



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Diseño Funcional de Diques Sumergidos para  
la Protección de la Costa y Aprovechamiento  
de Hábitats Marinos**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Carlos Alejandro Ruiz Guerrero

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Para mi madre,

## Agradecimientos

A mis padres, mi hermana y el resto de mi familia, siempre presentes para toda situación presentándome su apoyo inmensurable para terminar mis estudios de licenciatura.

A la Universidad y a la Facultad de Ingeniería por permitirme ser parte de esta gran comunidad y otorgarme todos los conocimientos y experiencias para lograr dar este gran paso.

Al Dr. Edgar Mendoza por permitirme formar parte del Grupo de Costas y Puertos y al Instituto de Ingeniería, compartiéndome un nuevo campo de estudio en la ingeniería de costas.

A Dea y Daniel por permitirme apoyarles en la realización de los experimentos durante mi servicio social y a la vez aprender el proceso de trabajo, con lo cual se fueron gestando las bases de este tema junto con su apoyo posterior para desarrollarlo.

A David, Ana, Jassiel, Emigdio, Anahí y Cesia por su apoyo, amistad y conocimientos compartidos durante mi estancia en el Instituto de Ingeniería.

A Grupo IXAN por su apoyo y la oportunidad de poder colaborar con ellos en el proceso de elaboración de esta tesis.

A mis compañeros Luis, Pedro, Daniel y Arturo por ser el apoyo primordial para lograr salir adelante durante este proceso y en el cual siempre han estado presentes.

A mis compañeros Antonio y Manuel por todos los años pasados y los que faltan por recorrer.

A todos, gracias.



## Resumen

---

Todas las construcciones costeras alrededor del mundo están sujetas al efecto del oleaje incidente y una de las estructuras capaces de protegerlas sin provocar tanto impacto visual son los diques sumergidos. Este tipo de diques pueden asemejar el funcionamiento de un arrecife artificial en el proceso y favorecer el desarrollo biológico de la zona mejorando el ecosistema. Para que un dique sumergido pueda funcionar adecuadamente en ambos sentidos se deben considerar sus características biológicas (acreción y desarrollo de especies marinas), morfológicas (función de forma para ambos fines) e hidráulicas (disipación de energía y vida útil de la estructura) en todo momento del diseño. Tres elementos básicos que otorgarán una respuesta inicial y cercana de su comportamiento y eficiencia son los coeficientes de transmisión, reflexión y disipación, los cuales se pueden obtener desde una prueba experimental con modelos a escala para su posterior colocación en la costa.

## Abstract

---

Every coastal structure around the world is subject to the effect of incident waves. One structure capable of protecting them without having significant visual impact, are submerged breakwaters. This type of breakwaters can mimic artificial reefs and favor biological development throughout the area enhancing the ecosystem connectivity and functioning. For them to properly work within both ends, the design should consider their biological (accretion and development of marine species), morphological (correct function in form for both purposes) and hydraulic (energy dissipation and usability lifetime) characteristics. There are three main elements used to characterize the initial response, efficiency and behavior of the submerged structures, namely transmission, dissipation and reflection coefficients. These can be obtained through experimental tests in a laboratory with scaled models, so they can be extrapolated to full size prototypes.

# Índice General

---

RESUMEN	IV
ABSTRACT	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS	VIII
INTRODUCCIÓN	IX
MOTIVACIÓN	IX
OBJETIVO GENERAL	X
ORGANIZACIÓN DE TRABAJO	X
<b>CAPÍTULO I - DIQUES COMO ELEMENTOS DE PROTECCIÓN</b>	<b>1</b>
CLASIFICACIÓN DE DIQUES	2
DIQUES SUMERGIDOS	4
DIQUES SUMERGIDOS CONTRA OTROS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN	6
OLEAJE	7
<b>CAPÍTULO II - CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS</b>	<b>10</b>
CORALES MARINOS	11
COMPOSICIÓN Y REACCIÓN DE MATERIALES	16
CAUCHO	16
METAL	17
CONCRETO	18
PLÁSTICO-POLÍMEROS	19
MADERA	20
ATRACCIÓN Y COLONIZACIÓN DE ESPECIES MARINAS	20
IMPACTOS EN EL ECOSISTEMA	25
<b>CAPÍTULO III - CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS</b>	<b>27</b>
FORMA DE LA ESTRUCTURA	27
LOCALIZACIÓN	30
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS Y EROSIÓN - ALTERACIÓN DE LA COSTA	31
<b>CAPÍTULO IV - CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS</b>	<b>34</b>

ENERGÍA DEL OLEAJE	34
NAVIER – STOKES PROMEDIADO EN LA VERTICAL	36
BOUSSINESQ PROMEDIADO EN LA VERTICAL	36
ECUACIÓN DE PENDIENTE SUAVE	36
ECUACIÓN EXTENDIDA DE PENDIENTE SUAVE	36
NAVIER-STOKES PROMEDIADA DE REYNOLDS	37
MÉTODOS LAGRANGIANOS	37
MÉTODOS CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL	37
PERCEPTRONES MULTINIVEL (MLP) Y FUNCIONES EN BASE A RADIOS (RBF)	38
ALGORITMOS DE PROPAGACIÓN DE REVERSA	38
ALGORITMO LEVENBERG-MARQUADT	38
REDES RBF	39
ELEMENTOS DE DISEÑO	39
DISIPACIÓN DE ENERGÍA	43
TRANSMISIÓN	45
ÁRRECIFES ARTIFICIALES COMO DIQUES DE PROTECCIÓN Y VICEVERSA	46
TURBULENCIA	49
FALLAS HIDRÁULICAS	51
<b>CAPÍTULO V – EXPERIMENTOS Y RESULTADOS</b>	<b>54</b>
<hr/>	
DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA MODULAR	54
DESARROLLO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL	62
RESULTADOS	63
ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
<b>CAPÍTULO VI - CONCLUSIONES</b>	<b>71</b>
<hr/>	
<b>REFERENCIAS</b>	<b>72</b>
<hr/>	

## Lista de figuras

---

Figura 1 – Diferentes tipos de diques: .....	4
Figura 2– Dique Sumergido .....	5
Figura 3– Elementos de una Ola .....	7
Figura 4– Efectos del oleaje al llegar a costa a) Refracción b) Difracción c) Reflexión del Oleaje.....	9
Figura 5– Piezas Eco-Reef y ReefBall .....	15
Figura 6 – Fondo marino con llantas .....	17
Figura 7– Buque sumergido con desarrollo biológico .....	18
Figura 8 – Estructuras ReefBall con especies completamente desarrolladas.....	22
Figura 9 – Comparativa en la superficie de piezas en Haifa .....	23
Figura 10 – Desarrollo en piezas en Haifa a 24 meses .....	24
Figura 11 – Vista superior con partes de un dique.....	27
Figura 12 – Corte transversal con las secciones de un dique regular .....	28
Figura 13 – Dique en reposo y dique anclado .....	28
Figura 14 – Dique uniforme y dique segmentado.....	30
Figura 15 – Creación de salientes y tómbolos en la costa.....	32
Figura 16 – Piezas WABCORE .....	47
Figura 17 – Espiral de Ekman.....	50
Figura 18 – Intensidad de Turbulencia Sobre un Dique.....	51
Figura 19 – Piezas PR -B .....	54
Figura 20 – Piezas PR -T.....	55
Figura 21 – Armado de piezas en dique.....	55
Figura 22 – Medidas oficiales del modelo en cm .....	56
Figura 23 – Medidas de piezas modulares en m .....	58
Figura 24 – Piezas modulares modificadas.....	58
Figura 25 – Primer prototipo de cimbra a)Cimbra b)Madera para los agujeros.....	59
Figura 26 – Segundo prototipo de cimbra .....	59
Figura 27 – Tercer prototipo de cimbra: a)Parte superior b)Parte inferior c)Pieza colada.....	60
Figura 28 – Comparativa de Piezas Terminadas: Primero, Segundo, Tercera Prototipo y Final .....	61
Figura 29 – Detalle de pieza de producción: a)Vista superior b)Vista lateral c)Armado del dique.....	62
Figura 30 – Perfil de Playa Utilizado en Experimento.....	63
Figura 31 – Perfil sin estructura, régimen medio ( $H = 0.10$ m, $T = 0.894$ s, $h = 0.45$ m) .....	67
Figura 32 – Perfil sin estructura, tormenta 1 ( $H = 0.10$ m, $T = 1.118$ s, $h = 0.48$ m) .....	67
Figura 33 – Perfil sin estructura, tormenta 2 ( $H = 0.05$ m, $T = 1.118$ s, $h = 0.45$ m) .....	67
Figura 34 – Perfil con estructura a 15 cm, régimen medio ( $H = 0.10$ m, $T = 0.894$ s, $h = 0.45$ m).....	68
Figura 35 – Perfil con estructura a 15 cm, tormenta 1 ( $H = 0.10$ m, $T = 1.118$ s, $h = 0.48$ m).....	68
Figura 36 – Perfil con estructura a 15 cm, tormenta 2 ( $H = 0.05$ m, $T = 1.118$ s, $h = 0.45$ m).....	68
Figura 37 – Perfil con estructura a 30 cm, régimen medio ( $H = 0.10$ m, $T = 0.894$ s, $h = 0.45$ m).....	69
Figura 38 – Perfil con estructura a 30 cm, tormenta 1 ( $H = 0.10$ m, $T = 1.118$ s, $h = 0.48$ m) .....	69
Figura 39 – Perfil con estructura a 30 cm, tormenta 2 ( $H = 0.05$ m, $T = 1.118$ s, $h = 0.45$ m).....	69
Figura 40 – Perfil con estructura a 30 cm, $h_s = 0$ cm, Tormenta 3 ( $H = 0.10$ m, $T = 1.118$ s, $h = 0.45$ m).....	70

## Lista de tablas

---

Tabla 1 – Afectaciones y Olas Significantes para Diferentes Periodos de Retorno .....	40
Tabla 2 – Coeficientes de Transmisión, Reflexión y Disipación para Régimen Medio.....	64
Tabla 3 – Coeficientes de Transmisión, Reflexión y Disipación para Tormentas .....	65

# Introducción

---

## Motivación

Las zonas costeras en México y alrededor del mundo son una parte esencial del desarrollo económico contribuyendo como agente comercial, turístico y residencial, y por ello su operabilidad se debe mantener en óptimas condiciones el mayor tiempo posible; sin embargo, estas zonas son propensas gran parte del año a fenómenos naturales de diferentes magnitudes como lo son huracanes, depresiones, tormentas tropicales, etc.

Considerando lo anterior, existe un fenómeno siempre presente en el océano que golpea en todo momento a la playa: el oleaje, que a lo largo del tiempo puede generar alteraciones y daños por sí sólo. Estas pueden ser tan sencillas como el movimiento de los navíos al encontrarse en un puerto impidiendo la carga o descarga, hasta procesos complejos, como el acarreo de sedimentos, los cuales son capaces de deformar o incluso deshacer la playa por completo.

Otra de las alteraciones presentada en los océanos es la devastación de flora y fauna marina, principalmente representada a través de los arrecifes de coral; su blanqueamiento propicia una disminución importante de especies que puede afectar directamente las especies de pesca para las personas; y al perder integridad física, también disminuye su capacidad de protección de la zona y el ecosistema.

Atendiendo a las problemáticas presentadas, los diques sumergidos son una estructura capaz de funcionar como un sustituto de un arrecife de coral con el cual se puede lograr una atracción de especies regenerando un hábitat marino, mientras que proporcionan cierto nivel de protección sin alterar visualmente la costa y a su vez permiten controlar otros aspectos como la estabilidad o deformación de las playas.

No todos los diques sumergidos son construidos para ambos fines pues no todas las playas requieren de las mismas solicitaciones y sus características son variadas; por ello, se pretende plantear un conjunto de lineamientos que influyen en su diseño y creación, capaces de ser considerados sin importar el lugar de colocación del dique a nivel mundial.

## Objetivo general

La finalidad de la presente tesis es obtener una serie de lineamientos que faciliten el diseño óptimo de un dique sumergido considerando sus funciones morfológica, hidráulica y biológica. Según las necesidades operativas del dique, se proporcionarán recomendaciones constructivas, de forma, materiales y localización enfocadas en la combinación de una, dos o las tres funciones mencionadas.

## Organización de trabajo

Esta tesis se encuentra dividida en seis capítulos de la siguiente forma:

En el primer capítulo se parte de la descripción general de los tipos de diques, indicando sus características generales de forma y funcionamiento. De aquí se delimitará el estudio y características específicas de los diques sumergidos.

En el segundo capítulo se presentan las cualidades de tipo biológico necesarias para sustentar vida marina cerca de los diques, éstas incluyen el material, la forma y localización de las piezas para su éxito en el ecosistema.

En el tercer capítulo se tienen las características físicas de los diques y su respuesta en la zona litoral, la reacción de la playa ante el transporte o no de sedimentos, la erosión posible a presentar y los distintos niveles de protección.

En el cuarto capítulo se presentan las fuerzas actuantes en el dique y la respuesta del mismo ante ellas, la energía del oleaje, transmisibilidad de la ola en la estructura y la respuesta hidráulica del material del dique.

En el quinto capítulo se encuentran las descripciones de los experimentos realizados en el Instituto de Ingeniería para comparar la respuesta hidro-morfológica de un dique conformado por una pieza diseñada para para protección de la costa y una modificada para el desarrollo de organismos marinos.

Finalmente, en el sexto capítulo se presentan las conclusiones obtenidas de las comparaciones, así como las recomendaciones y comentarios pertinentes para la creación de un dique sumergido de la forma más conveniente según las necesidades de la playa.

## Capítulo I - Diques como elementos de protección

---

El desarrollo de los puertos siempre ha estado presente a lo largo de la historia desde las primeras civilizaciones; poblaciones como Babilonia, Egipto o Roma utilizaban los barcos como medio de transporte y comercio con las zonas cercanas, y todos tenían puertos sencillos que permitían la entrada y salida de alguna zona marítima. Los primeros diques construidos se pueden rastrear atrás en el tiempo hasta los años 4000 a.C. aproximadamente, atribuidos a la isla de Creta, en la ciudad de Cnosos la cual se sabe realizaban comercios con los egipcios; esto se sabe después de que descubrimientos arqueológicos por Gaston Jondet en 1910 y 1915, mostraron una estructura construida en el lecho marino como parte del puerto de Pharos que aunque no los construían específicamente para protección, ya contaban con estas estructuras para la entrada y salida de los puertos.

Más adelante se tienen registros de puertos vikingos que contaban con diques construidos de rocas grandes y también pilas colocadas con barcos hundidos para proteger los puertos de navíos enemigos. Posteriormente, debido al desarrollo en el comercio marítimo en los siglos XVII y XVIII y se comenzaron a colocar puertos de cara al mar abierto (los primeros se colocaban al lecho de ríos o en bahías naturales lo que dificultaba el acceso en muchas ocasiones), y se descubrieron las complicaciones que el oleaje y los sedimentos provocaban en sus estructuras. Muchas de estas estructuras fueron destruidas o reposicionadas hasta encontrar un punto adecuado de funcionamiento, mientras en Bélgica y Holanda ya se realizaban pruebas para verificar la utilidad de los diques.

El estudio de los diques se fue haciendo cada vez más completo y complicado puesto que al revisar las solicitudes de los materiales era difícil conseguir rocas tan grandes que fueran capaces de soportar la energía del oleaje; es entonces cuando se hace uso del concreto, el cual proveyó las cualidades necesarias y capaces de sustituir a las rocas. Por otro lado, también permitió la colocación de diques con profundidades más allá de los 20 metros y la creación de las primeras figuras “entrelazables” (mejor conocidos como tetrápodos) que generaron bastantes problemas en sus inicios por su limitada resistencia en su unión, esto alrededor de 1950 (Bruun, 1985).

Muchos de estos modelos fallaban muy a menudo por diferentes causas que se presentarán más adelante, pero esto ayudó a tener la base de estudio actual que permite estudiar su respuesta y comportamiento detallado con un mayor número de variables consideradas.

Actualmente las estructuras siguen sirviendo a la misma finalidad: protección a la costa y a los navíos al entrar en zonas de carga o descarga ya sea de mercancía o personas. A pesar de contar con estudios extensos que respaldan su eficiencia, no eximen a la necesidad de que requieran de un monitoreo periódico para cuidar que sus condiciones de operabilidad corresponden a un margen aceptable de trabajo. Al siempre estar sujetas a esfuerzos externos tienen una alta demanda de uso, en otras palabras, siempre están actuando desde el primer minuto de su colocación. Por las mismas razones no se puede esperar que un dique funcione por siempre y es común considerar algún método de reparación en el diseño en dado caso que las condiciones a futuro no permitan la implementación de un proyecto nuevo.

También es importante señalar que no por colocar un dique todos los problemas en la zona pueden ser eliminados ya que a su vez pueden generar otras cuestiones no necesariamente relacionadas con la protección de la playa y esto conlleve un gasto acumulado mayor a cierto tiempo futuro.

## Clasificación de diques

Los diques pueden ser colocados sobre la costa o mar adentro dependiendo de la zona y el nivel de protección; usualmente se colocan de forma paralela a la playa y actualmente no cuentan con clasificaciones bien definidas.

En una división se podrían considerar de alta o baja incidencia energética: contruidos con piezas grandes y pesadas de concreto o rocas, o piezas más pequeñas creando estructuras continuas, segmentadas o hasta flotantes; cada uno de los diferentes tipos tiene sus propias características de armado y forma. Algunos ejemplos se muestran en la Figura 1 (CFE, 1983).

- **Diques de bermas** – Se construyen con una berma pronunciada que sobresale del nivel medio del mar. Utiliza piezas más ligeras ya que la idea de su implementación es que permita el movimiento de las mismas y alcance una estabilidad

dinámica junto con la playa. No se espera que mantenga su misma forma siempre y no son recomendables para lugares de alta incidencia energética.

- **Diques sumergidos y rebasables** – Colocados costa fuera, se encuentran por debajo del nivel medio del mar y un factor importante en ellos es la transmisibilidad de la ola considerada a través o más importantemente por encima del dique.
- **Diques verticales y mixtos** – Ambos son estructuras verticales creadas con cajones, bloques o pantallas apoyadas sobre una banquetta de escollera o hincada en el fondo. Su principal diferencia es que la ola debe romper específicamente en el vertical mientras que en el mixto puede romper antes por fondo o con la banquetta del dique. Según las características de la marea puede actuar como mixto o vertical en la misma ubicación. Su funcionamiento no permite disipar la energía, sino que más bien la refleja de vuelta.
- **Diques con espaldón** – Se llaman así cuando la estructura del dique se encuentra cimentada por encima del nivel medio del mar; también conocido como pantalla deflectora. En ellos la ola rompe sobre el talud y por ello son los que más energía disipa, la ola alcanza a la estructura solo durante el proceso de ascenso.
- **Espigones** – Estructuras costeras que pueden ser paralelas o perpendiculares a la playa, diseñadas para protegerlas contra la acción erosiva de las corrientes y el oleaje; se puede lograr la estabilización o restitución de la playa.
- **Diques de cortina** – Pueden interceptar las olas entrantes sin detener las corrientes estables, esto es preferible en lugares como el desembocadura de un río o una región de mareas. Estas estructuras pueden colocarse en zonas con suelos blandos debido a su bajo peso y es posible soportarlas con pilas.
- **Diques flotantes** – Son estructuras ancladas al suelo marino y no se colocan muy separadas de la playa, más económicos que las otras opciones, pueden ser cambiados de lugar con facilidad y no requieren de un suelo específico para soportarse. Como desventaja es que si llegan a separarse pueden ser un peligro para embarcaciones que transiten por la zona, no son fáciles de reparar en sitio.



Figura 1 – Diferentes tipos de diques::

a) Dique con tetrápodos, b) Espigón, c) Dique con espaldón

## Diques sumergidos

En el océano existen dos formaciones naturales que actúan como protección de la costa: arrecifes de coral y bancos de sedimentos, que, a pesar de no contar con una gran masa, son capaces de disminuir la incidencia energética en la costa; al retirar esas formaciones, la protección de la costa disminuye causando mayores daños a zonas ya establecidas.

A partir de este concepto se creó una estructura capaz de simular el mismo fin lo cual dio lugar a otro tipo de dique conocido como sumergido; tal y como el nombre lo indica, son estructuras de diversos tamaños capaces de proteger las zonas costeras del oleaje, que se encuentran por debajo del nivel medio del mar. En la antigüedad han existido registros de hasta 2000 años atrás en Grecia, donde se utilizaban principalmente como medios de protección contra los navíos enemigos colocando diversos objetos capaces de lastimar su parte inferior. En la Figura 2 se muestra un dique sumergido sencillo.

Al sustituir los elementos naturales en el lecho marino, estas estructuras funcionaron también para la atracción y colonización de especies marinas y ello dio lugar al otro uso por el cual también son conocidos: arrecifes artificiales; como tal pueden ser cualquier tipo de desecho o material no afectable por el agua, y en el que los microorganismos se pueden adherir para desarrollarse y atraer otros organismos más grandes generando o desarrollando un ecosistema. Cuando se coloca un arrecife artificial no se espera que funcione como un dique propiamente ya que puede llegar a ser muy pequeño para lograr interferir con la ola y no atenuarla en lo más mínimo. Usualmente se diseñan con uno u otro fin, no combinados.

En el caso de ser estructuras de protección, estos diques funcionan muy bien para reducir la energía del oleaje sin requerir el uso de mucho material prefabricado o armados de concreto, incluso pueden ser realizados únicamente con agregados de diferentes diámetros para cada una de las secciones del dique. Se ha comprobado que son capaces de reducir la altura de las olas y disminuir ondas de gran magnitud (Sarawagi, 1995).

Por otro lado, podemos añadir el transporte de sedimentos que se genera con su colocación: la acumulación es el efecto principal, los sedimentos se juntan gradualmente formando playas más largas si existen corrientes transversales a la costa o salientes de material acumulado detrás de la estructura; también puede llegar a disminuir en casos específicos. Estos movimientos se tratarán en el capítulo III.

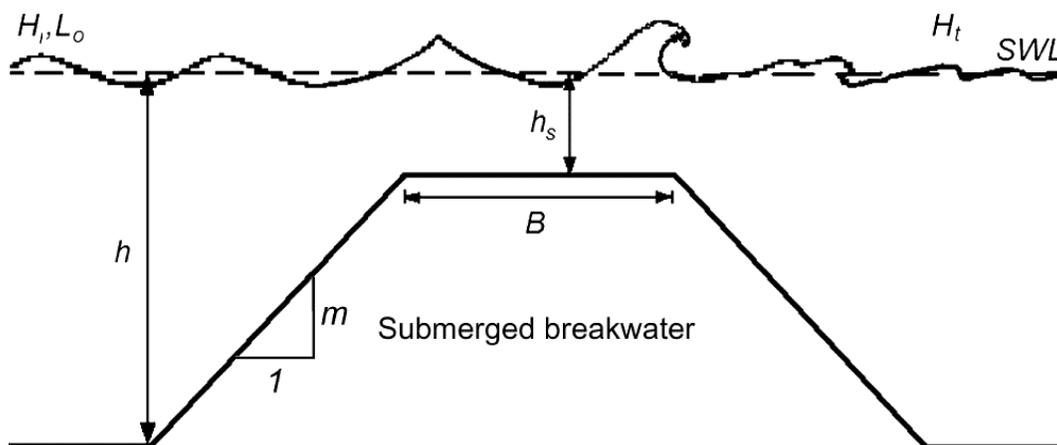


Figura 2- Dique Sumergido (Sharif, 2016)

## Diques sumergidos contra otros elementos de protección

Comparar y elegir cuál es el mejor método de protección costera es un proceso que debe considerar el estado actual de la zona y los alcances que se requieren según el caso (reparar, aumentar o disminuir el perfil, minimizar el oleaje, etc.). No se puede decir que uno es mejor que otro sin tomar en cuenta cuál es su finalidad. Debido lo anterior, para esta comparativa se toman los siguientes dos elementos: disipación de energía y transporte de sedimentos.

Contra métodos duros de protección, los diques sumergidos son buenos pues actúan para ambos fines: buena protección de la playa y acarreo de sedimentos para alargarla. Son las segundas estructuras más comunes para protección de costas, después de las paredes verticales.

Las paredes por otro lado tienen una mayor resistencia para oleajes de alta incidencia energética, son mucho más resistentes ya que cuentan con el apoyo de alguna estructura en tierra firme, siempre se colocan pegadas a la costa. El problema con las paredes es que, a lo largo del tiempo con la desestabilización de la playa, en la zona principal se genera una playa muy corta y en las zonas antes del inicio y término de la protección, la playa tiende a extenderse tierra adentro por hasta más del doble de la distancia inicial (French, 2001).

Respecto a los espigones, estos no sirven mucho para protección perpendicular de la playa contra oleaje, sino contra corrientes paralelas. Son utilizados mayormente en canales de entrada a algún puerto para evitar que las corrientes literales arrastren a los barcos hacia algún lado del canal. Por otro lado, también son muy buenos para la acumulación de sedimentos; colocados correctamente, pueden ayudar a la extensión de la playa hacia el mar incluso a diferentes longitudes dándole forma desde un inicio.

Finalmente se tienen los diques emergidos, con la capacidad de cubrir una amplia variedad de estructuras y costas pues son muy resistentes. Tienen un gran alcance y se pueden colocar tanto en mar adentro como pegados a la costa. Sus materiales de construcción son prácticamente los mismos que los sumergidos y su principal diferencia es que no están sujetos a una altura de ola para funcionar. Esto no quiere decir que no pueda pasar agua por encima de la estructura, sólo que también es parte del diseño cuánta agua se permite pasar e idealmente sería escurrimiento pues no haría transmisión de energía.

Contra los métodos suaves de protección no hay mucha comparación puesto que estos métodos se basan en disipar la energía mediante mejoras costeras que asemejen procesos naturales de estabilidad: relleno de playas, recarga de sedimentos, modificación del perfil de playa. En caso de requerirlo, podrían utilizar algún otro tipo de protección para ayudar a uno de sus procesos.

## Oleaje

Se conoce como oleaje a un conjunto de ondas que viajan en un cuerpo de agua. Estas son originadas por diversos motivos, los más comunes son el viento, la atracción gravitatoria y los movimientos telúricos.

Para el caso específico del mar, las ondas viajan desde mar adentro, donde se genera el movimiento, hacia las costas, donde se disipa la energía. Como cualquier tipo de onda se pueden identificar sus principales elementos (Figura 3):

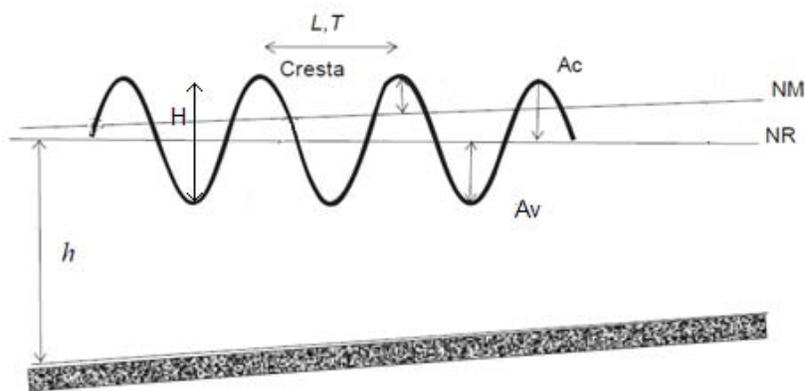


Figura 3- Elementos de una Ola - Adaptada de Garnica (2008)

$H$  - Altura de la ola

$L$  - Longitud de la ola, se puede considerar también como el periodo ( $T$ )

$A_c$  - Amplitud de cresta

$A_v$  - Amplitud de valle

$h$  - Profundidad

En un caso ideal donde el oleaje es constante:

$$H = A_c + A_v$$

Cuando el líquido se encuentra estable, su nivel de reposo puede no coincidir con el nivel medio que se genera al tener oleaje presente.

Al ser el oleaje una onda energética, existen cuatro casos que sufren las olas al llegar a la costa e interactuar con las estructuras presentes:

- **Disipación** – La ola rompe y la energía se pierde por completo. Es el final de la onda y se puede presentar en la playa o estructuras costeras.
- **Reflexión** – Puede ser de forma ‘perfecta’ que ocurre cuando se refleja con la misma cantidad de energía hacia el exacto lado opuesto del que golpea; se genera en el choque con materiales impermeables. La reflexión ‘imperfecta’ se da cuando la ola regresa, pero con una cierta cantidad de energía disipada en la estructura y no necesariamente en la dirección opuesta; esta se da cuando choca con materiales permeables.
- **Refracción** – Este fenómeno ocurre cuando la profundidad del lugar cambia y el oleaje golpea en diferentes puntos del cambio. La celeridad de la ola disminuye y su dirección cambia hacia la forma de las líneas batimétricas.
- **Difracción** – Presente con estructuras mar adentro, cuando el oleaje no se ha disipado aún. Se genera cuando la ola golpea el morro del dique y se modifica su trayectoria hacia la parte interna en un patrón circular y en el cual se disminuye bastante la energía. Este oleaje alcanza un límite en la parte interna del dique y se disipa gradualmente.

Se pueden apreciar dichos movimientos en la Figura 4.

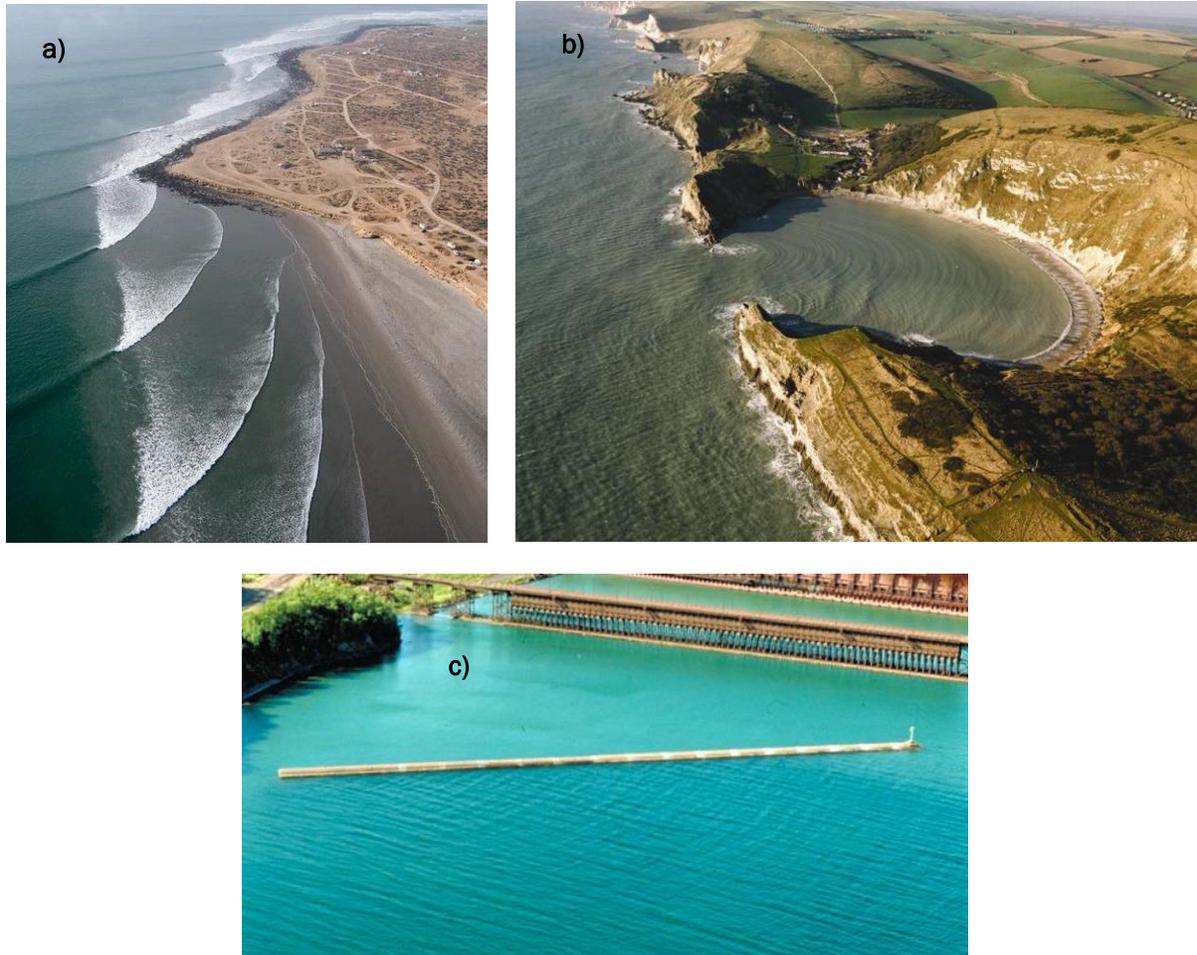


Figura 4– Efectos del oleaje al llegar a costa a) Refracción b) Difracción c) Reflexión del Oleaje

Estos fenómenos pueden ocurrir en conjunto, dependiendo del lugar donde llega a golpear la ola, y es importante conocer cuales están presentes al momento de realizar un análisis ya que son recursos que permiten un mejor modelo y resultados más adecuados.

Cuando la ola alcanza el punto final en la playa y se disipa por completo la energía se dice que la ola ‘rompe’. Si se tienen estructuras planas y muy duras, al golpear simplemente se disipa la energía en forma de calor o energía y desaparece la ola. Otra forma de romper es al llegar a un punto máximo de sí mismas, donde se vuelven inestables y disipan su energía.

Existen otros parámetros más que se consideran para un análisis costero, sin embargo, se presentarán en el capítulo IV.

## Capítulo II - Características Biológicas

---

En muchas publicaciones los diques sumergidos son considerados igualmente como un arrecife artificial; sin embargo, no es tan sencillo colocar cualquier conjunto de pedacera y esperar que se colonice por especies cercanas a la zona. Son diversos factores los que permiten el crecimiento de especies y la misma estructura debe ser capaz de mantenerlas por un periodo largo para crear un ecosistema adecuado.

Como se mencionó anteriormente las estructuras marinas se han rastreado muchos siglos atrás para su uso y lo mismo es para los arrecifes artificiales: sus primeros usos datan de aproximadamente 2200 años en donde el historiador Polybio registró el uso de arrecifes por los romanos a través de la entrada al puerto de Cartago para detener navíos enemigos durante la Primera Guerra Púnica; 200 años después registros del griego Strabo hablan sobre arrecifes utilizados por los persas en el Río Tigris para detener el paso de navíos hindúes a la zona.

Con el tiempo, su finalidad fue relegada de protección de puertos hacia fines más ecológicos. En el año de 1830 se tiene registrado el primer arrecife artificial moderno en Estados Unidos de América: se colocaron pedazos de troncos en conjunto con la finalidad de mejorar la pesca; en las costas de Carolina del Sur. Desde ese entonces se utilizaron con la misma finalidad y se empleaban materiales varios como árboles, rocas, conchas, cuerpos de barcos, entre otros.

A partir de los años 70's se vio un avance en su creación con ingeniería, pensando en reparar o regenerar un ecosistema marino en una zona que requiera de recuperación e incluso de forma recreativa para el snorkeling y el buceo.

La especie más relacionada con los arrecifes naturales o artificiales, son los corales marinos y su máxima representación está en Australia: la Gran Barrera de Coral, en la cual se concentran arriba de 600 especies diferentes de coral en una extensión de 2 300 kilómetros; esto aunado a ser hogar de miles de especies más. Desde los años noventa se han registrado pérdidas sustanciales de aproximadamente 50% del coral existente hasta la década de 2010; esto sin considerar la restauración que se ha trabajado en un periodo a la par para mantener su integridad en lo posible. Actualmente todos los esfuerzos han logrado disminuir el impacto negativo tanto en ésta como otras formaciones de coral alrededor del planeta, sin embargo, el resultado no es el esperado para

considerarlas fuera de peligro. Ha sido una gran carrera para lograr salvaguardar uno de los ecosistemas más grandes y diversos del planeta.

## Corales marinos

Inicialmente se debe tener en consideración que un arrecife no es lo mismo que un coral: el coral es la especie marina viviente que blanquea cuando muere mientras que el arrecife son depósitos de calcio que se van formando por los desechos y los corales muertos; se consideran como una especie de exoesqueleto que sirve de apoyo, así como protección y vivienda para las especies que llegan a colonizar la zona.

En una división sencilla los corales marinos se pueden clasificar según la cantidad de tentáculos y su tipo de soporte:

- Hematípicos – Capaces de crear arrecifes a partir de las secreciones de carbonato de calcio, son de tipo pétreo. Los hay de 6 tentáculos (hexacorales) y algunos de 8 (octacorales). Se mantienen en aguas someras, temperaturas promedio de 25°, fuerte penetración de luz, zonas de alta energía y con sustratos firmes; mucho cuidado en sus ecosistemas ya que son más sensibles a los cambios en su entorno.
- Ahermatípicos – Estos corales no construyen arrecifes, todos son octacorales, conocidos como córneos y suelen ser corales flexibles. No son tan abundantes como los anteriores y pueden mantenerse en zonas con condiciones ligeramente diversas a las usuales de corales pétreos o de algunos peces comunes de la zona; las características del agua pueden variar bajo límites aceptables sin causar un problema y suelen crecer más rápido.

Los corales pueden vivir en diferentes profundidades, el promedio de especies en general se encuentra hasta los 30 ó 40 metros. De los 50 metros en adelante se encuentran corales conocidos como mesofóticos y se han reportado hasta los 150 metros de profundidad. Su estudio requiere de maquinaria especializada ya que se encuentran fuera de los límites del buceo regular pero se consideran más como casos particulares que una presencia regular de corales profundos (Hindestein et al., 2010).

En México se cuenta con alrededor de 78 a 81 especies de coral en una extensión total de 1,780 km<sup>2</sup>; del lado del Caribe y golfo de México viven de 45 a 60 especies, mientras que en el Pacífico se tienen registradas aproximadamente 17 especies diferentes. De corales blandos se tienen registradas aproximadamente 50 especies diferentes. La mayor afectación en el país ocurrió en el año 1998, en el cual se registró un blanqueamiento en 39% de los corales existentes; para esa temporada se registró un aumento en la temperatura promedio de 2.8°C. Esto afectó alrededor de 50% de todo el Sistema Arrecifal Mesoamericano.

A nivel mundial los corales son responsables del 25% de biodiversidad marina y son una fuente de ingresos, alimentos y protección para más de 100 países diferentes (Logan, 2010).

De las especies más comunes que se pueden observar se tienen: coral de fuego, coral cuerno de ciervo, coral gorgóneo, coral cerebro. En total se tienen las siguientes áreas protegidas en el país:

- **Golfo de México** – Área de Protección de Flora y Fauna Sistema Arrecifal; Lobos-Tuxpan; Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano; Banco de Campeche; Parque Nacional Arrecife Alacranes Yucatán.
- **Caribe** – Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos; Sistema Arrecifal Mesoamericano; Parque Nacional Arrecifes de Cozumel; Reserva de la Biosfera Banco Chichorro; Banco Nacional Arrecifes de Xcalak; Reserva de la Biosfera Arrecifes de Sian Ka'an.
- **Península Baja California** – Parque Nacional Cabo Pulmo; Bahía de la Paz; Los Frailes.
- **Nayarit** – Isla Jaltemba; Bahía Banderas.
- **Jalisco** – Bahías Tenacatita; Islas Marietas; Cabo Corrientes; Zihuatanejo.
- **Oaxaca** – Puerto Escondido; Puerto Ángel; Parque Nacional Huatulco.

La mayoría de las especies de coral son muy susceptibles a las variaciones que se han acrecentado en los últimos años respecto parámetros específicos en los océanos en general y una ligera variación en cualquiera de ellos es suficiente para causar un problema en el coral:

- **Temperatura** – La temperatura no cambia mucho en una zona amplia del mar a la misma profundidad, pero los cambios climáticos generales han influido en aumentar el promedio general tanto externa como internamente. Otra razón posible en este aspecto es la existencia de alguna corriente oceánica cerca que sea capaz de alterar regularmente las temperaturas cercanas a los corales. Los corales viven en temperaturas que van desde los 19 hasta los 30°C, sin embargo variaciones tan pequeñas como 1°C o 2°C son suficientes para causar daños (siempre y cuando su temperatura promedio sea estable).
- **Salinidad** – La cantidad de sal no va a presentar mucha variación mientras la ubicación sea en áreas aisladas de mar, donde puede presentar un problema es en zonas cercanas a cuerpos de agua dulce: estuarios, islas con montañas o cenotes.
- **Cambio de pH** – El causante principal de nuevo vuelve a ser parte del calentamiento global: la acumulación de dióxido de carbono; al caer al océano reacciona con el agua y crea ácido carbónico liberando iones hidrógeno ( $H^+$ ) los cuales han acidificado año con año los océanos en general. En casos específicos puede haber un cambio de pH por accidentes marinos o descarga de desechos de algún tipo.
- **Nivel medio del mar** – El cambio de altura media del mar puede afectar la cantidad de luz que recibe el coral, puede influir en la temperatura, y en caso de estar cercano a la costa, si esto afecta la altura de las mareas puede llegar a causar que la marea baja disminuya más de lo normal exponiendo a las especies al contacto del aire causando diversos daños.
- **Tolerancia de sedimentos** – Se refiere a la cantidad de sedimentos suspendidos que puedan interferir con la alimentación del coral; también pueden afectar mediante la producción de mucosa en exceso para limpieza propia, bloqueando las zonas cercanas para la penetración de luz.
- **Basura** – En caso de que en la zona se junten desechos de naturaleza humana puede afectar la alimentación de corales y otras especies, así como el paso de luz nuevamente. Esto podrá no causar daños severos si se reacciona rápidamente y en caso de que así sea, su resolución no requiere de acciones a largo alcance tan drásticas como lo serían los otros problemas.

Todos los corales cuentan con una relación simbiótica con algún tipo de alga para subsistir: estas se encuentran en el tejido del coral y le proveen de nutrientes orgánicos, a su vez las algas reciben nutrientes inorgánicos y protección. El 90% de los nutrientes proviene de las algas con el resto de su alimentación de zooplancton.

En un seguimiento en especies sobrevivientes a blanqueamiento se pudo observar que las especies de alga cercanas cambiaban posterior al episodio. Estas nuevas especies de algas se encontraban en otros corales que presentaban cierta resiliencia a los cambios de temperatura. El cambio es algo inusual ya que en caso de ocurrir estando sano el coral, existe la probabilidad de que se afecte su salud y blanquear. No se tienen datos exactos sobre la causa del fenómeno, pero se ha considerado como una medida evolutiva que puede prestarse a la subsistencia de los corales después de fenómenos dañinos (Baker et al., 2004).

Como se mencionó, la acidificación de los mares también es otro problema presente que se propicia en todos los corales del mundo. Al disolverse el dióxido de carbono se generan ácido carbónico, que a su vez genera bicarbonato, carbonato e iones de hidrógeno. El tipo de mineral base del carbonato de calcio depende de la afectación que puede ocasionar la acidificación; aragonita y calcita de alto magnesio son de las más resistentes comparadas con calcita simple.

Una disminución en la saturación de carbonato de calcio puede incrementar la disolución de estructuras existentes y desprotegidas de carbonato de calcio. Los corales que utilizan calcio o se basan en él tienen un problema grave ya que al reaccionar mayor cantidad de CO<sub>2</sub>, menor será la disponibilidad de calcio disuelto y carbonatos, y las estructuras existentes pueden comenzar a disolverse por igual (Logan, 2010).

Actualmente existen piezas y métodos probados que ayudan a desarrollar el crecimiento de corales (y otras especies), que pueden servir si no se tiene una idea bien desarrollada del tipo de apoyo más adecuado para las especies. Es necesario revisar cuáles son los alcances probables de cada estructura y si el costo es adecuado para el proyecto:

- **Arrecifes Biorock** – Creados a partir de un proceso conocido como acreción, en el cual se colocan electrodos en el agua, se pasa una corriente eléctrica y comienza a juntar los minerales disueltos en el agua. Recomendables para proyectos cortos como viveros, generadores de fragmentos de coral e investigación cercana.

- **Eco-Reefs** – Módulos construidos de cerámica parecido a un copo de nieve tridimensional, su diseño en ramales permite que se rompan los apoyos y ayude a dispersar los corales conforme colonizan los módulos. Permiten un crecimiento acelerado comparado con otros módulos como concreto. Se presenta junto con el anterior en la Figura 5.

- **Módulos generales de concreto** – Cualquier módulo inventado que utilice concreto reforzado, suelen ser de menor tamaño; no se recomienda su uso para métodos de propagación.

- **Módulos piramidales** – Arrecifes piramidales o ‘colonias’ de agrupación, construidos de metal y/o llantas, son diseñados principalmente para atracción y proyectos de peces, los materiales no permiten desarrollo de coral.

- **Llantas** – Utilizadas solas se consideran arrecifes flotantes, se unen por medio de cadenas y con el tiempo suelen moverse de su ubicación inicial, en caso de liberarse prácticamente quedan como basura a la deriva en el mar. Pueden presentar más daños que beneficios ambientales e incluso afectar hábitats de especies existentes.

- **Fondo natural vivo** – Incentiva el desarrollo natural del fondo marino, limpiando y resguardando el lugar. Depende mucho de la zona y el tipo de proyecto, no es recomendable cuando puede desplazar o dañar especies existentes, así como causar competición, depredación y enfermedades entre las especies.



Figura 5– Piezas Eco-Reef (Izquierda) y ReefBall (Derecha)

## Composición y reacción de materiales

Pensando en un material para realizar una estructura sumergida, hay tres elementos importantes a considerar: la composición salina del entorno, la resistencia a las fuerzas de oleaje, y su facilidad de adaptación al entorno; por ello son pocos los materiales que puedan cubrir los tres elementos y mantener un costo bajo respecto al tamaño del proyecto. Estos son los materiales más comunes utilizados en estructuras marinas:

- **Caucho**

Material base de la composición de las llantas principalmente, se compone de gomas naturales y sintéticas (estireno-butadieno, polibutadieno, butilo) creadas de polímeros obtenidos del petróleo, éstas fueron muy comúnmente utilizadas algunos años atrás. Para mejorar su resistencia, algunas incluyen una malla metálica de refuerzo y también cuentan con carbón y sílice. Junto con los materiales principales, cuenta con ciertos aditivos que funcionan como antioxidantes, antiozonantes, y son responsables de disminuir su rápido desgaste, lo cual hace que las llantas tarden muchos años en degradarse naturalmente. Por esta misma razón se comenzaron a utilizar, como una solución a su desecho junto con la posible capacidad de regenerar hábitats, como arrecifes artificiales.

El primer y más grande proyecto creado con llantas, fue el Arrecife de Llantas Osborn, en las costas del condado Broward, Florida, construido en el año de 1967. Para el año de 2001 se revisó su estado general, mostrando que las llantas se habían extendido en un área cercana de 150,000 m<sup>2</sup>. Se realizó una prueba revisando y limpiando una zona de 20 x 20 m, se retiraron alrededor de 1,600 llantas y los resultados arrojaron que muy poco material orgánico se encontraba dentro o encima de ellas como se puede apreciar en la Figura 6. Las llantas del lecho (primera capa), se encontraban cubiertas de arena sin cambios ni degradación significantes. Finalmente se decidió monitorear dicha zona durante el siguiente año cada cuatro meses, desgraciadamente después de la primera visita, el sitio se encontraba totalmente cubierto de llantas de nuevo, mostrando que el puro oleaje sencillo era capaz de mover las llantas sin existir algún evento de gran magnitud y su facilidad para extenderse en poco tiempo. Por estas razones, se concluyó que no es un material recomendable para ninguna estructura marina, y en caso de utilizarse, se debe monitorear constantemente para revisar que sus anclajes no han fallado y las piezas sigan estables en la zona indicada (Sherman & Spieler, 2006).



Figura 6 – Fondo marino con llantas (Sherman, 2006)

- **Metal**

Es un material de fácil manejo, relativamente ligero y muy resistente a los esfuerzos. A pesar de ello, sus usos son reducidos y costosos en estructuras marinas por el efecto de la corrosión-oxidación. El tratamiento más básico y común es la adición de cromo a la aleación de acero y carbono, dando como resultado el acero inoxidable (este representa un aumento en costo de aproximadamente el doble, respecto a una tonelada de acero regular). Otros tratamientos utilizados para elementos metálicos en zonas costeras son: capas protectoras, protección catódica con varillas, o acero cubierto con protección de pintura metálica y/o plástica.

Considerando lo anterior, se han utilizado cuerpos de vehículos inservibles como parte de la solución para su desecho y aprovechamiento, su uso como arrecifes artificiales. Esta misma capacidad de oxidación permite a los organismos sujetarse del metal en las partes corroídas y comenzar a crecer alrededor. Se ha probado que estructuras de este estilo generan una mayor concentración de especies de coral en su estructura tal como se observan en la Figura 7, alcanzando aproximadamente un 70 % más de corales presentes que la utilización de arrecifes muertos para regeneración (Fitzhardinge & Bailey-Brock, 1989).

A pesar de ello, no es muy recomendable colocar una estructura completamente nueva de metal debido a los altos costos de producción. El hundimiento controlado de navíos o vehículos es la mejor opción para aprovechar este material (Figura 7).



Figura 7– Buque sumergido con desarrollo biológico

- **Concreto**

Compuesto de cemento, agregados y agua generalmente con un soporte de acero, es el material más utilizado para estructuras marinas. Tiene una gran resistencia contra las fuerzas externas en el mar y una larga vida útil si se diseña correctamente para soportar salinidad del agua. Su maniobrabilidad es relativamente sencilla, cuenta con la capacidad de tomar forma en diseños variados y su fabricación puede generarse rápidamente en serie. Con un diseño adecuado y un monitoreo regular pueden llegar a durar periodos relativamente largos sin mayor problema.

Ecológicamente el concreto común se considera un material no apto para el ecosistema, muy probablemente debido a la alcalinidad del mismo (pH de -13 contra -8 del agua salada), junto con el problema de que sus compuestos son tóxicos para las especies marinas. Al tener contacto con el agua, ésta comienza a aumentar su pH y acidificar la zona, por consiguiente, afectando el crecimiento de los soportes a base de calcio.

La principal causa de falla en estas estructuras es la de oxidación del acero de refuerzo, lo cual lleva a la falla del concreto y por ende de la estructura, pero para que ello ocurra primero debe de lograrse el acceso de agua hasta el interior de la estructura: El cloruro contenido en el agua comienza a penetrar el concreto hasta alcanzar el acero y después de un contacto extenso pierde su capacidad protectora y comienza a disolverse, los iones  $Fe^{2+}$  reaccionan y se forma la corrosión hasta romper el acero, esto puede crear en un inicio esfuerzos (de expansión) con los que se truenan el concreto y posteriormente la disminución de sección transversal, fallando

la estructura. A partir de ello se pueden ubicar dos estados de oxidación en el acero: iniciación, cuando el valor de cloruro permitido máximo en el acero es alcanzado; y propagación, tiempo posterior y aumento generalizado de cloruro en el acero.

- **Plástico-Polímeros**

Los plásticos por sí solos, no son utilizados para la creación de arrecifes artificiales (o cualquier estructura marina siendo el caso), ya que es un material con una densidad muy baja, que, a pesar de sí poder disipar la energía del oleaje, se requerirían secciones grandes y con un posible peso añadido para su mejor estabilidad.

Un estudio en la universidad de Sao Paulo, Brasil (Kelch & Zenker, 2012), en el cual utilizaron la forma de un arrecife flotante hecho por Harms en 1982 pero con botellas de plástico, mostró diversos problemas que se reflejarían a un proyecto parecido a gran escala:

- El modelo de plástico por sí sólo no tiene la rigidez necesaria para introducirse en el agua ya que, al tratar de sumergirlo, se deforma generando curvas longitudinales en todas direcciones.
- La obtención de cierta cantidad de botellas es un proceso tardado; siendo la idea poder aprovechar material de desecho, no es viable comprar otros contenedores para completar la estructura.
- Es recomendable tener algún tipo de peso extra en el modelo para prevenir la deformación al mínimo.

Los resultados arrojaron una buena respuesta del dique con una disipación de arriba del 90 % de energía de la ola, pero al percatarse de los problemas mencionados, no se propone que se haga a mayor escala el mismo modelo. Para participar correctamente en el proceso de reciclaje de plásticos en el océano, se tendrían que limpiar los océanos y a partir del material recaudado, generar una estructura con ciertas especificaciones para resistir lo necesario. Sin embargo, este desarrollo es tardado y más costoso que la utilización de otros materiales. Muy parecidamente a las llantas, siendo sintéticos muy resistentes, su degradación en el medio ambiente es muy tardada y si no se mantienen adecuadamente, pueden pasar rápidamente a ser otro desecho a la deriva.

- **Madera**

La madera es y ha sido uno de los materiales más utilizados a lo largo de la historia para todo tipo de estructuras por su abundancia, resistencia y facilidad de maleabilidad para crear diversos diseños.

En estructuras costeras también ha sido muy utilizada ya que ha presentado una buena preservación en un ambiente salino: se ha comprobado que maderas sin tratamientos suelen tener cierto nivel de resistencia a los organismos debido a la saturación salina que sufren al estar en contacto con el agua de mar (Schneider et al., 1996).

Para edificaciones costeras es común que la madera reciba tratamientos de protección con materiales a base de aceites para prolongar su vida útil; a la larga recubrimientos de este estilo se van perdiendo llegando a afectar las propiedades del agua en caso de estar en contacto con ella. Por las razones anteriores su uso no es recomendado para arrecifes artificiales debido a que los organismos no tendrían la capacidad de desarrollarse en un elemento que no permite su adherencia, y en el caso de colocar madera natural, la degradación se podría dar más rápido de lo esperado y fallar.

## Atracción y colonización de especies marinas

Cuando se planea la colocación de un arrecife artificial, es muy importante conocer las especies que se encuentran o encontraban en la zona, sus espacios necesarios para vivir y su capacidad de adaptación a un nuevo entorno. A partir de dicha información, se podrán diseñar adecuadamente las piezas necesarias para el nuevo lugar, propiciando el correcto desarrollo del ecosistema.

Cuando se pretende colonizar de nuevo una zona en estado deficiente, se debe analizar qué tipo de organismos se encontraban anteriormente y propiciar que los mismos vuelvan ahí. A futuro, el arrecife puede propiciar otro tipo de especies lo cual puede generar un desequilibrio ecológico y atraer especies invasivas que seguro generarán una colonización de microorganismos, mas no será el hábitat esperado y puede perjudicar a otras especies locales.

Estas especies generalmente conocidas como invasivas son más presentes en zonas marinas desarrolladas puesto que viajan por agua de lastre, cascos de los navíos o por agua de “cofre”. Para el año 2000, en el área del Mar Mediterráneo se registraron más de 550 especies que

fueron introducidas por el Canal de Suez (Ido & Shimrit, 2015). Como se mencionó anteriormente, es imposible evitar que dichas especies aparezcan, pero con el mismo desarrollo del ecosistema podemos dar paso a que las especies locales controlen y detengan la expansión de estas. Por ello es importante tener un monitoreo a lo largo del tiempo para permitir que las especies adecuadas tomen control del arrecife y pueda prosperar sanamente.

No todos los arrecifes artificiales tienen que ser creados considerando el crecimiento de especies de coral y esto puede marcar una diferencia en el diseño general de la estructura; en caso de que así fueran, tampoco serán la única especie marina presente y a futuro quedarán como una parte más de un gran organismo viviente.

La colocación de arrecifes va más allá de escoger un sitio y colocar alguna estructura inservible y esperar que las especies lleguen a crear un ecosistema nuevo. Generalmente se colocan en zonas arenosas o con fondos marinos lodosos y que cuenten con otros elementos como los mencionados temperatura, iluminación y nutrientes necesarios; no pueden tener únicamente una o dos de las características si se quiere una regeneración exitosa.

Considerando que el coral sí sea de principal importancia, con la clasificación anterior de las especies de corales, se puede elegir el primer tipo de sustrato que utilizar: bases a partir de especies generadoras de depósitos de calcio, algún fondo rocoso, lodoso, o incluso una combinación con la estructura nueva a colocar que pueda ayudar a un desarrollo rápido y adecuado de las especies.

El espacio requerido para una especie se puede denominar espacio vacío efectivo de protección, el cual delimita los movimientos más alejados de cada especie respecto a su lugar de permanencia; esto se da debido a que las especies encuentran protección en el arrecife contra depredadores mayores a ellos y de corrientes energéticas. Cuando existen corrientes lentas, el espacio aumenta debido a que las especies pueden alejarse un poco más y regresar sin problema, caso opuesto en ocasiones críticas como tormentas y corrientes de alta velocidad, no es sencillo que las especies se muevan tanto ya que se dificulta el regreso.

Este espacio se puede calcular de forma cercana a una media esfera alrededor de la zona y para ello es necesario conocer los patrones de movimiento de la especie para conocer sus alcances totales tanto en el día como en la noche, a este valor se resta el volumen total de la estructura hasta donde sea posible por irregularidades y se tiene un volumen final con el cual se tiene una extensión

para la colocación de otras estructuras y conocer si las especies futuras tendrán contacto unas con otras, afectando su desarrollo. Se puede realizar un estudio de espacio vacío de cada una de las especies que habitan en la zona y considerar el más adecuado según la finalidad del proyecto.

En caso de colocar una estructura más alta que el promedio de una zona con un hábitat establecido, se corre el riesgo de aumentar el espacio de protección de la zona afectando a especies existentes y sólo es recomendable colocar cuando los arrecifes cercanos permitan una buena adaptación a la nueva altura (Reef Ball Foundation, 2008).

Cuando la finalidad es hacer crecer alguna especie de coral, se utilizan adaptadores de anclaje de coral para colocarlos sobre el sustrato elegido, cuando este es natural es necesario barrenar para colocar el adaptador y en caso de ser una figura prefabricada es fácil considerar estas partes en el proceso de construcción (ver Figura 8).



Figura 8 – Estructuras ReefBall con especies completamente desarrolladas

Si se pretende tener un alto número de organismos en poco tiempo, una solución aplicable es utilizando materiales de residuo orgánico como base para el arrecife. Un experimento realizado en Mobile Bay, Alabama empleó estructuras hechas a partir de sacos rellenos de conchas de

almejas y a la par colocó las mencionadas Reef Balls para obtener una comparativa de la cantidad de organismos atraídos entre unas y otras.

En 630 m de costa en conjunto con el sitio de estudio de Helen Wood Park se colocaron ambas estructuras para estabilizar la línea de costa y mitigar la pérdida de hábitats naturales. De Reef-Balls se colocaron tres hileras con 41 piezas tipo Lo-Pro sin espaciado entre unas y otras; respecto a los sacos se colocaron alrededor de 2 000 con un volumen de 0.025 m<sup>3</sup>. Para cuantificar los resultados se hicieron tres mediciones en ambas estructuras durante los 2 años: nueve piezas y sacos retirados aleatoriamente para conteo de especies y examinación general; en caso de las especies se utilizaron redes para el conteo de especies.

Finalmente se encontró que, a pesar de ser estructuras de menor tamaño, son suficientes para proveer un hábitat adecuado para invertebrados móviles, bivalvos de filtración y peces jóvenes, una gran diferencia de concentraciones de bivalvos en el mismo periodo de tiempo siendo las conchas las más pobladas (Scyphers et al., 2014).

En este apartado, volviendo al tipo de material a escoger se debe tomar en cuenta que las especies pueden llegar a tener dificultad para adherirse a la superficie y comenzar su desarrollo:

Un estudio realizado en las costas de Haifa, Israel, presentó dos estructuras submarinas hechas una con ECONcrete con acabado rugoso y con oquedades (Figura 9), y otras con concreto regular con acabado liso. Después de 24 meses de monitoreo se encontró que las piezas de ECONcrete tenían un índice de diversidad de especies de 1.15 – 1.57 contra 0.5 – 0.76 en las piezas regulares mostrando una gran diferencia en cuanto a especies disponibles. Por otro lado, las especies invasivas también tuvieron mayor problema de adaptabilidad ya que las especies locales peleaban su espacio propio; se tuvo una relación de invasivas a locales de 0.57 contra 2 en las piezas regulares.



Figura 9 – Comparativa en la superficie de piezas en Haifa (Ido 2015)

Ambos parámetros reforzaron la teoría que el concreto con un acabado rugoso y con oquedades permite más fácilmente la readaptación de especies generadoras de hábitats (bivalvos, gusanos serpullidos, bryozoanes, algas de coral) para posteriormente atraer a las especies locales existentes (Figura 10). Como añadido, al cubrir estas especies a las figuras, se da un proceso de bio-protección ya que el carbonato de calcio desechado sirve como una protección externa para el concreto, así como un “bio-pegamento” que proporciona mayor rigidez y resistencia y una protección mayor contra los iones de cloro y la penetración de oxígeno (Ido, 2015).

Añadido a la rugosidad de las piezas se puede considerar incluso otro aspecto para la colonización: la orientación e inclinación de las superficies. Estructuras muy verticales tienen menor oportunidad de ayudar a las especies a adherirse y desarrollarse correctamente, o incluso no hacerlo en absoluto. Con estructuras a un mayor ángulo de reposo asemeja el perfil batimétrico natural y dependiendo del material nuevamente, puede propiciar a una mayor cantidad de especies. La orientación nos permite tener distintas entradas de luz natural dando paso a una distribución más amplia de organismos que requieran una cierta cantidad de luz natural en específico; para el caso de las algas es muy importante tener una adecuada entrada solar para lograr la fotosíntesis (Dyson & Yocom, 2014).

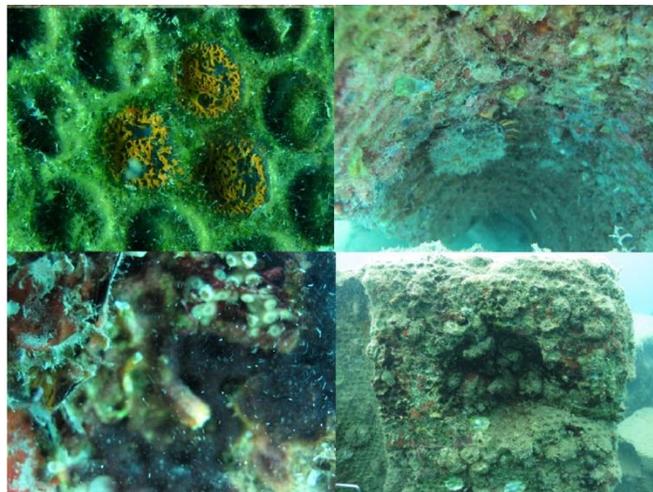


Figura 10 – Desarrollo en piezas en Haifa a 24 meses (Ido, 2015)

## Impactos en el ecosistema

Al construir un nuevo arrecife para las especies es importante considerar los alcances que se desean lograr, ver si es adecuado salvar el coral en estudio, traspassarlo a una nueva ubicación, colonizar un nuevo lugar a partir de una especie pobre en existencia, e incluso dejar morir al coral siendo que ninguna de las opciones sea viable en su rescate o la relación costo-beneficio total sea muy alta.

Al presentar un nuevo proyecto generalmente se espera que los resultados sean favorables y no existan alteraciones en el ecosistema. Esto es un proceso que puede basarse en resultados previos donde se ha utilizado la misma técnica y en una zona con condiciones parecidas al nuevo proyecto. Obviamente no podrá ser el mismo impacto dado que todas las zonas costeras son diferentes en cuanto a sus características y sollicitaciones biológicas, pero se esperará que sea positivo.

Hay que remarcar que un arrecife artificial es un ecosistema muy diverso y complejo y para llegar a tener altos niveles de calidad de vida se necesitan incluso años de cuidado extensivo (mínimo 5 años), ya que, en forma opuesta, pueden decaer y desaparecer en periodos cortos, ya sea por consecuencias climáticas o humanas.

Otro elemento dañino presente en todos los ecosistemas marinos son las poblaciones. En zonas comerciales y residenciales la construcción de paredes verticales y el acercamiento de las ciudades al mar ha propiciado zonas con altos niveles de polución de lo que principalmente son plásticos y sus derivados. Actualmente estos son la principal fuente de contaminación en el medio marino y afecta, no solo a las especies que ahí se encuentran, sino a los depredadores de ellas, subiendo por la cadena alimenticia, pues los plásticos se mantienen en sus organismos por mucho tiempo. En su proceso de descomposición, también se corre el riesgo de contaminar con agentes químicos que se desprenden y se mezclan con el agua. Otra afectación directa es en el paso de luz, al ser materiales flotantes, crean una capa superficial que bloquea su paso lo cual provoca daños a especies que aprovechan de ella.

Estudios realizados a través de cuatro años y abarcando arrecifes de Australia, Tailandia, Indonesia y Myanmar, mostraron que muchas zonas de corales se encuentran llenas de desechos plásticos que no son perceptibles a menos que se tenga más acercamiento. Estos son pedazos que llegan a hundirse y se atorán en los ramales de los corales los cuales, después de tener contacto, su

probabilidad de enfermedad aumenta de 4 % a 89 % y en el caso de corales blanqueados es todavía más peligroso, puesto que mueren más rápido de lo normal.

También existe el elemento de la pesca, tanto comercial como recreativa. En algunos puntos, los arrecifes se crean para sustento de pesca específicamente con la reproducción de las especies locales y mientras se tenga un control regulado en las cantidades de peces existentes, puede existir un balance para ambos fines. En el caso de la pesca recreativa, igualmente puede presentarse un déficit importante si las especies son pocas y no han logrado un avance en su crecimiento, esto puede causar que se detenga su desarrollo y eliminar las especies por completo (o nuevamente). Por ello es importante por parte de las autoridades crear programas de monitoreo para las especies y permitir estas actividades según sea posible e incluso llegar a su prohibición de ser necesario.

## Capítulo III - Características Morfológicas

Los diques cuentan con una estructura básica presente en todos ellos y los detalles específicos son adecuados según las características requeridas para cubrir su capacidad y objetivo. Normalmente por colocación en vista a la gente parecen muelles en medio del mar con rocas en todo su alrededor. Los sumergidos podrían ser visibles únicamente en caso de mareas bajas y muy específicamente en tormentas, esto dependiendo de su distancia y profundidad de la línea de costa.

### Forma de la estructura

A pesar de los diferentes tipos de diques existentes, todos cuentan con partes identificables en cada uno. La parte principal y alargada del dique se llama cuerpo mientras que la parte superior se le conoce como corona o cresta e indica el ancho menor de la estructura. Las partes finales del dique u orillas se conocen como morro y su forma influye en que el oleaje incidente viaje de cierta manera hacia la parte posterior del dique, suelen ser de mayor ancho que la corona ya que reciben un 50% de olas mayores que el resto del cuerpo. Los taludes se conocen como exterior o interior, siendo el primero el de cara al océano, y el segundo hacia la playa (Figura II).

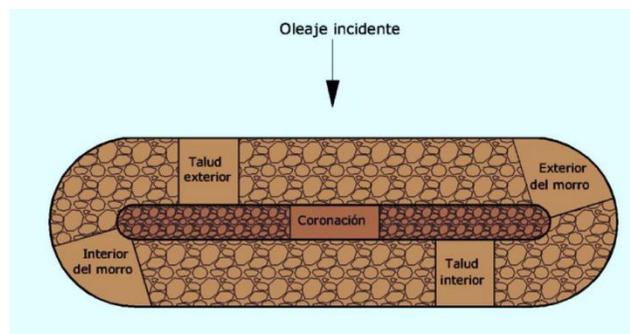


Figura II – Vista superior con partes de un dique (CFE 1983)

Al centro de la estructura cuentan con un núcleo de materiales permeables que permiten un flujo turbulento en su interior, con lo cual se disipa la energía y disminuye la reflectividad de la ola. El material debe ser permeable sólo para permitir dicho efecto, ya que siendo más permeable la transmisibilidad de la ola será mayor y no tendrá sentido la colocación del dique. Para terminar,

en la parte exterior de los taludes se colocan las piezas más grandes (boleos, gravas, tetrápodos) y de cierta manera desordenadas, para ayudar en la disipación de más formas como sea posible. En la Figura 12 se tienen los elementos del dique en corte vertical.

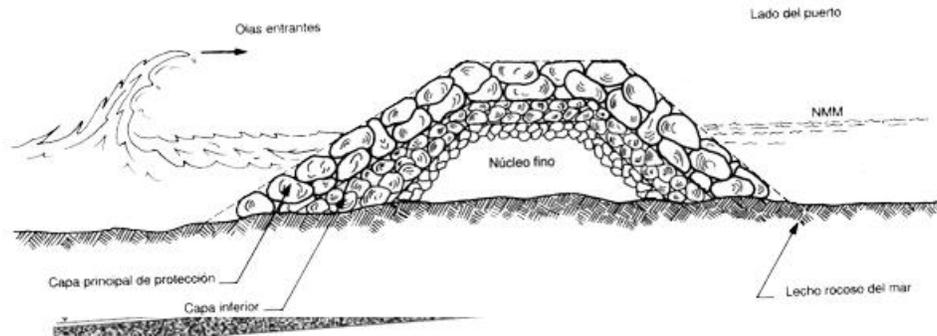


Figura 12 – Corte transversal con las secciones de un dique regular

Externamente en su forma más sencilla son prismas trapezoidales de gran base, algunos diseños cuentan con bermas para ayudar a disipar la presión del peso si la estructura requiere ser muy ancha. Respecto a su colocación en el mar, se pueden colocar solos, aislados, o varios en conjunto, conocidos como segmentados.

Por último, se puede mencionar su sistema de reposo, ya sea gravedad para la mayoría de diques o de anclaje en estructuras flotantes (Figura 13) para restringir más su movimiento (su construcción es algo limitada a aguas someras para evitar que los anclajes que estén sujetos a grandes esfuerzos y se rompan fácilmente).

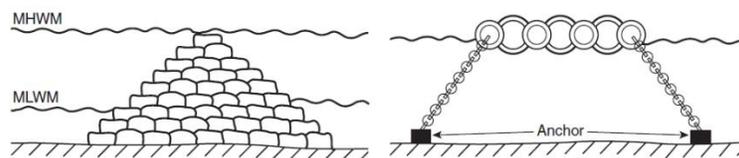


Figura 13 – Dique en reposo (Izquierda) y dique anclado (Derecha) (French, 2001)

Un problema presente al colocar estructuras costa fuera es que las fuerzas del oleaje son más grandes y la resistencia a la fricción entre el lecho marino y la estructura es mucho menor, lo cual ocasiona un movimiento más fuerte que podría crear deformaciones en la morfología general del armado y si no se atienden en tiempo, provocar la fallar la estructura.

Estas estructuras permiten la disipación de la energía cuando la ola pega con el talud. En caso de no golpear con esta zona, la rotura de la ola recae en la corona o en la estructura superior si cuenta con ella. La inclinación de dichos taludes depende de las solicitaciones de la zona para tener un diseño adecuado. Esta inclinación puede ser diferente en ambas caras del dique.

En datos obtenidos de pruebas, investigación y simulación se ha encontrado que entre 80 – 98 % del oleaje sobrepasa los diques en el evento de una tormenta y en condiciones normales la disipación de energía es alrededor de 35 – 45 % (Marcinkowski & Szmytkiewicz, 2013; Kubowicz-Grajewska, 2016).

Estas pruebas encontraron que un elemento que presenta mejoras al momento de diseñar contra oleajes de tormenta es aumentar el ancho de la corona con una disminución ligera en la sumergencia del dique. Experimentación anterior también ha encontrado que mientras más grande sea el periodo de la ola, más grande debe ser su altura en relación con la profundidad para que la rotura pueda ocurrir. Para olas más pequeñas y largas, la disipación es mucho menos violenta que con olas cortas. (Marcinkowski & Szmytkiewicz, 2013)

Retomando a la parte biológica, se encuentra la primera problemática al construir un arrecife artificial que funcione simultáneamente como dique. Como se mencionó, los mejores modelos de arrecifes son usualmente secciones pequeñas y segmentadas que se encuentran asentadas más cerca del fondo marino donde, dependiendo de la profundidad y ubicación de la zona, el oleaje puede ser de menor intensidad. Esto se traduce a menor daño.

Comparando la colocación de los arrecifes artificiales ya mencionados contra un dique, se observa que no tienen parecido en cuanto a ubicar una corona, taludes o un morro; entonces se debe cambiar la forma de estructurar la figura de una pieza colocada varias veces en una zona, a una pieza que pueda ser armable a una estructura de mayor tamaño que sí tenga parecido a un dique regular. Si se espera, por ejemplo, que un conjunto de ReefBalls soporte las mismas solicitaciones que un dique sólido de una sección con recubrimiento de roca, no tendrán la misma respuesta y durará mucho menos tiempo el primero.

En este punto se debe pensar en modelos mucho más grandes y que, si son formados por diferentes módulos, la escala real implica que las piezas tengan un tamaño considerable si se espera que tengan una buena respuesta ante la acción del oleaje. Para efecto de muestra, se tienen las figuras utilizadas por Monroy (2013), las cuales se presentan en el Capítulo V.

## Localización

La localización de un dique depende de la magnitud del oleaje en la zona a proteger. Como se ha mencionado, se debe evitar que las olas viajen en lo más posible encima de la estructura. Esto va unido a la rapidez con que aumenta la profundidad en dirección del océano; en una zona de este estilo como pueden ser las costas mexicanas del lado del Pacífico, es más probable que las olas no toquen al dique, y en caso de lograrlo seguramente será una estructura muy grande que reflejará un costo de construcción y mantenimiento muy alto.

Respecto a la cercanía a la cual se puede colocar, tampoco hay un parámetro fijo, de nuevo depende de las solicitudes del proyecto y el alcance deseado en cuanto a protección, transporte sedimentario u otros fines. De nuevo en el Capítulo V, se presentan algunos resultados al respecto.

Considerando la longitud de playa a proteger, el ángulo de colocación dependerá de la dirección predominante del oleaje. En la mayoría de los casos, los diques son colocados paralelos a la playa dado que esa es la dirección usual predominante.

Otra investigación arrojó resultados en los cuales, debido a la colocación de los diques, se incrementaron las velocidades de los flujos de retorno. Si se permite dicho movimiento, en las áreas cercanas se puede dar un fregado localizado por las grandes velocidades y posiblemente generar fallas en la estabilidad de la estructura (Kim et al., 2016).

Los diques pueden ser tan cortos o largos como sea necesario, cuando es una sección muy larga de costa es común la segmentación del dique en secciones más pequeñas (Figura 14). Esto permite una mejor orientación y control sobre los efectos costeros como lo son las corrientes litorales.

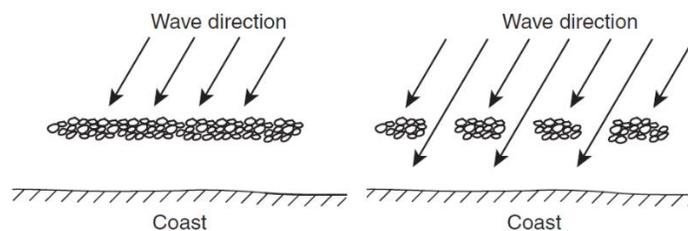


Figura 14 – Dique uniforme (Izquierda) y dique segmentado (Derecha) (French, 2001)

## Transporte de sedimentos y erosión - Alteración de la costa

En una forma muy general, la erosión es parte de un proceso de transporte de sedimentos y ocurre cuando se generan movimientos de grandes volúmenes que son ocasionados por algún fenómeno natural de gran intensidad o la afectación por colocación de estructuras artificiales costeras, y que no son parte de un ciclo natural de alteración de la playa por temporada. Su principal diferencia es que en el transporte se llevan y traen sedimentos a una zona en específico, mientras que en la erosión únicamente se considera una pérdida de material.

Cuando las olas golpean con la playa, se liberan sedimentos los cuales pueden ser transportados en suspensión, por arrastre o de forma combinada (influye el tipo de material existente); son llevados por las corrientes cercanas o al ser liberados al llegar a la costa y escurrir de vuelta por el movimiento de la marea. Este movimiento es uno de los principales problemas a futuro que se pueden presentar, después de haber colocado una estructura: si no se realizó el análisis correspondiente, el transporte puede llegar a cambiar por completo el perfil de la playa y afectar en su propósito. Por consiguiente, se tendría que detener – o aumentar, según el caso – el volumen transportado de sedimentos. Al final, de nuevo se debe conseguir la estabilidad dinámica en la costa, pero esta puede no ser la deseada por los ‘dueños-inversionistas-pobladores’ y el tiempo de asentamiento puede llegar a ser de años si las características de la costa sufren un cambio drástico.

Se distinguen dos formaciones principales que se dan en la playa en la parte posterior del dique después de su colocación:

- **Salientes y tómbolos** – Al golpear con el morro se genera la difracción de la ola con un movimiento hacia la parte interna. Con el tiempo esto empieza a acrecentar la cantidad de sedimento que acumula desde la playa hacia el dique, estas pequeñas acumulaciones se conocen como salientes. Cuando finalmente los sedimentos alcanzan la estructura se conocen como tómbolos y muy a largo plazo puede llegar a modificar la playa hasta comenzar en la línea del o los diques. Esta afectación ocurre más fácilmente en diques que se encuentran cercanos a la playa ya que en los más lejanos la refracción no es suficiente para lograr la acumulación (más no quiere decir que no puedan generarlos, sólo que pueden tomar más tiempo en lograrlo). Es muy probable que ocurran cuando se tienen diques

segmentados ya que la refracción entre las dos estructuras aumenta la energía remanente en la parte posterior de éstos (Figura 15).

- **Corrientes** – Con la acumulación de sedimentos se pueden presentar modificaciones a las corrientes litorales que podrían volverse un punto de erosión y/o lavado aguas arriba y abajo debido al aumento de velocidad por la disminución de espacio entre la playa y la estructura.

Otro efecto que puede ocurrir cuando se tienen diques segmentados son las corrientes de retorno, las cuales se generan por la difracción de las olas entre dos estructuras provocando una corriente de salida hacia el mar en medio de éstas. Estas corrientes pueden acarrear material desde la playa hacia aguas adentro y son peligrosas para el nado debido a que pueden llevar al bañista hacia zonas con oleaje fuera de la protección de los diques.

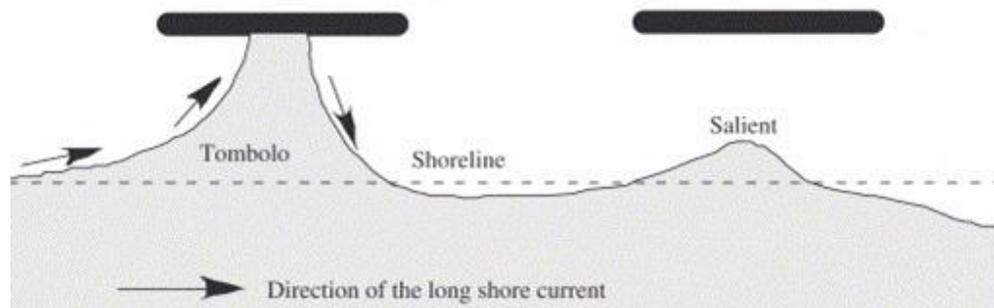


Figura 15 – Creación de salientes y tómbolos en la costa

En una comparación por Pan & Fairbairn (2016) hecha a través de una simulación en COAST2D se encontró que en los diques sumergidos es más propenso el transporte de sedimentos lo cual se refleja en menor probabilidad para la creación de tómbolos. También se encontró que para condiciones de tormenta ofrecen mejor protección para la costa creando únicamente salientes, por lo cual consideraron que los diques sumergidos producen un transporte de sedimentos más estable y balanceado en el área protegida.

En la estabilidad dinámica de una playa sí se considera el transporte de sedimentos mas no quiere decir que se detenga específicamente ya que los sedimentos se mueven siempre en la misma forma y volumen en el tiempo, así como su respectiva acumulación. Como se mencionó siempre

que se coloca alguna estructura de protección, sin importar cuál sea, dicha estabilidad es afectada y naturalmente deberá hacerlo nuevamente a lo largo del tiempo.

Este tipo de afectación se da debido a que la corriente comienza a jalar sedimentos desde zonas desprotegidas donde comienza la corriente y deja libre la zona para una erosión más grave, así como el acercamiento de la marea a zonas tierra dentro. Por otro lado, aguas arriba todo este material acarreado debe depositarse de nuevo en otro lugar según la posición del dique, y esto afecta de nuevo la estabilidad dinámica de la zona.

Estos no son los únicos elementos que generan alteraciones respecto a los sedimentos. Como se mencionó, la presencia de fenómenos naturales o incluso construcciones de gran magnitud pueden presentar afectaciones importantes, sin embargo, los anteriores son de los más comunes ante la presencia de diques.

Para identificar las cantidades de volumen involucradas en los fenómenos, se requiere de un cálculo de balance de sedimentos, donde se tengan las pérdidas y aportaciones para conocer el volumen neto disponible en el perfil de la playa. Es importante considerar el tiempo del año en que se realiza el análisis, debido a que pueden presentarse fenómenos naturales capaces de modificar el volumen en ciertas épocas (temporales, oleajes de alta intensidad o bonanza) y no por ello se considerará como erosión.

Biológicamente hablando, en la parte trasera del dique (de cara a la playa), se generan zonas aptas para el desarrollo de organismos debido a la disminución de energía. Esto puede ser una ventaja para nuevas colonias, o un problema para existentes: si los sedimentos se acumulan, los organismos pueden quedar sepultados o sin los hábitats a los que están acostumbrados y la adaptación puede no ser óptima pues la profundidad disminuye a la misma distancia desde un punto fijo en la playa. Si ya existían anteriormente, la colocación del dique ayuda a mejorar su monitoreo y conservación.

Al estar por debajo del agua, uno de sus principales usos confiere a zonas turísticas debido a que protegen a los visitantes de oleajes intensos, y no interfieren visualmente en el horizonte conservando el ruido visual al mínimo. Por otro lado, respecto a la seguridad de los usuarios, al no percatarse de los diques, las personas no tienen el impulso de llegar a él y subir. Igualmente suelen utilizarlos desarrolladores costeros para la acumulación de sedimento generando una mayor área de playa para su aprovechamiento.

## Capítulo IV - Características Hidráulicas

---

### Energía del oleaje

El oleaje puede ser generado de diferentes maneras, siendo la más común la fuerza del viento, seguido de los movimientos telúricos. Para el análisis del oleaje se toman mediciones en ciertas zonas cercanas a la zona de estudio como lo son las estaciones existentes meteorológicas (boyas). Existen diversos datos de recolección del esparcimiento de olas para poder utilizarlos en un análisis o modelación, estos se encuentran en organizaciones gubernamentales como CONAGUA, SIPROMAT, NOAA, entre otros.

El origen de todo oleaje está asociado a una frecuencia específica y un nivel de energía diferente. Al inicio del estudio del oleaje de forma científica, se consideraba al oleaje como un fenómeno perfecto (alturas, longitudes, periodos iguales); sin embargo, en realidad es muy diferente y actualmente es estudiado como un fenómeno aleatorio de una superposición de ondas que viajan en diferentes direcciones.

Dado que esto infiere que existen diversos parámetros participando al mismo tiempo, se requiere un valor específico que nos ayude a realizar un análisis. La finalidad es obtener inicialmente los siguientes parámetros en el oleaje:

- $H_s$  – Altura significativa de ola
- $L$  – Longitud de onda
- $\Delta_f$  – Intervalo de frecuencia de oleaje
- $\theta$  – Dirección predominante del oleaje
- $S$  – Nivel energético del oleaje

Para ello existen dos métodos que permiten obtener las características del oleaje en un tiempo y lugar determinado: el análisis temporal y el espectral de una medición de superficie libre. Se pueden considerar como modelos complementarios ya que uno se basa en la temporalidad del oleaje mientras que el otro se basa en las frecuencias. Ambos ofrecen los valores requeridos y se pueden usar por sí solos también. El primero se puede realizar a un conjunto pequeño de datos y es una forma más sencilla y gráfica para obtener la dirección predominante del oleaje. El segundo

es el más utilizado para grandes conjuntos de datos (más de 100) para encontrar un espectro direccional.

El análisis espectral utiliza la transformada de Fourier para obtener los componentes necesarios para el espectro de energía. Dependiendo de la cantidad total de datos, inicialmente es recomendable evitar las ondas grandes dentro del análisis, y en caso de tener alguna variación, posteriormente se puede utilizar un suavizado en el espectro para acotar el tamaño de las olas. En este paso se debe tener gran cuidado ya que, si el suavizado no se realiza adecuadamente, los resultados pueden variar en gran medida.

Finalmente se tiene la dirección predominante del oleaje representada a través de un espectro direccional. Si se junta el espectro direccional con un espectro frecuencial se forma un espectro más amplio conocido como espectro bidireccional.

A través de investigaciones a lo largo de la historia, se ha encontrado que los oleajes presentan ciertas características parecidas (velocidad del viento, fetch, frecuencia) al momento de estudiarse y por ello se han creado diferentes espectros de energía para utilizar según nuestras necesidades; algunos de los más utilizados son (Silva, 2005):

- Phillips
- Neumann
- Pierson-Moskowitz
- Bretschneider
- JONSWAP

Con ellos se pueden predecir espectros direccionales, alturas significantes de ola, periodos promedio, dirección promedio del oleaje, esfuerzos radiales y movimientos profundos sobre el dominio del modelo. También tienen la habilidad de modelar procesos que incluyen interacciones no lineales, refracción, someramiento, roturas producidas por profundidad y superficiales. Mayormente utilizados a gran escala, en aguas profundas y regiones alejadas. No son recomendables para pendientes pronunciadas y donde los efectos de difracción son importantes.

A partir de los datos obtenidos de un espectro para el diseño de los diques se utilizan modelos en dos o tres dimensiones, estos son analizados con diferentes modelos matemáticos según el alcance que se deseé. Los más utilizados se mencionan a continuación:

- Navier – Stokes promediado en la vertical

Modelos de los más utilizados para modelaje en dos dimensiones. No es muy útil en modelos donde la variación de la profundidad es importante. Si la presión hidrostática es considerada se puede tener un modelo semi tri-dimensional. Cuando no se considera la turbulencia, la ecuación es reducida a una ecuación de Laplace basada en la teoría de flujo potencial para flujos irrotacionales (transformación no lineal sobre profundidades variables).

- Bousinesq promediado en la vertical

Utilizadas en aguas de profundidad baja y media. Se puede aplicar a flujos no periódicos incluyendo dispersión de frecuencias. Estas ecuaciones se han ido modificando progresivamente para adaptarse a los modelos. Estas modificaciones han permitido simular la propagación de ondas de superficie de profundidades intermedias a someras, adicionalmente pueden ser modificadas para profundidades más grandes.

- Ecuación de pendiente suave

Utilizada principalmente para olas lineales en aguas medias y profundas. Se usan para aproximar la propagación del oleaje y su transformación, así como los cambios a lo largo de variaciones de profundidad y batimetrías con límites laterales; permiten calcular el campo del oleaje considerando los efectos de difracción de mar adentro hacia la costa. El perfil vertical de la velocidad es considerado en el modelo. También permite calcular las amplitudes de las olas y la velocidad del flujo. Sólo posible su uso con problemas de tipo lineal en donde no existe interacción entre olas.

Los modelos anteriores pueden ser aplicado a un plano bidimensional con la integración de la profundidad, en casos donde las variaciones de profundidad son importantes, estos modelos no funcionan adecuadamente.

- Ecuación extendida de pendiente suave

Es una variación de la anterior que sí permite el análisis de pendientes pronunciadas, olas aleatorias, predicción de oleaje aleatorio sobre una zona con alta variación topográfica, entre otros.

Una de las más útiles en diques sumergidos debido a su utilidad en pendientes y crestas con sumergencia baja.

- **Navier-Stokes promediada de Reynolds**

Utilizable en la interacción de olas y diques sumergidos especialmente para describir flujos turbulentos. Utiliza ecuaciones de flujo promediadas de tiempo. La descomposición de Reynolds se utiliza para derivar las ecuaciones completas de las de Navier-Stokes separando la variable del flujo a una componente promediada de tiempo y una fluctuante.

A su vez existen modelos más avanzados en tres dimensiones que nos permiten tener un alcance mayor al área de estudio, sin embargo, estos modelos requieren de un poder de procesamiento grande y que irá en aumento según las características que se utilicen.

- **Métodos lagrangianos**

Modelo basado en partículas en vez de elementos, utiliza diferencia finita, punto finito, hidrodinámica de partículas suaves, partícula reproductiva de kernel y elementos libres de Galerkin. El método suave divide el fluido en un conjunto de partículas con una cierta distancia espacial, así la cantidad física de cierta partícula depende de todas las partículas dentro de una distancia radial específica.

- **Métodos con inteligencia artificial**

Métodos basados en análisis computacional de gran nivel. Guardan información “aprendida” que pueden utilizar para resolver problemas. Redes Neuronales Artificiales son algoritmos paramétricos multidimensionales no lineales; pueden aprender relaciones entre parámetros de un proceso desconocido del que no se tiene un análisis matemático disponible (aprenden a través de la repetición de ejemplos). Consisten en números grandes de unidades computacionales conectadas mediante capas de peso que funcionan como sinapsis, mandando señales a otras unidades (unidades adquieren conocimiento, capas lo guardan). Son de dos tipos:

1. **Alimentación progresiva** – Redes supervisadas, consisten en tres o más capas ordenadas: una entrada, una salida y una o más ocultas. La señal viaja de la capa de entrada a la capa de salida no entregando retroalimentación o creando un bucle dentro de la red. La información entra por la capa de entrada pasa por las capas ocultas y finalmente sale por la capa de salida.

2. Alimentación regresiva – Los resultados de salida son entregados de nuevo a la red. La capa de salida cuenta con una validación comparando los resultados con resultados deseados. A través del proceso de aprendizaje, la red se modifica para predecir mejor los resultados contra los valores deseados.

- Perceptrones multinivel (MLP) y funciones en base a radios (RBF)

Son las redes de tipo alimentación progresiva más utilizadas. Las primeras tienen más de una capa oculta y están parcialmente conectadas. La activación de las funciones en la capa oculta diferencia a los modelos: parámetros de RBF se determinan durante el proceso de entrenamiento en dos etapas con diferentes estrategias para capas ocultas y de salida; para MLP los parámetros están determinados en una sola etapa para ambas capas con una sola estrategia de entrenamiento. En el RBF la separación de datos en la capa oculta es dada colocando cada una de las clases utilizando funciones de kernel mientras que en MLP se logra definiendo los hiper-planos en el espacio de análisis.

- Algoritmos de propagación de reversa

El proceso de aprendizaje de MLPs consiste en dos fases: fase de avance, los parámetros de la red son escogidos y la información de entrada es propagada hacia adelante en la red, capa por capa, se completa cuando existe un error en el proceso computacional. En la fase de reversa, el error calculado es propagado de vuelta a través de la red ajustando sus parámetros hasta ser minimizado basado en el índice cuadrático de error estadístico. Su limitación está en la convergencia de datos y en un lento aprendizaje.

Validación cruzada: divide la información disponible en dos grupos, estimación y validación. El primero utilizado para entrenar a la red y el segundo para evaluar el performance del modelo. Finalmente, el modelo es ajustado con los elementos de entrenamiento y probado en datos no utilizados.

- Algoritmo Levenberg-Marquadt

Método de optimización de una RNA. Provee una solución numérica al problema de minimizar una función no lineal sobre el espacio de parámetros para la función. Ha probado ser un método eficiente por su velocidad y estabilidad.

- **Redes RBF**

Funciones de aproximación, están diseñados para encontrar una superficie multidimensional que provea el mejor ajuste a los datos de entrenamiento y entonces la red entrenada utilizará la superficie para interpolar los datos. Un valor predicho de una muestra es casi el mismo de otras muestras que tengan valores similares en el predictor de variables. RBFs calculan la distancia Euclidiana de los puntos hacia el centro de cada neurona posicionada en el mismo espacio dimensional que las variables de entrada; utilizando la distancia, una función básica radial computa el peso de cada parámetro en la red para cada neurona. Predicciones para datos nuevos son creados sumando los resultados de las funciones RBF multiplicados por el peso de cada neurona (Sharif, 2016).

El modelado de estructuras sumergidas se da en una, dos, semi tres, y tres dimensiones completamente. Pueden ser para áreas pequeñas o grandes (phase-resolving o phase averaged). Los modelos más utilizados son los modelos espectrales, ecuación de media pendiente, Boussinesq, ecuación de aguas someras y de modelos específicamente tridimensionales.

Para un análisis más a fondo de los modelos creados y utilizados a través de los años para diques sumergidos, se recomienda ir a Ning et al. (2016).

## Elementos de diseño

Como toda construcción actual, los diques también se diseñan con ciertos límites en mente: el primero y más importante es el límite último y de servicio, en el cual se espera que la estructura falle completamente y va aunado a su vida útil, ya que se espera se sobrepase ese límite justo antes de dejar de funcionar (Dependerá del nivel de avería si es posible que se siga utilizando, pero para el caso se considera que no lo hará). El segundo tiene que ver con la operatividad de la estructura en la cual no existe daño alguno, únicamente es de interrupción de actividades o de su finalidad.

Comprendido en su diseño también se incluyen factores de seguridad los cuales otorgan un margen adicional de trabajo a la estructura para el cual se encuentran diseñados. Este factor no debe ser tan grande que incremente los costos constructivos, ni tan bajo que no permita un soporte extra de solicitaciones.

Finalmente, en el diseño también se considera un periodo de retorno adecuado para un evento de gran magnitud, logrando extender la vida útil de nuestra estructura. Para los diques se consideran periodos de retorno desde 50 a 100 años, y esto incluye el hecho de encontrarse bajo el agua por el resto de su vida. En caso de no utilizar este parámetro, se trata de utilizar valores máximos representativos de un fenómeno de gran magnitud dentro de un periodo establecido (Silva, 2005):

- Series anuales – Valores máximos de cada año.
- Picos – Utiliza picos de los temporales.
- Series Completas – Utiliza todos los valores de cierta medición.
- Excedencias – Utiliza los valores excedentes a partir de cierto punto.

El nivel de agua asociado al diseño es el nivel medio en primavera más el aumento por temporada de tormenta. Ambos parámetros aseguran un funcionamiento arriba de los 100 años. Un punto de vista moderno se basa en el análisis probabilístico de la combinación de alturas extremas de olas y niveles extremos de marea. No es un método muy recomendado ya que pareciera económicamente más viable, sin embargo, se remueven algunos de los parámetros de seguridad. (Reedijk, 2016)

Tabla 1 – Afectaciones y Olas Significantes para Diferentes Periodos de Retorno (Burcharth, 1987)

Periodo de Retorno (años)	Altura de ola Significante Hs (m)	Movimiento de Dolos	Rebase
1	6.5	Ninguno	Comienza con alturas de 10 – 11 m
10	8.5	Oscilaciones ligeras	
30	9.5	Inicio de desplazamiento	Rebase severo con alturas de 15 – 16 m
100	11.0	1 % de daño	

Es recomendable que las estructuras sean diseñadas para soportar al menos un 10 o 20 % de las condiciones de excedencia con un daño limitado. En la actualidad es difícil saber cuánto más es adecuado variar dicho porcentaje mediante un factor de riesgo para proteger una

estructura, los cambios climáticos a nivel mundial han generado cambios drásticos en los fenómenos naturales y año con año han ido incrementando en magnitud y daños. Es más probable que las condiciones meteorológicas lleven a que el fenómeno de diseño se acerque más al inicio de su vida útil. Dicho fenómeno implicaría una falla estructural o la destrucción por completo.

Esto se debe diferenciar del momento en que el dique aún funciona, pero se encuentra en condiciones extremas, su diseño se realiza para soportarlas, aunque en realidad se ha visto que “fallan” cuando se presentan estados de mar asociados a tormentas o huracanes. Las olas simplemente pasan por encima de la estructura y el nivel de pérdida de energía es insignificante en ese momento. Esto no quiere decir que no funcionen posteriormente, sino que volverán a hacerlo una vez que el nivel del mar regrese a su estado original. Entonces el diseño del dique debe comprender este tipo de fenómenos dentro de su periodo de retorno y una de las formas de lograrlo es haciendo más ancha la cresta del dique (Kubowicz-Grajewska, 2016).

En cuanto a las cargas de agua y la distribución de presiones es común utilizar las fórmulas de Goda, ya que son las más adecuadas en general para la distribución de presiones para estructuras tanto con rompientes o no. Una de sus limitaciones, sin embargo, es que no cuenta con la capacidad de considerar la porosidad de la estructura, la contribución no lineal del oleaje, ni la sumergencia de las estructuras (Ning, 2016).

Al probar cualquier tipo de estructura a escala en laboratorio, existen ciertas complicaciones en que el modelo no permita conocer los efectos reales o dependiendo de la mayor escala permitida, que no actúe de la manera requerida, y por ende que los resultados del análisis no reflejen su utilidad real en el océano. Otra consideración de cambio es la colocación de las piezas puesto que en el ambiente controlado es un proceso sin complicaciones mientras que en el océano es difícil que incluso en un estado de mar tranquilo (tipo conocido como “sea”) sea posible que la estructura quede exactamente como se planea en un inicio. De nuevo es un factor que se debe tomar en cuenta desde el momento de diseño y a través del margen de error.

La estabilidad de la capa de protección del dique dependerá del material a utilizar y la sumergencia del dique. Primero se debe asegurar que el “pie” estará protegido adecuadamente ya que es un punto donde ocurre una gran cantidad de movimiento de sedimentos y fácilmente se puede dar la falla del dique; generalmente esta parte tiene un recubrimiento y armado más resistente que del resto del talud.

Para el material a elegir tenemos rocas de gran tamaño o piezas de concreto (ya sean entrelazables o no); las primeras dependerán mucho de su tamaño y forma para llegar a un punto de estabilidad y siempre deben ser las primeras en considerarse para los proyectos. En casos específicos de que sea más económica o estéticamente viable, o se requiera de un margen de seguridad aún más alto que el proporcionado por rocas ya es preferible utilizar piezas de concreto; con ellas, mientras más profundo se encuentre el dique y mayor interacción exista entre las piezas, más estable será su acomodo. (van der Bosch et al., 2012). El tamaño de dichas piezas puede variar según la magnitud del dique y el nivel de protección, aunque el diámetro nominal para un dique con un núcleo poco permeable puede ser de hasta 40% más grande que el equivalente a uno con mayor permeabilidad (Reedijk et al., 2009; Muttray & Reedijk, 2008).

En el caso de los materiales de esta capa se pueden considerar cuatro propiedades cuantitativas importantes para su análisis:

- Densidad del material ( $\rho$ ) – Depende específicamente del material, mientras más denso es más pesado y más útil.
- Coeficiente de daño ( $K_D$ ) – Engloba las propiedades restantes de las unidades de protección: forma, grado de entrelazado, rugosidad, ubicación, etc.
- Coeficiente de capa ( $K_\Delta$ ) – Indica el grado de compactación de la capa externa.
- Porosidad – Se utiliza para determinar la cantidad de unidades de armadura a utilizar.

Las secciones que más pueden sufrir daño por el oleaje son la cresta y a la capa interior. Se ha encontrado que puede existir una corriente de regreso cercana a la cresta cuando el valle de la ola pasa en la estructura. Esta corriente es más fuerte para olas largas y crestas delgadas. En cuanto al movimiento de las piezas se da en mayor grado en la cresta del dique. Ambas caras pueden presentar ligeros daños mas no son tan grandes comparados con la cresta. Aun así, la cantidad de piezas que puedan presentar movimientos son menores que cualquier dique emergente y tendrán más estabilidad mientras más sumergencia tenga la cresta (Muttray, 2012).

## Disipación de energía

No se debe considerar que un dique sumergido será capaz de atenuar el cien por ciento de un cierto tren de olas; en general los diques sumergidos no tienen esa finalidad y es más fácil lograrlo con un dique regular que sobrepasa el nivel medio del mar. Quizá en un momento dado las condiciones son adecuadas para detener el oleaje en ese momento específico, pero no seguirá haciéndolo, por ejemplo, cuando suba la marea. El porcentaje de energía disipada va a depender de muchos factores como la profundidad del sitio, el ancho de la estructura y la cresta, el tipo de marea, el material de construcción, etc. Por ello es que los diques sumergidos no son la solución para zonas que requieren de mayor estabilidad de la zona interna, como en puertos de descarga.

Existen dos mecanismos de desplazamiento de energía que atenúan la altura de ola: el primero es cuando las olas son disipadas por rotura causada por un cambio abrupto en la profundidad de la zona cuando se encuentran con el dique; en el segundo, la energía es disipada en la superficie de y en la capa impermeable del dique (en caso de que exista) (Massie, 1976).

Cuando una ola pega con la playa o una estructura sufre una rotura de una de cuatro maneras diferentes y una forma de encontrar qué tipo de rotura existe es con el número de Iribarren:

$$Ir = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L}}} = \frac{m}{\sqrt{\frac{H}{L}}}$$

- Spilling (Descrestamiento) – Rotura gradual, cuentan con mucha espuma, rompientes en pendientes pequeñas.  $Ir < 0.5$
- Plunging (Voluta) – Cresta en forma de rollo, el frente colapsa generando un salpicón de agua; pendientes con mayor inclinación.  $0.5 < Ir < 3.0$
- Collapsing (Colapso) – La caída se da en la parte media del frente de la ola; muchas burbujas y espuma.  $3.0 < Ir < 3.5$
- Surging (Oscilación) – Pendientes muy inclinadas a casi verticales. Parecida a la anterior sin embargo en ocasiones no existe tanto una rompiente sino una alta reflexión del oleaje.  $Ir > 3.5$

A partir de varios análisis se ha encontrado que los elementos de gran importancia para el tipo de rotura son la relación entre la altura de ola y la sumergencia de la estructura, así como ciertos parámetros del oleaje – longitud e inclinación – (Kubowicz–Grajewska, 2016). Cuando las olas rompen en la pendiente, una porción de su momento se transfiere a la cantidad de agua subiendo por la pendiente. Ese volumen de agua sube hasta disipar toda su energía hasta una elevación denominada run-up cuya definición es la elevación vertical máxima alcanzada medida relativamente desde el nivel medio del agua.

La energía de las olas es, en general, parcialmente destruida por rotura, parcialmente reflejada y parcialmente gastada en el run-up. La altura de la ola, la profundidad del agua y el periodo de la ola determinan la inclinación de la ola. Esta inclinación en conjunto con la pendiente, determinan las características de rotura de la ola.

Para considerar el índice de reflexión de la estructura, se tiene un coeficiente  $K_r$  y se define como el ratio entre la altura de ola reflejada y la altura de la ola incidente.

$$K_r = \frac{H_r}{H_i}$$

Otro efecto presente cuando las olas se acercan a zonas de baja profundidad es el conocido como someramiento, en donde las olas al llegar perpendicularmente a la costa la velocidad y longitud de onda decrecen, la energía por unidad de área de la ola cambia y la altura de ola incrementa mientras que el periodo es constante. Este efecto está en función de diversos parámetros:

- $H_i$  – Altura de ola incidente
- $L_o$  – Longitud de ola costa afuera
- $B$  – Ancho de la cresta
- $h_s$  – Profundidad de Sumergencia
- $H_t$  – Altura de ola transmitida
- $m$  – Pendiente de talud del dique
- $K_t$  – Coeficiente de transmisión de ola

Usualmente los efectos de refracción, difracción y someramiento ocurren al mismo tiempo. Respecto a la forma geométrica en su corte transversal se ha encontrado que para una mayor capacidad de disipación, la cara exterior debe contar con un arreglo de bermas o escalonado respecto a las formas más utilizadas como rectangulares o trapezoidales sencillas (Lokesha et al., 2016).

## Transmisión

La transmisión se denota a través de un coeficiente  $K_t$  definido como el ratio entre la altura de ola transmitida detrás del dique y la altura incidente de ola, e igualmente es dependiente de varios parámetros:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = f\left(\frac{H_i}{L}, \frac{h}{L}, \frac{B}{L}, \frac{H_s}{H_i}, A, m, p\right)$$

- $p$  – Porosidad
- $\frac{H_i}{L}$  – Inclinación incidental de ola
- $\frac{h}{L}$  – Profundidad relativa a longitud de onda
- $\frac{B}{L}$  – Ancho relativo de cresta
- $\frac{H_s}{H_i}$  – Profundidad relativa de la cresta
- $A$  – Factor no numérico relacionado con la sección transversal

A través de diversas investigaciones se ha comprobado que el factor más importante es la sumergencia de la cresta; con ello se ha encontrado en general un límite en la profundidad de sumergencia a menos de 0.3 veces la profundidad general del agua.

El fenómeno de transmisión se puede dar por el simple paso de olas largas por encima de la estructura y la transmisión por dentro del dique según el material del núcleo, y el índice de reflexión y absorción de energía. También se puede presentar por el proceso de rebase causado por el run-up en caso de que la ola golpee el dique. En caso de un mal cálculo en la sumergencia del

dique, es posible no afectar al tren de olas adecuado y tener una transmisión constante que puede ocasionar problemas en la costa.

Para ayudar a la disipación de energía en cuanto más sea posible se ha demostrado que mientras más porosidad tenga el material del núcleo, más oportunidad tendrá el dique de tomar la energía e interactuar con ella antes de sobrepasar por completo la estructura. Para aprovechar esto, hay que tener en consideración que la onda puede pegar tanto el frente como en la parte superior de la cresta, con lo cual existe otro punto de acceso al núcleo (Twu, 2001).

Por otro lado, también se ha demostrado que suficiente altura y anchura de un dique reduce la transmisibilidad hacia la costa, lo cual se ha representado de manera que el coeficiente de transmisión se reduce con un incremento del radio de  $\frac{B}{L}$ . Respecto al diseño, se ha recomendado que el ancho de la cresta sea de más de un cuarto de la longitud de la ola para presentar un decrecimiento en el coeficiente de transmisión, mientras que la relación  $\frac{B}{L}$  aumenta. Estos resultados se pueden relacionar con el periodo relativo de ola:  $L_r = \frac{L_s}{L}$ , dado que una onda larga es más probable que pase por encima del dique si cuenta con ancho de corona más corto, y aunque este tipo de ondas sean más complicadas de detener (a su vez son las más propensas a pasar por encima del dique), un ancho adecuado será capaz de golpear con la onda y disminuir su energía (Loksha et al., 2015; Desa et al., 2016).

### Arrecifes artificiales como diques de protección y viceversa

Diversos experimentos se han llevado a cabo para probar la eficiencia de arreglos o estructuras que pretenden funcionar tanto como arrecife artificial, y como un dique sumergido. El grado de éxito y utilidad va a depender tal y como se planteó anteriormente, del alcance que se desee tener con la estructura.

Un ejemplo de estos experimentos es el realizado en por Desa et al. (2016) en el Instituto Nacional de Investigación en Hidráulica de Malasia (NAHRIM por sus siglas en inglés). Utilizaron una figura que denominaron Rompeolas Restaurador de Coral (WABCORE por sus siglas en inglés, Figura 16) y encontraron los siguientes resultados:

- Mientras más profunda la estructura, menor interacción del oleaje. En la profundidad más baja se obtuvo el valor más bajo de  $K_t$ ; su valor incrementaba directamente conforme lo hacía la profundidad de la estructura.
- Al aplicar diversas alturas de ola incidentes se encontró que en la profundidad mínima posible y con una amplitud baja, el valor de  $K_t$  era bastante grande. Por el contrario, con la misma profundidad, pero con la ola más grande, el valor de  $K_t$  disminuyó probando que la altura de las olas es un factor importante y no va únicamente relacionado con la profundidad del dique o arrecife.
- Específicamente su modelo WABCORE presentó un nivel alto de transmisión (lo cual se buscaba en el proyecto). Se alcanzó un nivel alto de supresión del oleaje bajo las siguientes condiciones: colocación en aguas someras, exposición a olas con alta inclinación, periodos más cortos de olas y suficiente espacio en el ancho de la base (Desa et al., 2016).



Figura 16 – Piezas WABCORE (Desa et al., 2016)

Los bloques de concreto suelen ser utilizados como arrecifes artificiales, sin embargo, están diseñados y desarrollados desde un punto de vista ingenieril y no funcionan como hábitats para peces o como substrato para corales y algas marinas. Arrecifes Artificiales de Forma Hemisférica y Hueca (HSAR por sus siglas en inglés) han sido de las estructuras que mejor se adaptan debido a los vórtices y la turbulencia que se genera en su interior, siendo características atractivas para diversas especies de peces, ya que son influenciados por vórtices de corrientes.

Siendo que en general estas estructuras se colocan individualmente (no importa si se colocan varias juntas, igual cada una actúa por su propia estabilidad). Una propuesta considerada por Armono & Hall (2003), consiste en colocar una cama de material rocoso como un dique regular y por encima colocar los HSARs. El mejor ejemplo de estas piezas y el cual fue utilizado para sus experimentos es el conocido ReefBall; estos cuentan con una porosidad de 10 a 40% debido a que el número de agujeros y diámetros es variado. Para tener un aproximado, utilizaron un valor promedio de 20% por los moldes utilizados.

Finalmente se armaron seis arreglos diferentes para las pruebas y estos fueron los resultados más prominentes:

- Las pruebas a profundidades bajas presentaron los valores más bajos de  $K_t$  mientras que las pruebas con profundidades altas tuvieron los valores más altos de  $K_t$  para cualquier tipo de ola.
- Olas incidentales con un alto grado de inclinación en bajas profundidades tuvieron los valores más bajos de  $K_t$ , los más altos fueron para profundidades altas y una baja inclinación de ola.
- Para profundidades bajas donde la altura del dique es más del 70% de la profundidad total, el ancho de la estructura es algo a considerar. Este efecto comienza a ser despreciable conforme aumenta la profundidad y esto debido a que las olas no golpean con el arrecife resultando en una atenuación nada efectiva.
- El armado que presentó un menor coeficiente de transmisión en casi todas las profundidades fue el de la base de roca con una capa de ReefBalls encima. El coeficiente más bajo se presentó en el armado de dos capas de ReefBalls con la superior boca abajo, finalmente el que presentó más transmisión fue el de tres capas de ReefBall colocado en el suelo.
- Con estas estructuras se encontró que el 84% de la variabilidad en cuanto al coeficiente de transmisión, recae especialmente en la inclinación del oleaje  $\left(\frac{H_i}{g T^2}\right)$ , sumergencia  $\left(\frac{H}{d}\right)$  y la proporción  $\frac{h}{B}$  (reef proportion). Al final de las experimentaciones se logró disipar alrededor del 60% de energía incidente.

De ambos experimentos mencionados se puede mostrar que, como cualquier dique regular, al encontrarse a una profundidad adecuada para la altura de olas en la zona, el arrecife será capaz de disminuir el nivel energético del oleaje. Los agujeros no presentan mucha variación respecto a la transmisión de un dique regular ya que, para mantener su nivel de protección las piezas se colocan en conjunto y no de forma aislada. Si se colocaran de esa manera únicamente servirían como arrecife artificial ya que las olas no serían capaces de disipar tanta energía golpeando piezas al azar. Esta porosidad en las piezas y en los materiales de un dique son las responsables de proveer el soporte adecuado a las especies marinas.

Respecto al avance biológico no se tienen datos específicos sobre las piezas WABCORE sin embargo se espera que tengan un buen desarrollo ya que cuentan con las características adecuadas para funcionar como arrecifes por igual. Los modelos ReefBall se ha demostrado que han sido de los más utilizados debido a su alto grado de habitabilidad marina por lo cual se espera que con el cuidado adecuado siempre generen un impacto positivo en el ecosistema donde se coloquen.

## Turbulencia

La turbulencia se puede definir como un estado caótico de movimiento de un fluido, el cual se da en cambios abruptos de velocidad y dirección mediante la transmisión y decaimiento de la energía mecánica.

Osborne Reynolds fue el primero en clasificar de cierta manera el cambio desde un estado laminar hacia uno turbulento, sin embargo, su clasificación fue creada a partir de experimentaciones en tuberías con velocidades muy bajas. Este parámetro conocido como número de Reynolds, se puede aplicar para el océano, aunque por el estado general, es común encontrar números altísimos que representan un estado de turbulencia en el medio.

En una columna con una estratigrafía bien definida se tienen en las aguas superficiales muchos organismos (plancton) que consumen muchos nutrientes a gran velocidad, sus desechos a su vez pasan a los organismos que se encuentran en la capa subsuperficial y continuando progresivamente hacia zonas más profundas; aquí suele haber menor cantidad de especies, pero aguas con muchos más nutrientes y para que todos ellos puedan viajar a través de la columna de agua, se requiere de la turbulencia.

La turbulencia se genera desde la superficie con el movimiento del viento tanto superficialmente, como con un fenómeno conocido como espiral de Ekman (Figura 17). Por debajo se da debido a corrientes marinas, mareas y la surgencia que se da al alcanzar el continente o alguna estructura costera. Estos fenómenos permiten la afluencia hacia todas direcciones de los diferentes alimentos que requieren las especies marinas. Los animales y organismos también son responsables de generar cierta turbulencia a todas profundidades, aunque a menor nivel energético.

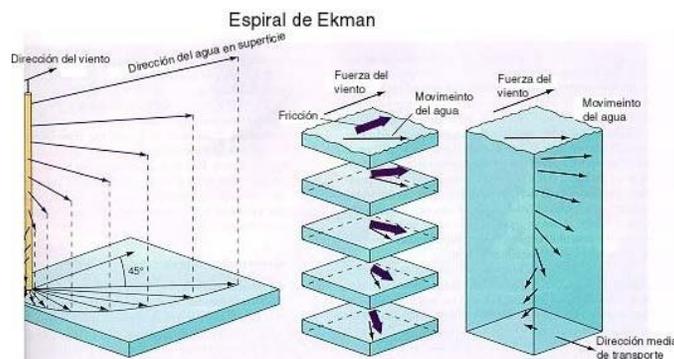


Figura 17 – Espiral de Ekman

Toda esta turbulencia generada en el dique es la requerida para poder transportar los nutrientes al interior del arrecife artificial y poder proveer de alimento a las especies en su interior sin tener que salir al peligro de otras especies depredadoras. Esto igualmente permite la circulación de oxígeno a dichas zonas y genera un intercambio constante de aguas cerca y en el interior del arrecife.

El análisis de este efecto sobre una estructura es algo complicado en realidad, la mayoría de los modelos están basados en la teoría de flujo potencial evitando la turbulencia, o en modelos integrados verticalmente con lo cual limitan el modelo rompiente o llevando a velocidades no representativas alrededor de la estructura. Modelos de análisis modernos basados en teorías potenciales no lineales evitan el flujo dentro de las capas porosas y por ende evitando el proceso de control de transmisión y rompiente de la ola.

La turbulencia generada en una estructura va de la mano con las velocidades generadas al golpear el dique como la celeridad respectiva de la ola. Cuando se tienen diques más angostos en la corona se tiene una posibilidad de generar mayores velocidades en el lado interno después de

que las olas han golpeado. En cambio, un dique ancho dispersa la velocidad hacia la cresta y se estabiliza para la parte trasera.

Para medir la intensidad de turbulencia podemos utilizar el parámetro

$$u = \sqrt{2k} \quad \left(\frac{m}{s}\right)$$

Donde  $k$  es la componente cinética computada de la turbulencia. Este parámetro es una estimación del incremento de velocidad debido a fluctuaciones turbulentas. La turbulencia es más grande en la cresta con la rotura de una ola, mientras que es más baja en el lado interno del dique.

Los valores máximos se presentarán momentos antes de la rotura de una ola, cuando alcanza el talud y pierde su energía. Al golpear, los esfuerzos cortantes incrementan generando la turbulencia. La disipación de turbulencia presenta mayor pérdida en el interior de la capa de protección mostrando un régimen más grande en el núcleo del dique. La mayoría de la energía cinética es disipada dentro de las capas porosas y muy poca en las capas exteriores, ya que se genera desde estas mismas generalmente. La transmisibilidad de una ola puede verse afectada por la turbulencia generada dentro y por encima del dique, sin embargo, el coeficiente siempre recae mayormente en la anchura de la cresta. (Losada et al., 2005)

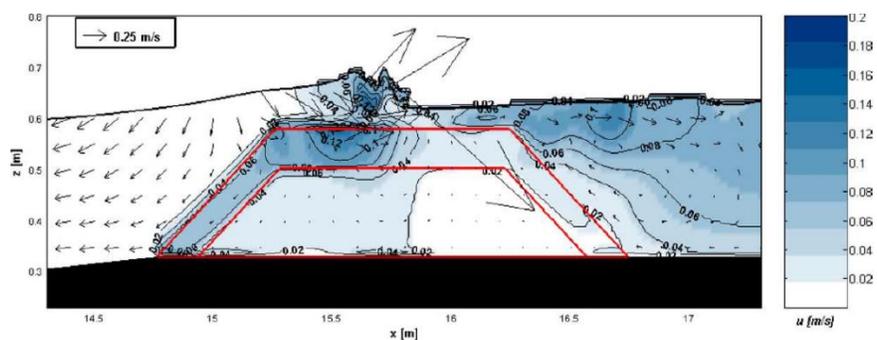


Figura 18 – Intensidad de Turbulencia Sobre un Dique (Losada et al., 2015)

## Fallas hidráulicas

Como se ha mencionado, el oleaje es el principal elemento a considerar al diseñar el dique, sin embargo, existen una diversidad de cargas que se pueden considerar de la siguiente manera:

1. Cargas exteriores – Se aplican sobre el frente expuesto del dique: carga hidrostática, carga dinámica debida al oleaje.

2. Cargas interiores – Aplicadas sobre la cara interior del dique: carga hidrostática, carga dinámica del oleaje, empuje activo de tierras si existe algún relleno.
3. Subpresiones – Cargas aplicadas verticalmente sobre la base: carga hidrostática, carga dinámica por el oleaje a ambos lados.
4. Peso.
5. Posibles cargas de uso – Viento, atraque de navíos, grúas, tráfico sobre el dique, etc.

Todas las cargas actuarán al mismo tiempo sobre el dique y este puede fallar de varias maneras, las cuales se parecen a una presa y prácticamente son aplicables para la mayoría de estructuras marinas. Aquí se presentan algunas de las más conocidas y que han ocurrido en estructuras a lo largo de la historia:

- **Falla de pie de la estructura** – El movimiento generado por oleaje y corrientes puede afectar severamente la protección del pie en el dique ya sea por una erosión continua o por un socavamiento por debajo de este y causar una falla en el talud generando su caída.
- **Falla de la armadura** – Cuando se colocan piezas de concreto, ya sea de forma aleatoria o con un armado específico, están limitadas a cierta capacidad mecánica de soporte a todos los esfuerzos principalmente por no contener acero y si no se diseñan adecuadamente, con un fenómeno de media intensidad puede generar grandes estragos en el dique. Esto en conjunto con el máximo movimiento permitido que tengan las piezas en su estado final; si están muy limitadas puede causar que las piezas golpeen entre ellas y causar la falla.
- **Subpresiones** – Al ser un medio sobresaturado, se puede presentar el viaje de corrientes por debajo del dique e ir subiendo por las diferentes capas. Si en algún momento se diseña una capa impermeable y esta saturación alcanza ese punto, se puede crear una separación de materiales y por deslizamiento hacer fallar el dique desde el interior.
- **Fallas por mal diseño estadístico** – En ciertas zonas es complicado encontrar datos acertados sobre el comportamiento del oleaje a través de los años. Esto

puede llevar a que las estimaciones estadísticas nos entreguen un diseño para el que pueda existir la posibilidad de que la falla se presente por un fenómeno mucho antes de lo esperado.

- **Corrosión de acero** – En caso de colocar alguna estructura con concreto reforzado, si no se cuenta con algún concreto adecuado para impedir el paso (y aún con él) del cloro y oxígeno del agua, el acero puede expandirse provocando la quebradura de las piezas y generando una falla gradual.
- **Mala consideración de fuerzas actuantes** – Si por conveniencia se toman valores más bajos que los adecuados para el diseño, simplemente se corre un riesgo más alto de que el dique falle en cualquier fenómeno que se presente.
- **Erosión por oleaje** – Con el constante golpeteo con las olas, las rocas de la zona comienzan a erosionarse y liberar sedimentos que son acarreados a otros lugares; esto provoca que la parte en contacto con el agua se debilite poco a poco hasta provocar el derrumbe.
- **Deslizamiento** – Si la estructura no llega a un punto fijo de estabilidad, se puede presentar un movimiento general conocido como deslizamiento y es posible que se dañe por completo o simplemente ocurra un cambio de posición y que no aporte a la finalidad de disipar la energía. Si la pendiente del dique es muy pronunciada y el suelo no es adecuado para soportar la carga, se puede generar un deslizamiento del talud junto con una parte del suelo, tal y como lo haría un talud en construcción fuera del agua.

Dependiendo de la magnitud de la falla, usualmente es recomendable reparar la estructura a partir de las causas para futuros eventos, y no rehacerla completamente. Normalmente las reparaciones incluyen una extensión en lo ancho de estructura completa, así como la adición de materiales y capas exteriores de ambos lados de los diques. (Burcharth, 1987)

## Capítulo V – Experimentos y Resultados

### Descripción de la pieza modular

La pieza modular original fue presentada por Monroy (2013) en la búsqueda de una nueva pieza capaz de funcionar de forma “apilable” bajo el estudio de diversas piezas parecidas ya existentes. A partir de las observaciones realizadas, decidió considerar las siguientes características como base:

- El material de construcción debería ser concreto.
- Capacidad de modificación aún instalada la estructura.
- Generación de rotura del oleaje por peraltado, posible disipación de fricción si el diseño lo permitía.
- Facilidad de transporte de las piezas.
- Debería evitar fallas por socavación y hundimiento en la cimentación, y tendría un correcto anclaje.
- Paralelamente funcionaría como arrecife artificial de ser posible.

A partir de las condicionantes anteriores, Monroy mostró dos figuras parecidas ligeramente a un barco de papel en tres dimensiones con todas las pendientes a  $45^\circ$ , la diferencia entre una y otra fue que la parte frontal en una tenía una pendiente de cara hacia afuera mientras que la otra mantenía la silueta del barco con la pendiente hacia dentro (Figuras 19 y 20). Ambas cuentan con salientes en forma de prismas rectangulares a los costados, y en la parte superior la unión de las pendientes se da en una superficie plana angosta.

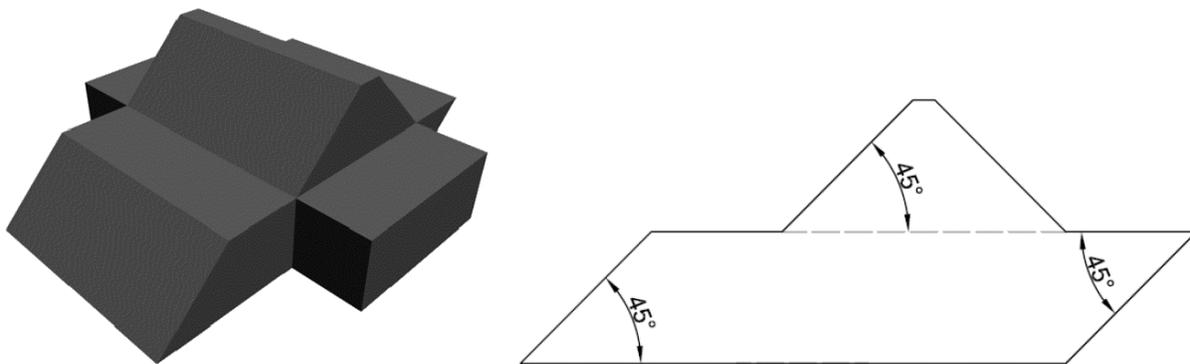


Figura 19 – Piezas PR -B (Monroy, 2013)

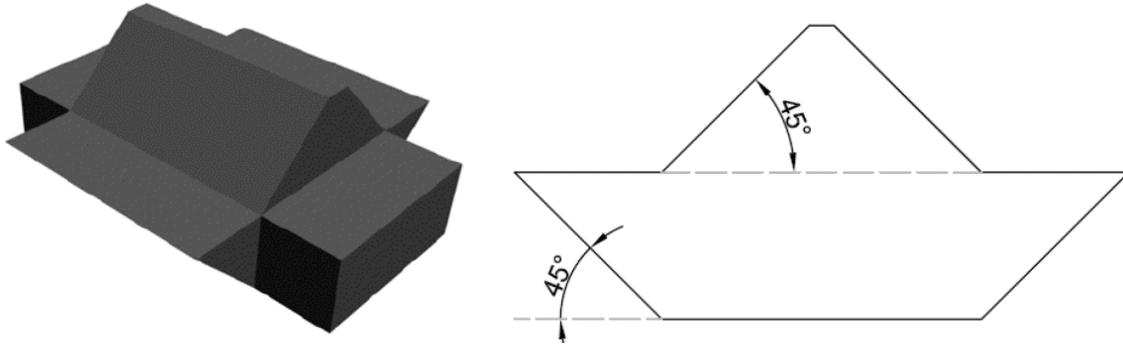


Figura 20 – Piezas PR -T (Monroy, 2013)

El armado de las piezas en dique utiliza las primeras piezas como base y las segundas como niveles subsecuentes superiores hasta donde se permita según el ancho de la base (Figura 21).

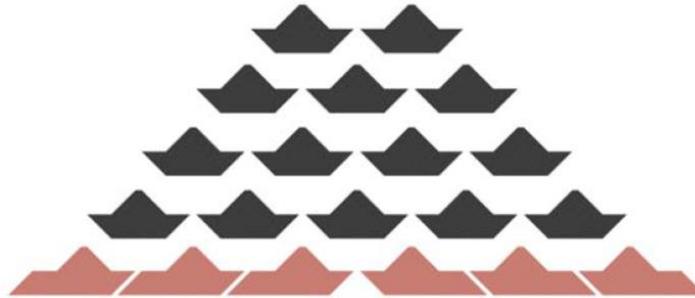


Figura 21 – Armado de piezas en dique (Monroy, 2013)

Para el modelo real se consideraron las medidas mostradas en la Figura 22:

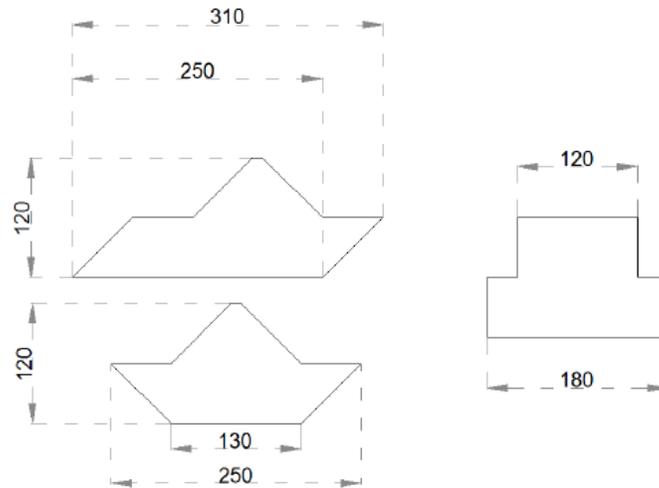


Figura 22 – Medidas oficiales del modelo en cm (Monroy, 2013)

Para la experimentación, se escalaron los modelos a 1:10 y 1:15. El material base de estos modelos fue un concreto de  $2\,300 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  de resistencia realizado con: 126 kg de arena (malla #4), 50 kg de cemento y 31 l de agua. La cimbra se creó con figuras de unicel con cinta para soportar la presión del concreto.

Procediendo con la experimentación, se obtuvieron los coeficientes de reflexión, transmisión y disipación para ambos modelos

Tomando ambos coeficientes, junto con el parámetro  $\frac{F_b}{H_i}$ , logró presentar un conjunto de ecuaciones de mejor ajuste para su posible uso en caso de crear un dique bajo las características y piezas que presenta. En el caso del coeficiente de reflexión se tienen dos ecuaciones correspondientes a las escalas 1:10 y 1:15 dado que la unificación de datos presentó un coeficiente de error  $R^2 = 0.5$ , esto posiblemente por la diferencia de escalas para una misma configuración.

$$K_{R\ 1:10} = 0.5286 \left( 2.225 + \frac{F_b}{H_i} \right)^{-0.432}$$

$$K_{R\ 1:15} = 0.264305 \left( 2.005 + \frac{F_b}{H_i} \right)^{-2.2512}$$

Estas ecuaciones por separado cuentan con coeficientes  $R^2 = 0.8$  y  $R^2 = 0.7$  respectivamente.

Para la transmisión se generó la siguiente ecuación, con un coeficiente  $R^2 = 0.8785$ :

$$K_T = 1.1 \left\{ 1 - \exp \left[ -0.318 \left( \frac{F_b}{H_i} \right) \right] \right\}$$

Bajo la condición:

$$\frac{F_b}{H_i} > 1.5, \quad \frac{H_i}{L} > 0.012$$

$$\frac{F_b}{H_i} < 1.5, \quad \frac{H_i}{L} < 0.012$$

Ambas ecuaciones son representación de una primera configuración del dique y se deben considerar con cierto nivel de precaución para su uso con diques similares debido a que se pueden sobreestimar valores de los coeficientes

Finalmente, terminando las pruebas, Monroy demostró que las piezas cumplieron con su capacidad de rotura del oleaje hasta donde la profundidad del tanque permitió realizarlas. La reflexión de las estructuras presentó un aumento conforme la sumergencia de la estructura disminuyó hasta emerger completamente, cumpliendo con lo esperado para su estado sumergido. Bajo estas condiciones no se presentaron fallas en la estructura y los coeficientes de transmisión y reflexión calculados, resultaron ser bajos y acorde a lo esperado.

Partiendo de este diseño hacia una figura orientada a un arrecife artificial, Monroy propuso su modificación con agujeros dentro de la estructura. Continuando con la línea de investigación, Cárdenas (2017) realizó una variación en las piezas base para el anclaje de la estructura completa y la creación del nuevo modelo con dichos agujeros (Figura 24). Las nuevas figuras omiten las piezas PR-B y la pieza PR-T se termina en una forma piramidal en la parte superior, uniendo la arista de las pendientes. La nueva pieza de anclaje se conforma de la parte inferior del modelo sin la sección piramidal. Los agujeros son parecidos a túneles con dos de forma longitudinal en la parte inferior y dos en la parte superior; y transversalmente uno al centro igualmente en la parte inferior y superior. El modelo adoptó las medidas presentadas en la Figura 23.

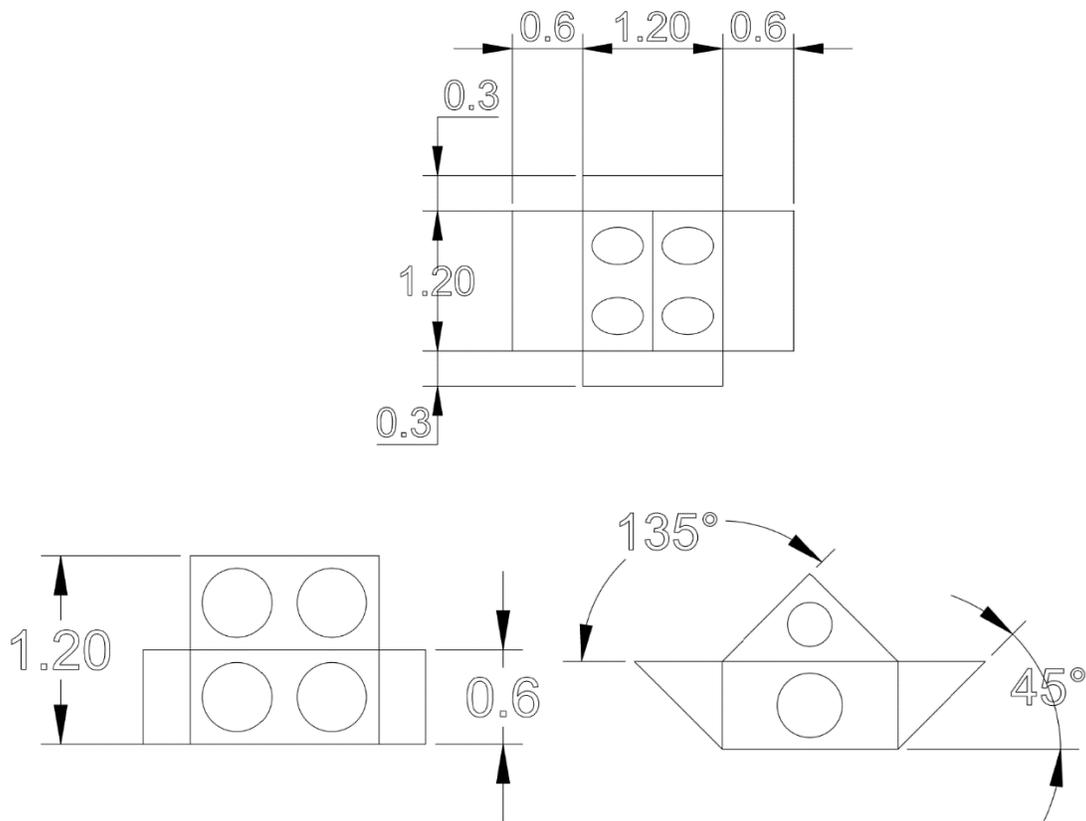


Figura 23 – Medidas de piezas modulares en m

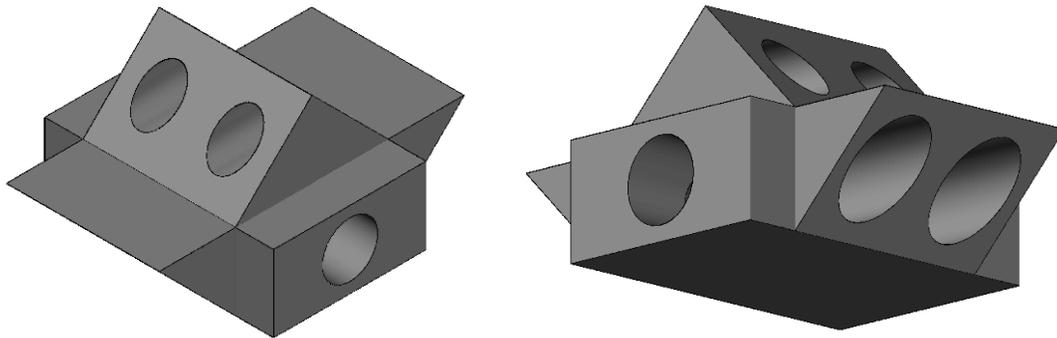


Figura 24 – Piezas modulares modificadas

Para la prueba de estas nuevas piezas, la creación a escala causó conflicto con el agujero longitudinal superior por lo cual se descartó en el modelo, por otro lado, se modificó también el proceso de cimbrado ya que la escala requería de una mayor cantidad de piezas que la experimentación de Monroy.

El proceso de dicha cimbra partió de un prototipo de cuatro piezas modulares (Figura 25) que no funcionó debido a que al apretar la cimbra se desfasaba longitudinalmente y no creaba una pieza exacta; igualmente la creación de los agujeros causó problemas por ser madera envuelta en plástico ya que no se liberaban fácilmente del modelo.



Figura 25 – Primer prototipo de cimbra a) Cimbra b) Madera para los agujeros

Posteriormente se trató de utilizar una tabla de triplay con tubería de PVC para una nueva cimbra que se pudiera rellenar y adaptar más fácilmente al diseño (Figura 26). El resultado fue negativo debido a que a que el proceso de descimbrado no permitía su reúso a causa la fragilidad de la madera y el proceso de remoción de las tuberías dañaría la pieza.



Figura 26 – Segundo prototipo de cimbra

Finalmente se regresó a utilizar como base el primer modelo de una cimbra modular de piezas más gruesas, pero en conjunto con la tubería de PVC (Figura 27). Esta nueva cimbra se compuso de tres piezas: una para la parte superior y dos para la parte inferior, la figura se engrasa para su fácil separación, se cuele de cabeza y se pueden colocar las piezas separadamente para facilitar el proceso. Ya colada la pieza, se presionaba con prensas manuales para lograr la simetría del modelo.

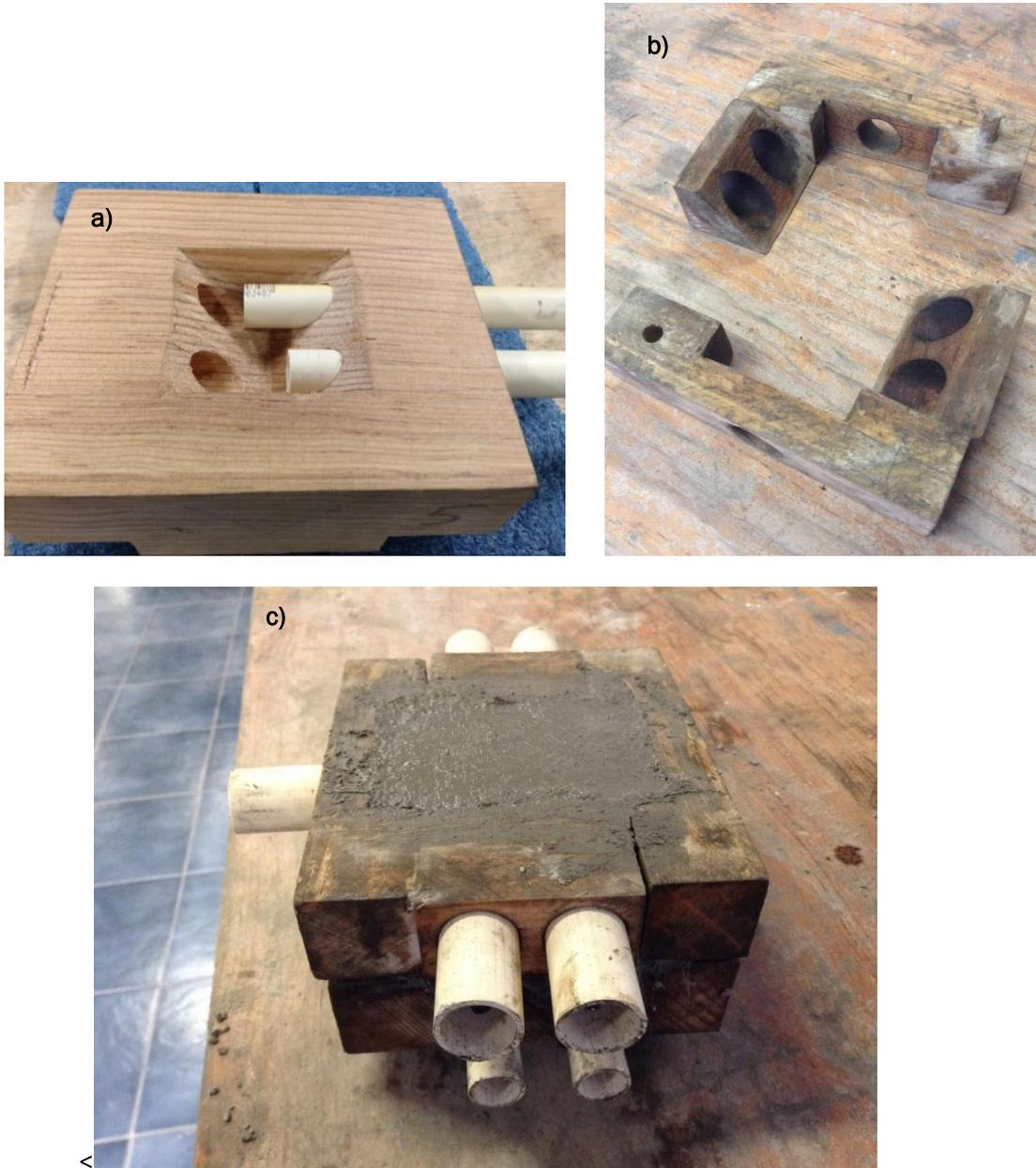


Figura 27 – Tercer prototipo de cimbra: a)Parte superior b)Parte inferior c)Pieza colada

Los tubos son los primeros en salir y seguido se remueven las piezas de madera, estas se deben limpiar al momento para alargar su vida útil. En la Figura 28 se tienen los diferentes modelos tras los diferentes pruebas de cimbras.



Figura 28 – Comparativa de Piezas Terminadas: Primera (Arriba Izquierda), Segunda (Arriba Derecha), Tercera Prototipo (Abajo Izquierda) y Tercera Final (Abajo Derecha)

Estas segundas piezas fueron creadas a escala 1:20 a partir del modelo original y fueron realizadas en base a una dosificación para un concreto de  $300 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ . Para su integridad estructural, se le añadió fibra de vidrio, así como limadura de hierro, todo en la siguiente relación para un total de 15 piezas:

- Cemento – 1 266 kg
- Arena – 2.436 kg
- Agua – 0.570 l
- Fibra de Vidrio – 0.020 kg
- Limadura de Hierro – 2 400 kg

La nueva forma de estas piezas permite que se apilen de mejor manera sin dejar tantos espacios libres, reduciendo su capacidad de oscilación individual. Los agujeros de la parte superior de una pieza se alinean con los de la parte inferior de la pieza que se coloca encima para permitir el tránsito de las especies y con el agujero transversal poder moverse fácilmente también en dicha dirección.



Figura 29 – Detalle de pieza de producción: a) Vista superior b) Vista lateral c) Armado del dique

## Desarrollo del trabajo experimental

Las pruebas se realizaron en el canal del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería (GICyP). Dicho canal tiene una longitud de 37 m por 0.80 m de ancho y 1.20 m de profundidad.

En el canal se colocaron dos perfiles de playa, uno con una berma y la duna y el otro con la duna solamente. Para desarrollo de la presente tesis únicamente se considerarán los resultados de la playa con la duna, sin la berma.

El perfil se creó con una altura de duna de 0.20 m con un ancho de 1.23 m, una pendiente de  $9^\circ$  de cara al oleaje y de  $20^\circ$  en la parte posterior. La pendiente de playa es de  $5^\circ$  desde el pie de la duna hasta los 23 m y de aquí surge una pendiente de  $1^\circ$  hasta llegar al fondo del canal, como se muestra en la Figura 30.

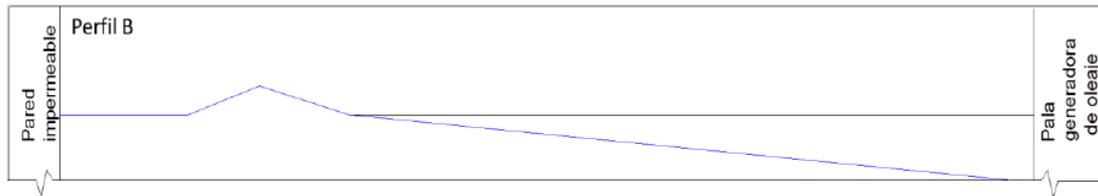


Figura 30 – Perfil de Playa Utilizado en Experimento (Cárdenas, 2017)

El oleaje fue de tipo irregular utilizando un espectro JONSWAP con  $\gamma = 3.33$ .

Se realizaron tres diferentes configuraciones del dique con sumergencias  $h_{s1} = 0$  cm (cresta rozando la superficie libre) y  $h_d = 15$  cm,  $h_{s2} = 15$  cm y  $h_d = 15$  cm, y por último  $h_{s3} = 0$  cm con  $h_d = 30$  cm. También se realizaron mediciones con el perfil libre. Dos experimentos corresponden a oleaje con un régimen medio con  $H_s = 0.5$  y  $1.0$ ; con periodo  $T = 0.894$  s y  $h = 0.45$  m para ambos casos. Para los siguientes se consideraron oleajes de tormenta con las mismas alturas y profundidades, pero con periodo  $T = 1.188$  s, y un cambio de profundidad  $h = 0.48$  m para la tormenta I con  $H = 0.1$  m.

Para medir el perfil del oleaje se utilizaron sensores de nivel, los cuales registran variaciones de voltaje conforme avanza la onda, lo cual, con la sumergencia del sensor, nos otorga el perfil de la superficie libre del agua. Estos se colocaron antes y después de la estructura con una separación mínima de  $\frac{\pi}{10k}$  y una máxima de  $\frac{9\pi}{10k}$ , donde  $k = \frac{2\pi}{L}$  ( $L$  = número de onda) (Cárdenas, 2017).

## Resultados

El proceso de obtención de los resultados fue el mismo que utilizó Monroy (2013) y se basa en lo siguiente: a través de un programa llamado LEEWDC del GICyP, junto con los datos de calibración y el nombre del experimento, se entregan dos archivos iniciales, uno de extensión .DAT con la serie de tiempo de la superficie del agua, y otro tipo .TXT con las alturas de olas, periodos y otros datos estadísticos. De estos archivos se procede a utilizar otro programa más de parte del GICyP, conocido como REFLAB, en el cual se introduce el archivo .DAT, las distancias entre la pala y los sensores más cercanos del lado expuesto de la estructura, y el nivel del agua en el canal.

Finalmente, esto entrega las alturas de ola reflejadas con lo cual podemos obtener los coeficientes de reflexión, el cual se conjunta con el de transmisión tal como se indicó en el capítulo anterior, para conseguir el coeficiente de disipación:

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

$$K_r = \frac{H_R}{H_i}$$

$$K_D = \sqrt{1 - K_r^2 - K_t^2}$$

Con ello se obtuvieron los resultados que se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2 – Coeficientes de Transmisión, Reflexión y Disipación para Régimen Medio

Prueba	$H(m)$	$T(s)$	$H(m)$	Reflexión $K_r$	Transmisión $K_t$	Disipación $K_d$
<b>Régimen Medio</b>						
Perfil sin Estructura	0.05	0.894	0.45	48.11 %	18.53 %	85.69 %
Estructura de 15 cm / $h_{pie} = 15$ cm				51.59 %	16.64 %	84.03 %
Estructura de 30 cm / $h_{pie} = 30$ cm				41.11 %	71.31 %	56.79 %
<b>Régimen Medio</b>						
Perfil sin Estructura	0.1	0.894	0.45	33.16 %	32.93 %	88.41 %
Estructura de 15 cm / $h_{pie} = 15$ cm				41.52 %	31.39 %	85.38 %
Estructura de 15 cm / $h_{pie} = 30$ cm				32.24 %	31.97 %	89.10 %

Tabla 3 – Coeficientes de Transmisión, Reflexión y Disipación para Tormentas

Prueba	$H(m)$	$T(s)$	$H(m)$	Reflexión $K_r$	Transmisión $K_t$	Disipación $K_d$
<b>Tormenta 1</b>						
Perfil sin Estructura	0.1	1.118	0.48	35.38 %	36.16 %	86.26 %
Estructura de 15 cm / hpie = 15 cm				34.73 %	18.37 %	91.96 %
Estructura de 15 cm / hpie = 30 cm				41.21 %	35.10 %	84.08 %
Estructura de 30 cm / hpie = 30 cm				29.12 %	68.15 %	70.36 %
<b>Tormenta 2</b>						
Perfil sin Estructura	0.05	1.118	0.45	32.08 %	35.47 %	87.82 %
Estructura de 15 cm / hpie = 15 cm				43.05 %	40.92 %	80.45 %
Estructura de 15 cm / hpie = 30 cm				36.04 %	31.94 %	87.64 %
<b>Tormenta 3</b>						
Estructura de 30 cm / hpie = 30 cm	0.1	1.118	0.45	27.97 %	89.46 %	34.85 %

## Análisis de resultados

Respecto a la reflexión, el valor más alto es de alrededor del 51 % lo cual es acorde con tipo de material del dique y la respuesta que se espera de un dique sumergido de no reflejar completamente el oleaje.

Observando los valores de disipación en general se encuentran en un margen alto arriba del 80 % para casos de régimen medio y tormenta, con lo cual reforzamos su funcionamiento ante la protección de la costa. La estructura específica en donde disminuye la disipación es la de 30 cm con sumergencia cero (57 %, 70 %, 35 %); en los tres casos probados, la transmisión resultó ser mayor tanto en tormenta (que es un resultado esperado debido a la intensidad del oleaje) y en un régimen medio. Esto puede deberse a la oscilación que se puede generar de las piezas estando directamente en el camino de la onda, o dependiendo de la forma en que la onda golpea con el dique, se pueden generar movimientos de run-up mayores que permiten un mayor rebase a esta. Comparado con el caso del perfil con la estructura de 15 cm a la misma sumergencia, es posible que la variación se deba a su altura e incluso la cercanía a la playa en la parte posterior lo cual agrega a la capacidad reflectiva ya que se aprecia en los casos sin estructura que el material de la playa es reflejante.

En el caso de la transmisión en general, volvemos a los casos anteriores para considerar valores altos (71 %, 68 %, 89 %) comparado con el resto de los cuales alcanzamos un promedio de 38,65 %. Como se esperaría nuevamente, los valores en tormenta son más altos comparados con el régimen medio aun siendo valores debajo del 40 %.

Para decidir si biológicamente la estructura es apta o no, es necesario un análisis en sitio más detallado, sin embargo, como parte de la experimentación se generaron perfiles topográficos con los cuales se puede analizar el transporte de sedimentos comparado con sus respectivos coeficientes y decidir qué ubicaciones son mejores para su colocación. (Cárdenas, 2017):

- Perfil Inicial Azul
- Perfil Final Rojo

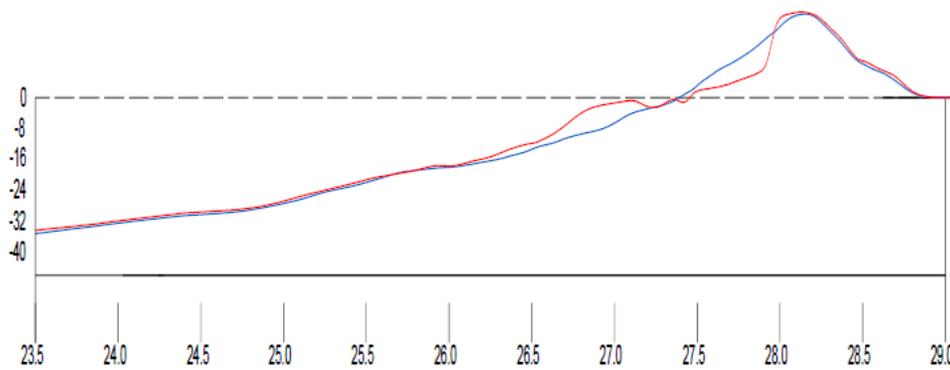


Figura 31 – Perfil sin estructura, régimen medio ( $H = 0.10$  m,  $T = 0.894$  s,  $h = 0.45$  m) (Cárdenas, 2017)

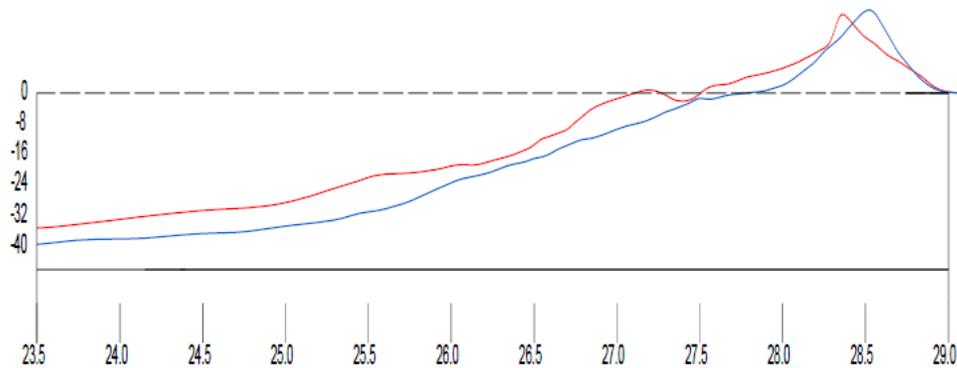


Figura 32 – Perfil sin estructura, tormenta 1 ( $H = 0.10$  m,  $T = 1.118$  s,  $h = 0.48$  m) (Cárdenas, 2017)

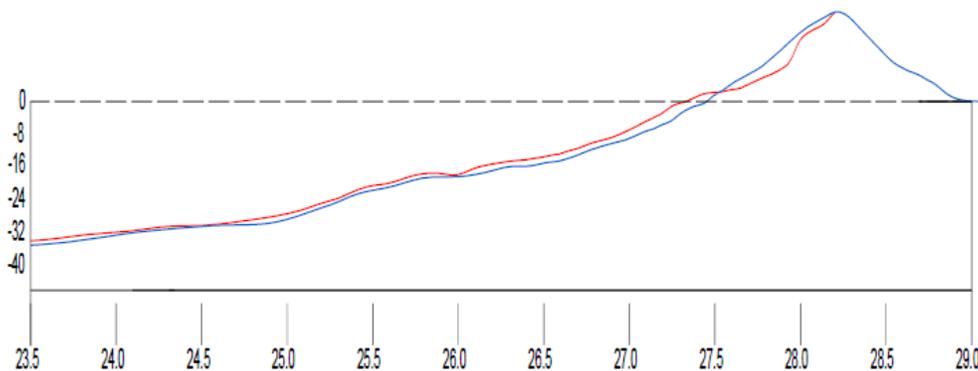


Figura 33 – Perfil sin estructura, tormenta 2 ( $H = 0.05$  m,  $T = 1.118$  s,  $h = 0.45$  m) (Cárdenas, 2017)

En los perfiles sin estructura (Figuras 31, 32 y 33) se puede apreciar que los sedimentos tienden a viajar de la duna hacia la playa generando barras por debajo del nivel medio del agua. En el caso de la tormenta el volumen es mucho mayor aumentando la altura de la playa.

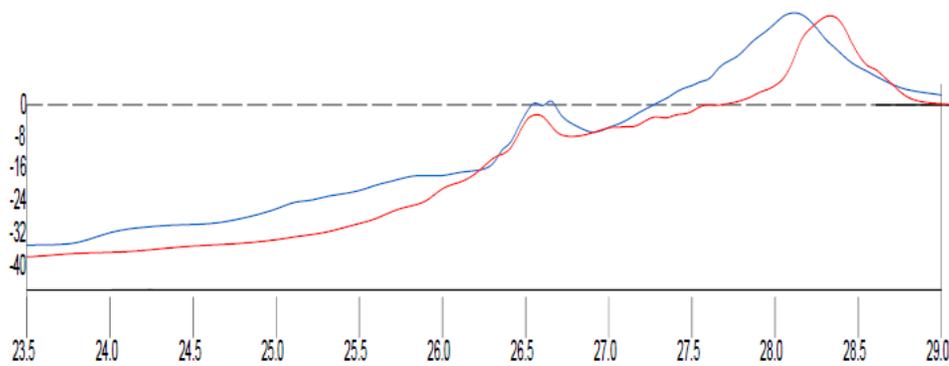


Figura 34 – Perfil con estructura a 15 cm, régimen medio ( $H = 0.10$  m,  $T = 0.894$  s,  $h = 0.45$  m) (Cárdenas, 2017)

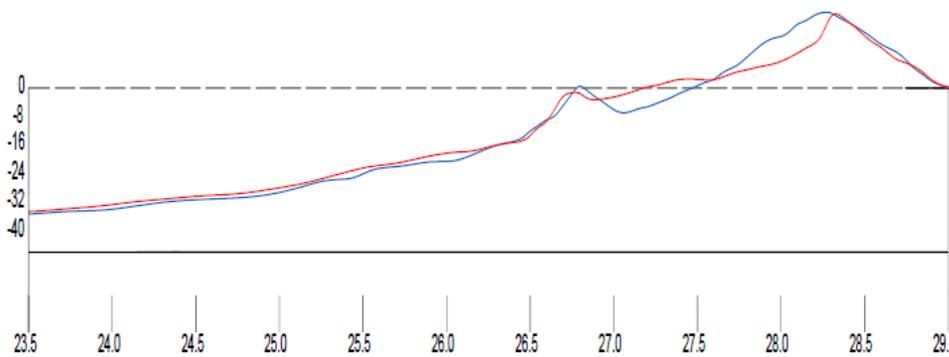


Figura 35 – Perfil con estructura a 15 cm, tormenta 1 ( $H = 0.10$  m,  $T = 1.118$  s,  $h = 0.48$  m) (Cárdenas, 2017)

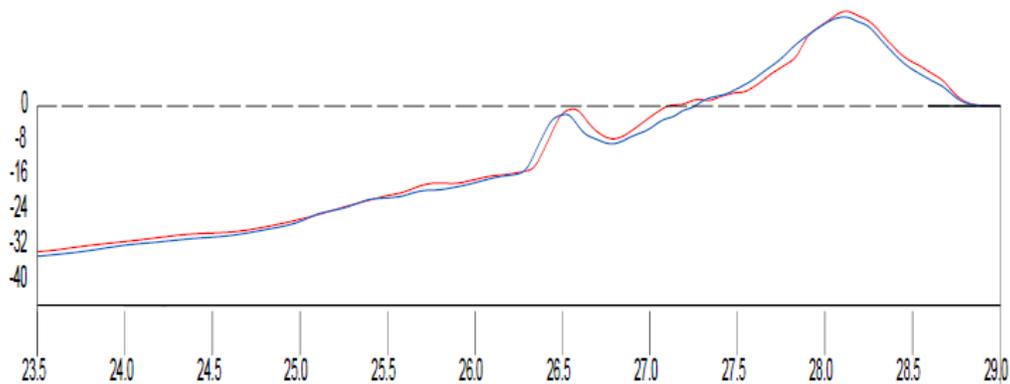


Figura 36 – Perfil con estructura a 15 cm, tormenta 2 ( $H = 0.05$  m,  $T = 1.118$  s,  $h = 0.45$  m) (Cárdenas, 2017)

Para la estructura colocada a 15 cm de profundidad con sumergencia cero, tanto el régimen medio como la tormenta 1 (Figura 34 y 35) son causantes de jalar sedimentos de la duna que son acumulados en la parte interior del dique aunque se presenta un mayor movimiento del

perfil con el primer caso. La tormenta 2 (Figura 36) también genera el mismo fenómeno de arrastre de sedimentos aunque en menor medida.

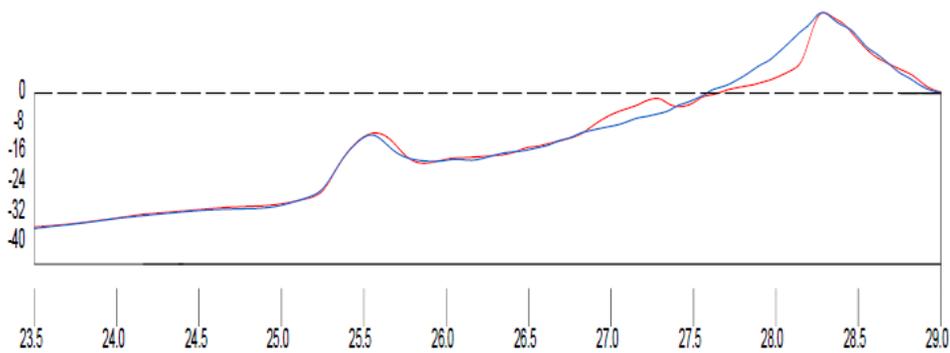


Figura 37 – Perfil con estructura a 30 cm, régimen medio ( $H = 0.10$  m,  $T = 0.894$  s,  $h = 0.45$  m) (Cárdenas, 2017)

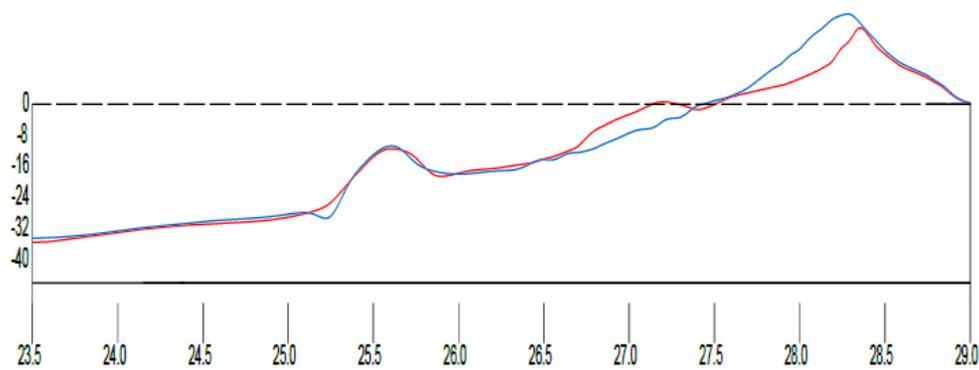


Figura 38 – Perfil con estructura a 30 cm, tormenta 1 ( $H = 0.10$  m,  $T = 1.118$  s,  $h = 0.48$  m) (Cárdenas, 2017)

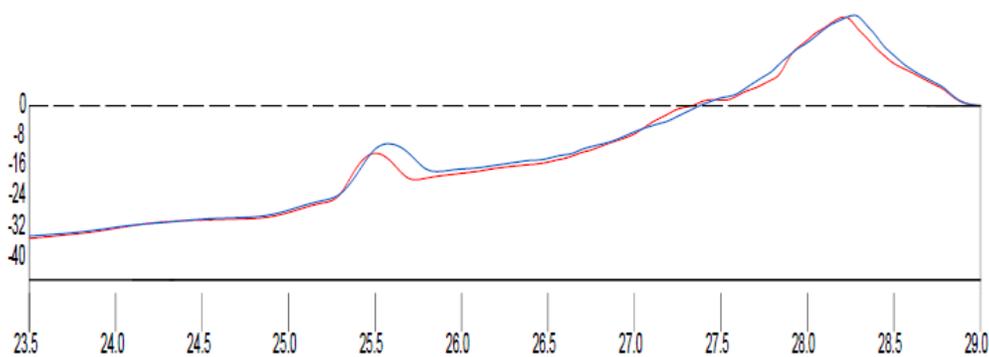


Figura 39 – Perfil con estructura a 30 cm, tormenta 2 ( $H = 0.05$  m,  $T = 1.118$  s,  $h = 0.45$  m) (Cárdenas, 2017)

Con la estructura de 15 cm a 30 cm de profundidad en los tres casos (Figuras 37, 38 y 39) observamos el mismo movimiento de sedimentos desde la duna hacia el dique, la diferencia en este caso es que la barra se forma antes y no junto al dique.

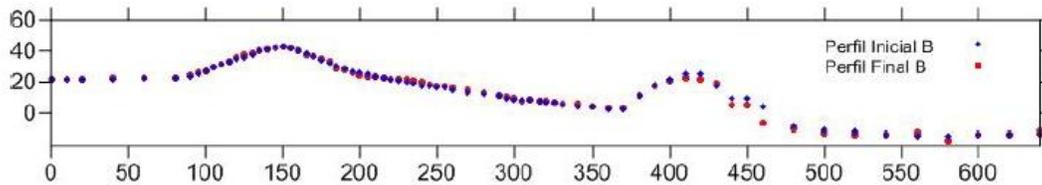


Figura 40 – Perfil con estructura a 30 cm,  $h_s = 0$  cm, Tormenta 3 ( $H = 0.10$  m,  $T = 1.118$  s,  $h = 0.45$  m) (Cárdenas, 2017)

Por último, con la estructura de 30 cm con sumergencia cero (Figura 40), a pesar de que se presenta mayor transmisibilidad el movimiento de sedimentos no es tan marcado como en los casos anteriores. La modificación del perfil se presenta ligeramente justo antes del dique en la cara externa.

Volviendo al punto inicial, se puede apreciar que las estructuras más cercanas a la costa y al nivel medio del mar generan una acumulación mayor de sedimentos en las proximidades del dique, en un régimen medio no presenta mucho problema, pero en tormenta y en una situación de costa real, esto implicaría que la formación de una berma se daría rápidamente sin dar paso a un desarrollo adecuado del ecosistema en esa zona. Además, los sedimentos invadiendo parte del dique limitarían el tránsito fácil a esta zona con lo cual tampoco se generaría una adecuada circulación de nutrientes.

Las estructuras colocadas más costa fuera, generarían un mejor ambiente de desarrollo biológico ya que incluso ante una tormenta, los perfiles no presentan gran acumulación de sedimentos tan cercano al dique, por ende, disminuyendo la problemática a las especies que llegasen a instalarse en esa zona. Respecto a la sumergencia, el perfil parece afectarse casi en la misma manera, aunque respaldados en los coeficientes, cuando la sumergencia es menor, para este modelo y según los experimentos la transmisión es mayor.

## Capítulo VI - Conclusiones

---

- El funcionamiento de un dique como arrecife artificial paralelamente sí se puede lograr con resultados altamente positivos respecto a la protección y el desarrollo de organismos en su interior y en sus alrededores.
- Revisando los resultados de Monroy (2013) junto con los obtenidos de Cárdenas (2017) se puede asegurar que configuraciones de diques con una nueva pieza modular, presentan un comportamiento muy bueno hidráulicamente donde la transmisión, reflexión y disipación respaldan su funcionamiento para disipar los niveles energéticos del oleaje y un posible desarrollo como un arrecife artificial.
- El desarrollo biológico de las piezas presentadas requiere de un estudio en sitio en una zona costera y por un periodo relativamente largo (mínimo de seis meses a un año), con un monitoreo constante. Sin embargo, por las condiciones de diseño presentadas se espera que los organismos se adecuen correctamente al nuevo arrecife artificial apoyado por los agujeros y la porosidad que presentaría su construcción.
- El mejor material para la construcción de un dique sumergido contemplando funcionar como un arrecife artificial se recomienda ser concreto y existe una posibilidad de colocar añadidos de fibras (de origen natural de preferencia), para permitir cierta resistencia a tensión sin tener que recurrir al acero.
- Bajo las características dadas, es parte importante permitir ciertos niveles de turbulencia dentro y por encima del arrecife para ayudar a la oxigenación del agua, el transporte de alimento para los organismos y la circulación de nutrientes en general.
- Para el comportamiento hidráulico del modelo de Cárdenas (2017), sería recomendable realizar al menos un experimento más con una escala mayor para ver los efectos de la morfología a mejor detalle y con diferentes armados a mayor sumergencia para comprobar su eficacia.

## Referencias

---

- Armono, D., Hall, K.R. (2003). *Wave Transmission on Submerged Breakwaters Made of Hollow Hemispherical Shape Artificial Reefs*. Canadian Coastal Conference. Performance of Hemispherical Artificial Reef as Submerged Breakwater.
- Baker, A. C., Starger, C. J., McClanahan, T. R., Glynn, P. W. (2004). *Corals' Adaptive Response to Climate Change*. Nature 430, 741.
- Bruun, P. (1985). *Design and Construction of Mounds for Breakwaters and Coastal Protection*. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, The Netherlands. P. 1 – 13.
- Burcharth, H. F. (1987). *The Lessons from Recent Breakwater Failures. Development in Breakwater Design*. Technical Congress on Inshore Engineering. Vancouver, Canada.
- Cárdenas, D. (2017) *Optimización Mecánica e Hidráulica de un Dique Sumergido Homogéneo Tipo Arrecife Artificial*. Reporte de Actividades Semestre 2017 – 2 y 2018 – 1, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM.
- CFE (1983) *Manual de Diseño de Obras Civiles: Hidrotécnica*. Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cap. 13.
- Desa, S. M., Karim, O. A., Mohamed, A. (2016). *Submerged Breakwater Hydrodynamic Modeling for Wave Dissipation and Coral Restorer Structure*. ICBBE '16, November, 12 – 14, Taiwan.
- Diplarakos, N., Repousis, E. G. (2016). *Velocity Measurements In and Around Permeable Breakwaters*. National Technical University of Athens.

- Dyson, K., Yocom, K. (2014). *Ecological Design for Urban Waterfronts*. Urban Ecosyst 18, 189 – 208.
- Fitzhardinge, R. C., Bailey-Brock, J. H. (1989). *Colonization of Artificial Reef Materials by Coral and Other Sessile Organisms*. Bulletin of Marine Science 44, 567 – 579.
- French, P. W. (2001) *Coastal defenses: processes, problems and solutions*. Routledge, USA. P. 141 – 151, 163 – 164.
- Garnica, R. (2008). *Modelo Matemático de los Fenómenos que Modifican el Oleaje. Aplicado a las Obras de Protección de la Central Núcleo Eléctrica Laguna Verde (CNLV)*. Tesis. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. ESIA – IPN.
- Hinderstein, L. M., Marr, J. C. A., Martinez, F. A., Dowgiallo, M. J., Puglise, K. A., Pyle, R. L., Zawada, D. G., Appeldoorn, R. (2010). *Theme Section on “Mesophotic Coral Ecosystems: Characterization, Ecology and Management”*. Coral Reefs 29, 247 – 251.
- Ido, S., Shimrit, P.-F. (2015). *Blue is the New Green – Ecological Enhancement of Concrete Based Coastal and Marine Infrastructure*. Ecological Engineering 84, 260 – 271.
- Jackson, N. L., Harley, M. D., Armaroli, C., Nordstrom, K. F. (2015). *Beach Morphologies Induced by Breakwaters with Different Orientations*. Geomorphology 239, 48 – 57.
- Kelch Vieira, L. K., Zenker Gireli, T. (2012). *Development of a green floating breakwater with re-use of plastic bottles*. Journal of Sustainable Development Vol. 5 No. 12, 19 – 26.

- Kim, K.-H., Shim, K.-T., Shin, B. (2016). *Morphological Change Near Artificial Reefs as Beach Erosion Countermeasure*. Journal of Coastal Research, Special Issue 75, 403 – 407.
- Kubowicz-Grajewska, A. (2016). *Experimental Investigation Into Wave Interaction With a Rubble-Mound Submerged Breakwater (Case Study)*. J Mar Sci Technol 22, 313 – 326.
- Logan, C. A. (2010). *A Review of Ocean Acidification and America's Response*. BioScience vol. 60 no. 10, 819 – 828.
- Loksha, Kerpen, N. B., Sannasiraj, S. A., Sundar V, Schlurmann T. (2015). *Experimental Investigations on Wave Transmission at Submerged Breakwater with Smooth and Stepped Slopes*. Procedia Engineering 116, 713 – 719.
- Losada, I. J., Lara, J. L., Christensen, E. D., García, N. (2005). *Modelling of Velocity and Turbulence Fields Around and Within Low-Crested Rubble-Mound Breakwaters*. Coastal Engineering 52, 87 – 913.
- Marcinkowski, T., Szmytkiewicz, M. (2013). *Performance of Submerged Breakwaters as Improvement of Beach Fill Effectiveness in Gdynia, Poland*. Journal of Coastal Research, Special Issue 65, 326 – 331.
- Margalef, R. (1997). *Turbulence and Marine Life*. Scientia Marina 61 (Supplement 1), 109 – 123.
- Massie, W. W., P.E. (1976) Coastal Engineering Volume III – Breakwater Design. Delft University of Technology. Delft, The Netherlands.
- Monroy J. (2013) *Desarrollo de una Nueva Tipología de Dique Sumergido a Partir de Piezas Homogéneas*. Tesis. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM, 2013.

- Muttray, M., Reedijk, B. (2008). *Design of Concrete Armor Layers*. Delta Marine Consultants, Gouda, The Netherlands.
- Muttray, M., ten Oever, E., Reedijk, B. (2012). *Stability of Low Crested and Submerged Breakwaters with Single Layer Armoring*. *Journal of Shipping and Ocean Engineering* 2, 140 – 152.
- Ning, D., Chen, L., Zhao, M., Teng, B. (2016). *Experimental and Numerical Investigation of the Hydrodynamic Characteristics of Submerged Breakwaters in Waves*. *Journal of Coastal Research* 32 (4), 800 – 813.
- Pan, S., Fairbairn, G. (2016). *Impacts of Submerged Breakwaters on Nearshore Sediment Transport*. *Journal of Coastal Research, Special Issue* 75, 1212 – 1216.
- Prounthy, N. G., Cohen, A., Yates, K. K., Storlazzi, C. D., Swarzenski, P. W., White, D. (2017). *Vulnerability of Coral Bioerosion from Land-based Sources of Pollution*. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 122, 9319 – 9331.
- Reedijk, J. S., Muttray, M., Bergman, H. (2009). *Risk Awareness – Key to a Sustainable Design Approach for Breakwater Armoring*. Conference: Coasts, Marine Structures and Breakwaters. Edinburgh, United Kingdom.
- Reef Ball Foundation (2008) *A Step-by-Step Guide for Grassroots Efforts to Reef Rehabilitation*. Reef Ball Foundation. Georgia, USA. PP 10 – 19.
- Sarawagi, T. (1995). *Coastal Engineering – Waves, Beaches, Wave-Structure Interactions*. Elsevier Science B.V. Amsterdam, The Netherlands.

- Schneider, P. F., Freitag, C. M., Morrell, J. J., (1996). *Decay Resistance of Saltwater-Exposed Douglas-Fir Piles*. Wood and Fiber Science 29(4), 370 – 374.
- Scyphers, S. B., Powers, S. P., Heck Jr., K. L. (2014). *Ecological value of submerged breakwaters for habitat enhancement on a residential scale*. Environmental Management 55, 383 – 391.
- Sharif Ahmadian, A. (2016). *Numerical Models for Submerged Breakwaters*. Elsevier Ltd., USA.
- Sherman, R. L., Spieler, R. E. (2006). *Tires: Unstable Materials for Artificial Reef Construction*. NSUWorks Oceanography Faculty, Proceedings, Presentations, Speeches, Lectures 58.
- Silva Casarín, R. (2005) *Análisis y Descripción Estadística del Oleaje*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería. México.
- Twu, S.-W., Liu, C.-C., Hsu, W.-H. (2001). *Wave Damping Characteristics of Deeply Submerged Breakwaters*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 127 (2), 97 – 105.
- van der Bosch, I., ten Oever, E., Bakker, P., Muttray, M. (2012). *Stability of Interlocking Armor Units on a Breakwater Crest*. Delta Marine Consultants, Gouda, The Netherlands.