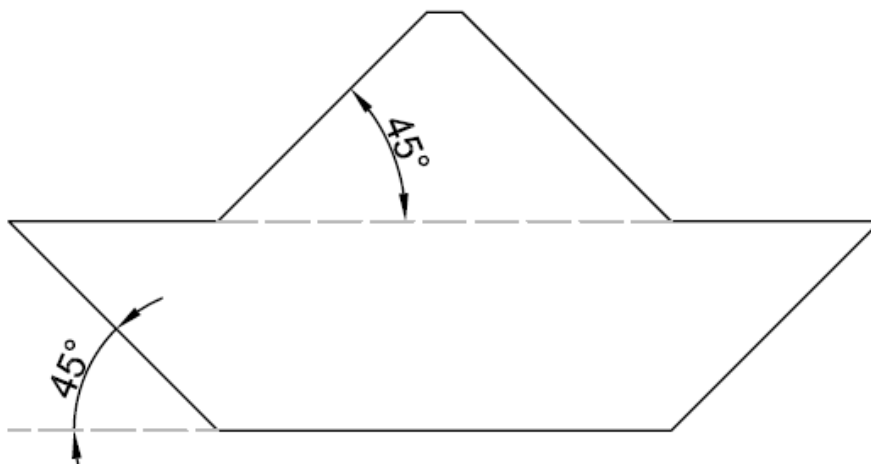


Figura 2. 43. Esquema del elemento PR-T.

2.2.3 Armado del dique

Una vez colocados los elementos base, se coloca el segundo elemento en capas hasta alcanzar la forma deseada del dique. En la figura 2.44 se muestra de manera esquemática la colocación de los elementos.

Finalmente, en la figura 2.45 se presenta un esquema del dique construido a partir de los elementos diseñados en este trabajo. En dicha figura, se presenta un dique de 4 capas, con la posibilidad de añadir una capa extra a modo de coronar el dique; esto, además de la base (color rosado). Como se observa además en la figura 45, la estructura aún permite que le sean colocados más elementos en la base, lo que permitiría agregar más elementos al cuerpo del dique para aumentar el ancho o su altura.

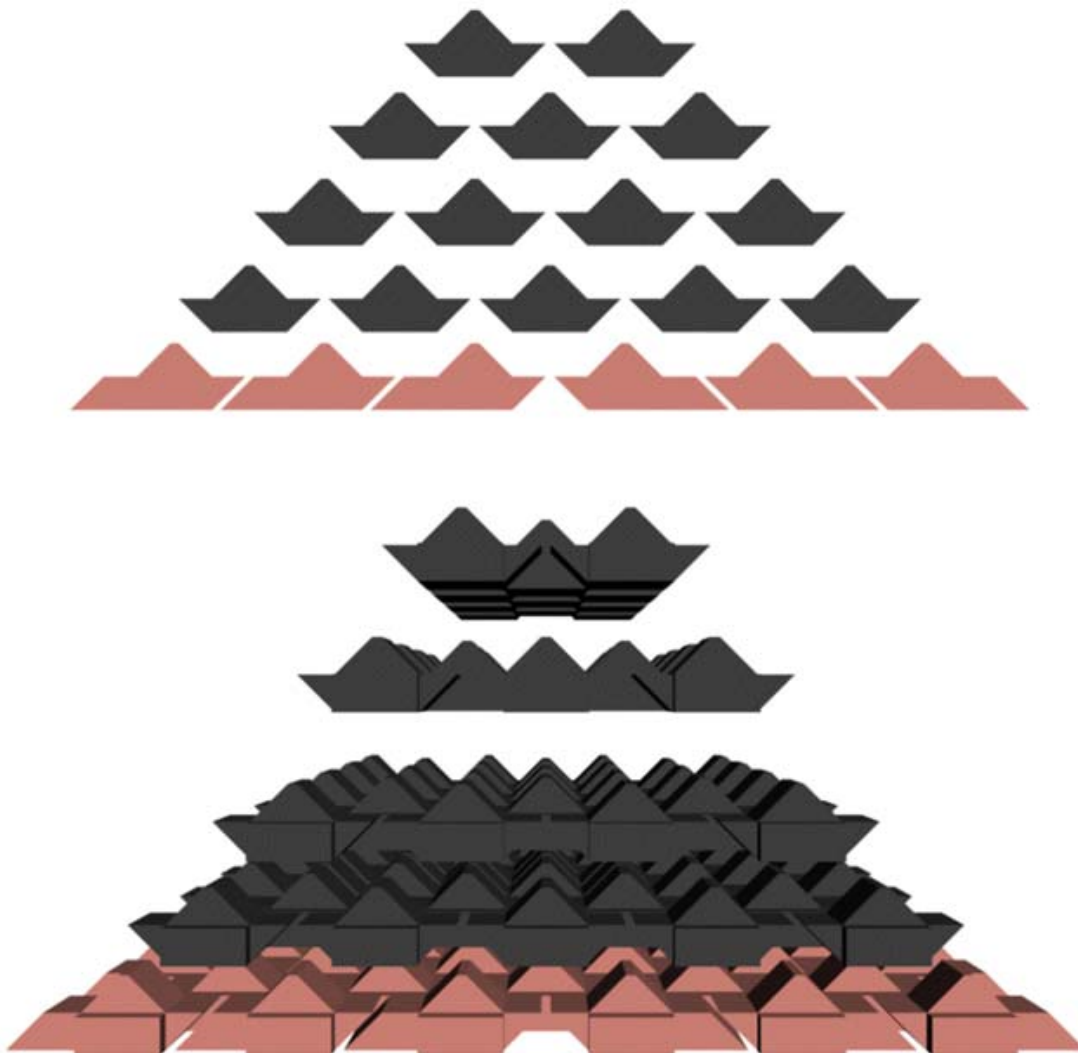


Figura 2. 44. Esquema del proceso de colocación de los elementos.

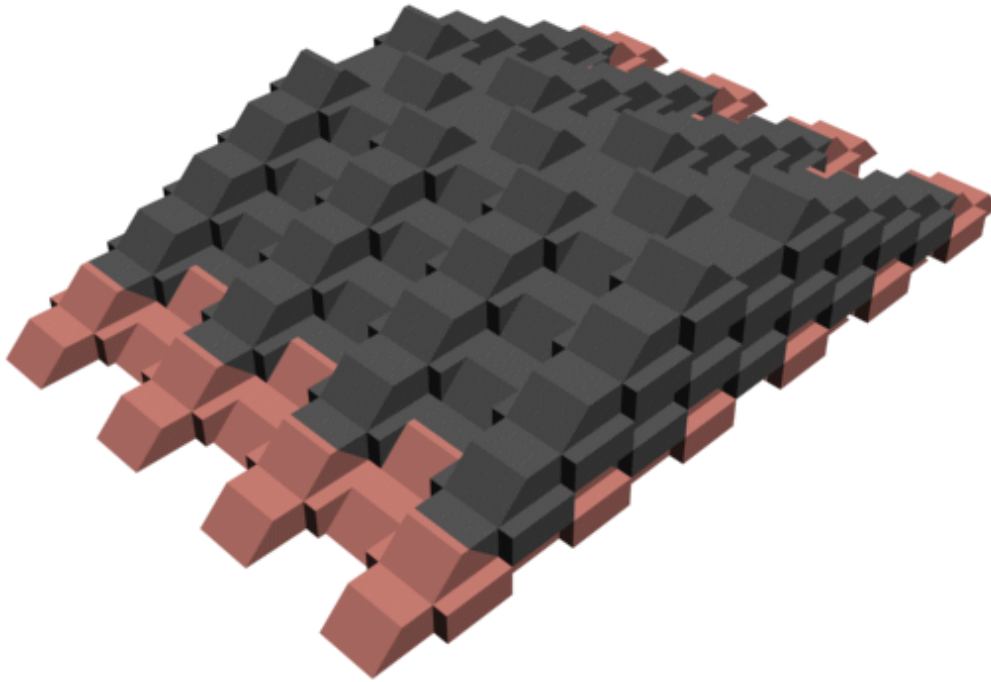


Figura 2. 45. Esquema del dique construido a partir de las piezas diseñadas.

Así mismo, se presentan vistas en perfil (figura 2.46), frontal (figura 2.47) y en planta (figura 2.48) del dique propuesto.



Figura 2. 46. Vista en perfil del dique.

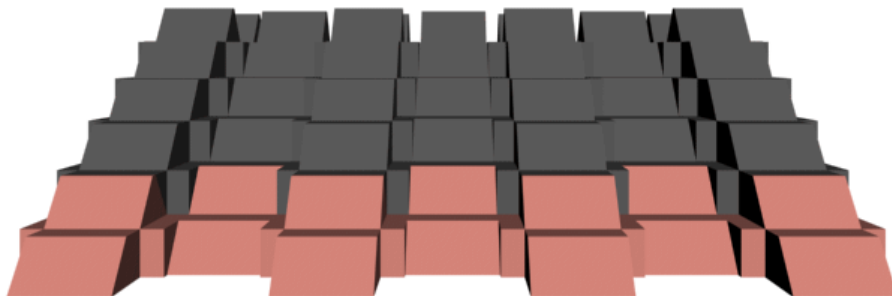


Figura 2. 47. Vista frontal del dique.

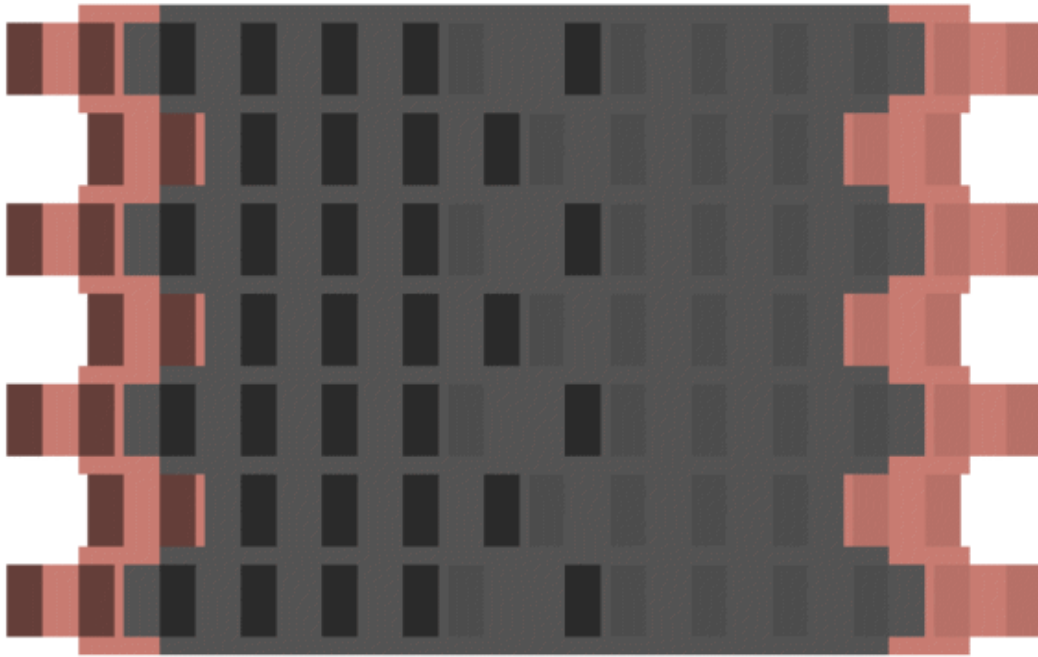


Figura 2. 48. Vista en planta del dique.

Capítulo 3. Base teórica

Dentro del diseño del diseño de una estructura rompeolas, interesa cuantificar el oleaje transmitido para determinar cuán eficiente es el diseño en su propósito de disipar la energía del oleaje. Otro dato que interesa cuantificar es el oleaje que ha sido reflejado por la estructura. En conjunto, estos dos datos permitirán conocer la capacidad de disipación de un dique rompeolas.

A continuación, se tratarán con más detalle estos dos fenómenos, y cómo se cuantifican mediante los coeficientes de reflexión y transmisión.

3.1 Reflexión

Cuando el oleaje incide sobre un obstáculo permeable, parte de la energía pasará a través de éste, otra parte de la energía se disipará y otra parte generará otro tren de ondas en sentido contrario (de vuelta al mar). Este fenómeno se presenta siempre que el oleaje encuentra una estructura o rompeolas, y se le conoce como reflexión, y su magnitud dependerá de la capacidad de disipación de la estructura. Así, una estructura en talud y con cierta porosidad, presentará una reflexión mayor que una estructura vertical; esto debido a la disminución progresiva de la profundidad que provoca la rotura de la ola, proceso por el cual la energía del oleaje es bien disipada; aunado a esto, una estructura porosa puede contribuir a la disipación del oleaje cuando éste pasa entre los huecos del dique.

La reflexión se define mediante un cociente complejo, tal que:

$$R = |R| * e^{-i\varepsilon} \quad (3.1)$$

Donde:

$$|R| = \sqrt{R_R^2 + R_I^2} \quad \text{Es el modulo del coeficiente de reflexión.}$$

$\varepsilon = \arctan (R_I/R_R)$ Es el argumento del coeficiente complejo y da información sobre el desfase entre la ola incidente y la reflejada.

Donde R_I es la amplitud de la onda incidente y R_R la amplitud de la onda reflejada.

Sin embargo, el coeficiente de reflexión también se puede considerar como el cociente del oleaje reflejado entre el oleaje incidente, principalmente en oleaje regular, tal que:

$$K_r = \frac{H_I}{H_R} \quad (3.2)$$

Donde H_I es la altura de ola incidente, y H_R es la altura de ola reflejada.

En el presente trabajo, se ensayaron únicamente condiciones de oleaje regular porque se trata de una condición sobre la cual se puede tener un mayor control.

Cuando el oleaje se encuentra con una estructura y parte de la energía es reflejada, la altura de ola reflejada se suma con el tren de olas incidente, modificando la altura de las olas totales. Así, para poder cuantificar correctamente la altura de ola reflejada, la altura de ola incidente, y con ello el coeficiente de reflexión, se debe realizar una separación de la señal de oleaje. Para este propósito, se han sugerido dos métodos que son: Goda y Suzuki (1976), y Mansard y Funke (1980); y que a continuación se explican a detalle.

3.1.1 Método de Goda y Suzuki (1976)

En 1976, los autores Goda y Suzuki desarrollaron un análisis técnico basado en la superficie libre, calculado a partir de las mediciones de dos sensores separados por una distancia determinada. De este modo, obtuvieron el coeficiente de reflexión y el desfase en oleajes regulares e irregulares, bajo condiciones controladas en laboratorio.

3.1.1.1 Obtención del espectro energético

Es necesario aplicar a los datos un análisis de Fourier discreto. La función $f(t_i)$, obtenida a partir de los dos sensores empleados en el ensayo, se expresa como una serie de Fourier en forma general, como se expresa en la ecuación (3.3):

$$f(t_i) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cos\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) + B_n \sin\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \right] \quad (3.3)$$

Donde el periodo (T) de la función debe ser constante para que ésta sea válida.

Los coeficientes de Fourier A_0 , A_n y B_n se obtienen a partir de los registros de los sensores, y se definen como:

$$A_0 = \frac{1}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \Delta t \quad (3.4)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \cos\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \Delta t \quad (3.5)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \sin\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \Delta t \quad (3.6)$$

El oleaje generado $f(t)$ utiliza el nivel medio del canal con la medida de pasos ascendentes por cero, esto hace que el coeficiente A_0 sea nulo. Así, las áreas positivas y negativas de la función $f(t)$ deben compensarse y su integral en todo su dominio es nula. Por tanto, la función de Fourier general queda como:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(\omega_n t) + B_n \sin(\omega_n t)] \quad (3.7)$$

3.1.1.2 Descomposición de la señal de oleaje

Para realizar la descomposición de la señal del oleaje, es necesario conocer la ecuación de la superficie libre del agua, que se define como:

$$\eta(t, x) = a * \cos(kx - \omega t + \varepsilon) \quad (3.8)$$

Y haciendo la separación del oleaje incidente y reflejado, la ecuación queda:

$$\eta(t, x) = a_I * \cos(kx - \omega t + \varepsilon_I) + a_R * \cos(kx - \omega t + \varepsilon_R) \quad (3.9)$$

De este modo, para encontrar los valores de las amplitudes incidente y reflejada, se iguala la ecuación de la superficie libre (ecuación 3.9) con la función de Fourier (ecuación 3.7), tal que:

$$\begin{aligned} \eta(t, x) &= a_I * \cos(kx - \omega t + \varepsilon_I) + a_R * \cos(kx - \omega t + \varepsilon_R) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(\omega_n t) + B_n \sin(\omega_n t)] \end{aligned} \quad (3.10)$$

Con las condiciones

$$A_n = A_{I,n} * \cos(k_n x + \varepsilon_{I,n}) + A_{R,n} * \cos(k_n x + \varepsilon_{R,n}) \quad (3.11)$$

$$B_n = B_{I,n} * \sin(k_n x + \varepsilon_{I,n}) + B_{R,n} * \sin(k_n x + \varepsilon_{R,n}) \quad (3.12)$$

Siendo la amplitud de onda y el desfase, las incógnitas a encontrar. Por otro lado, de la descomposición de la señal en las series de Fourier se obtienen los coeficientes A_n y B_n ; sin embargo, se tienen dos señales (una por cada sensor), teniendo así dos ecuaciones de superficie libre para cada sensor, tal que:

$$\eta_1(t, x_1) = (\eta_I + \eta_R)_{x=x_1} = \sum_{n=1}^{\infty} [A_{1n} \cos(\omega_n t) + B_{1n} \sin(\omega_n t)] \quad (3.13)$$

$$\eta_2(t, x_2) = (\eta_I + \eta_R)_{x=x_2} = \sum_{n=1}^{\infty} [A_{2n} \cos(\omega_n t) + B_{2n} \sin(\omega_n t)] \quad (3.14)$$

Finalmente, los valores de los coeficientes $A_{1n}, A_{2n}, B_{1n}, B_{2n}$ quedan como:

$$A_{1n} = a_{In} \cos \Phi_{In} + a_{Rn} \cos \Phi_{Rn} \quad (3.15)$$

$$B_{1n} = a_{In} \sin \Phi_{In} - a_{Rn} \sin \Phi_{Rn} \quad (3.16)$$

$$A_{2n} = a_{In} \cos(k_n \Delta x + \Phi_{In}) + a_{Rn} \cos(k_n \Delta x + \Phi_{Rn}) \quad (3.17)$$

$$B_{2n} = a_{In} \sin(k_n \Delta x + \Phi_{In}) - a_{Rn} \sin(k_n \Delta x + \Phi_{Rn}) \quad (3.18)$$

Donde

$A_{1n}, A_{2n}, B_{1n}, B_{2n}$ Son coeficientes de la serie de Fourier, obtenidos a partir de la medida de los dos sensores;

Δx Es la distancia entre los sensores;

$\Phi_{In} = k_n x + \varepsilon_{I,n}$ Y $\Phi_{Rn} = k_n x + \varepsilon_{R,n}$ son las expresiones de la fase en el primer sensor, donde x es su posición.

3.1.2 Método de Mansard y Funke (1980)

En 1980, Mansard y Funke desarrollaron un método basado en los mínimos cuadrados, utilizando datos de tres sensores de nivel.

El método supone la medida simultánea de tres sensores de nivel en tres puntos conocidos durante un tiempo total, T , de modo que $0 \leq t \leq T$. Una de las características que distingue a este método es la introducción de una variable de error, mediante la propia aplicación de la teoría de mínimos cuadrados.

3.1.2.1 Obtención del espectro energético

Al igual que en el método de Goda y Suzuki (1976), en este método se asocia una función a las series de datos proporcionadas por los sensores. Para ello, se aplica un análisis de Fourier, donde cualquier función puede ser expresada de la siguiente forma:

$$f(t_i) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cos\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) + B_n \sin\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \right] \quad (3.19)$$

Con los coeficientes:

$$A_0 = \frac{1}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \Delta t \quad (3.20)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \cos\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \Delta t \quad (3.21)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \sum_{-T/2}^{T/2} f(t_i) \sin\left(\frac{2\pi n t_i}{T}\right) \Delta t \quad (3.22)$$

Sin embargo, la diferencia con el método de Goda y Suzuki es que se hace una reformulación de la ecuación general de la serie de Fourier. La fórmula se expresa ahora en función de la amplitud y la fase de forma, tal que:

$$f(t_i) = \frac{E_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} E_n \sin\left(\frac{2\pi n t_i}{T} - \alpha_n\right) \quad (3.23)$$

Donde:

$$E_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

$$\alpha_n = \tan^{-1}\left(\frac{B_n}{A_n}\right)$$

Nuevamente, el oleaje generado $f(t)$ utiliza el nivel medio del canal con la medida de pasos ascendentes por cero, esto hace que el coeficiente E_0 sea nulo. Así, las áreas positivas y negativas de la función $f(t)$ deben compensarse y su integral en todo su dominio es nula. Por tanto, la función de Fourier general queda como:

$$f(t_i) = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \sin\left(\frac{2\pi n t_i}{T} - \alpha_n\right) \quad (3.24)$$

Para que la ecuación (3.24) sea válida, debe poseer un periodo constante, T.

3.1.2.2 Descomposición de la señal de oleaje

La ecuación de la superficie libre del agua de un tren de ondas regulares, registrada por un sensor, s, se define como:

$$\eta(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin\left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi x}{L_n} + \varepsilon_{s,n}\right) \quad (3.25)$$

Considerando un sensor, s, situado en una posición $x = x_1$ se puede expresar una señal como la superposición de un oleaje incidente con un oleaje reflejado, de la forma:

$$\begin{aligned} \eta_{s=1}(x_1, t) = & \sum_{n=1}^{\infty} a_{In} \sin\left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi x_1}{L_n} + \varepsilon_{1,n}\right) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} a_{Rn} \sin\left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi(x_1 + 2r_1)}{L_n} + \gamma_{1,n}\right) + \Omega_1(t) \end{aligned} \quad (3.26)$$

Donde:

- $\Omega_1(t)$ Representa las posibles interferencias que existan en la señal, y por tanto, posibles errores dentro de la formulación;
- $\varepsilon_{1,n}$ y $\gamma_{1,n}$ Representan los desfases de las ondas incidentes y reflejadas;
- x_1 Es la distancia que existe entre la pala de oleaje y primer sensor;
- r_1 Es la distancia que existe entre el primer sensor y la estructura que refleja el oleaje.

Los siguientes dos sensores, se colocan en una posición $x = x_1 + x_{1s}$ con respecto a la pala; y en una posición $r_s = 2r_1 + x_{1s}$ con respecto a la estructura reflejante, siendo x_{1s} la distancia entre el primer sensor y el siguiente sensor 's'.

La expresión de la superficie libre para este nuevo sensor queda como:

$$\begin{aligned} \eta_{s=1}(x_1 + x_{1s}, t) = & \sum_{n=1}^{\infty} a_{In} \sin\left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi(x_1 + x_{1s})}{L_n} + \varepsilon_{1,n}\right) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} a_{Rn} \sin\left(-\frac{2\pi n t}{T} + \frac{2\pi(x_1 + 2r_1 - x_{1s})}{L_n} + \gamma_{1,n}\right) + \Omega_1(t) \end{aligned} \quad (3.27)$$

Igualando las ecuaciones de superficie libre de ambos sensores, con las formulaciones de superposición de ondas, se tiene:

$$a_{I,n} \sin\left(-\frac{2\pi nt}{T} + \frac{2\pi x_1}{L_n} + \varepsilon_{1,n}\right) + a_{R,n} \sin\left(-\frac{2\pi nt}{T} + \frac{2\pi(x_1 + 2r_1)}{L_n} + \gamma_{1,n}\right) + \Omega_1(t) \quad (3.28)$$

$$= A_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T} + \alpha_n\right)$$

$$a_{I,n} \sin\left(-\frac{2\pi nt}{T} + \frac{2\pi(x_1 + x_{1s})}{L_n} + \varepsilon_{1,n}\right) + a_{R,n} \sin\left(-\frac{2\pi nt}{T} + \frac{2\pi(x_1 + 2r_1 - x_{1s})}{L_n} + \gamma_{1,n}\right) + \Omega_1(t) \quad (3.29)$$

$$= A_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T} + \alpha_n\right)$$

Siguiendo la metodología propuesta por Mansard y Funke, se desarrollan las ecuaciones anteriores en forma polar, de tal manera que:

$$B_{1,n} = a_{I,n} \exp i \left[\frac{2\pi x_1}{L_n} + \varepsilon_{1,n} \right] + a_{R,n} \exp i \left[\frac{2\pi(x_1 + 2r_1)}{L_n} + (\varepsilon_{1,n} + \gamma_{1,n}) \right] + \gamma_{1,n} \exp i(\rho_{1,n}) \quad (3.30)$$

$$B_{s,n} = a_{I,n} \exp i \left[\frac{2\pi(x_1 + x_{1s})}{L_n} + \varepsilon_{s,n} \right] + a_{R,n} \exp i \left[\frac{2\pi(x_1 + 2r_1 - x_{1s})}{L_n} + (\varepsilon_{s,n} + \gamma_{1,n}) \right] + \gamma_{s,n} \exp i(\rho_{s,n}) \quad (3.31)$$

Las ecuaciones anteriores pueden ser agrupadas como:

$$B_{1,n} = Z_{I,n} + Z_{R,n} + Z_{E1,n} \quad (3.32)$$

$$B_{s,n} = Z_{I,n} \exp \left[i \left(\frac{2\pi x_{1s}}{L_n} \right) \right] + Z_{R,n} \exp \left[-i \left(\frac{2\pi x_{1s}}{L_n} \right) \right] + Z_{E1,n} \quad (3.33)$$

Para resolver las ecuaciones anteriores, se emplea el método del error de mínimos cuadrados, lo cual simplifica las ecuaciones, tal que:

$$C_{s,n} = \frac{2\pi x_{1s}}{L_n} = k_n(x_{1s}) \quad (3.34)$$

Con lo anterior, las ecuaciones quedan de la siguiente forma:

$$-Z_{E1,n} = Z_{I,n} \exp[iC_{1,n}] + Z_{R,n} \exp[-iC_{1,n}] - B_{1,n} \quad \text{Para el sensor 1.}$$

$$-Z_{Es,n} = Z_{I,n} \exp[iC_{s,n}] + Z_{R,n} \exp[-iC_{s,n}] - B_{s,n} \quad \text{Para el sensor 's'}$$

A estas ecuaciones, se aplica el método de mínimos cuadrados de tal forma que los valores de $Z_{E1,n}$ y $Z_{Es,n}$ sean mínimos, para cumplir la condición:

$$\sum_{s=1}^m (-Z_{Es,n}) = \text{mínimo}$$

De esta forma es como se obtienen los valores de $Z_{I,n}$ y $Z_{R,n}$. El sistema se resuelve de forma matricial:

$$\begin{pmatrix} \sum_{s=1}^M B_{s,n} \exp[-iC_{s,n}] \\ \sum_{s=1}^M B_{s,n} \exp[iC_{s,n}] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M & \sum_{s=1}^M \exp[-2iC_{s,n}] \\ \sum_{s=1}^M \exp[2iC_{s,n}] & M \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} Z_{I,n} \\ Z_{R,n} \end{pmatrix}$$

La solución queda de la forma:

$$\begin{pmatrix} Z_{I,n} \\ Z_{R,n} \end{pmatrix} = \frac{1}{M^2 - [\sum_{s=1}^M \exp(2iC_{s,n}) * \sum_{s=1}^M \exp(-2iC_{s,n})]} \begin{pmatrix} M & -\sum_{s=1}^M \exp[-2iC_{s,n}] \\ -\sum_{s=1}^M \exp[2iC_{s,n}] & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{I,n} \\ Z_{R,n} \end{pmatrix} \quad (3.35)$$

Donde $Z_{I,n}$ y $Z_{R,n}$ representan el movimiento de la superficie del agua del oleaje incidente $\eta_I(x1, t)$; y reflejado $\eta_R(x1, t)$ para cualquier f_n , con lo cual se obtiene la descomposición de la señal de oleaje en incidente y reflejado.

3.2 Transmisión

Cuando se construye una estructura de protección, puede existir cierta agitación en la zona abrigada. Dicha agitación puede ser causada por las olas que rebasan la estructura o por las ondas que son transmitidas a través de ésta. Al fenómeno por el que parte de la energía de las ondas pasas a través de la estructura se le conoce como transmisión. Para estructuras emergidas, la transmisión del oleaje dependerá principalmente de la porosidad y anchura de la estructura, pues entre mayor sea ésta existirán mayores espacios por donde el oleaje podrá viajar de un lado a otro, mientras que a menor porosidad el oleaje tenderá a ser disipado por medio de la fricción del material de la estructura. Por otro lado, para estructuras sumergidas los niveles de transmisión del oleaje serán mayores, y la transmisión dependerá principalmente de la distancia existente entre la superficie libre del agua y la cresta de la estructura (francobordo); así, cuanto menor sea el francobordo (menor distancia entre la cresta del dique y la superficie libre del agua) la transmisión del oleaje será menor, y viceversa: cuanto mayor sea el francobordo, la transmisión del oleaje aumentará.

La transmisión del oleaje se caracteriza por medio de un coeficiente que se determina como el cociente de la altura de ola transmitida entre la altura de ola incidente, tal que:

$$K_T = \frac{H_{Transmitida}}{H_{Incidente}} \quad (3.36)$$

3.2.1 Factores que alteran la transmisión del oleaje

La transmisión que puede presentarse en una estructura, depende de diferentes factores inherentes a la forma y material de la estructura rompeolas, o factores propios del oleaje.

3.2.1.2 Factores hidráulicos

Altura de ola incidente (H_i)

El factor más importante que influye en la transmisión del oleaje es la altura de ola incidente. Para oleaje regular, siendo éste el caso de este estudio, comúnmente se utiliza la altura de ola cuadrática media, incidente. En este trabajo, se utilizarán las alturas de ola incidentes medidas en los tres sensores más próximos y anteriores a la estructura, calculados mediante los métodos de Mansard y Funke (1980), y Goda y Suzuki (1976).

Periodo de onda incidente (T_i)

Para periodos de onda más largos, se presentará un mayor nivel de ascenso máximo (run up) y con ello habrá una mayor transmisión.

3.2.1.3 Factores geométricos

Francobordo (F_b)

El francobordo es la distancia existente entre la cresta de la estructura y el nivel medio del agua. En el caso de las estructuras emergidas, mientras mayor sea el francobordo, la transmisión del oleaje será menor; y viceversa, a menor francobordo, habrá mayor rebase y por tanto, mayor será la transmisión.

Lo mismo sucede con las estructuras sumergidas, cuyo francobordo puede considerarse como negativo. Así, mientras más sumergida se encuentre una estructura, existirá una mayor transmisión.

Ancho de la cresta

Mientras mayor sea el ancho de la cresta, la transmisión decrecerá, pues existirá una mayor superficie en la cual la energía del oleaje incidente será disipada.

Pendiente de la estructura

Una de las razones por la cual se construyen estructuras rompeolas con una pendiente, además de darle cierta estabilidad, se pretende que parte de la energía sea disipada por una disminución gradual en la profundidad del agua, generando así rotura y con ello disipando una gran cantidad de energía del oleaje incidente. Lo ideal sería construir estructuras rompeolas con pendientes tendidas, con el fin de que las olas siempre rompan; sin embargo, resulta complicado por la cantidad de material que esto representaría. Con esto, se puede inferir que, cuando la pendiente es más tendida, la estructura tendrá una mayor capacidad disipativa, y por tanto, presentará una menor transmisión.

La influencia de la pendiente de la estructura será más evidente en el caso de estructuras emergidas, que es donde se presenta el ascenso máximo (run up) y donde se disipa gran parte de la energía.

Rugosidad de la estructura

Dentro de las propuestas que se han hecho de elementos prefabricados para la construcción de estructuras rompeolas, se han presentado formas que presentan cierta rugosidad en la superficie expuesta. Esto tiene como finalidad disipar la energía del oleaje por medio de la fricción que se presenta, pues, cuanto más rugosa sea la estructura, se generará mayor fricción y con ello, se disipará buena parte de la energía.

Capítulo 4. Modelo experimental

El diseño de las nuevas piezas para la construcción de estructuras rompeolas deberá pasar por diferentes etapas, hasta llegar a un modelo final que cumpla con los requerimientos planteados en el capítulo 2. Esta es una primera etapa en la que se prioriza la verificación del correcto funcionamiento de la estructura bajo diferentes condiciones de oleaje; en ese sentido, se busca que la estructura no falle, es decir, que ninguna pieza se mueva de su lugar aún bajo condiciones fuertes de oleaje, así como verificar que no sufran ningún tipo de ruptura. Además, al ser la disipación del oleaje la mayor prioridad del diseño de esta estructura, se busca determinar la capacidad de disipación de la misma, con base en los coeficientes de transmisión obtenidos en cada prueba.

Para lo anterior es necesario construir un modelo a escala que pueda ser montado en el canal de oleaje del laboratorio del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos (GICyP), en el Instituto de Ingeniería, UNAM.

4.1 Modelo a escala

Usando como referencia los WADs, mencionados en el capítulo 2, cuyo diseño original es de 2 metros de altura por 3.3 metros de arista en la base; se tiene contemplada la construcción de ambas piezas con las siguientes dimensiones:

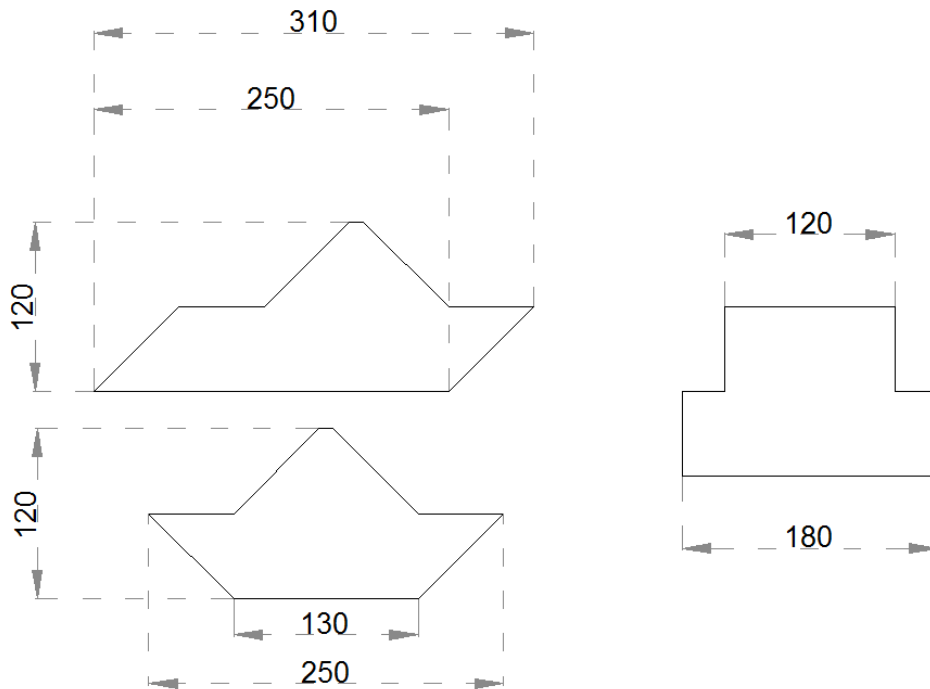


Figura 4. 1. Dimensiones de los elementos propuestos. Perfil (izq.) y sección transversal (der.). Anotaciones en cm.

PR-B (elemento base): 1.20 metros de alto, 2.50 metros de largo en la base, 3.10 metros de largo en total, 1.20 metros de ancho del cuerpo, y 1.80 metros tomando en cuenta las trabazones laterales.

PR-T (elemento tipo): 1.20 metros de alto, 1.30 metros de largo en la base, 2.50 metros de largo en total, 1.20 metros de ancho del cuerpo, y 1.80 metros tomando en cuenta las trabazones laterales.

Estas dimensiones pueden observarse en la figura 4.1.

4.1.1 Escalas utilizadas

Partiendo de lo anterior, se decidió construir dos escalas con la finalidad de poder comparar el funcionamiento entre ambas. Una de las escalas utilizadas fue la escala 1:10, pues de esta manera se tiene un tamaño de pieza que es fácilmente manejable para su construcción y armado del dique dentro del laboratorio. La segunda escala se pretendía que fuese de 1:15, sin embargo, se tiene como limitante el ancho del canal, pues la intención es construir un dique del ancho del canal, y escalando las piezas a este tamaño se tendría un espacio que daría lugar a una mayor transmisión del oleaje; o por otro lado, con esta escala, no habría suficiente espacio a lo ancho para colocar las piezas. Así, únicamente se utilizó la escala 1:15 para el alto y el largo de la estructura; la longitud de la cresta se dejó de 1 centímetro por facilidad de construcción. Con esto, las dimensiones quedan de la siguiente forma:

4.1.1.1 Escala 1:10

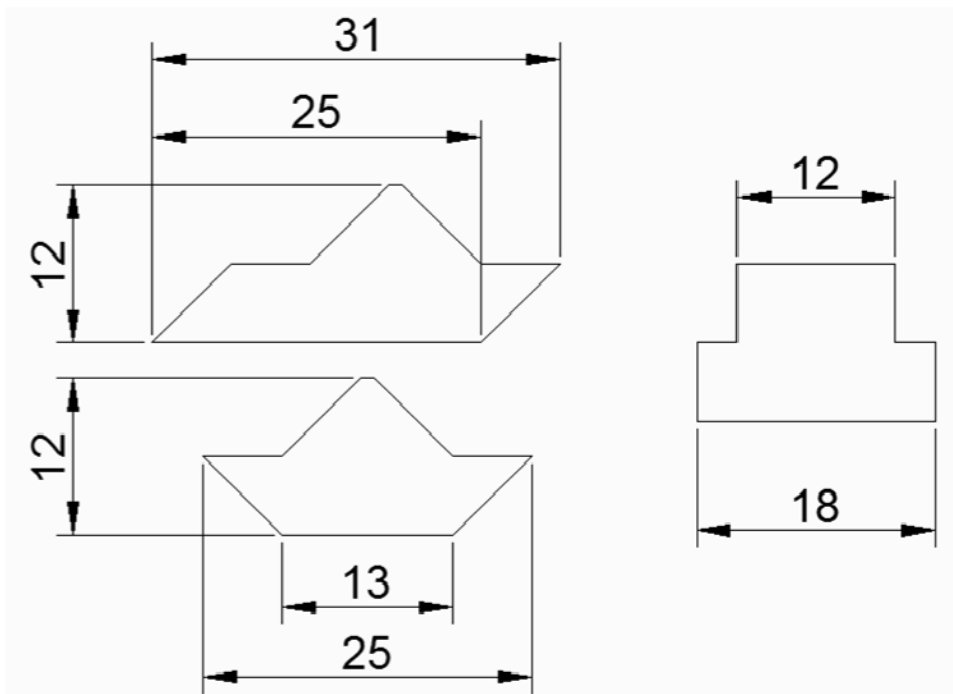


Figura 4. 2. Dimensiones de los elementos propuestos, escala 1:10. Perfil (izq.) y sección transversal (der.). Anotaciones en cm.

PR-B: 12 centímetros de alto, 25 centímetros de largo en la base, 31 centímetros de largo en total, 12 centímetros de ancho del cuerpo, y 18 centímetros tomando en cuenta las trabazones laterales.

PR-T: 12 centímetros de alto, 13 centímetros de largo en la base, 25 centímetros de largo en total, 12 centímetros de ancho del cuerpo, y 18 centímetros tomando en cuenta las trabazones laterales.

Estas dimensiones se muestran en la figura 4.2.

4.1.1.2 Escala 1:15

PR-B: 8 centímetros de alto, 17 centímetros de largo en la base, 21 centímetros de largo en total, 9 centímetros de ancho del cuerpo, y 13 centímetros tomando en cuenta las trabazones laterales.

PR-T: 8 centímetros de alto, 9 centímetros de largo en la base, 17 centímetros de largo en total, 9 centímetros de ancho del cuerpo, 13 centímetros tomando en cuenta las trabazones laterales.

Estas dimensiones se pueden observar en la figura 4.3.

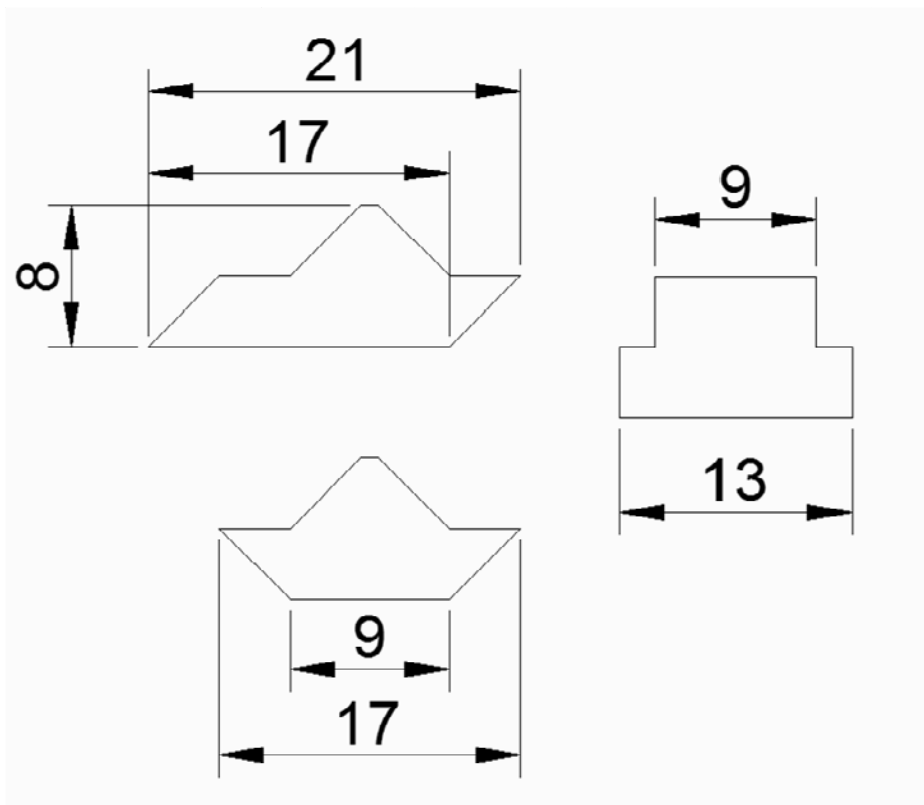


Figura 4. 3. Dimensiones de los elementos propuestos, escala 1:15. Perfil (izq.) y sección transversal (der.). Anotaciones en cm.

4.1.2 Fabricación

La fabricación de las piezas se realizó dentro del laboratorio del GICyP del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Es por esto, y por la cantidad de piezas a construir, que se decidió utilizar materiales de fácil manejabilidad como lo es el unicel, a fin de construir las cimbras necesarias y realizar el colado de todas las piezas al mismo tiempo.

4.1.2.1 Cimbra

Como se mencionó anteriormente, se decidió construir las cimbras con unicel, para lo cual se necesitaron 25 bloques de 40x40x25 centímetros, y con una densidad de 10 kg/m³.

El armado de la cimbra se realizó por secciones, como se muestra en la figura 4.4. Al juntar todas las secciones, se tendrá un hueco con la forma de la pieza a colar, como se muestra esquemáticamente en la figura 4.5. Para cortar las diferentes secciones, se armó en el laboratorio una cortadora de unicel, con una tabla de triplay de 60x60 cm, dos varillas para formar un marco, un alambre fino y un eliminador con regulador de voltaje; con ello se creó una resistencia, lo que permite cortar el unicel. En la figura 4.6 se muestra la cortadora de unicel y su funcionamiento.

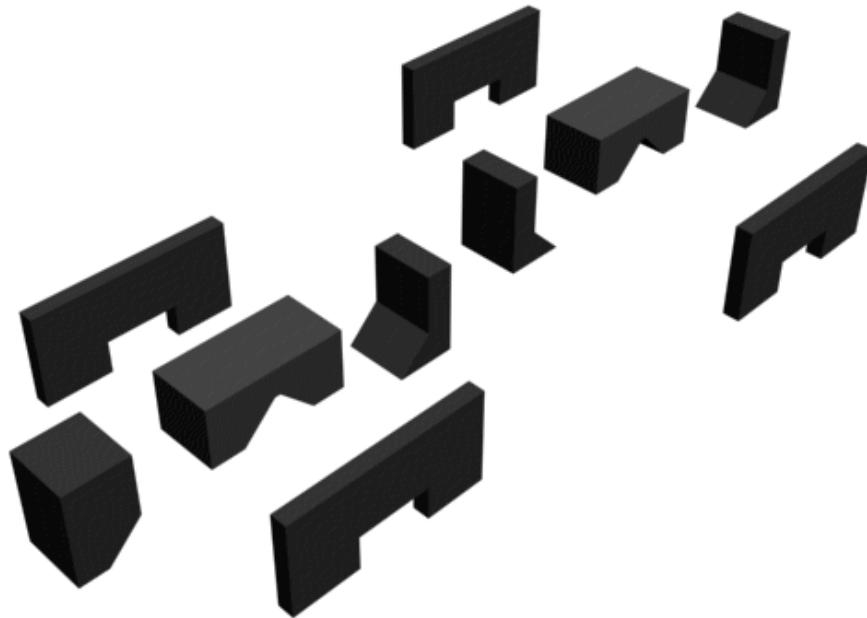


Figura 4. 4. Secciones de las cimbras.

Una vez cortadas todas las secciones, se procedió al armado de la cimbra. Cada sección fue pegada con pegamento blanco y al final se envolvió con abundante cinta adhesiva para mantener confinado el concreto una vez colocado. En la

figura 4.6 se muestra un modelo 3D de cómo se verían los elementos colados dentro de la cimbra.

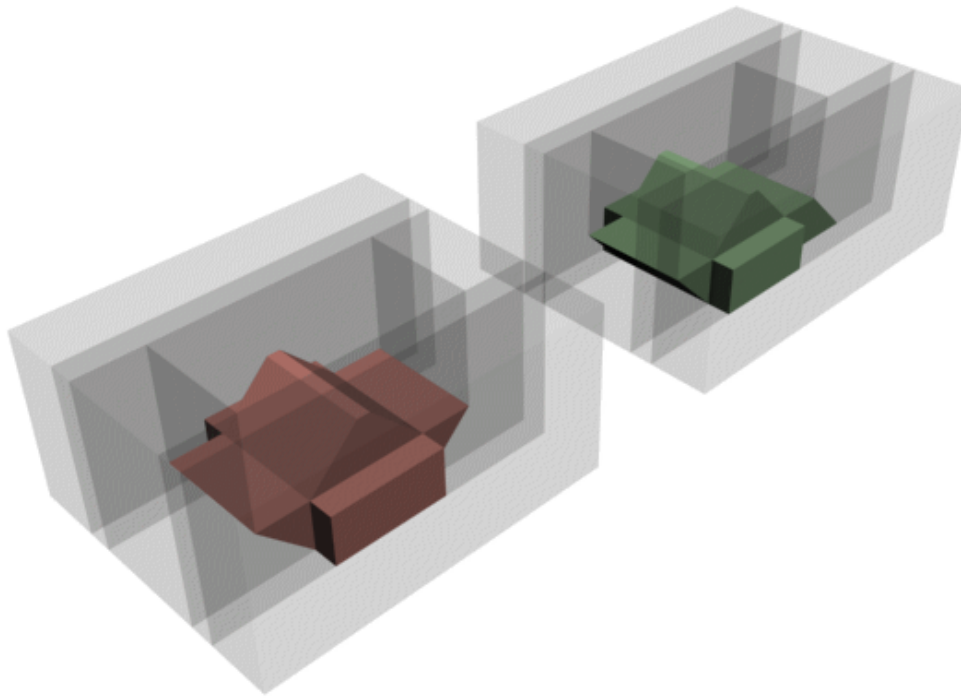


Figura 4. 5. Cimbra armada (der.) y modelo 3D de los elementos dentro de la cimbra.

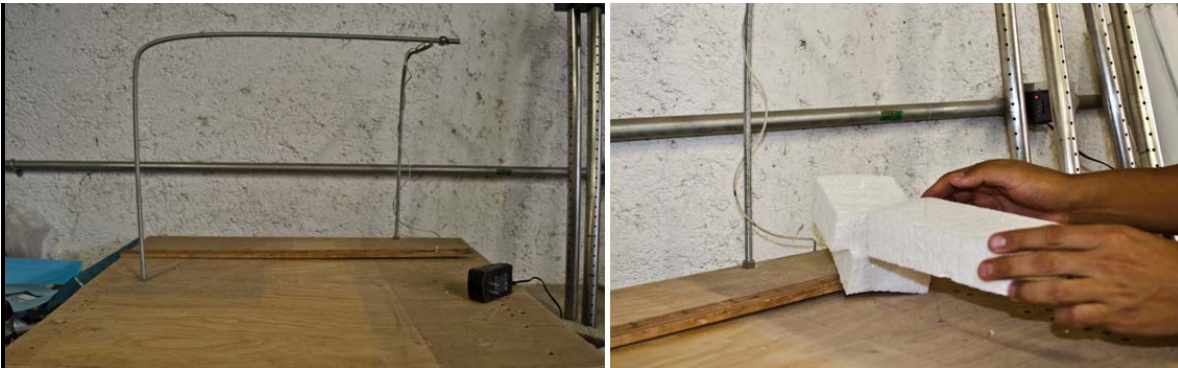


Figura 4. 6. Cortadora de unicel armada (izq.) y cortes de unicel (der.)

4.1.2.2 Características de la mezcla de concreto

Para la mezcla de concreto se usó como referencia la dosificación empleada en trabajos anteriores para la fabricación de cubos de concreto, utilizados para la construcción de diques a escala. Dicho concreto alcanzaba una densidad de 2300 kg/m³. Para fabricar este concreto y cubrir la cantidad necesaria, se mezclaron 126 kg de arena (malla #4), 50 kg de cemento y 31 l de agua.

Una vez que la mezcla se fabricó, se procedió al colado de las piezas, colocando cuidadosamente el concreto mediante el uso de una pala y cucharones. Durante

el fraguado del concreto, se realizó el curado de las piezas manualmente, vertiendo agua dos veces al día durante una semana. Después de 7 días de fraguado, se descimbraron las piezas, y se dejó fraguar el concreto durante 18 días más, mismos en los que se continuó con el curado. En la figura 4.7 se muestran algunos elementos colados.



Figura 4. 7 Piezas coladas.

4.2 Diseño del experimento

Para determinar las dimensiones que tendría el dique construido a partir de la nueva tipología presentada en este trabajo y con ello, el número de piezas a construir, se tomó como referencia el trabajo realizado por Pérez (2012) en el cual se realizaron ensayos con un dique de dimensiones: 75 cm de ancho en la base, 15 cm de ancho de cresta y 15 cm de alto. De esta manera, se modeló un dique con escala 1:10 cuyas dimensiones son cercanas al dique mencionado, esto es: 18 cm de alto y 76 cm de ancho en la base; que en dimensiones reales sería: 1.80 m de alto, 7.60 m de ancho en la base. Posteriormente, partiendo de las dimensiones reales del dique mencionado, se construyó el mismo dique pero a escala 1:15; cuyas dimensiones resultan: 52 cm de ancho en la base y 12 cm de alto.

Finalmente, se construyó un tercer dique, de escala 1:15 y de dimensiones: 79 cm de ancho en la base, y 16 cm de alto; con la finalidad de tener un punto de

comparación, pero principalmente para verificar la capacidad modular del dique con un número mayor de piezas.

Siendo que para las piezas con escala 1:10 se utilizó una sola configuración, en total se construyeron 10 elementos base y 4 elementos tipo, para tener así un dique de dos capas, y con 18 centímetros de alto, 76 centímetros de largo y 78 centímetros de ancho.

En el caso de la escala 1:15 se construyeron 25 elementos base y 29 elementos tipo para tener la posibilidad de construir dos diques: el primero de tres capas y con 16 centímetros de alto, 79 centímetros de largo y 79 centímetros de ancho; y un segundo de dos capas y con 12 centímetros de alto, 52 centímetros de largo y 79 centímetros de alto. Este último pretende ser comparado con el construido a escala 1:10, pues en tamaño real se tendrían dimensiones muy parecidas.

Con esto, se tienen en total 3 diferentes configuraciones: una para la escala 1:10 y dos para la escala 1:15.

Cada una de estas configuraciones se colocó dentro del canal de oleaje del laboratorio del GICyP una plataforma de madera de 10 centímetros de alto, y posterior a una rampa con pendiente 1:15; esto con el objeto de peraltar las olas que inciden sobre la estructura.

4.2.1 Instrumentación

4.2.1.1 Canal de oleaje

Como se ha mencionado a lo largo de este capítulo, los ensayos se realizaron en el canal de oleaje del laboratorio del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Este canal se irgue 80 centímetros sobre el nivel del suelo sobre un soporte estructural de acero. Las dimensiones del canal son: 37 metros de largo, 80 centímetros de ancho y 1.20 metros de profundidad.

Para poder observar la evolución del oleaje, una de las laterales del canal está construida en su totalidad de vidrio de alta resistencia, de 20 mm de espesor, y resistente a la tracción mecánica y térmica. La otra lateral y el fondo están contruidos con acero inoxidable. El canal se puede observar en la figura 4.8.



Figura 4. 8. Canal de oleaje de del laboratorio del GICyP

El llenado de canal se lleva a cabo mediante la circulación de un volumen de agua, que por medio de 3 bombas conectadas en paralelo con una potencia de 10 CP o HP cada una, permite llenar el canal por sus dos extremos, hasta alcanzar un nivel máximo de 80 cm.

4.2.1.1.1 Generación del oleaje

El sistema de generación de oleaje fue adquirido a HR Wallingford, y consiste en una placa montada sobre un pistón que tiene un recorrido máximo de 80 cm; a este sistema se le conoce como pala generadora. Esta pala se encuentra sujeta a una viga especial que cuenta con 4 soportes que reposan sobre el suelo sin tocar el canal y está conectada directamente con el motor eléctrico del sistema. El sistema de movimiento de la pala cuenta con un engranaje sencillo y de bajo mantenimiento.

La pala generadora es operada mediante un software proporcionado por el fabricante, llamado HR WaveMaker. La aplicación permite reproducir oleaje regular introduciendo parámetros tales como frecuencia (Hz) y altura de la ola (m), o bien, permite reproducir oleaje irregular a través de un archivo de datos con el espectro deseado.

Las especificaciones técnicas del sistema generador, dadas por el fabricante, establecen máximos valores de desplazamiento, velocidad y fuerza que la pala puede alcanzar. A continuación se enlistan dichos valores:

- Máximo desplazamiento, $S = 80$ cm;
- Máxima velocidad, $U = 0.81$ cm/s;
- Máxima fuerza, $F = 3.50$ KN.

Durante la generación del oleaje, el software considera la función de transferencia hidráulica del pistón. La proporción que existe entre la altura de ola que se genera, y el desplazamiento que necesita para ello el pistón, viene dada por un factor que varía en función de la profundidad y la frecuencia de la onda, aumentando su valor desde 0.6 hasta 0.2.

Existen algunas restricciones en la altura de ola que se puede generar, de acuerdo a la profundidad. El rango de profundidad permitido para la generación del oleaje es de 15 a 80 cm, si se supera el límite superior, se corre el riesgo de que la ola rebase el canal. Así mismo, para cada profundidad existirá una altura de ola máxima antes de que ésta rompa; esta relación estará dada por la ecuación de Mc Cowan (1981) que establece:

$$H_b = 0.78 * h$$

Donde H_b es la altura de ola de rotura, y h la profundidad.

Sin embargo, al estar limitado el canal de oleaje, la relación cambia sensiblemente, siendo $H_b = 0.50 * h$, por lo que la altura de ola máxima que se podrá crear será la mitad de la profundidad utilizada.

Otro de los parámetros que restringen la altura de ola es el periodo. Cuando se modelan periodos de onda largos, la ola se vuelve inestable y se decresta antes de incidir sobre la estructura, situación que impide hacer una evaluación de la transmisión que se presenta sobre la estructura.

El sistema generador cuenta con un sistema de absorción dinámica durante la generación del oleaje, que consiste en dos sensores montados en la pala que miden la altura de ola generada corrigiendo, de ser necesario, el desplazamiento de la pala para proporcionar siempre la altura de ola deseada (absorción de ondas re-reflejadas). En el extremo opuesto del canal se cuenta con un sistema disipador pasivo de oleaje, que fue cubierto con grava con la intención de disipar el oleaje y así, reducir al máximo la reflexión.

4.2.1.2 Sensores de nivel

Para medir el oleaje generado a lo largo de la duración de cada ensayo, se utilizaron 12 sensores de nivel. Estos sensores trabajan con un voltaje de 20 V, registrando las variaciones en el voltaje durante el ascenso y descenso de la

superficie libre. Esta diferencia de voltajes, relacionada con la sumergencia del sensor, se interpreta como la posición instantánea de la superficie libre del agua. El límite de operación de estos sensores está dado por su propia longitud, $L = 60$ cm, y ofrecen una precisión de 0.01 mm. Los sensores de nivel se pueden observar en la figura 4.9.



Figura 4. 9. Sensores de nivel.

Los sensores se montan en soportes metálicos diseñados especialmente para este propósito, individualmente, o en grupos de 2 a 5 sensores, de acuerdo a las necesidades de la prueba. Cuando se utilizan grupos de sensores, estos deben guardar una separación mínima de $\pi/10k$ y una máxima de $9\pi/10k$ donde k es el número de onda, dado por $k = 2\pi/L$, siendo L la longitud de onda.

Para estos experimentos, se colocaron 12 sensores de nivel. Tomando como origen la pala generadora de oleaje, los sensores fueron colocados a 7, 14.30, 14.75, 15.13, 20.95, 21.33, 21.78, 23.85, 25.40, 25.78, 26.23 y 29.65 metros medidos desde la pala generadora de oleaje. La configuración de los sensores se muestra a continuación, en la figura 4.10. Con esta configuración, se pretende medir el oleaje incidente con los sensores 1 a 7, el oleaje reflejado con los sensores 5 a 7, y el transmitido con los sensores 9 a 12. El sensor 8, ubicado justamente sobre la cresta del dique rompeolas, servirá para poder revisar datos del oleaje alcanzado por el efecto de la estructura; y únicamente funcionará bajo condiciones en las que la estructura se encuentre sumergida, pues sólo de esta forma este sensor puede estar calibrado y por ende, sólo así se pueden aceptar los datos.

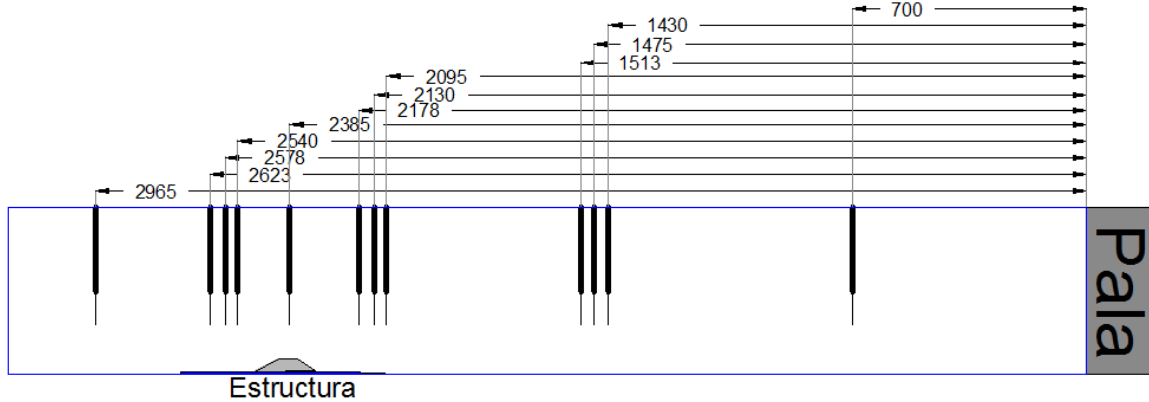


Figura 4. 10. Acomodo de los sensores (anotaciones en centímetros).

4.2.1.2.1 Calibración de los sensores de nivel

Al iniciar los ensayos, o cuando el nivel del agua dentro del canal ha cambiado, es necesario realizar una calibración a los sensores de nivel.

La calibración consiste en establecer un nivel de referencia, $nm=0$, que normalmente se situará en un punto medio entre el fondo del canal y la superficie libre del agua. Una vez colocados todos los sensores en el nivel de referencia, se establece en este nivel un voltaje de 0 V con un potenciómetro configurado en 20V. Una vez establecido el nivel 0, y el voltaje de 0V, en un programa desarrollado por el GICyP para la calibración de los sensores, se indica el primer nivel de referencia.

Posteriormente, se varía la sumergencia de los sensores a una distancia conocida, y dicha distancia se registra en el programa de calibración; este proceso se realiza dos veces, para tener un total de 3 niveles de referencia y 3 voltajes. Con este conjunto de datos, el programa ajusta una recta por mínimos cuadrados, obteniéndose así para cada sensor, la relación entre el voltaje registrado y la elevación de agua que le corresponde. Finalmente, el programa escribe en un archivo la pendiente, ordenadas al origen y coeficientes de correlación (R^2) de los ajustes lineales realizados. La calibración se considera aceptable cuando el valor de R^2 se encuentra entre 0.9999 y 1.

4.2.1.2.2 Toma de datos

La escritura de los datos de nivel del agua dependerá del número de olas y el periodo utilizado en cada prueba. Para estos ensayos se fijó un total de 500 olas por prueba. De esta forma, el número de datos se calcula como sigue:

$$\frac{\# \text{ de olas} * \text{ periodo} * \# \text{ de datos deseado}}{512}$$

Lo anterior se redondea al entero inmediato mayor, y el resultante se multiplica nuevamente por 512, lo que da el número de datos a registrar en cada prueba.

El número de datos escrito en cada prueba, se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4. 1. Número de datos escrito para diferentes periodos de onda.

Escala 1:15		Escala 1:10	
T_{escala} (s)	# Datos	T_{escala} (s)	# Datos
1.54919334	62464	1.8973666	76288
2.06559112	82944	2.52982213	101376
2.5819889	103424	3.16227766	126976
3.09838668	124416	3.79473319	152064
3.61478446	144896	4.42718872	177152

4.2.1.3 Cámaras

Se utilizó una cámara fotográfica réflex (Nikon D5100) para registrar el proceso de construcción, obtener fotografías de las piezas y el modelo construido, así como de diferentes patrones observados en la interacción oleaje-estructura.

También se utilizó una cámara de video de alta velocidad (Signum Prime Vision) para observar con mayor detalle la interacción oleaje-estructura durante los ensayos. Esta cámara graba a una velocidad de 1000 cuadros por segundo, y necesita una configuración de iluminación para tener una correcta exposición de las imágenes.

4.2.2 Análisis de datos

4.2.2.1 Conversión de voltaje a altura de ola

Los datos que se obtienen a partir de los sensores de nivel corresponden a diferencias de voltajes que posteriormente pueden ser interpretadas como los niveles de superficie libre del agua, a partir de los cuales se pueden obtener las alturas de ola.

Dicha interpretación se realiza mediante la utilización de un programa desarrollado en el GICyP Instituto de Ingeniería de la UNAM, llamado LEEWDC.EXE. Para poder utilizar dicho programa, en un archivo de entrada (llamado InputWDC.INP) se indica el nombre del caso a analizar, el nombre del archivo con los datos de calibración y el número de sensores utilizados en el ensayo. Este programa da como resultado dos archivos, el primero con extensión .DAT contiene la serie de tiempo de la superficie libre del agua para cada sensor. El segundo archivo con extensión .TXT contiene las alturas de ola ordenadas de mayor a menor, y los periodos para cada instante medido; así como un resumen con los estadísticos más importantes como son $H_{1/2}$, $H_{1/3}$, $H_{1/10}$, $H_{1/100}$ en centímetros; y $T_{1/2}$, $T_{1/3}$, $T_{1/10}$, $T_{1/100}$ en segundos.

4.2.2.2 Tratamiento para evaluar la reflexión del oleaje

Cuando el oleaje incide sobre la estructura, parte de la energía es reflejada afectando al oleaje que sigue incidiendo. Por ello es necesario realizar una

separación entre el oleaje incidente y el reflejado. Esta separación se hace utilizando un programa llamado REFLAB.EXE, desarrollado en el GICyP del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

El programa trabaja sobre el archivo de resultados (serie de tiempo de la superficie libre del agua) arrojado por el programa LEEWDC.EXE y calcula para los métodos de Mansard y Funke (1980), y Goda y Suzuki (1976), las alturas de ola reflejadas, incidentes (cuadrática media y significativa), entre otros.

Para hacer funcionar el programa, se especifican en un archivo de entrada las distancias que existen entre la pala generadora y los sensores involucrados en la reflexión del oleaje (los sensores más próximos en el lado expuesto de la estructura) y el nivel del agua utilizado en el ensayo.

Una vez hecho el tratamiento, se obtiene la altura de ola incidente, con la cual es posible obtener el coeficiente de transmisión.

4.2.2.3 Transmisión del oleaje

Una vez que el oleaje ha sido descompuesto en incidente y reflejado, se puede utilizar el valor del oleaje incidente para calcular el coeficiente de transmisión de la siguiente forma:

$$K_T = \frac{H_T}{H_i}$$

Donde H_T es el oleaje transmitido, obtenido de uno o más sensores posteriores a la estructura; y H_i es el oleaje incidente obtenido del programa REFLAB.EXE.

El hecho de tener más de un sensor en el lado abrigado por la estructura sirve para poder determinar, eventualmente, la distancia adecuada entre la playa y la estructura a fin de tener un coeficiente de transmisión menor.

4.2.2.4 Disipación del oleaje

La cantidad de energía disipada por la estructura en cada condición modelada se calcula como

$$E_D = 1 - K_r^2 - K_T^2$$

Donde K_r es el coeficiente de reflexión y K_T el coeficiente de transmisión.

4.2.3 Condiciones modeladas

4.2.3.1 Profundidades

Para cada acomodo de los diques (una para la escala 1:10 y dos para la escala 1:15) se modelaron 3 configuraciones diferentes: dique sumergido, dique emergido y dique coronado al nivel medio del mar.

Los niveles de sumergencia y francobordo se establecieron a partir de la altura real de la pieza; al ser ésta igual a 1.20 metros, el valor de francobordo y sumergencia sería igual a 60 centímetros.

Así, en una primera configuración, la estructura estaría sumergida 60 centímetros; en una segunda configuración, la estructura estaría coronada al nivel medio del mar; y en una tercera configuración, la estructura estaría emergida 60 centímetros sobre el nivel del agua. Esto hablando a tamaño real; para fines de los ensayos, los niveles de sumergencia y francobordo se ajustan dividiéndolos entre 10 y 15, según la escala utilizada; con lo que los niveles de sumergencia y francobordo quedarían de la siguiente forma:

- Escala 1:10: sumergencia = 6 cm, francobordo = 6 cm;
- Escala 1:15: sumergencia = 4 cm, francobordo = 4 cm.

Es importante mencionar que para todos los ensayos se tiene considerada la altura de la plataforma de madera utilizada para peraltar las olas. De esta manera, para determinar la profundidad adecuada en función de los niveles de sumergencia y francobordo, a la altura de cada dique (a escala) se le suman 10 cm.

4.2.3.2 Alturas de ola y periodos

Los ensayos fueron diseñados considerando el tamaño real, tentativo, de las piezas y los niveles de profundidad contemplados a fin de tener números de Ursell ($U_r = HL/h^3$) bajos para garantizar la linealidad del fenómeno. Partiendo de lo anterior, se planteó una altura de ola igual a la mitad de la altura de la pieza, en este caso de 0.60 metros (considerando la altura del elemento de 1.20 metros). A partir de esta altura de ola, se aumentó cada 20 centímetros su valor hasta llegar a una altura de ola límite de 3.80 metros, es decir, tres veces mayor a la altura de cada elemento.

Bajo estas condiciones, se eligieron periodos acordes a cada altura de ola, que van desde los 6 hasta los 14 segundos, con incrementos de 2 segundos.

Estos parámetros se han ajustado para cada escala. La altura de ola únicamente se divide entre 10 o 15 según la escala utilizada. El periodo se escala de acuerdo a la siguiente relación:

$$T_{escala} = T / \sqrt{Escala}$$

En la tabla 4.2 se muestran las alturas de ola y periodos reales, y los modelados (a escala).

Tabla 4. 2. Periodos y alturas de ola reales y ensayadas.

T_{real} (s)	H_{real} (m)	$T_{\text{escala 1:10}}$ (s)	$H_{\text{escala 1:10}}$ (m)	$T_{\text{escala 1:15}}$ (s)	$H_{\text{escala 1:15}}$ (m)
6	0.6	1.54919334	0.04	1.8973666	0.06
6	0.8	1.54919334	0.05333333	1.8973666	0.08
6	1	1.54919334	0.06666667	1.8973666	0.1
6	1.2	1.54919334	0.08	1.8973666	0.12
6	1.4	1.54919334	0.09333333	1.8973666	0.14
8	1.2	2.06559112	0.08	2.52982213	0.12
8	1.4	2.06559112	0.09333333	2.52982213	0.14
8	1.6	2.06559112	0.10666667	2.52982213	0.16
8	1.8	2.06559112	0.12	2.52982213	0.18
8	2	2.06559112	0.13333333	2.52982213	0.2
10	1.8	2.5819889	0.12	3.16227766	0.18
10	2	2.5819889	0.13333333	3.16227766	0.2
10	2.2	2.5819889	0.14666667	3.16227766	0.22
10	2.4	2.5819889	0.16	3.16227766	0.24
10	2.6	2.5819889	0.17333333	3.16227766	0.26
12	2.4	3.09838668	0.16	3.79473319	0.24
12	2.6	3.09838668	0.17333333	3.79473319	0.26
12	2.8	3.09838668	0.18666667	3.79473319	0.28
12	3	3.09838668	0.2	3.79473319	0.3
12	3.2	3.09838668	0.21333333	3.79473319	0.32
14	3	3.61478446	0.2	4.42718872	0.3
14	3.2	3.61478446	0.21333333	4.42718872	0.32
14	3.4	3.61478446	0.22666667	4.42718872	0.34
14	3.6	3.61478446	0.24	4.42718872	0.36

4.3 Experimentos

Cada ensayo consistió en generar un total de 500 olas. El tiempo de cada prueba depende del periodo modelado, siendo los periodos largos aquellos que hacen que el ensayo tenga una mayor duración.

Se comenzó con la escala 1:15 en ambas configuraciones y por último se trabajó con la escala 1:10 para tener un total de 3 configuraciones utilizadas. Esto da un total teórico de 216 ensayos, sin embargo, esta situación cambia por la restricción que se tiene con algunas profundidades.

A continuación se detallan las configuraciones utilizadas y las pruebas que pudieron realizarse.

4.3.1 Escala 1:15, primera configuración (altura de estructura de 16 cm)

Esta primera configuración, como se describió anteriormente, consiste en la colocación de 3 capas. La primera capa está formada por 7 filas alternadas de 4 y 3 piezas, para dar un total de 25 piezas en la base. Sobre esta base, reposa una segunda capa formada por 7 filas alternadas de 3 y 2 piezas, para dar un total de 18 piezas. Finalmente se coloca una última capa, formada por 7 filas alternadas de 2 y 1 piezas para dar un total de 11 piezas. Esto da un total de 54 piezas: 25 elementos base y 29 elementos PR-T. Las dimensiones finales del dique son de 79 cm de largo y 79 cm de ancho en la base, y una altura de 16 cm, con una pendiente equivalente a 1:2. El armado de esta estructura se puede observar en la figura 4.10.

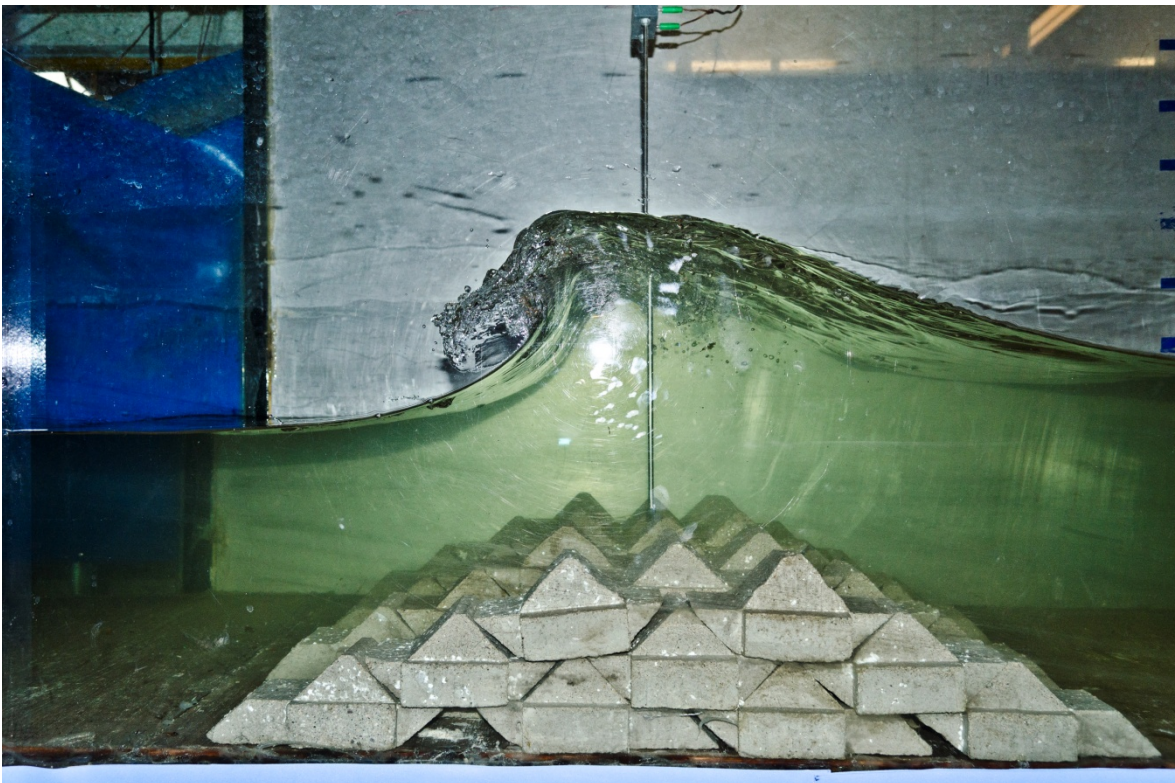


Figura 4. 11. Primera configuración de la estructura (escala 1:15).

Se comenzó con una profundidad de 30 cm, nivel que corresponde a una sumergencia de la estructura de 4 cm, y se modelaron alturas de ola hasta 14.67 cm, pues, con alturas de ola mayores las olas comenzaban a romper antes de llegar a la estructura. A fin de poder ensayar el resto de alturas de ola para una estructura sumergida, se utilizó una profundidad de 47.33 cm, sí, para evaluar la capacidad de disipación de la estructura, pero principalmente para saber si bajo alturas de ola elevadas (hasta tres veces mayores a la altura de la pieza) el dique o alguna pieza no presentaba fallas.

Para el segundo grupo de ensayos, las estructuras fueron coronadas al nivel medio del agua, para lo cual la profundidad se tuvo que disminuir a 26 cm. Con esta nueva profundidad sólo se alcanzó una altura de ola máxima de 12 cm con un periodo de 2.065 s antes de que las olas comenzaran a romper; es decir, sólo pudieron ensayarse 9 olas.

Finalmente, la profundidad se disminuyó 4 cm más para dejarla en 22 cm y así tener una condición de estructura emergida con un francobordo de 4 cm. Sin embargo, para esta nueva profundidad cabían aún menos olas, logrando ensayar únicamente 7 alturas de ola hasta los 9.33 cm y 2.065 s.

En la tabla 4.3 se muestra una relación de los ensayos realizados para esta configuración.

Tabla 4. 3. Condiciones ensayadas para la escala 1:15 y altura de la estructura de 16 cm.

h_{Total} (cm)	h_{pie} (cm)	T (s)	H_m (cm)	h_{Total} (cm)	h_{pie} (cm)	T (s)	H_m (cm)
47.33333	37.33333	2.5819889	16	30	20	2.06559112	13.3333333
47.33333	37.33333	2.5819889	17.3333333	30	20	2.5819889	12
47.33333	37.33333	3.09838668	16	30	20	2.5819889	13.3333333
47.33333	37.33333	3.09838668	17.3333333	30	20	2.5819889	14.6666667
47.33333	37.33333	3.09838668	18.6666667	26	16	1.54919334	4
47.33333	37.33333	3.09838668	20	26	16	1.54919334	5.3333333
47.33333	37.33333	3.09838668	21.3333333	26	16	1.54919334	6.6666667
47.33333	37.33333	3.61478446	20	26	16	1.54919334	8
47.33333	37.33333	3.61478446	21.3333333	26	16	1.54919334	9.3333333
47.33333	37.33333	3.61478446	22.6666667	26	16	2.06559112	8
47.33333	37.33333	3.61478446	24	26	16	2.06559112	9.3333333
30	20	1.54919334	4	26	16	2.06559112	10.6666667
30	20	1.54919334	5.3333333	26	16	2.06559112	12
30	20	1.54919334	6.6666667	22	12	1.54919334	4
30	20	1.54919334	8	22	12	1.54919334	5.3333333
30	20	1.54919334	9.3333333	22	12	1.54919334	6.6666667
30	20	2.06559112	8	22	12	1.54919334	8
30	20	2.06559112	9.3333333	22	12	1.54919334	9.3333333
30	20	2.06559112	10.6666667	22	12	2.06559112	8
30	20	2.06559112	12	22	12	2.06559112	9.3333333

4.3.2 Escala 1:15, segunda configuración (altura de estructura de 12 cm)

Para este nuevo acomodo del dique se retiraron 33 piezas (11 elementos PR-B y 22 elementos PR-T) de la configuración anterior hasta alcanzar un dique de únicamente dos capas. La primera capa está formada por 7 filas de dos piezas, para dar un total de 14 elementos PR-B. La segunda capa está formada por 7

elementos que reposan sobre la base. Esto da un total de 21 elementos: 14 elementos base y 7 elementos PR-T. Las dimensiones del dique son 52 cm de largo por 79 cm de ancho en la base, por 12 cm de alto. Como se mencionó anteriormente, con esta configuración se busca comparar el funcionamiento de dos diques de similar armado y forma, pero a diferentes escalas; así, la forma del dique mostrado en la figura 4.11 es muy similar a la forma proyectada del dique a escala 1:10.



Figura 4. 12. Segunda configuración de la estructura (escala 1:15).

Se comenzó con una profundidad de 26 cm para tener una sumergencia de la estructura de 4 cm y se logró ensayar hasta una altura de ola hasta 10.67 cm y un periodo de 2.065 s, pues a partir de esta condición las olas comenzaban a romper antes de incidir sobre la estructura, situación que impide medir de forma objetiva la capacidad disipadora de la estructura. Con el objeto de poder ensayar alturas de ola mayores se llenó el canal de oleaje hasta un nivel de 43.33 cm para evaluar la capacidad de disipación de la pieza y el dique, y verificar que no exista falla en éstos. Con estos 43.33 cm de profundidad se tiene un nivel de sumergencia de 21.33 cm, que en tamaño real son 3.20 m.

Para el segundo grupo de ensayos con esta configuración se niveló el agua a la corona del dique, alcanzando un nivel de 22 cm. Con esta profundidad sólo se pudieron realizar ensayos hasta una altura de ola de 6.67 cm y un periodo de 1.55 s, antes de que las olas comenzaran a romper; bajo esta situación, sólo se pudieron ensayar 3 alturas de ola.

Finalmente, para tener una condición de estructura emergida se disminuyó el nivel del agua del canal 4 cm más, teniendo así un francobordo de 4 cm y una

profundidad total de 18 cm. Sin embargo, con esta profundidad únicamente pudieron ensayarse dos alturas de ola: 4 y 5.33 cm, ambas con periodo igual a 1.55 s.

Tabla 4. 4 Condiciones ensayadas para la escala 1:15 y altura de la estructura de 12 cm.

h_{Total} (cm)	h_{pie} (cm)	T (s)	H_m (cm)	h_{Total} (cm)	h_{pie} (cm)	T (s)	H_m (cm)
43.33333	33.33333	2.065591	12	43.33333	33.33333	3.614784	24
33	33	12		33	33	46	
43.33333	33.33333	2.065591	13.33333	43.33333	33.33333	3.614784	25.33333
33	33	12	33	33	33	46	33
43.33333	33.33333	2.581988	12	26	16	1.549193	4
33	33	9				34	
43.33333	33.33333	2.581988	13.33333	26	16	1.549193	5.333333
33	33	9	33			34	33
43.33333	33.33333	2.581988	14.66666	26	16	1.549193	6.666666
33	33	9	67			34	67
43.33333	33.33333	2.581988	16	26	16	1.549193	8
33	33	9				34	
43.33333	33.33333	2.581988	17.33333	26	16	1.549193	9.333333
33	33	9	33			34	33
43.33333	33.33333	3.098386	16	26	16	2.065591	8
33	33	68				12	
43.33333	33.33333	3.098386	17.33333	26	16	2.065591	9.333333
33	33	68	33			12	33
43.33333	33.33333	3.098386	18.66666	26	16	2.065591	10.66666
33	33	68	67			12	67
43.33333	33.33333	3.098386	20	22	12	1.549193	4
33	33	68				34	
43.33333	33.33333	3.098386	21.33333	22	12	1.549193	5.333333
33	33	68	33			34	33
43.33333	33.33333	3.614784	20	22	12	1.549193	6.666666
33	33	46				34	67
43.33333	33.33333	3.614784	21.33333	18	8	1.549193	4
33	33	46	33			34	
43.33333	33.33333	3.614784	22.66666	18	8	1.549193	5.333333
33	33	46	67			34	33

En la tabla 4.4 se muestra una relación de los ensayos realizados para esta configuración.

4.3.3 Escala 1:10, tercera configuración (altura de estructura de 18 cm)

Una vez terminados los ensayos realizados con la escala 1:15 se retiraron del canal de oleaje todas las piezas y fueron introducidas los elementos a escala 1:10. De esta escala se fabricaron los elementos justos para una sola configuración que consiste en dos capas. La primera capa está formada por 5 filas de dos piezas, para un total de 10 elementos PR-B; el acomodo de estos elementos queda de tal

forma que en el frente de la estructura sobresalen 3 piezas (una en cada extremo y una al centro). La segunda capa está formada por 5 elementos PR-T que reposan sobre cada fila que conforma la base. Esto da un total de 15 elementos para formar un dique con dimensiones: 76 cm de largo y 78 cm de ancho en la base, y una altura de 18 cm, que llevados a tamaño real serían 7.60 m de largo por 7.80 m de ancho en la base, y una altura de 1.80¹ m. Este acomodo y el armado de la estructura se puede observar en la figura 4.12.



Figura 4. 13. Armado de la estructura, escala 1:10.

Se comenzó con una profundidad de 34 cm para tener un nivel de sumergencia de 6 cm, y se logró ensayar hasta una altura de ola de 14 cm y 2.53 s, pues, a partir de esta condición las olas comenzaban a romper. Para poder ensayar el resto de olas y observar el comportamiento de la estructura bajo condiciones más fuertes de oleaje, se aumentó el nivel del agua hasta los 60 cm, lo que da un nivel de sumergencia de 32 cm; hablando del tamaño real se tendría una profundidad de 6 m y una estructura sumergida 3.20 m por debajo del nivel medio del mar.

Para el segundo grupo de ensayos, se niveló el agua hasta la corona de las estructuras, descendiendo el nivel del agua hasta los 28 cm. Con esta profundidad se pudieron realizar ensayos para 3 alturas de ola: 6, 8 y 10 cm, las tres con un periodo de 1.90 s; antes de que las olas comenzaran a romper.

¹ Cabe aclarar que para la escala 1:15 no se mencionan las dimensiones reales a lo ancho y largo de la estructura, pues, como se mencionó anteriormente, estas dimensiones fueron ajustadas de acuerdo al ancho del canal.

Por último se ensayo una condición de estructura emergida, con un francobordo de 6 cm, para lo cual se llevó el nivel del agua hasta los 22 cm. Con esta profundidad, únicamente se lograron ensayar dos alturas de ola: 6 y 8 cm, ambas con un periodo de 1.90 s; a partir de estas condiciones las olas comenzaron a romper.

En la tabla 4.5 se muestran los ensayos realizados.

Tabla 4. 5. Condiciones ensayadas para la escala 1:10 y altura de la estructura de 18 cm.

h_{Total} (cm)	h_{pie} (cm)	T (s)	H_m (cm)	h_{Total} (cm)	h_{pie} (cm)	T (s)	H_m (cm)
60	50	2.52982213	18	60	50	4.42718872	36
60	50	2.52982213	20	60	50	4.42718872	38
60	50	3.16227766	18	34	24	1.8973666	6
60	50	3.16227766	20	34	24	1.8973666	8
60	50	3.16227766	22	34	24	1.8973666	10
60	50	3.16227766	24	34	24	1.8973666	12
60	50	3.16227766	26	34	24	1.8973666	14
60	50	3.79473319	24	34	24	2.52982213	12
60	50	3.79473319	26	34	24	2.52982213	14
60	50	3.79473319	28	34	24	2.52982213	16
60	50	3.79473319	30	28	18	1.8973666	6
60	50	3.79473319	32	28	18	1.8973666	8
60	50	4.42718872	30	28	18	1.8973666	10
60	50	4.42718872	32	22	12	1.8973666	6
60	50	4.42718872	34	22	12	1.8973666	8

Capítulo 5. Resultados

5.1 Análisis descriptivo

Además del estudio numérico de los ensayos realizados a las estructuras, también es importante detallar algunos fenómenos que se observaron durante los ensayos, y que pudieron ser capturados mediante el uso de cámaras fotográficas y de video.

Visualmente y de perfil, que es como se observan los ensayos normalmente, resulta complicado observar la reflexión del oleaje; sin embargo, en una fotografía tomada desde la parte superior de la estructura (vista en planta) se alcanzan a apreciar ondulaciones que parecen avanzar en sentido contrario a la dirección del oleaje después de que se presentó la rotura (figura 5.1). Sin embargo, a simple vista y de perfil, cuando el valle coincide con la posición de la estructura se pudo apreciar durante los ensayos una ligera corriente generada en sentido contrario a la dirección del oleaje; esta misma corriente se encuentra con el oleaje incidente y al entrar en contacto crea una alteración en la superficie libre del agua. Este fenómeno puede observarse en la figura 5.2, y corresponde a una altura de ola de 16 cm, periodo de 2.58 s y profundidad de 47.33 cm, y se presentó durante los ensayos del dique 2.



Figura 5. 1. Reflexión del oleaje vista en planta.

En los casos donde el dique tiene un menor nivel de sumergencia (4 cm en escala 1:15 y 6 cm en escala 1:10) la influencia del dique sobre la superficie libre comienza a ser evidente; los valles de las ondas, especialmente con amplitudes altas, prácticamente alcanzan la estructura. Se presenta el mismo fenómeno mencionado anteriormente: las ondas tienden a tomar la forma de la estructura, generando pequeñas corrientes de retorno que afectan el oleaje incidente; en la figura 5.3 se muestra una secuencia de imágenes con diferentes alturas de ola (en orden ascendente) en la que se puede observar este comportamiento. Cuando estas mismas corrientes se presentan en las piezas posteriores, sienten la influencia de las que se encuentran más cercanas a la generación del oleaje, generando así una turbulencia que parece adquirir la forma de un vórtice, como se observa en la figura 5.4; este fenómeno se podía apreciar mejor cuando se trabajó con la escala 1:10, pues por las dimensiones propias de la escala, se tenía un mayor espaciamiento entre las piezas, existiendo un mayor espacio para la generación de estas turbulencias.

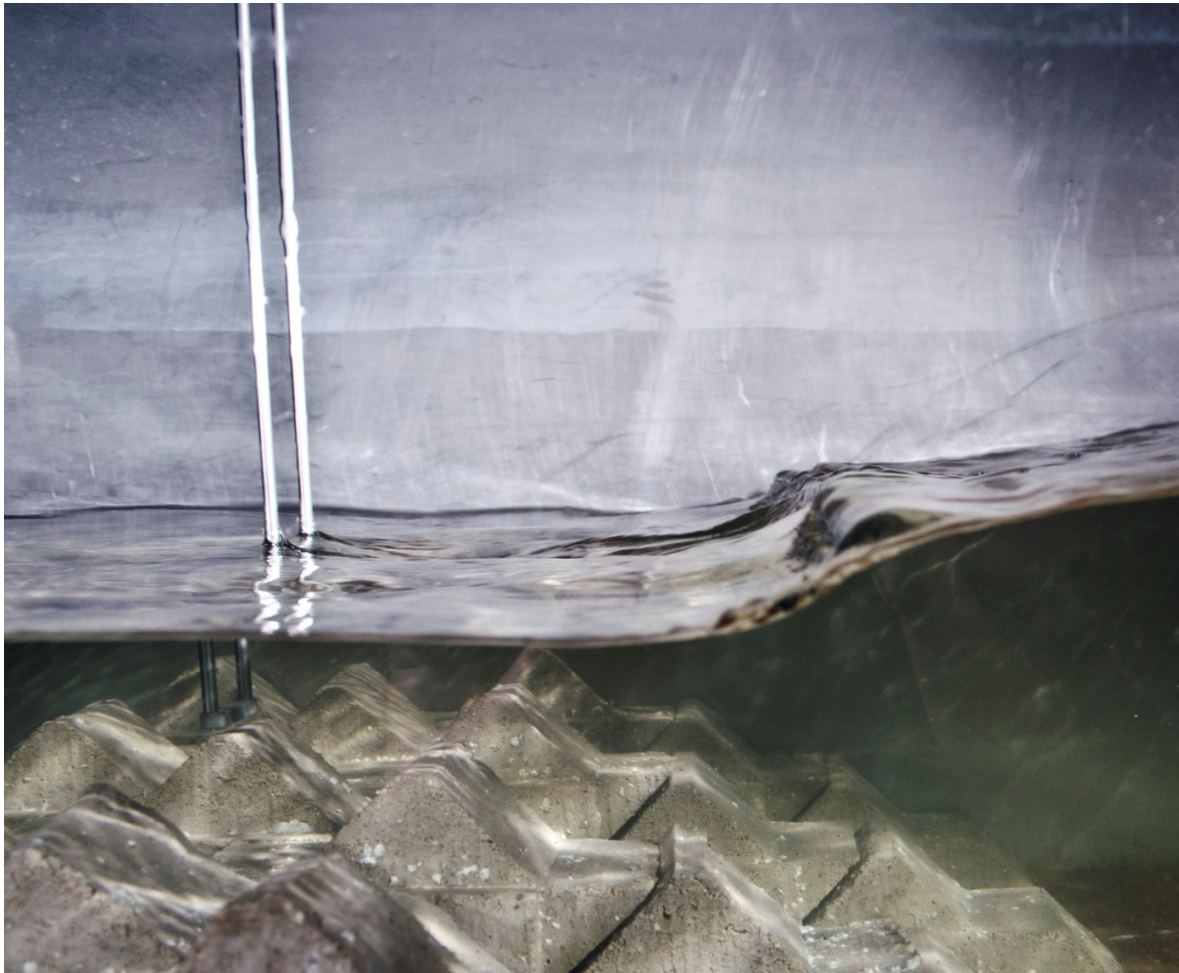


Figura 5. 2. Reflexión del oleaje inducido por la estructura. $H = 16$ cm, $T = 2.58$ s.

Cuando se ensayaron condiciones en las cuales la estructura estaba coronada al nivel medio del agua, o tenía un francobordo igual a la mitad de la altura de los elementos (4 cm para la escala 1:15, 6 cm para la escala 1:10), se observó durante los ensayos que el oleaje incidía directamente sobre las paredes frontales de las piezas superiores, como se observa en la figura 5.5, disipando gran parte de la energía; situación que es evidente al observar los coeficientes de transmisión correspondientes a estas condiciones, que en su mayoría fueron bajos; y al mismo tiempo, aumentando los valores de los coeficientes de reflexión. Cuando la amplitud de la onda coincidía con el francobordo, existió cierto rebase del oleaje sobre las crestas de las piezas. Esto, aunado a los espacios existentes en el dique, pudo contribuir a la disminución de la reflexión del oleaje.

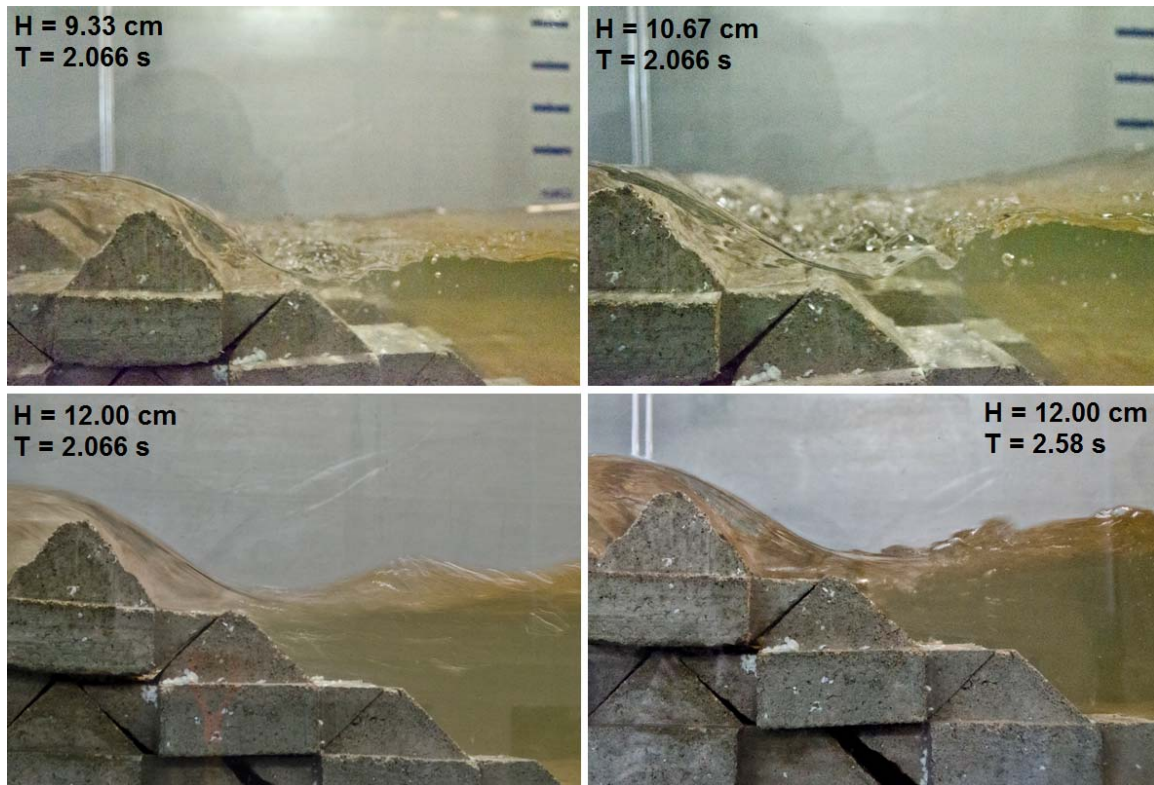


Figura 5. 3. Corrientes de retorno en la interacción oleaje-estructura ($h = 30 \text{ cm}$).



Figura 5. 4. Vórtices entre las crestas de las piezas.



Figura 5. 5. Oleaje incidiendo sobre estructura coronada al nivel medio del agua.

Una de las situaciones que llamaron la atención fue el hecho de que las olas con amplitudes más pequeñas eran peraltadas, dando como resultado olas de mayor amplitud después de haber incidido sobre la estructura. Estas olas sienten el efecto de la estructura peraltándose, sin embargo, su amplitud no es lo suficientemente grande como para descrestar por efectos de gravedad, manteniendo así una amplitud ligeramente mayor y dando como resultado, coeficientes de transmisión elevados cuando se ensayaba el oleaje con menor altura. Esta situación alcanza a apreciarse en la figura 5.6, correspondiente a una altura de ola $H=4$ cm y periodo $T=1.549$ s, donde se observa una onda que se va peraltando justo cuando está incidiendo sobre la estructura.



Figura 5. 6. Oleaje peraltado. $H=4$ cm, $h=30$ cm, $T=1.549$ s.

La función principal del dique construido a partir de los elementos propuestos es disipar energía por medio de la rotura del oleaje, función que la estructura final cumplió en la mayoría de los casos. En la figura 5.7 se observa una secuencia de imágenes en las que se alcanza a apreciar cómo el oleaje descresta al pasar sobre la parte más alta de la estructura, disipando parte de la energía.

Cuando se tenían condiciones donde la estructura estaba coronada al nivel medio del agua, la rotura se presentaba sobre el talud expuesto de la estructura. Esto se puede observar en la figura 5.8. Como se estableció anteriormente, en estas condiciones, los coeficientes de transmisión fueron principalmente bajos.



Figura 5. 7. Ola rompiendo cuando incide sobre la estructura. $H=9$ cm, $h=30$ cm.



Figura 5. 8. Ola rompiendo sobre el talud de la estructura. $H=4$ cm, $h=26$ cm.

Los ensayos en los que se trabajaron niveles de agua elevados dentro del canal, sirvieron sí, para determinar cuánta transmisión y reflexión permitía este diseño, pero también se buscaba determinar las condiciones de falla de la estructura (en caso de que ésta se presentase). La estructura no presentó fallas y de hecho no se notó movimiento en ninguna de las piezas.

Incluso bajo estas condiciones en las que la estructura tenía una mayor sumergencia, se observaron casos en los cuales la estructura provocaba la rotura de las olas, como se observa en la figura 5.9. Esta fotografía corresponde a un ensayo de condiciones $H=18.67$ cm, $T=3.098$ s, $h=47.33$ cm. Como se aprecia, la onda rompe en voluta al pasar sobre la parte más alta de la estructura.

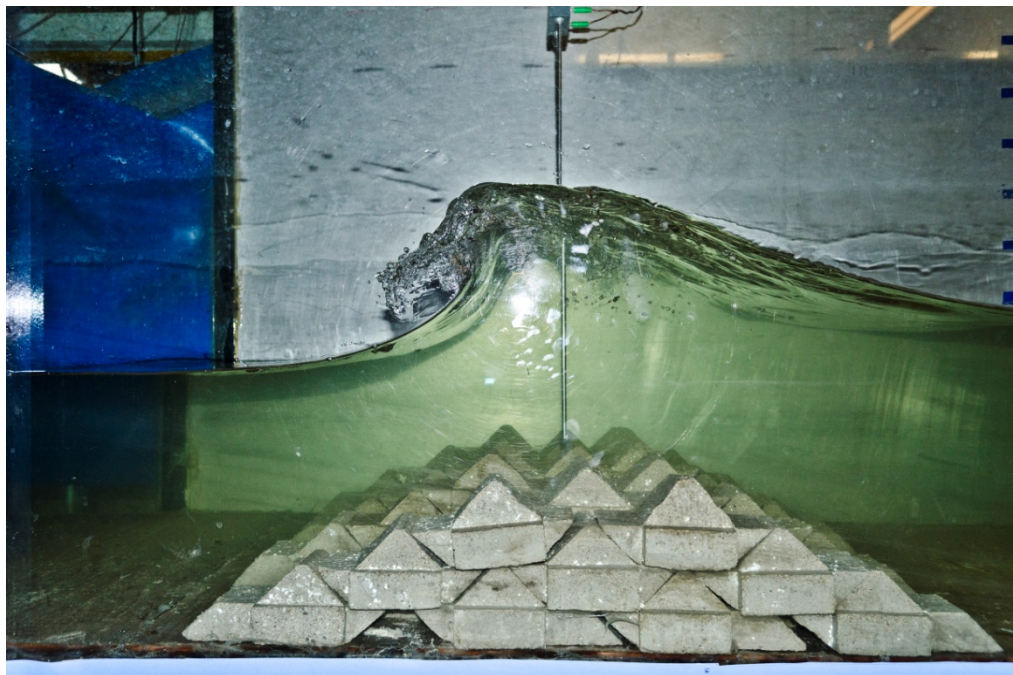


Figura 5. 9. Oleaje rompiendo con nivel máximo de sumergencia, $h=40$ cm, $fb=18$ cm.

En otra fotografía similar, mostrada en la figura 5.10 se puede observar con mayor detalle el momento en que una ola rompe una vez que incide sobre la estructura. Esta imagen corresponde a una profundidad $h=47.33$ cm, altura de ola $H=20$ cm y periodo $T=3.098$ s.

Sin embargo, independientemente de la función propia que se espera de un rompeolas (que es, como su nombre lo indica, provocar la rotura de las olas) una de las hipótesis planteadas cuando se tuvo el diseño final del elemento propuesto fue que la forma final del dique podría contribuir a la disipación de la energía del oleaje, también, por medio de la fricción que puede generar sobre el agua.

Existen diferentes tipologías para la construcción de diques rompeolas, algunas de ellas estudiadas en el capítulo 2, que incluyen rugosidades o irregularidades en los taludes del dique para contribuir a la disipación de la energía por medio de la fricción. Para esta tipología, se tiene una forma escalonada a lo largo del talud, y una forma alternada a lo ancho del dique, con el que se pretende generar fricción con el oleaje incidente. Aunque en primera instancia es difícil determinar qué porcentaje de la energía fue disipado por la fricción y qué porcentaje fue disipado por rotura, visualmente, durante los experimentos se pudo observar que la estructura tenía una fuerte influencia sobre el oleaje incidente, esto incluso, cuando la estructura se encontraba con un mayor nivel de sumergencia.

Anteriormente, se mencionó y se observó una cierta influencia cuando la onda descendía y el valle coincidía con la posición de la estructura. Sin embargo, esta misma influencia se observó con el paso de la onda completa cuando pasaba sobre la estructura, incluso durante la rotura de la ola.



Figura 5. 10. Rotura del oleaje vista a detalle.

En la figura 5.11, se puede observar cómo la forma del frente de onda que está rompiendo presenta irregularidades, que podrían estar dadas por los espacios que hay en la parte superior de la estructura.

En las figuras 5.12 y 5.13, se puede apreciar esta misma irregularidad en la cresta de la onda, desde la parte inferior, una vez que la onda pasó sobre la estructura (figura 5.12); y la parte frontal, antes de que la onda pase sobre la estructura (figura 5.13). En estas imágenes se pueden apreciar zonas que sobresalen en forma de picos achatados y que se ven bien definidos, y corresponden a la misma condición de oleaje: altura de ola $H=17.33$ cm, periodo $T=2.852$ s, y profundidad $h=47.33$ cm.

Este fenómeno puede estar relacionado propiamente con la disposición alternada de las piezas superiores. En la primera configuración trabajada con la escala 1:15, la capa superior está compuesta por filas de dos y un elemento alternadamente; en la segunda configuración trabajada con la escala 1:15, y con el caso de la escala 1:10, la segunda (última) capa está formada por elementos que se encuentran de forma alternada uno detrás del otro. Con esto, la forma de la cresta no será la misma en todo lo ancho de la estructura, pues en algunos puntos se tiene la influencia de dos elementos; y en otros casos, se presenta primero la influencia de un elemento antes de ocurrir con el otro.



Figura 5. 11. Rotura deformada por la forma de la estructura.



Figura 5. 12. Rotura de la ola deformada por la estructura (vista posterior).

Aún cuando las olas no rompen o no descrestan, la forma de la estructura se hizo evidente cuando una onda pasa por encima de ella. En la figura 5.14 se puede observar cómo se marca la influencia de la estructura sobre la superficie libre del agua, vista desde abajo.



Figura 5. 13. Rotura de la ola deformada por la estructura (vista frontal).



Figura 5. 14. Superficie libre influida por la forma de la estructura.

Esto habla de la influencia que sin duda tiene la estructura sobre el oleaje, que hasta ahora únicamente ha sido observada por medio de fotografías.

5.2 Metodología propuesta

Después de realizarse los experimentos y procesar los datos obtenidos de los sensores de nivel, se procedió a calcular los coeficientes de reflexión, transmisión y disipación; y se graficaron contra diferentes parámetros adimensionales con el propósito de determinar qué parámetro describe mejor los fenómenos que se presentaron durante los ensayos, y poder proponer una primera metodología de diseño de estructuras rompeolas a partir de la tipología propuesta en este trabajo.

Una vez que se presentan las gráficas, se buscará una ecuación que pueda representar los fenómenos de reflexión y transmisión generados con una misma estructura a dos escalas diferentes, 1:10 y 1:15; y una tercera estructura a escala 1:15; a fin de proporcionar una ecuación de diseño que permita a los usuarios de la tipología propuesta, tener una estimación de los valores de reflexión y transmisión que se tendrían con una configuración determinada de la estructura.

Al separar la señal de oleaje utilizando dos métodos distintos, se tienen dos oleajes incidentes y reflejados: uno para el método de Goda y Suzuki (1976), y otro para Mansard y Funke (1980). De esta manera, se obtuvieron dos coeficientes distintos de reflexión y transmisión para cada acomodo de la estructura.

Así mismo, se presenta un análisis detallado de lo observado durante cada prueba, en fotografías, y en los videos de alta velocidad sobre la interacción entre el oleaje y la estructura para cada caso ensayado.

Como se mencionó en el capítulo 4, se construyeron 3 diques:

- a) 1 dique, escala 1:10 y dimensiones: 76 cm de ancho de base y 18 cm de alto.
- b) 1 dique, escala 1:15 y dimensiones: 52 cm de ancho de base y 12 cm de alto.
- c) 1 dique, escala 1:15 y dimensiones: 79 cm de ancho de base y 16 cm de alto.

Cabe recordar que las dimensiones de los diques 'a' y 'b' llevadas a tamaño real corresponden a un mismo dique; mientras que el dique 'c' funge como punto de comparación, y su intención es probar la capacidad modular de la tipología propuesta.

A continuación, se propone una metodología de diseño para estos diques, que serían:

- Dique 1, con dimensiones en tamaño real: 7.60 m de ancho de base y 1.80 m de altura (diques 'a' y 'b');
- Dique 2, con dimensiones en tamaño real: 11.85 m de ancho de base y 2.40 m de altura (dique 'c').

Así mismo, en el Anexo A se muestran los resultados numéricos obtenidos a partir de los ensayos realizados.

El dique 1, consiste en la colocación alternada de 1 elemento PR-T sobre 2 elementos PR-B como se muestra en la figura 5.15. Sin embargo, la cantidad total de piezas dependerá de la escala utilizada y del ancho del canal, pues, mientras que para la escala 1:10 sólo se necesitan 5 hileras de piezas para abarcar todo el ancho del canal, para la escala 1:15 se necesitan 7 hileras de piezas. Esto da un total de 15 elementos (10 PR-B y 5 PR-T) para la escala 1:10 y 21 elementos (14 PR-B y 7 PR-T).

Las filas que componen el dique tienen una posición alternada en el sentido longitudinal de la estructura, de manera que, vista en planta, la estructura tendrá una cantidad n de filas en una posición y una cantidad de filas $n-1$ desplazadas una distancia $h_{\text{estructura}}/2$ hacia la parte protegida. Esta configuración se muestra en la figura 5.16.

5.2.1 Dique 1



Figura 5. 15. Dique 1 (escala 1:10).

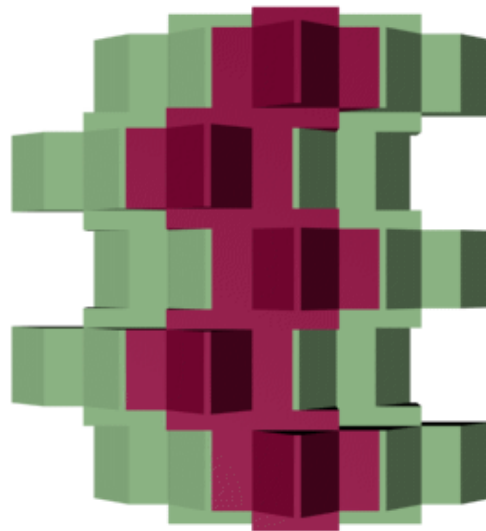


Figura 5. 16. Esquema del dique 1, visto en planta

5.2.1.1 Resultados

Haciendo el análisis para conocer los coeficientes de reflexión y transmisión, se trabajó con diferentes parámetros adimensionales. Finalmente, se observó que al presentar los coeficientes de reflexión y transmisión, en función del parámetro adimensional Fb/Hi el fenómeno se ve bien caracterizado, permitiendo incluso obtener una ecuación representativa de los resultados. Por convención, el

francobordo se considera negativo cuando la estructura está sumergida, y positivo cuando ésta es emergida; sin embargo, en este trabajo se considera lo contrario: francobordo positivo cuando la estructura está sumergida, y francobordo negativo cuando ésta se encuentra emergida; esto con la finalidad de observar la tendencia de los gráficos y poder ajustar una ecuación exponencial.

Para estimar la altura de ola incidente, se tomaron en cuenta tres posibilidades: la altura de ola medida en el primer sensor, la altura de ola incidente calculada a partir de los métodos de Mansard y Goda, o la altura de ola propuesta originalmente. Es importante señalar que al tratarse de un oleaje regular, lo ideal es trabajar con altura de ola cuadrática media para casos de oleaje regular; sin embargo, a pesar de que se modelaron casos únicamente con oleaje regular, el comportamiento de las olas no fue constante, teniendo por instantes alturas de ola con menor amplitud, es por ello que se trabajó con alturas de ola significantes para el procesamiento de los datos.

Para la presentación de los resultados en este capítulo, únicamente se muestran los gráficos correspondientes al oleaje incidente obtenido a partir del método de Mansard y Funke (1980) que es el que permite observar tendencias más claras. El resto de los resultados se presenta en el Anexo B.

Reflexión

Para el caso del primer dique, se muestran, en la figura 5.3, los coeficientes de reflexión correspondientes al dique 1 en ambas escalas.

Como se observa en el gráfico, para la escala 1:15 se tienen valores del coeficiente de reflexión principalmente bajos, en comparación con los que se presentan en la estructura 1:10, lo que quiere decir que la estructura a escala 1:10 sería más reflejante.

Sin embargo, un aspecto muy importante a considerar es el factor de escala: mientras que, para la escala 1:10 se plantearon medidas a lo largo del dique, éste no pudo ser escalado como tal a 1:15, pues se tiene como restricción el ancho del canal de oleaje. Por este motivo, las piezas escala 1:15 tuvieron que dimensionarse de tal forma que abarcaran todo el ancho del canal, y no corresponden exactamente a la escala 1:10. Debido a lo anterior, la cresta de la estructura escala 1:10 tiene una mayor superficie de contacto que la estructura escala 1:15.

En la figura 5.17 también se observa una cierta tendencia a la disminución del coeficiente de reflexión conforme el parámetro adimensional Fb/H_i aumenta, es decir, conforme la sumergencia de la estructura tiende a aumentar y la altura de ola a disminuir.

Cuando la profundidad es mayor y la estructura se encuentra más sumergida, sí hay reflexión y sí existe una influencia de la estructura sobre el oleaje, pero éstas

son apenas notorias. Si la profundidad se disminuye, teniendo la estructura, sí, sumergida pero más cerca del nivel medio del agua, la influencia de la estructura comienza a ser más evidente, aumentando los coeficientes de reflexión. Cuando la estructura está coronada al nivel medio del agua, una gran parte del oleaje comienza a incidir directamente sobre las caras frontales de los elementos, reflejando gran parte de la energía del oleaje; misma situación cuando la estructura se encuentra completamente emergida.

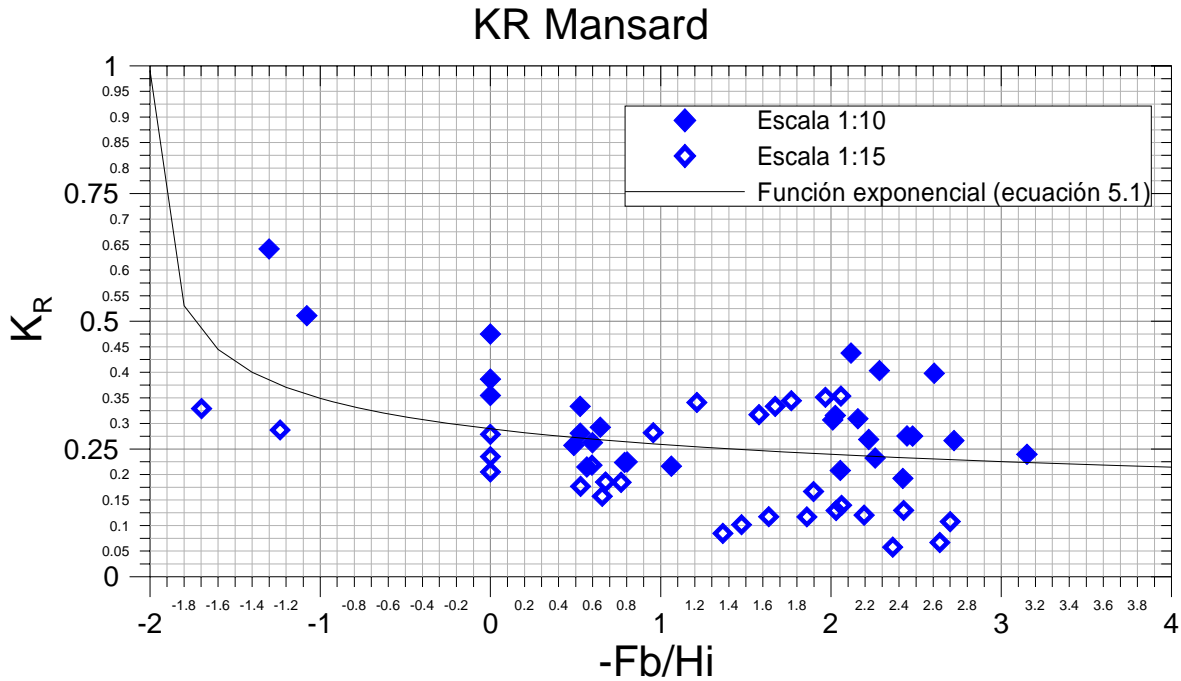


Figura 5. 17. Coeficiente de reflexión a partir de la altura de ola incidente significativa obtenida por el método de Mansard y Funke (1994) para el dique 1.

Aunque existe mucha dispersión en los datos, se ajustó una ecuación que permitiría tener una estimación del coeficiente de reflexión utilizando esta configuración de estructura.

La ecuación queda expresada como:

$$K_R = 0.3512 \left(2.023 + \frac{Fb}{H_i} \right)^{-0.275} \quad (5.1)$$

Tomando en cuenta:

$fb > 0$ Para estructuras emergidas;

$fb < 0$ Para estructuras sumergidas.

Esta ecuación se puede observar en la misma figura 5.17, representada por una línea negra. Sin embargo, comparando los datos obtenidos a partir de la ecuación

5.1 con los obtenidos experimentalmente, el coeficiente de correlación R^2 tiene un valor de 0.5, por lo cual no se puede considerar como aceptable.

La disipación encontrada en los datos puede estar relacionada, principalmente, con el uso de dos escalas distintas para una misma configuración de dique sumergido, por lo que se estaría hablando de efectos de escala; esto se deduce al observar que los datos de cada escala tienden a agruparse entre sí, presentando una cierta separación entre los coeficientes de reflexión de ambas escalas.

Dichos efectos de escala no han sido estudiados a profundidad en este trabajo, e incluso, es posible que sea necesaria la realización de más ensayos, modelando diferentes configuraciones y escalas para observar qué es lo que hace que los valores de los coeficientes de reflexión sean tan diferentes entre ambas escalas. De manera preliminar, se puede establecer como hipótesis que uno de los parámetros que afectan directamente a la reflexión de la estructura es la porosidad de la misma, siendo un parámetro que no es posible escalar; esto, debido a la condicionante que se tiene para adaptar ambas escalas a un solo ancho fijo del canal.

Tomando en cuenta los efectos de escala, se puede encontrar una ecuación para cada grupo de datos, de tal manera que cada escala cuente con una función que permita estimar el valor del coeficiente de reflexión para esta configuración del dique. En la figura 5.18 se pueden observar los grupos de datos con sus respectivas funciones de ajuste.

La ecuación que permite estimar el coeficiente de reflexión, para la escala 1:10 está dada por la expresión:

$$K_R = 0.5286 \left(2.225 + \frac{Fb}{H_i} \right)^{-0.432} \quad (5.2)$$

Si se comparan los valores obtenidos con la ecuación 5.2, con los valores obtenidos a partir de los ensayos, se tiene un coeficiente de correlación, $R^2=0.8$, el cual se considera aceptable.

Mientras que la ecuación que permite estimar el coeficiente de reflexión, para la escala 1:15 está dada por la expresión:

$$K_R = 0.264305 \left(2.005 + \frac{Fb}{H_i} \right)^{-0.2512} \quad (5.3)$$

Si se comparan los valores obtenidos con la ecuación 5.3, con los valores obtenidos a partir de los ensayos, se tiene un coeficiente de correlación, $R^2=0.7$. Este coeficiente de correlación indica que la ecuación puede ser aceptada, sin embargo, habría que utilizarla con precaución para no sobreestimar valores de coeficientes de reflexión.

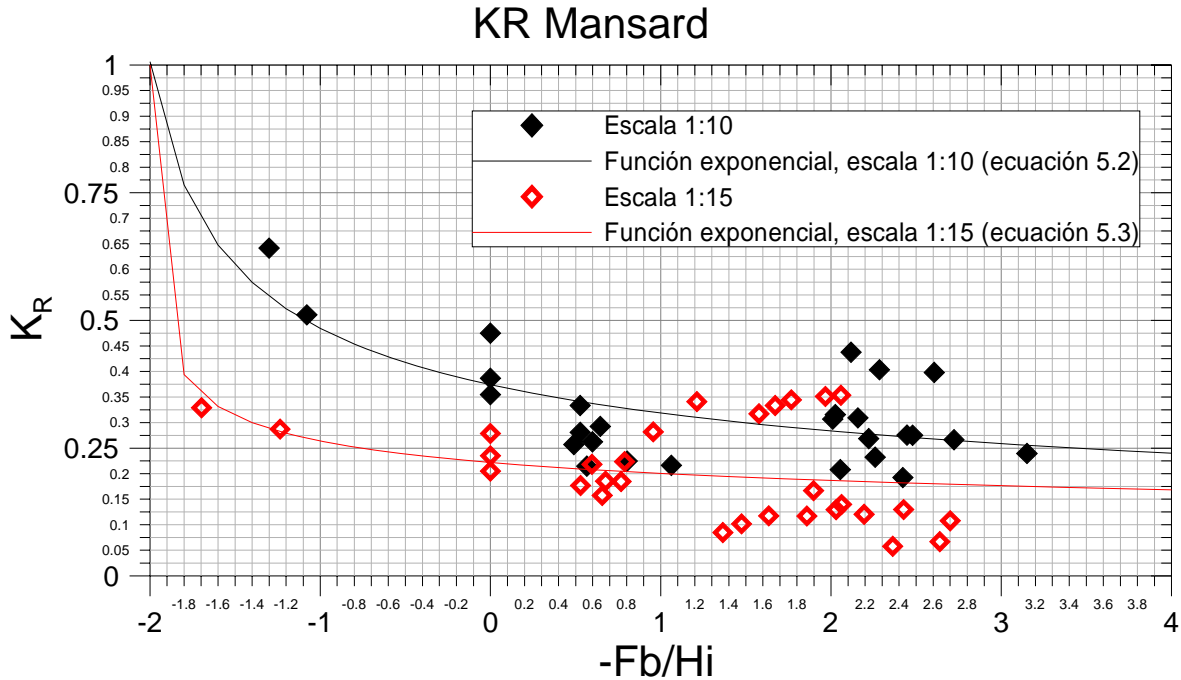


Figura 5. 18. Coeficientes de reflexión para ambas escalas, con su respectiva función de ajuste.

Transmisión

Uno de los parámetros más importantes para el diseño de una estructura de disipación del oleaje es el coeficiente de transmisión. Entre menor sea éste, la estructura se considerará más eficiente, sin dejar de lado los coeficientes de reflexión. Por este motivo, se realizará un análisis más minucioso de la transmisión con las diferentes configuraciones de la estructura, a fin de determinar las condiciones bajo las cuales el coeficiente de transmisión supera el 100% ($K_T \geq 1.00$) y así poder fijar límites sobre las condiciones en las que se podrán utilizar los elementos para la construcción de estructuras de protección de una playa.

Una vez graficados los coeficientes de transmisión, se buscó ajustar una función exponencial que pueda representar lo mejor posible el fenómeno, tal como se hizo con los coeficientes de reflexión. Con esta ecuación se pretende: ofrecer información de diseño que permita patentar la tipología propuesta; y ofrecer a los usuarios de esta tipología, una ecuación que les permita tener una estimación de la transmisión que se tendrá utilizando la tipología y configuración ensayada a escala.

Disponiendo de esta información, los usuarios podrían determinar si esta tipología es la indicada para utilizarse en determinadas zonas costeras; o bien, determinar si esta disposición de los elementos (que tiene como ventaja la poca cantidad de piezas) es la adecuada para proteger una playa.

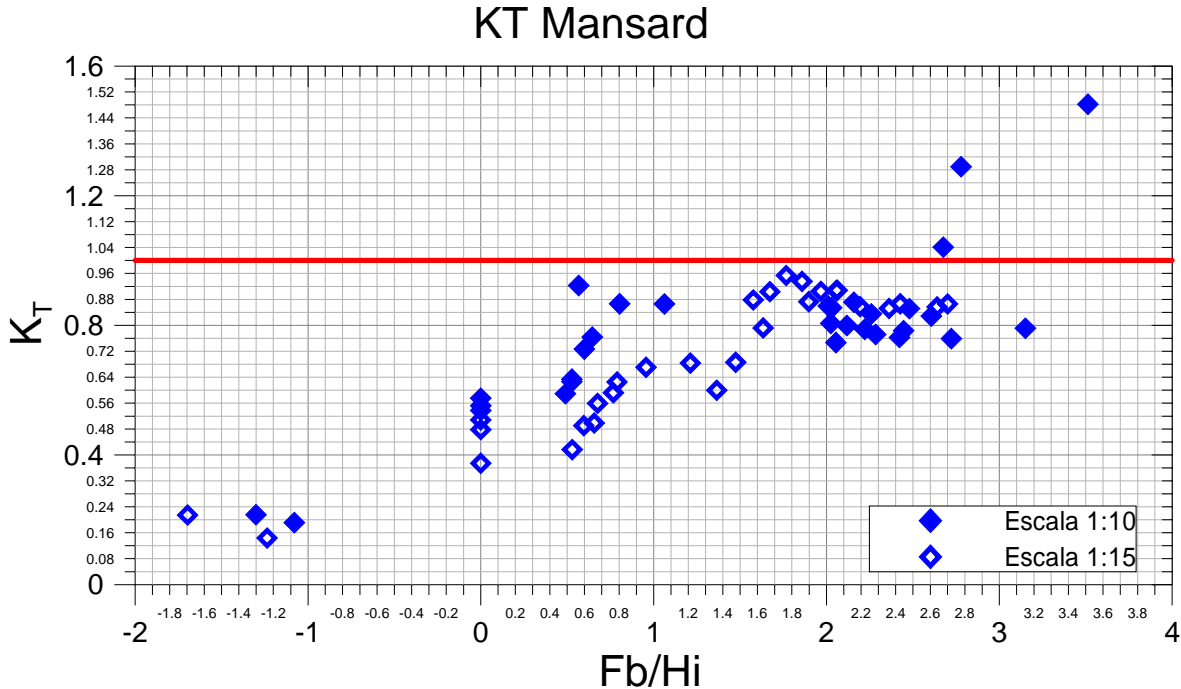


Figura 5. 19. Coeficiente de transmisión a partir de la altura de ola incidente significativa obtenida por el método de Mansard y Funke (1994) para el dique 1.

Los coeficientes de transmisión también fueron graficados como una función del parámetro adimensional Fb/Hi . En el gráfico (figura 5.19) se observa claramente una tendencia al aumento de la transmisión conforme la profundidad aumenta sometiendo a la estructura a un mayor nivel de sumergencia.

Cuando la estructura está emergida, la transmisión del oleaje es muy baja, alcanzando apenas un valor de $K_T=0.25$. Coronada al nivel medio del agua, los valores del coeficiente de transmisión comienzan a aumentar; sin embargo, son las olas de baja amplitud aquellas que provocaban una mayor transmisión del oleaje, pues la estructura únicamente alcanza a peraltarlas, provocando así un ligero aumento en la altura de ola transmitida. Con un nivel de sumergencia igual a la mitad de la altura de cada pieza, la transmisión del oleaje aumenta, sin embargo, el coeficiente de transmisión se sigue manteniendo por debajo del valor $K_T=1$, lo que indica que la estructura sumergida efectivamente cumple con su propósito de disipar la energía del oleaje. Es cuando la estructura está bajo un mayor nivel de sumergencia que el coeficiente de reflexión aumenta, manteniéndose por arriba de $K_T=0.75$; e incluso en tres casos, correspondientes a la estructura de escala 1:10 la transmisión supera el valor de $K_T=1$.

Analizando las condiciones bajo las cuales la transmisión del oleaje supera el 100%, se observó que esto ocurre cuando el parámetro adimensional Fb/Hi es mayor que 1.5 y, simultáneamente, el parámetro adimensional Hi/L es menor que

0.012. Estas condiciones no deben presentarse para que el coeficiente de transmisión no sea mayor que 1.

Si se aplica dicha condición, en ningún caso la estructura estaría permitiendo una transmisión del oleaje mayor que 100%, es decir, en mayor o menor medida (como se verá más adelante) estará disipando oleaje aún bajo condiciones donde la profundidad sea más de cuatro veces mayor, y la altura de ola, sea más de 3 veces la altura de cada pieza.

En la figura 5.20 se pueden observar nuevamente los coeficientes de transmisión para esta configuración del dique, aplicando las condiciones bajo las cuales la estructura estará disipando la energía del oleaje.

A este grupo de valores, se le puede ajustar una función exponencial que represente el fenómeno de la transmisión del oleaje. Esta ecuación es:

$$K_T = 1.1 * \left\{ 1 - \exp \left[-0.318 * \left(\frac{fb}{H_i} + 2 \right) \right] \right\} \quad (5.4)$$

Con la condición:

$$\begin{aligned} \frac{fb}{H_i} > 1.5 & \quad \frac{H_i}{L} > 0.012 \\ \frac{fb}{H_i} < 1.5 & \quad \frac{H_i}{L} < 0.012 \end{aligned}$$

La ecuación (5.4) se puede observar en la figura 5.20, y es representada por una línea negra que pasa sobre los coeficientes de transmisión.

En la figura 5.21 se grafican, en el eje de las abscisas los coeficientes de transmisión obtenidos a partir de las mediciones realizadas, y en el eje de las ordenadas los coeficientes de transmisión obtenidos a partir de la ecuación propuesta (ecuación 5.4) con la finalidad de hacer una comparación entre éstos; sobre esta gráfica se traza una función identidad cuyo propósito es el de separar el conjunto de datos en dos grupos: los datos que se encuentren por encima de la recta estarán siendo subestimados por la ecuación, mientras que aquellos que se encuentran por debajo de la misma estarán del lado de la seguridad. Calculando el coeficiente de correlación lineal entre ambos grupos de datos, se tiene un valor de $r=0.8785$, con lo cual se puede tener una estimación del coeficiente de transmisión bastante cercana a lo ocurrido durante los ensayos.

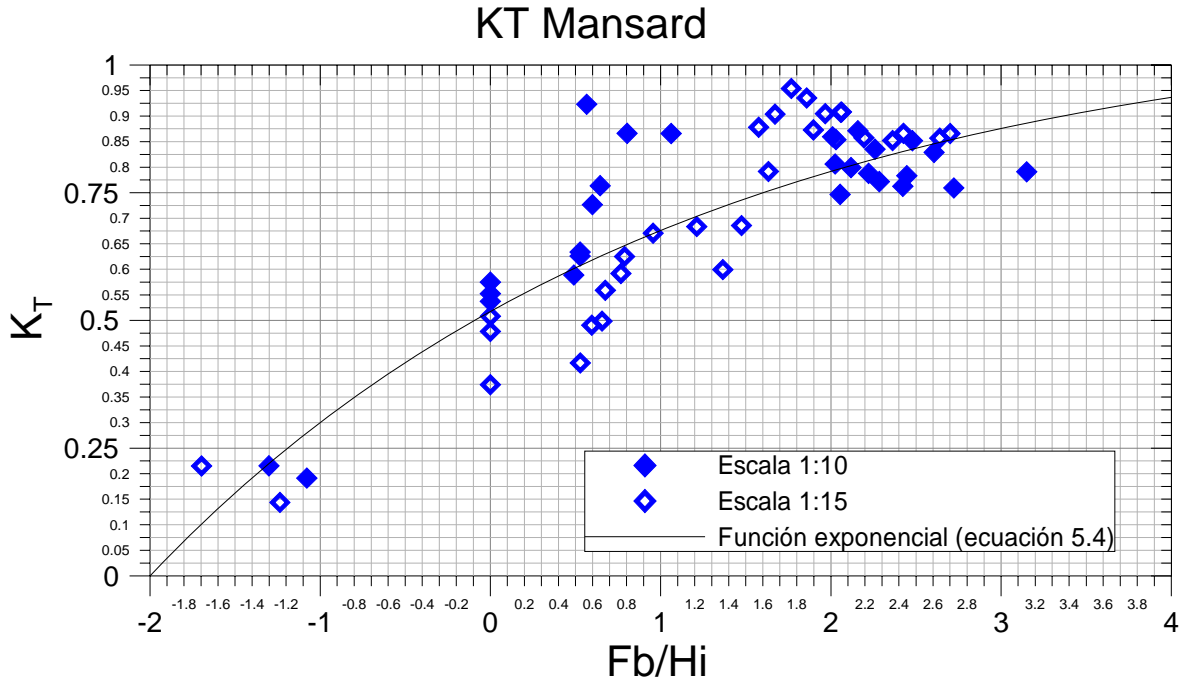


Figura 5. 20. Coeficiente de transmisión a partir de la altura de ola incidente significativa obtenida por el método de Mansard y Funke (1994) para el dique 1.

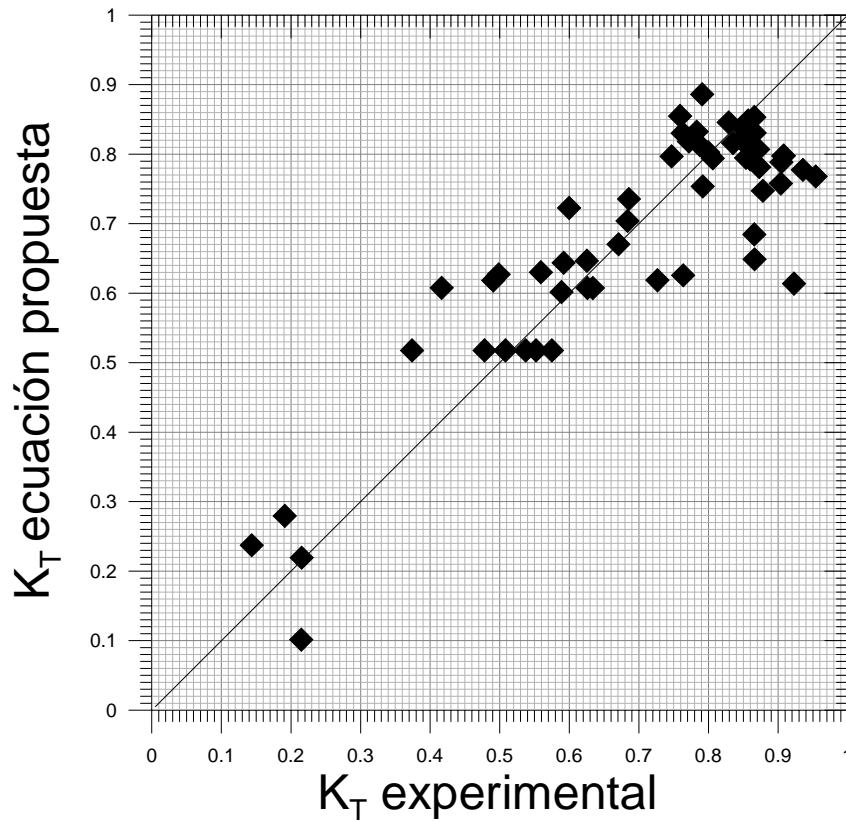


Figura 5. 21. Comparación entre los coeficientes de transmisión, experimental y teórico.

En la literatura existen expresiones que permiten hacer una estimación del coeficiente de transmisión a partir de diferentes parámetros, que son las siguientes:

Van der Meer y Daemen (1994)

$$K_T = a \frac{Fb}{D_{n50}} + b \quad (5.5)$$

Donde:

Fb Es el francobordo de la estructura;

D_{n50} Es el diámetro de la pieza, que en este caso se considera el largo de cada pieza;

$$a = 0.031 \frac{H_i}{D_{n50}} - 0.021$$

$$b = -5.42S_{op} + 0.0323 \frac{H_i}{D_{n50}} - 0.017 \left(\frac{B}{D_{n50}} \right)^{1.84} + 0.51$$

$$S_{op} = \frac{2\pi H_i}{gT^2}$$

Y su límite de aplicación es $0.075 \leq K_T \leq 0.800$.

D'Angremond et al. (1996)

$$K_T = -0.4 \frac{Fb}{H_i} + 0.64 \left(\frac{B}{H_i} \right)^{-0.31} [1 - \exp(-0.5\xi)] \quad (5.6)$$

Donde:

B Es el ancho de la cresta de la estructura;

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{S_{op}^{0.5}}$$

Y su límite de aplicación es $0.075 \leq K_T \leq 0.750$.

En la figura 5.22 se muestra una comparación entre los valores de los coeficientes de transmisión dados por las ecuaciones de Van der Meer (1994) (ecuación 5.5), d'Angremond et al. (1996) (ecuación 5.6) y la ecuación (5.4) propuesta en este trabajo; contra los valores de los coeficientes de transmisión obtenidos a partir de las mediciones realizadas en los ensayos.

Resulta evidente que la ecuación (5.4), propuesta en este trabajo es la que presenta un mejor ajuste con respecto a los valores obtenidos a partir de las mediciones, situación que se puede obviar, pues dicha expresión se obtiene a

partir de los valores experimentales. Por otro lado, los valores de los coeficientes de transmisión obtenidos a partir de la ecuación propuesta por d'Angremond et al. (1996) no presentan una diferencia considerable con los valores experimentales; especialmente para coeficientes de transmisión bajos a intermedios, los cuales corresponden a profundidades bajas; para coeficientes de transmisión mayores, correspondientes a profundidades mayores, la ecuación estaría sobre-estimando los coeficientes de transmisión, pero siempre con la misma tendencia al aumento de la transmisión conforme aumenta la profundidad. Finalmente, la ecuación de Van der Meer y Daemen (1994) presenta valores de coeficientes de transmisión que tienden a ser constantes, y únicamente los valores intermedios son los que presentan se encuentran más cercanos a los valores experimentales.

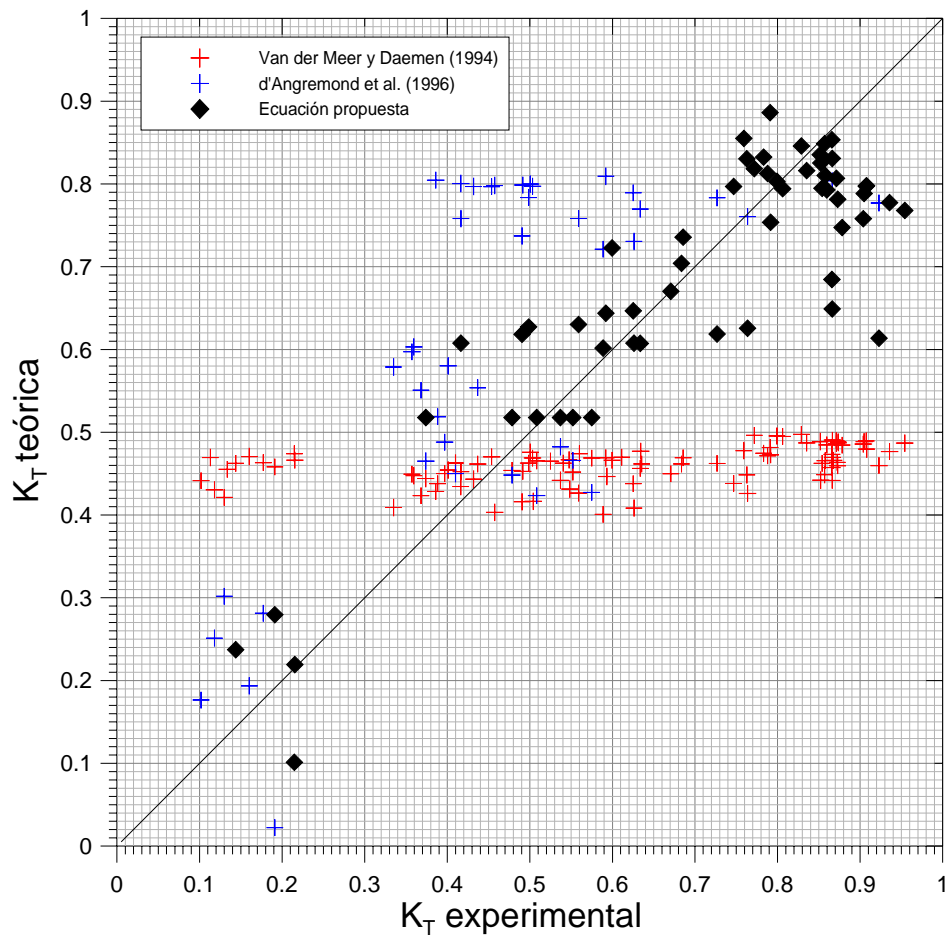


Figura 5. 22. Comparación entre los coeficientes de transmisión, experimentales y teóricos (diferentes autores).

Disipación

La disipación de la energía del oleaje se calcula a partir de la ecuación 5.7, como se muestra a continuación:

$$K_D = 1 - K_r^2 - K_T^2 \tag{5.5}$$

Se calculó el coeficiente de disipación, tomando en cuenta únicamente los valores para los cuales el coeficiente de transmisión no superaba el valor de $K_T=1$.

Los coeficientes de disipación se grafican como un mapa tridimensional para poder observar cómo se comporta la disipación del oleaje en relación a los parámetros Fb/H_i y H_i/L .

En la figura 5.23 se muestran estos coeficientes de disipación, y se observa una tendencia al aumento de la disipación del oleaje conforme la profundidad es mayor; esto es: conforme la estructura presenta un nivel de sumergencia menor, se corona al nivel medio del agua o si ésta es emergida, la disipación de la energía del oleaje tenderá a disminuir. En los casos en los que la estructura se modeló con un máximo nivel de sumergencia, los coeficientes de disipación presentan ligero aumento, para descender de nuevo conforme la profundidad aumenta; en general, para este caso de estudio, los coeficientes de disipación son menores, por lo que se puede inferir que la estructura tiene una baja capacidad de disipación para profundidades que superen más de 4 veces el tamaño de cada elemento.

Por otro lado, en la misma figura 5.23 se alcanza a apreciar que, con valores menores del parámetro H_i/L se tiene un ligero aumento en la disipación del oleaje; esto es, para olas de menor amplitud la disipación será ligeramente mayor que para olas con menor amplitud.

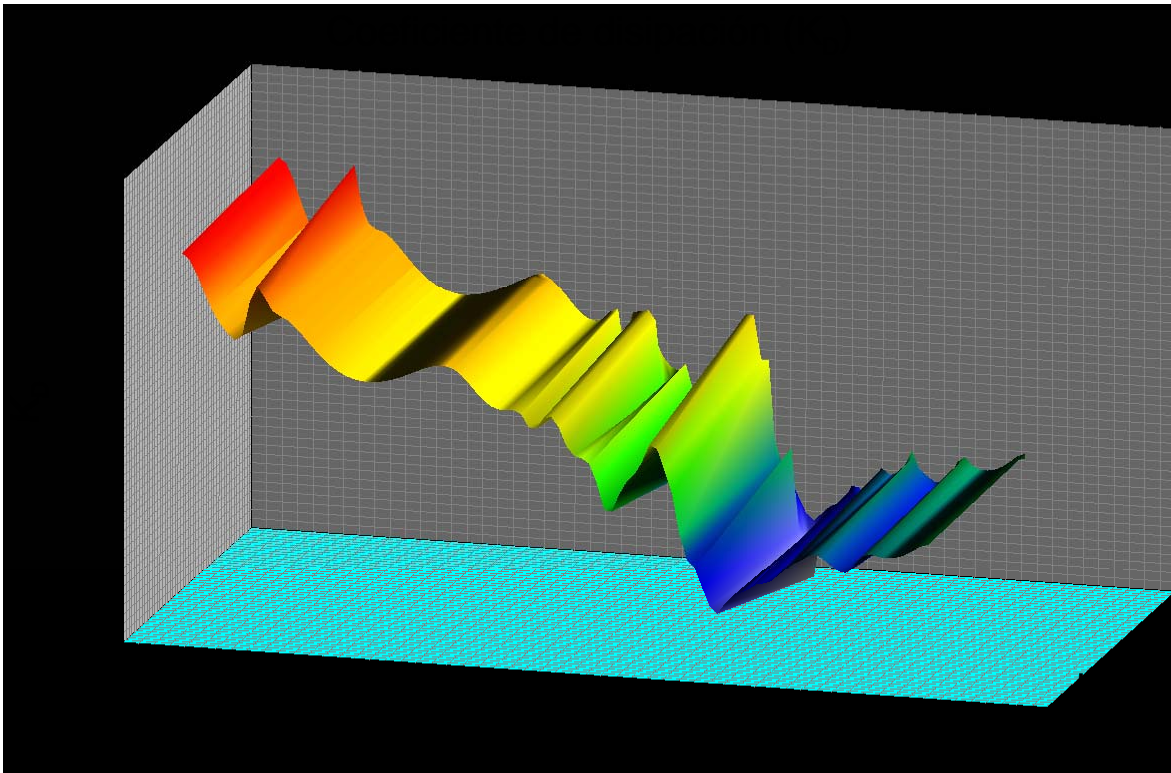


Figura 5. 23 Coeficiente de disipación para el dique 1.

5.2.2 Dique 2

En este segundo caso de estudio, correspondiente a un dique con escala 1:15 de mayor altura, mayor ancho por la utilización de un mayor número de piezas, se observaron patrones muy similares en cuanto a los fenómenos de reflexión y transmisión.

La construcción del dique 2 se realiza mediante la colocación de siete filas alternadas, constituidas por 3 capas de elementos. La primera fila tendrá una primera capa al fondo de 4 piezas PR-B (elementos base), una segunda capa con 3 piezas PR-T (elementos tipo) y una última capa con 2 piezas PR-T; la segunda fila tendrá una primera capa de 3 elementos PR-B, una segunda capa con 2 piezas PR-T y una última capa con 1 pieza PR-T. Estas filas se intercalan hasta alcanzar 7 y tener un dique simétrico visto desde su parte frontal o posterior. Esto da un total de 54 piezas: 25 elementos PR-B y 29 elementos PR-T. En la figura 5.24 se puede observar dicha configuración en perfil y planta.



Figura 5. 24. Dique 2, visto en perfil (izq.) y visto en planta (der.)

Debido a la altura del dique 1, y de la restricción existente por el límite de rotura de las olas, en los ensayos anteriores pudieron modelarse apenas 30 olas por escala. Para este dique se lograron modelar 10 olas más para dar un total de 40, pues se trabajó con profundidades mayores para cumplir con los francobordos que se habían considerado.

5.2.2.1 Resultados

A fin de poder tener un punto de comparación entre ambas configuraciones, se trabajaron los mismos parámetros adimensionales y mismos valores de altura de ola incidente, obtenidos a partir del método de separación de ondas propuesto por Mansard y Funke (1980). Al igual que con la configuración anterior, el resto de los resultados se muestran en el Anexo B.

Reflexión

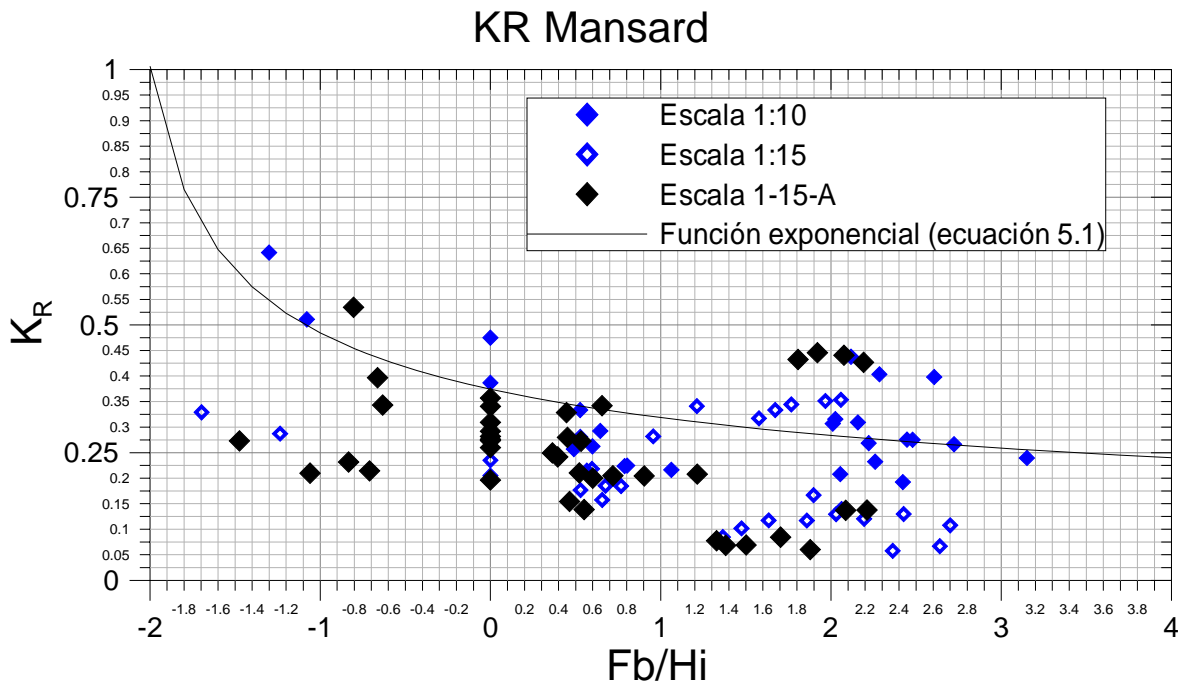


Figura 5. 25. Coeficiente de reflexión a partir de la altura de ola incidente significativa obtenida por el método de Mansard y Funke (1994) para el dique 2.

En la figura 5.25 se grafican los valores de los coeficientes de reflexión para esta configuración y son representados por rombos negros; graficados junto a los coeficientes de reflexión correspondientes al dique anterior. En esta figura se observa que el comportamiento es similar en ambos diques, especialmente con la condición de estructura coronada al nivel medio del agua y con una sumergencia igual a la mitad de la altura de cada elemento.

Con este dique se presentó el mismo caso que con el dique anterior: conforme el parámetro adimensional Fb/Hi tiende a crecer (la profundidad aumenta), el coeficiente de reflexión tiende a disminuir.

Sin embargo, en ambos casos se presentan valores altos de los coeficientes de reflexión para el máximo nivel de sumergencia ensayado. Este fenómeno puede tener lugar debido a la reflexión propia del canal, pues, a pesar de que éste cuenta con sistema de absorción y una playa disipativa para reducir al máximo ésta se sigue presentando en mayor o menor medida. Mas, esta situación puede ser considerada, pues existirán playas en la realidad con poca capacidad disipativa, que podrían, eventualmente alterar la reflexión ocasionada por la estructura misma.

Transmisión

Los coeficientes de transmisión para este dique también son graficados junto a los obtenidos del dique 1, esto con la finalidad de observar su comportamiento y ver la influencia que tiene una nueva configuración en la disipación del oleaje.

Se observa, en la figura 5.26, que los valores de los coeficientes de transmisión son muy cercanos a los que se presentaron con el dique 1 en ambas escalas; y se presenta el mismo aumento de la transmisión conforme la profundidad aumenta, es decir, conforme el valor de Fb/H_i aumenta y con ello el nivel de sumergencia. Los valores del coeficiente de transmisión para esta segunda configuración, con un aumento en la altura y el ancho de la estructura son, sí, cercanos, pero predominantemente son menores que los presentados con la configuración anterior, situación que podría indicar una influencia, principalmente del ancho de la cresta del dique. Incluso, a una profundidad mayor, $h=47.33$ cm, los valores del coeficiente de transmisión se siguen manteniendo por debajo de $K_T=1$, y los más altos se agrupan con los valores obtenidos de los ensayos del dique 1.

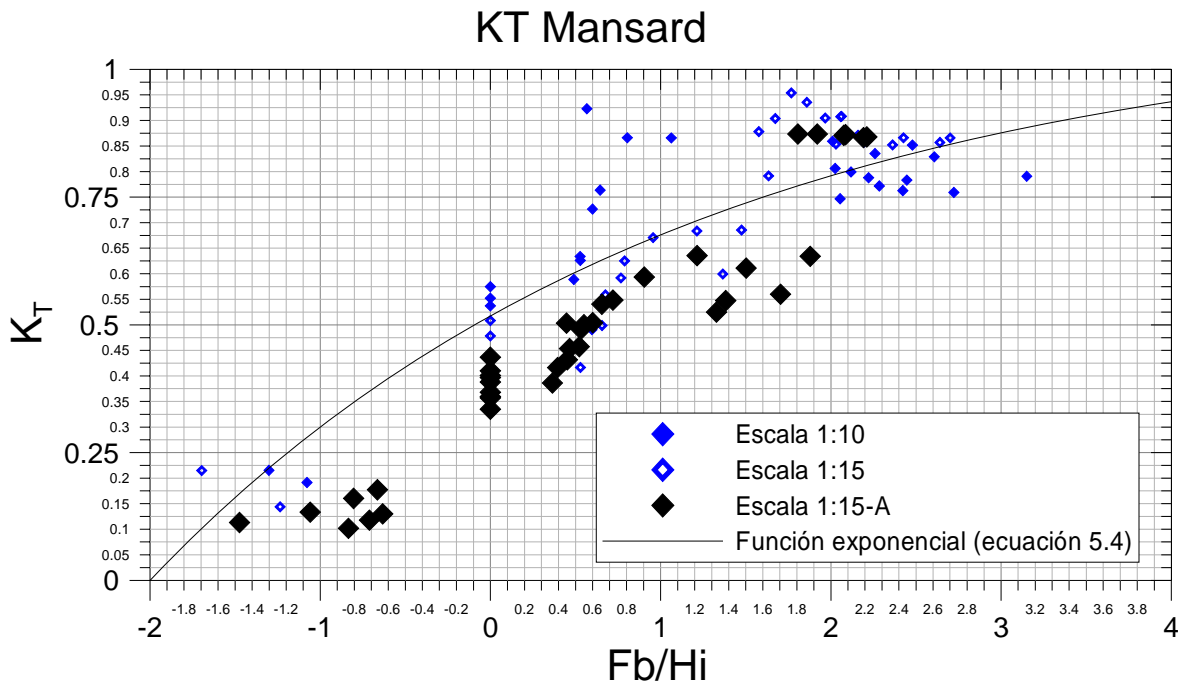


Figura 5. 26. Coeficiente de transmisión a partir de la altura de ola incidente significativa obtenida por el método de Mansard y Funke (1994) para el dique 2.

Además, en la figura 5.26, se observa un grupo de coeficientes de transmisión que alcanza el valor de $K_T=0.88$. En este grupo, podría existir también un efecto de escala, pues, así como en el dique 1 se rebasaba el valor de $K_T=1$ cuando no se cumplía la condición (escala 1:10):

$$\frac{fb}{H_i} > 1.5 \quad \frac{H_i}{L} > 0.012$$

$$\frac{fb}{H_i} < 1.5 \quad \frac{H_i}{L} < 0.012$$

Con esta nueva configuración, los valores se salen de la tendencia para presentar coeficientes de transmisión altos cuando se tiene la condición:

$$\frac{fb}{H_i} > 1.8 \quad \frac{H_i}{L} < 0.017$$

Sin embargo, es importante resaltar que se tiene una influencia del ancho de la cresta del dique, pues, para este caso, los valores de transmisión más altos no alcanzan si quiera el valor de $K_T=0.9$, por lo que se estaría teniendo una disipación de la energía del oleaje aceptable.

Disipación

Finalmente, se calculó la disipación asociada a esta nueva configuración, cuyos coeficientes se presentan en la figura 5.27. En esta gráfica se aprecia que la disipación asociada a la configuración del dique 2 presenta valores altos con respecto al dique 1 en sus dos escalas, salvo el caso mencionado anteriormente, que es cuando los coeficientes de transmisión de esta segunda estructura alcanzan sus valores más altos. Con esto, se tendrían aún más elementos para decir que, aumentando el ancho de la estructura (tanto en su base, y especialmente en su cresta) se estaría alcanzando un mayor nivel de disipación.

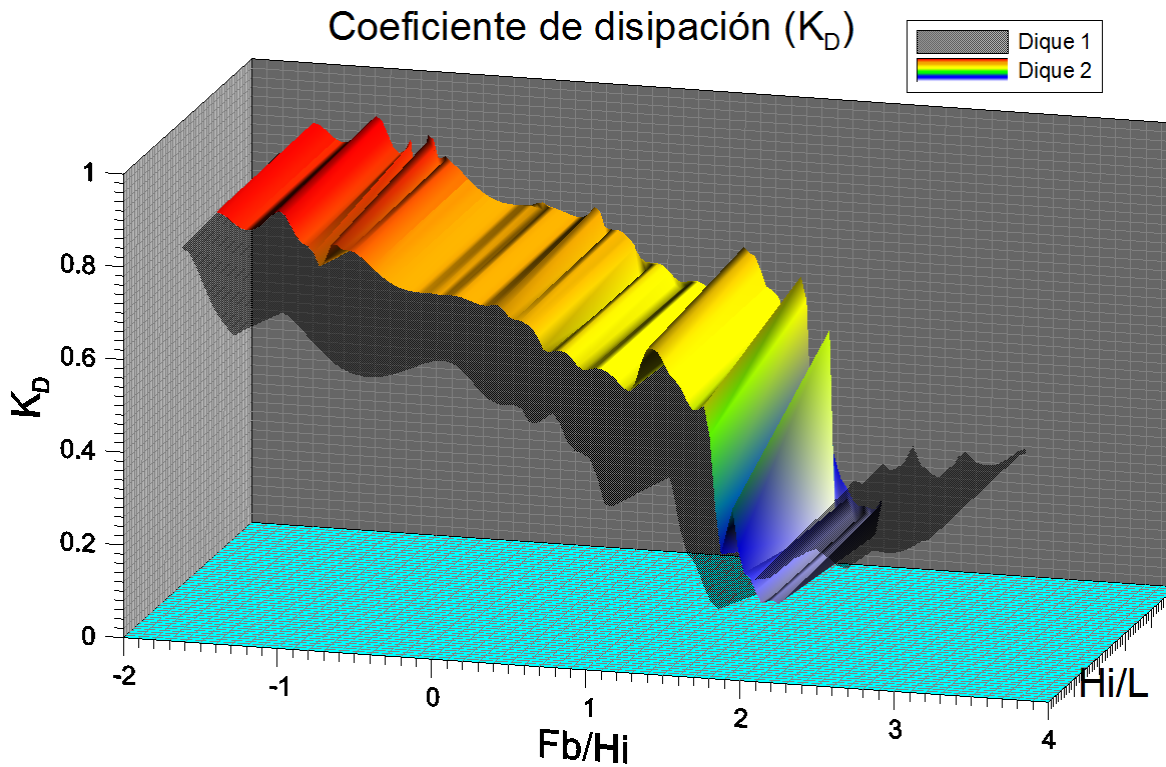


Figura 5. 27. Coeficiente de disipación para el dique 2.

Capítulo 6. Conclusiones y futuras líneas de investigación

Conclusiones

Este trabajo representa una primera etapa en el desarrollo de una nueva tipología de piezas para la construcción de diques rompeolas con elementos prefabricados. Como tal, los objetivos principales al diseñar una nueva tipología son: contar con un diseño de pieza con alta capacidad modular y de fácil construcción; verificar su capacidad para disipar la energía del oleaje.

Finalmente, se logró llegar a un diseño el cual, individualmente puede parecer muy sencillo, y que sin embargo, al agruparlo forma un dique en talud con una superficie irregular, lo cual supone una capacidad de disipación por peraltamiento de las olas, pero también por la fricción que pueda generar con las ondas que viajan a través de la estructura. Además, es un diseño de fácil construcción, tal que las piezas a escala pudieron construirse en el laboratorio del GICyP del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

En un primer diseño se había contemplado únicamente la construcción de un solo tipo de pieza para la construcción de un solo dique, sin embargo, se determinó que la forma final del dique no favorecía a la estabilidad del mismo, pues podría favorecer su socavación y con ello se podía llegar a un estado de falla, considerando su colocación en la realidad.

La colocación de las piezas dentro del canal de oleaje fue sencilla, y efectivamente se comprobó la alta capacidad modular de las piezas para formar un dique en talud.

Durante los ensayos, se observó que a pesar de haber piezas que, por algún defecto de construcción, no encajaban bien con el resto de la estructura, éstas presentaban un movimiento oscilatorio mínimo, e incluso bajo amplitudes, o periodos de onda altos. Aunado a esto, la estructura no presentó ningún tipo de falla, es decir, no hubo cabeceo, desplazamiento, desprendimiento ni rotura de ninguna de las piezas que componían los diques modelados.

Observando los datos de los ensayos, se observaron tendencias muy claras.

En el caso de la reflexión del oleaje, en todos los casos modelados se observó una tendencia muy clara: la reflexión aumenta conforme la profundidad disminuye y la estructura tiende a emerger. Además, aunque la tendencia de los coeficientes de reflexión era clara, sus valores presentaron una dispersión muy alta entre sí y en comparación con los coeficientes de transmisión, situación que podría indicar que se trata de una estructura reflejante; y también podría considerarse el efecto

de la reflexión propia del canal de oleaje, pues a pesar de contar con un sistema de absorción y una playa de grava reflejante al final del canal, la reflexión sólo fue disminuida, mas no eliminada por completo, pues con las condiciones más fuertes de oleaje fue cuando se dispersaban y aumentaban más los coeficientes de reflexión. Pero, en términos generales, el comportamiento mencionado de la reflexión era de esperarse, y aunque la ecuación podría estar sobre estimando o subestimando sus valores, debe recordarse que la reflexión del oleaje no depende únicamente de la estructura, sino de la configuración misma de la costa que se esté protegiendo, por lo que, eventualmente podría ser válido contar con ciertos factores de seguridad que estén en función de la zona a proteger y de las condiciones en que ésta se encuentre.

Sobre la transmisión del oleaje, que se puede considerar uno de los parámetros más importantes para el diseño de esta estructura, se observó también un comportamiento esperado y una tendencia muy clara: la transmisión aumenta cuando la estructura tiende a estar más sumergida.

Para el caso del dique 1, con dimensiones reales de 1.80 m de alto, por 7.60 m de ancho en la base, y modelado en dos escalas: 1:15 y 1:10, los valores del coeficiente de transmisión únicamente sobrepasaron el valor de $K_T=1$ con la siguiente condición, presentada en el dique modelado con escala 1:10.

$$\frac{fb}{H_i} > 1.5 \quad \frac{H_i}{L} < 0.012$$

Sin embargo, omitiendo los ensayos donde se presentan estas condiciones (que únicamente representan 3 datos), la transmisión de la energía del oleaje en ningún momento superó el 100%, situación que se vio reflejada en los coeficientes de transmisión. Dichos ensayos, sí, se omiten pero sirven como referencia para establecer condiciones bajo las cuales se recomienda el uso de esta tipología con la configuración ensayada.

De esta manera, se pudo alcanzar una ecuación de diseño de las estructuras que permitiría estimar la transmisión del oleaje mediante el cálculo de un coeficiente bajo una configuración determinada del dique. Esta ecuación estaría en función del parámetro adimensional fb/H_i y se expresa como:

$$K_T = 1.1 * \left\{ 1 - \exp \left[-0.318 * \left(\frac{fb}{H_i} + 2 \right) \right] \right\} \quad (5.4)$$

Teniendo como condición:

$$\frac{fb}{H_i} > 1.5 \quad \frac{H_i}{L} > 0.012$$

$$\frac{fb}{H_i} < 1.5 \quad \frac{H_i}{L} < 0.012$$

Cuando se compararon los valores de la ecuación propuesta con los medidos y se traza una función identidad, se tiene un coeficiente de correlación $r=0.8785$, con lo cual se puede tener una estimación muy cercana del coeficiente de transmisión con respecto a lo que se pueda presentar en la realidad.

El caso del dique 2, con dimensiones reales de 2.40 m de alto por 11.85 m de ancho en la base, fungió como comparativo para conocer los efectos de escala. Algunas expresiones para el cálculo del coeficiente de transmisión, como las estudiadas en este trabajo, están en función del ancho de la cresta del dique. Con este segundo dique, que presentaba un ancho mayor en su cresta se presentaron valores del coeficiente de transmisión relativamente más bajos comparados con lo del dique uno. Esto se debe a que la onda tiene una mayor área sobre la cual se puede disipar.

Finalmente, observando los coeficientes de disipación del oleaje, se observa que la estructura, aún estando bajo niveles de sumergencia altos (profundidades mayores) la estructura no pierde su capacidad de disipación, por lo cual se puede concluir que esta tipología cumple con su propósito principal que es la de disipar la energía del oleaje. Además, en los mapas de superficie tridimensionales que representaban los coeficientes de disipación, también se alcanzó a apreciar que con alturas de ola más chicas, la estructura se volvía más eficiente para disipar la energía del oleaje.

Complementando lo que establecen los resultados numéricos, durante los ensayos se alcanzó a confirmar uno de los supuestos: la estructura, además de inducir la rotura de las olas cuando éstas inciden sobre el dique, sí se observó cierta influencia sobre la superficie del agua, especialmente cuando las condiciones entre profundidad y altura de ola no favorecía su rotura. Incluso bajo estas condiciones, aún se sigue teniendo disipación del oleaje, con lo cual, otro de los propósitos del diseño de esta nueva tipología se estaría cumpliendo: disipar la energía del oleaje por medio de la fricción que induce la forma del dique al tren de ondas.

Futuras líneas de investigación

Como se ha mencionado en reiteradas ocasiones, este trabajo representa una primera etapa en el desarrollo de esta nueva tipología. Haría falta realizar modificaciones en el diseño de cada pieza, de acuerdo a lo observado en los videos realizados durante las pruebas. Estas modificaciones podrían incluir:

- Realizar perforaciones que permitan el flujo de las corrientes que se pueden generar por la estructura;
- Realizar huecos en la estructura para determinar si ésta podría fungir como arrecife artificial.

Una de las desventajas que podría presentar esta nueva tipología sería la necesidad de contar dos cimbras distintas para su construcción. Sin embargo, esta situación podría solucionarse proponiendo una sola cimbra tipo, la cual, con una modificación sencilla y sin requerir mucho esfuerzo permita colar los dos tipos de pieza por separado.

Otro aspecto que quedaría pendiente sería revisar los esfuerzos a los cuales se está sometiendo cada pieza, pues, hay que recordar que cada elemento cuenta con salientes laterales que hacen las veces de trabazón con los elementos aledaños, y dichas piezas eventualmente podrían estar sometidas a esfuerzos de tensión. En este caso, sería necesario utilizar materiales que permitan absorber los esfuerzos de tensión y que no generen reacciones desfavorables si entran en contacto con el agua de mar.

En este trabajo sólo se trabajaron dos configuraciones diferentes: un dique primer dique modelado a dos escalas, con una altura y ancho de cresta determinados; y un segundo dique modelado a una sola escala con una altura y ancho de cresta mayor. Se alcanzó a observar que el segundo dique, que es el que tenía un ancho de cresta mayor tenía ligeramente una mayor capacidad para disipar el oleaje. Valdría la pena estudiar más casos, incluso sin aumentar la altura del dique, únicamente modificando el acomodo de las piezas para poder tener diferentes configuraciones de estructuras rompeolas, y ver cómo disipan el oleaje; explotando al máximo la capacidad modular de esta tipología.

Finalmente, se debe recordar que la superficie sobre la cual se pone este tipo de estructuras es sobre superficies arenosas. Faltaría realizar modificaciones al diseño original, para que las piezas de las base no presenten desplazamiento por la acción del oleaje, o la estructura no presente socavación.

Referencias

- Ahmed, M., Anwar, R. (2011). *Experimental Study Of The Performance Of Submerged Breakwater As Shore Protection Structure*. International Conference on Environment and BioScience, IPCBEE, Vol. 21: pp.
- Battjes, J. (1974b). *Surf similitary*. Proc.14 Int. Conference on Coastal Engineering, ASCE, Copenague. 466-480 pp.
- Dean, R. (2003). *Beach Nourishment, theory and practice*. Vol. 18 of advanced series on ocean engineering, World Scientific, Singapore.
- Dean, R. et al. (1997). *Full scale monitoring study of a submerged breakwater, Palm Beach, Florida, USA*. Coastal Engineering, Vol. 29: pp. 219-315.
- Dean, R. & Dalrymple, R. (2002). *Coastal Processes with engineering applications*. Cambridge University Press, UK.
- Etemad-Shahidi, A., Bonakdar L. (2009). *Design of rubble-mound breakwaters using M5' machine learning method*. Applied Ocean Research, Vol. 31: pp. 197-201.
- Feary, D. et al. (2011). *Artificial marine habitats in the Arabian Gulf: Review of current use, benefits and management implications*. Ocean & Coastal Management, Vol. 54: pp. 742-749.
- Franco, L. et al. (2000). *Concrete strength and durability of prototype tetrapods and dolosse: results of field and laboratory tests*. Coastal Engineering, Vol. 40: pp. 207-219.
- Goda, Y., & Suzuki, Y., (1976). *Estimation of Incident and Reflected Waves in random wave experiment*. Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, Hawaii, 628-650.
- Gómez, N. (2009). *Presión de poro inducida por el oleaje en playas de grano grueso*. Tesis de licenciatura, UNAM, México.
- González M. et al (2013). *Experimental study on geotextile bag applications as submerged breakwaters for beach protection at Yucatán, México*.
- Hattori, M., Sakai, H (1994). *Wave breaking over permeable submerged breakwaters*. Proc. 24th Int. Coastal Engineering Conference, ASCE, Reston, VA (1994), pp. 1101-1114.

-
- Hudson, R. Y. (1959). *Laboratory investigation of rubble mound breakwaters*. Journal of the Waterways and Harbour Division, ASCE. Vol. 85(WW3). pp. 93-121.
- Kobayashi, N., & Wurjanto, A. (1989). *Wave Transmission Over Submerged Breakwaters*. Journal of Waterway, Port and Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, New York, 662-680.
- Latham, J. P. et al. (2006). *Prediction of in-situ block size distributions with reference to armourstone for breakwaters*. Engineering geology, Vol. 86: pp. 18-36.
- Losada, I. J., Silva, R., and Losada, M. A. (1996). *3-D Non-breaking Wave Interaction with Submerged Breakwaters*. Coastal Engineering 28, 229-248.
- Maertens, J. (2007). *Study of prefabricated re-usable breakwaters for shore protection*. Tesis de maestría, Universidad de Ghent, Bélgica.
- Mansard, E. P. D., and Funke, E. R. (1980). *The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Square Method*. Proceedings 17th Coastal Engineering Conference, Sydney, Australia, vol. 1, 154-172.
- Masselink, G. y Hughes, M.G. 2003. *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Hodder Education, Londres, UK, 354 pp.
- Milne-Dick, T., Brebner, A (1968). *Solid and permeable submerged breakwaters*. Proc 11th Coastal Engineering Conference, London, ASCE, New York (1968), pp. 1141-1158.
- Neelamani, S., Rajendran, R. (2002). *Wave interaction with T-type breakwaters*. Ocean Engineering, Vol. 29: pp. 151-175.
- Neelamani, S., Vedagiri, M. (2002). *Wave interaction with partially immersed twin vertical barriers*. Ocean Engineering, Vol. 29: pp. 215-238.
- Oumeraci, H., Kortenhaus, A. (2011). *Core made of geotextile sand containers for rubble mound breakwaters and seawalls: Effect on armour stability and hydraulic performance*. Ocean Engineering, Vol. 38: pp. 159-170.
- Pérez, L. (2012). *Estudio en laboratorio sobre comportamiento hidrodinámico de estructuras de protección costera de baja coronación*. Tesis de maestría, Universidad de Cantabria, España.
- Pickering, H. (1996). *Artificial reefs of bulk waste materials: a scientific and legal review of the suitability of using the cement stabilized by-products of coal-fired power stations*. Marine policy, Vol. 20: pp. 483-497.
- Ruiz, D. (2010). *Zonificación de la Península de Yucatán a partir de un análisis sedimentológico*. Tesis de licenciatura, UNAM, México.

Tanimoto K., Takahashi, S. (1994). *Design and construction of caisson breakwaters-the Japanese experience*. Coastal engineering, Vol. 22: pp. 57-77.

U.S. Army Corps of Engineers. 2002. *Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.

Van der Meer et al. (2005). *Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change*. Coastal Engineering, Vol. 52: pp. 915-929.

Verduzco-Zapata, M. G. et al. (2012). *Practical estimation of wave transmission and reflection from fixed submerged structures*. Ocean Engineering, Vol. 45: pp. 63-74.

Vidal, C., Losada, M. A., Medina, R., Mansard, E. P. D. y Gomez-Pina, G. (1992). *An universal analysis for the stability of both low-crested and submerged breakwaters*. Venecia, Italia.

Anexos

Anexo A

En este anexo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados.

A.1 Dique 1

A.1.1 Escala 1:10

Tabla A. 1. Condiciones y resultados, para el dique 1, escala 1:10.

h_{Total} (cm)	h_{pie} (cm)	T (s)	H_m (cm)	H_{Mls} (cm)	H_{Gls} (cm)	H_{s1} (cm)	Fb (cm)	K_{RMpico} (%)	K_{RGpico} (%)	H_{TMs} (cm)	H_{TGs} (cm)	S_{talud}	K_{TM} (%)	K_{TG} (%)
60.00	50.00	2.53	18.00	18.70	18.87	11.53	32.00	19.24	19.15	14.27	14.60	0.57	0.76	0.77
60.00	50.00	2.53	20.00	22.05	22.00	13.02	32.00	20.81	20.91	16.47	17.00	0.57	0.75	0.77
60.00	50.00	3.16	18.00	12.90	12.87	14.47	32.00	23.54	23.44	19.12	18.95	0.57	1.48	1.47
60.00	50.00	3.16	20.00	14.38	14.41	7.44	32.00	23.95	23.79	11.37	11.38	0.57	0.79	0.79
60.00	50.00	3.16	22.00	16.64	16.64	8.25	32.00	26.64	26.66	12.63	12.67	0.57	0.76	0.76
60.00	50.00	3.16	24.00	18.52	18.46	9.11	32.00	27.56	27.73	14.51	14.44	0.57	0.78	0.78
60.00	50.00	3.16	26.00	20.40	20.42	9.97	32.00	26.86	27.06	16.07	16.16	0.57	0.79	0.79
60.00	50.00	3.79	24.00	16.94	17.21	11.05	32.00	25.36	25.49	17.63	17.86	0.57	1.04	1.04
60.00	50.00	3.79	26.00	18.27	18.61	13.71	32.00	27.51	27.62	15.56	16.01	0.57	0.85	0.86
60.00	50.00	3.79	28.00	20.05	20.03	14.93	32.00	23.23	25.70	16.75	17.31	0.57	0.84	0.86
60.00	50.00	3.79	30.00	20.99	21.04	16.14	32.00	30.92	30.64	18.29	18.40	0.57	0.87	0.87
60.00	50.00	3.79	32.00	22.53	22.29	17.43	32.00	30.68	30.44	19.37	19.60	0.57	0.86	0.88
60.00	50.00	4.43	30.00	16.30	16.35	18.70	32.00	38.52	38.16	21.03	20.80	0.57	1.29	1.27
60.00	50.00	4.43	32.00	17.38	17.39	13.21	32.00	39.81	38.27	14.40	14.08	0.57	0.83	0.81
60.00	50.00	4.43	34.00	19.83	20.01	14.28	32.00	40.34	38.90	15.30	14.87	0.57	0.77	0.74
60.00	50.00	4.43	36.00	21.39	21.60	15.51	32.00	43.78	43.20	17.10	17.39	0.57	0.80	0.80
60.00	50.00	4.43	38.00	22.37	23.04	16.60	32.00	31.57	30.49	18.03	18.48	0.57	0.81	0.80
34.00	24.00	1.90	6.00	7.99	7.99	5.30	6.00	21.64	22.72	6.92	5.55	0.57	0.87	0.69
34.00	24.00	1.90	8.00	10.58	10.58	6.89	6.00	22.47	23.29	9.16	6.89	0.57	0.87	0.65
34.00	24.00	1.90	10.00	13.17	13.17	8.89	6.00	29.25	24.18	10.06	9.12	0.57	0.76	0.69
34.00	24.00	1.90	12.00	16.11	16.11	10.41	6.00	28.09	28.89	10.08	8.52	0.57	0.63	0.53
34.00	24.00	1.90	14.00	17.36	17.36	11.74	6.00	25.70	23.82	10.22	7.86	0.57	0.59	0.45
34.00	24.00	2.53	12.00	14.18	14.18	9.44	6.00	26.22	19.44	10.30	10.62	0.57	0.73	0.75
34.00	24.00	2.53	14.00	16.13	16.13	11.06	6.00	33.34	42.53	10.22	10.06	0.57	0.63	0.62
34.00	24.00	2.53	16.00	15.00	15.00	11.57	6.00	21.46	28.76	13.85	16.42	0.57	0.92	1.09
28.00	18.00	1.90	6.00	6.11	5.82	5.15	0.00	38.68	41.23	3.51	2.31	0.57	0.57	0.40
28.00	18.00	1.90	8.00	8.91	8.39	7.44	0.00	47.50	46.57	4.92	2.85	0.57	0.55	0.34
28.00	18.00	1.90	10.00	10.55	9.77	8.50	0.00	35.47	37.03	5.67	3.38	0.57	0.54	0.35
22.00	12.00	1.90	6.00	6.53	5.87	4.37	-6.00	64.17	65.63	1.41	0.71	0.57	0.22	0.12
22.00	12.00	1.90	8.00	7.88	6.80	5.03	-6.00	51.08	52.18	1.51	0.70	0.57	0.19	0.10

Tabla A. 2. Condiciones y resultados, para el dique 1, escala 1:15.

h_{Total} (cm)	h_{pie} (cm)	T (s)	H_m (cm)	H_{MIs} (cm)	H_{GIs} (cm)	H_{s1} (cm)	Fb (cm)	K_{RMpico} (%)	K_{RGpico} (%)	H_{TM_s} (cm)	H_{TG_s} (cm)	S_{talud}	K_{TM} (%)	K_{TG} (%)
43.33	33.33	2.07	12.00	11.44	11.06	8.10	21.33	6.68	6.35	9.80	7.84	0.57	0.86	0.71
43.33	33.33	2.07	13.33	12.79	12.40	9.13	21.33	5.78	6.88	10.90	8.21	0.57	0.85	0.66
43.33	33.33	2.58	12.00	11.18	11.18	8.35	21.33	10.75	10.80	9.68	9.67	0.57	0.87	0.86
43.33	33.33	2.58	13.33	12.44	12.49	9.42	21.33	12.97	11.43	10.78	10.85	0.57	0.87	0.87
43.33	33.33	2.58	14.67	13.76	13.24	10.40	21.33	12.04	12.43	11.80	11.32	0.57	0.86	0.86
43.33	33.33	2.58	16.00	14.87	14.23	11.35	21.33	12.94	13.27	12.70	12.22	0.57	0.85	0.86
43.33	33.33	2.58	17.33	15.92	15.93	12.48	21.33	16.69	14.32	13.89	14.02	0.57	0.87	0.88
43.33	33.33	3.10	16.00	14.64	14.57	11.13	21.33	13.96	14.59	13.29	10.64	0.57	0.91	0.73
43.33	33.33	3.10	17.33	16.25	16.13	12.43	21.33	11.70	12.36	15.21	10.93	0.57	0.94	0.68
43.33	33.33	3.10	18.67	18.49	18.24	13.78	21.33	11.74	12.58	14.63	10.99	0.57	0.79	0.60
43.33	33.33	3.10	20.00	20.48	19.99	14.56	21.33	10.17	11.43	14.04	11.06	0.57	0.69	0.55
43.33	33.33	3.10	21.33	22.13	21.31	15.24	21.33	8.48	9.72	13.27	10.80	0.57	0.60	0.51
43.33	33.33	3.61	20.00	14.68	13.39	10.19	21.33	35.34	34.97	13.32	11.68	0.57	0.91	0.87
43.33	33.33	3.61	21.33	15.35	13.93	10.52	21.33	35.11	33.84	13.89	12.55	0.57	0.90	0.90
43.33	33.33	3.61	22.67	17.09	16.60	10.94	21.33	34.44	33.29	16.30	14.80	0.57	0.95	0.89
43.33	33.33	3.61	24.00	18.05	17.50	11.45	21.33	33.37	32.53	16.32	15.58	0.57	0.90	0.89
43.33	33.33	3.61	25.33	19.16	18.52	12.03	21.33	31.72	31.04	16.82	16.37	0.57	0.88	0.88
26.00	16.00	1.55	4.00	4.67	4.27	4.39	4.00	34.11	44.03	3.19	3.04	0.57	0.68	0.71
26.00	16.00	1.55	5.33	5.92	5.47	5.53	4.00	28.21	37.38	3.97	3.86	0.57	0.67	0.71
26.00	16.00	1.55	6.67	7.19	6.68	6.63	4.00	22.36	32.53	4.50	4.42	0.57	0.63	0.66
26.00	16.00	1.55	8.00	8.38	7.69	7.64	4.00	18.53	31.44	4.69	4.72	0.57	0.56	0.61
26.00	16.00	1.55	9.33	9.50	8.17	8.45	4.00	21.84	40.99	4.66	4.18	0.57	0.49	0.51
26.00	16.00	2.07	8.00	7.38	7.26	7.27	4.00	18.48	18.43	4.37	4.43	0.57	0.59	0.61
26.00	16.00	2.07	9.33	8.64	8.34	8.67	4.00	15.74	13.91	4.31	4.23	0.57	0.50	0.51
26.00	16.00	2.07	10.67	10.72	9.58	9.82	4.00	17.67	20.73	4.47	4.08	0.57	0.42	0.43
22.00	12.00	1.55	4.00	4.28	1.62	3.14	0.00	23.50	69.42	2.18	1.90	0.57	0.51	1.17
22.00	12.00	1.55	5.33	5.48	2.09	4.20	0.00	27.87	90.76	2.62	2.32	0.57	0.48	1.11
22.00	12.00	1.55	6.67	6.52	2.90	5.46	0.00	20.50	83.15	2.44	2.01	0.57	0.37	0.69
18.00	8.00	1.55	4.00	3.34	1.61	3.16	-4.00	32.90	181.42	0.72	0.41	0.57	0.21	0.25
18.00	8.00	1.55	5.33	4.58	2.48	4.26	-4.00	28.72	131.98	0.66	0.37	0.57	0.14	0.15

Tabla A. 3 Condiciones y resultados, para el dique 2, escala 1:15.

h_{Total} (cm)	h_{pie} (cm)	T (s)	H_m (cm)	H_{Mis} (cm)	H_{Gis} (cm)	H_{s1} (cm)	F_b (cm)	K_{RMpico} (%)	K_{RGpico} (%)	H_{TMs} (cm)	H_{TGs} (cm)	S_{talud}	K_{TM} (%)	K_{TG} (%)
47.33	37.33	2.58	16.00	13.66	13.97	10.44	21.33	13.77	13.57	11.86	10.69	0.53	0.87	0.76
47.33	37.33	2.58	17.33	14.47	14.83	10.73	21.33	13.70	16.35	12.62	11.63	0.53	0.87	0.78
47.33	37.33	3.10	16.00	16.08	16.06	11.04	21.33	6.02	7.46	10.20	10.21	0.53	0.63	0.64
47.33	37.33	3.10	17.33	17.72	17.67	12.02	21.33	8.45	10.39	9.93	10.09	0.53	0.56	0.57
47.33	37.33	3.10	18.67	20.11	19.81	13.81	21.33	6.89	7.44	12.29	12.15	0.53	0.61	0.61
47.33	37.33	3.10	20.00	21.85	21.35	14.93	21.33	6.85	6.71	11.96	11.80	0.53	0.55	0.55
47.33	37.33	3.10	21.33	22.74	22.26	15.49	21.33	7.74	6.92	11.94	11.66	0.53	0.52	0.52
47.33	37.33	3.61	20.00	13.78	12.91	9.62	21.33	42.66	39.57	11.94	12.55	0.53	0.87	0.97
47.33	37.33	3.61	21.33	14.55	13.59	9.93	21.33	44.08	43.43	12.67	13.45	0.53	0.87	0.99
47.33	37.33	3.61	22.67	15.73	16.02	10.13	21.33	44.59	43.30	13.74	14.61	0.53	0.87	0.91
47.33	37.33	3.61	24.00	16.72	16.91	10.44	21.33	43.23	42.06	14.61	15.63	0.53	0.87	0.92
30.00	20.00	1.55	4.00	4.67	4.41	3.99	4.00	20.80	25.43	2.97	2.92	0.53	0.64	0.66
30.00	20.00	1.55	5.33	6.27	5.89	5.35	4.00	20.44	25.44	3.72	3.71	0.53	0.59	0.63
30.00	20.00	1.55	6.67	7.87	7.45	6.81	4.00	20.48	24.43	4.32	4.43	0.53	0.55	0.60
30.00	20.00	1.55	8.00	9.43	8.89	8.22	4.00	20.01	23.48	4.75	4.88	0.53	0.50	0.55
30.00	20.00	1.55	9.33	10.86	9.65	9.39	4.00	21.05	33.29	4.97	4.69	0.53	0.46	0.49
30.00	20.00	2.07	8.00	8.65	8.61	8.08	4.00	34.19	33.91	4.67	4.69	0.53	0.54	0.55
30.00	20.00	2.07	9.33	10.65	10.61	9.39	4.00	27.23	26.66	5.23	5.29	0.53	0.49	0.50
30.00	20.00	2.07	10.67	12.54	12.38	10.31	4.00	27.98	27.52	5.41	5.42	0.53	0.43	0.44
30.00	20.00	2.07	12.00	14.35	13.52	12.01	4.00	24.15	26.52	5.97	5.66	0.53	0.42	0.42
30.00	20.00	2.07	13.33	15.55	14.03	12.23	4.00	24.93	26.90	6.00	5.44	0.53	0.39	0.39
30.00	20.00	2.58	12.00	12.69	13.47	9.23	4.00	32.87	32.14	6.38	7.84	0.53	0.50	0.58
30.00	20.00	2.58	13.33	12.19	10.64	8.42	4.00	15.45	15.29	5.53	5.28	0.53	0.45	0.50
30.00	20.00	2.58	14.67	10.29	10.32	7.34	4.00	13.85	10.99	5.15	5.36	0.53	0.50	0.52
26.00	16.00	1.55	4.00	4.55	4.06	4.17	0.00	35.68	50.92	1.86	1.77	0.53	0.41	0.44
26.00	16.00	1.55	5.33	5.90	5.29	5.43	0.00	34.05	48.27	2.34	2.22	0.53	0.40	0.42
26.00	16.00	1.55	6.67	7.19	6.37	6.73	0.00	30.93	45.56	2.79	2.66	0.53	0.39	0.42
26.00	16.00	1.55	8.00	8.72	7.65	8.13	0.00	29.20	45.18	3.21	3.07	0.53	0.37	0.40
26.00	16.00	1.55	9.33	10.24	8.76	9.38	0.00	27.37	44.71	3.43	3.05	0.53	0.33	0.35
26.00	16.00	2.07	8.00	8.88	7.54	7.79	0.00	27.61	28.25	3.88	3.21	0.53	0.44	0.43
26.00	16.00	2.07	9.33	10.32	8.98	9.14	0.00	25.97	25.32	4.14	3.55	0.53	0.40	0.40
26.00	16.00	2.07	10.67	11.69	9.82	10.53	0.00	28.18	25.44	4.20	3.66	0.53	0.36	0.37
26.00	16.00	2.07	12.00	11.33	9.83	9.35	0.00	19.64	18.11	4.05	3.72	0.53	0.36	0.38
22.00	12.00	1.55	4.00	3.84	2.21	3.14	-4.00	27.31	64.82	0.43	0.37	0.53	0.11	0.17
22.00	12.00	1.55	5.33	5.34	2.72	3.92	-4.00	20.98	90.83	0.71	0.67	0.53	0.13	0.25
22.00	12.00	1.55	6.67	6.79	4.06	5.28	-4.00	23.16	92.60	0.69	0.65	0.53	0.10	0.16
22.00	12.00	1.55	8.00	7.97	5.56	6.25	-4.00	21.42	98.61	0.94	0.84	0.53	0.12	0.15
22.00	12.00	1.55	9.33	8.94	6.56	6.62	-4.00	34.33	61.98	1.16	0.97	0.53	0.13	0.15
22.00	12.00	2.07	8.00	7.04	5.66	6.76	-4.00	53.46	53.58	1.13	0.92	0.53	0.16	0.16

22.00	12.00	2.07	9.33	8.53	7.24	7.26	-4.00	39.65	46.33	1.51	1.32	0.53	0.18	0.18
-------	-------	------	------	------	------	------	-------	-------	-------	------	------	------	------	------

Siendo:

- h_{total} la profundidad total en el canal;
- h_{pie} la profundidad a pie de dique;
- T el periodo;
- H_m la altura de ola modelada;
- H_{MIS} la altura de ola incidente significativa, separada por el método de Mansard y Funke;
- H_{GIS} la altura de ola incidente significativa, separada por el método de Goda y Suzuki;
- H_{S1} la altura de ola, medida en el sensor 1;
- F_b el francobordo, siendo positivo cuando está sumergida la estructura, y negativo cuando es emergida;
- K_{RMpico} el coeficiente de reflexión a partir de la altura de ola incidente obtenida por el método de Mansard y Funke;
- K_{RGpico} el coeficiente de reflexión a partir de la altura de ola incidente obtenida por el método de Goda y Suzuki;
- H_{TMS} la altura de ola transmitida significativa obtenida a partir del método de Mansard y Funke;
- H_{TGS} la altura de ola transmitida significativa obtenida a partir del método de Goda y Suzuki;
- S_{talud} la pendiente del talud;
- K_{TM} el coeficiente de reflexión a partir de la altura de ola incidente obtenida por el método de Mansard y Funke;
- K_{TG} el coeficiente de transmisión a partir de la altura de ola incidente obtenida por el método de Goda y Suzuki.

Anexo B

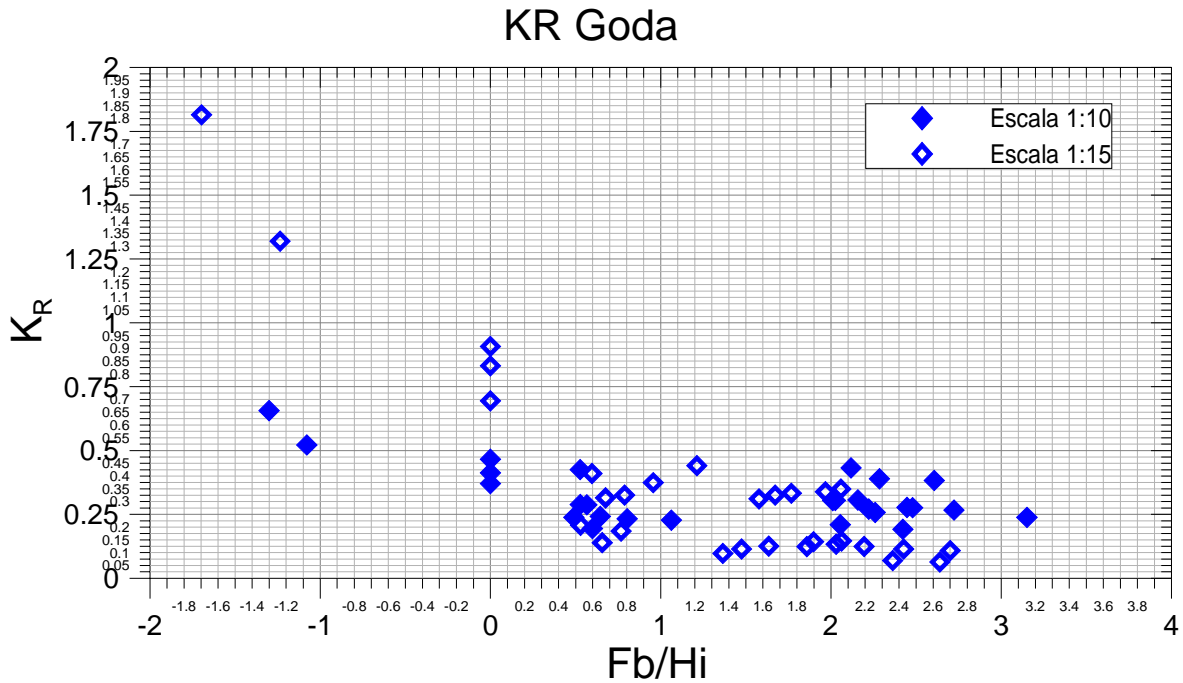


Figura B. 1. Coeficiente de reflexión a partir de la altura de ola incidente significativa obtenida por el método de Goda y Suzuki (1976) para el dique 1.

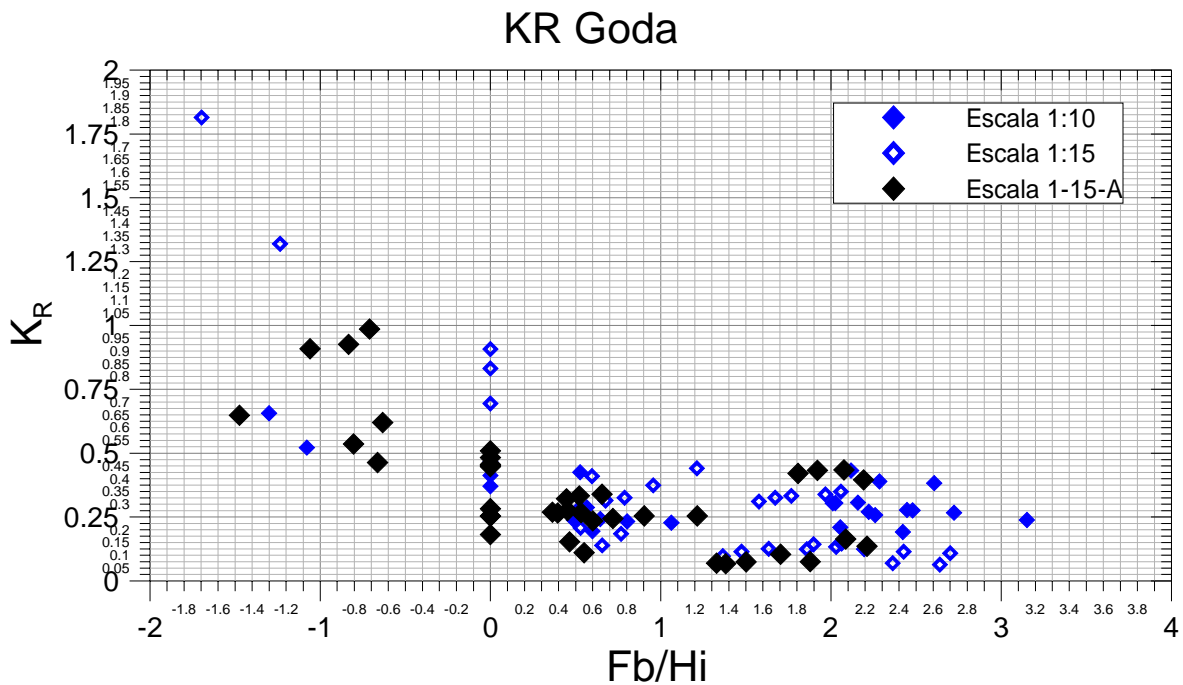


Figura B. 2. Coeficiente de reflexión a partir de la altura de ola incidente significativa obtenida por el método de Goda y Suzuki (1976) para los diques 1 y 2.

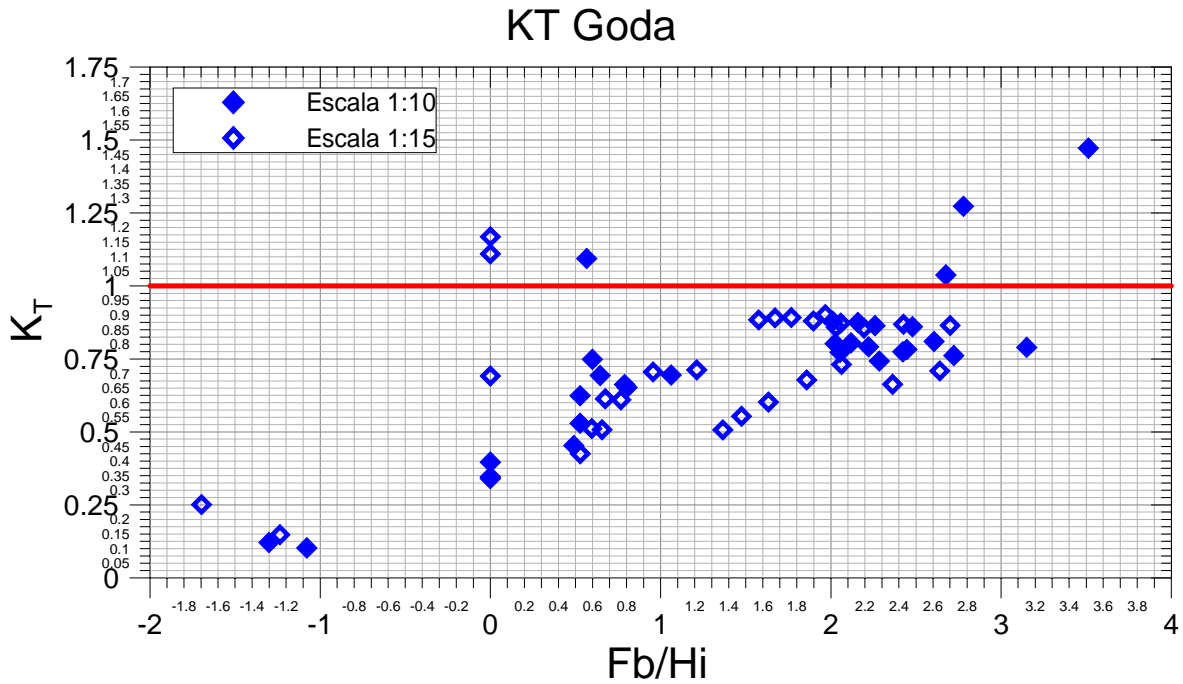


Figura B. 3. Coeficiente de transmisión a partir de la altura de ola incidente significativa obtenida por el método de Goda y Suzuki (1976) para el dique 1.

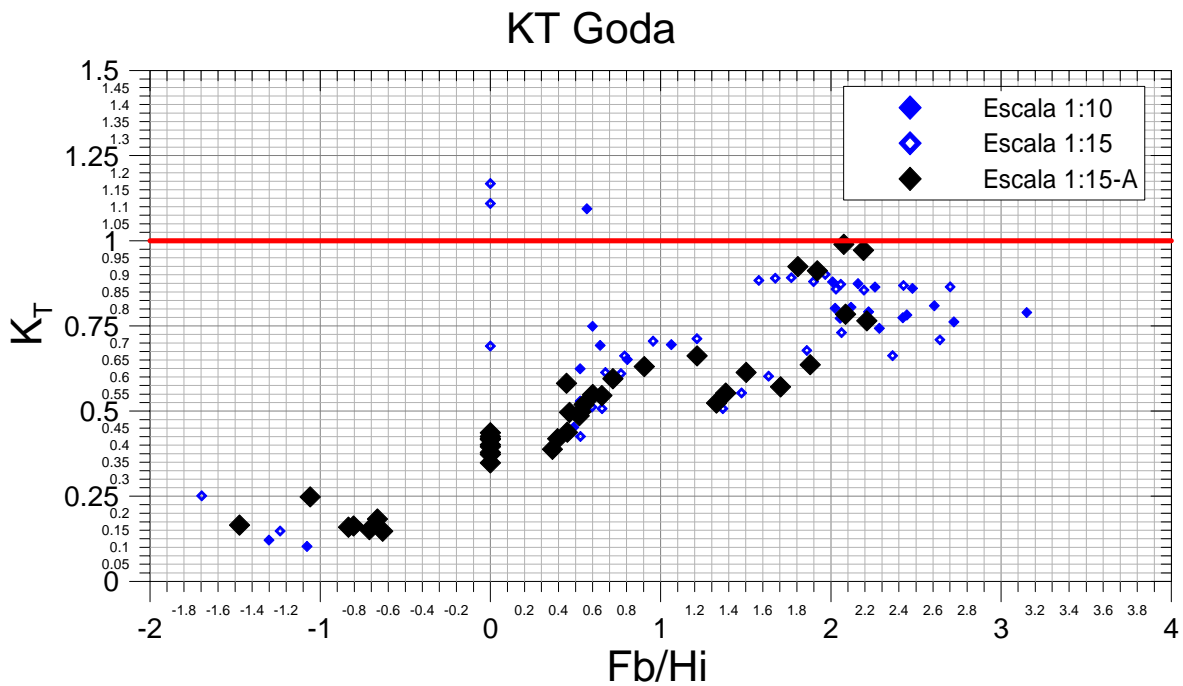


Figura B. 4. Coeficiente de transmisión a partir de la altura de ola incidente significativa obtenida por el método de Goda y Suzuki (1976) para los diques 1 y 2.

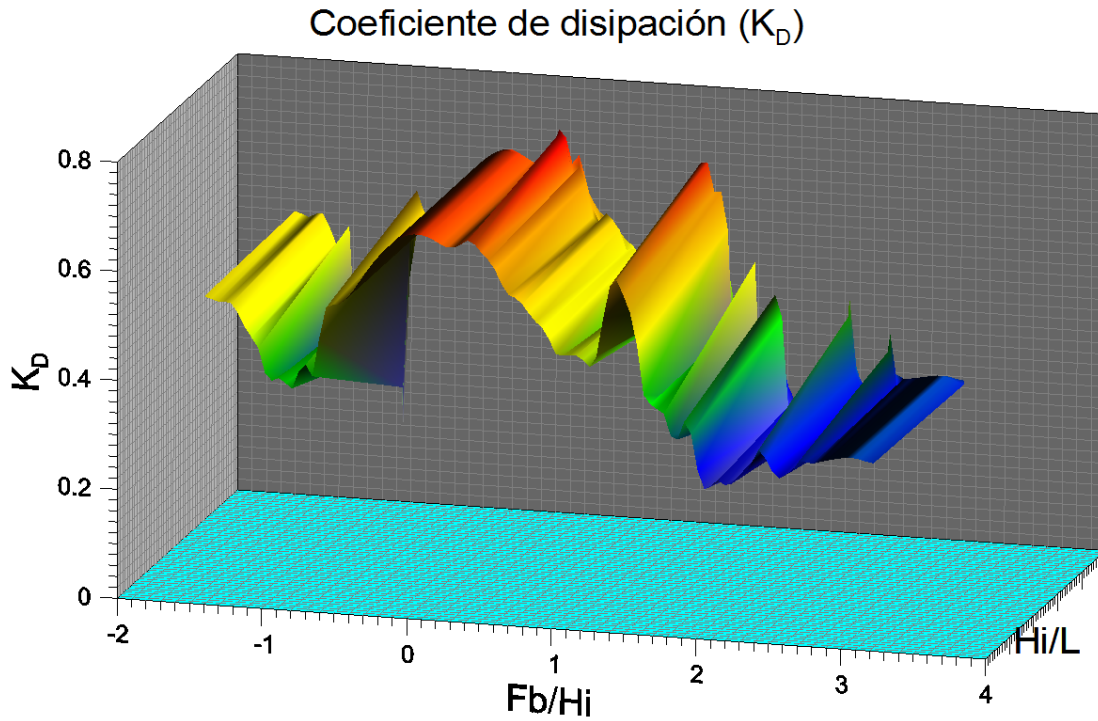


Figura B. 5. Coeficiente de disipación a partir de los coeficientes de transmisión y reflexión obtenidos por el método de Goda y Suzuki (1976) para el dique 1.

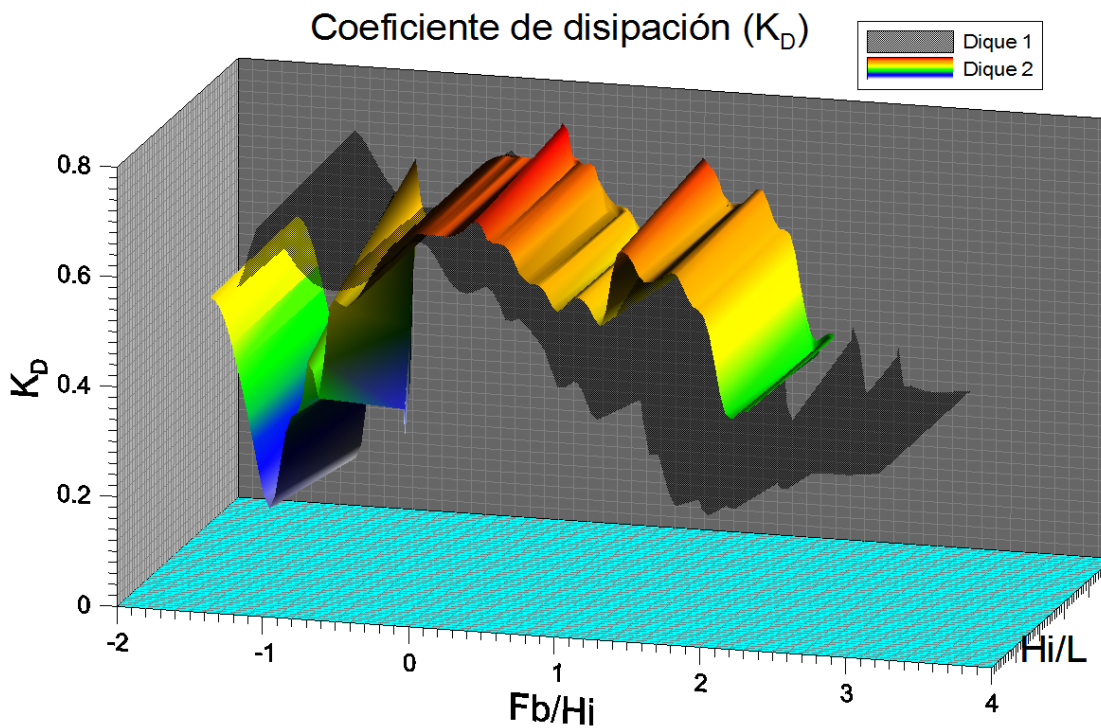


Figura B. 6. Coeficiente de disipación a partir de los coeficientes de transmisión y reflexión obtenidos por el método de Goda y Suzuki (1976) para los diques 1 y 2.