



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA
HIDRODINÁMICA Y MORFOLÓGICA DE
DIQUES ARRECIFE**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

P R E S E N T A:

JOSÉ ANTONIO GONZÁLEZ VÁZQUEZ

TUTOR:

DR. RODOLFO SILVA CASARÍN



MÉXICO, D.F.

OCTUBRE 2010

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval

Secretario: Dra. Lilia Reyes Chávez

Vocal: Dr. Rodolfo Silva Casarín

1^{er}. Suplente: Dr. Adrián Pedrozo Acuña

2^{do}. Suplente: Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

TUTOR DE TESIS:

Dr. Rodolfo Silva Casarín

A mi madre por enseñarme a luchar cada día con más fuerza.

A mis hermanos y mi sobrino por enseñarme a vivir cada día mejor.

A mis amigos que siempre están y que siempre aprendo de ellos.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la aportación financiera que me permitió cursar los estudios de maestría.

Al Doctor Rodolfo Silva Casarín por proporcionarme un espacio en donde trabajar y las facilidades para terminar este proyecto.

***“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA HIDRODINÁMICA Y MORFOLÓGICA
DE DIQUES ARRECIFE”***

ÍNDICE

Índice	1
Lista de figuras	3
Lista de tablas	5
Lista de símbolos	7
Resumen	9
Introducción	11
1. Estado del arte	15
1.1. El oleaje	17
1.1.1. Refracción	18
1.1.2. Reflexión	18
1.1.3. Difracción	19
1.1.4. Rotura	20
1.2. Diques sumergidos	21
1.2.1. Método de Vidal et al. (1992)	22
1.2.2. Coeficiente de transmisión diques rebasables	29
1.2.3. Coeficiente de reflexión en diques sumergidos	29
1.3. Perfiles de playa colgados	30
1.3.1. Perfil de equilibrio	31
1.4. Protección de playas	33
1.5. Interacción Playa-estructura	35
1.6. Espectro JONSWAP	36
1.7. Método de Mansard y Funke para la separación de la ola incidente y Reflejada	38
2. Metodología de pruebas en el laboratorio	43
2.1. Canal de oleaje	45
2.2. Instrumentos de medición	47
2.3. Variables de estudio	49
2.3.1. Altura de ola significativa	49
2.3.2. Periodo	50
2.3.3. Variación del nivel medio del mar	50
2.3.4. Profundidad de desplante de la estructura	51
2.3.5. Geometría de la estructura	51
2.3.6. Material de construcción	52
2.3.7. Modelos ensayados	53
2.3.7.1. Cubos	53

2.3.7.2.	Geotubos®-----	53
2.3.7.3.	WAD, Wave Attenuation Devices®-----	54
2.3.7.4.	Rocas -----	55
2.3.8.	Metodología experimental -----	56
3.	Modelación numérica-----	61
3.1.	Antecedentes -----	63
3.1.1.	Modelo de transformación de oleaje bajo la presencia de estructuras sumergidas -----	64
3.1.2.	Descripción del modelo de avance de playa-----	66
3.2.	Implementación numérica -----	68
4.	Resultados -----	71
4.1.	Primera etapa-----	74
4.1.1.	Comportamiento estructural-----	74
4.1.2.	Comportamiento morfodinámico -----	76
4.2.	Segunda etapa -----	79
4.2.1.	Comportamiento estructural-----	79
4.2.2.	Morfodinámica de playas -----	83
4.3.	Validación del modelo numérico-----	93
5.	Conclusiones y futuras líneas de investigación-----	99
5.1.	Discusión y conclusiones -----	101
5.2.	Futuras líneas de investigación -----	104
	FUENTES DE INFORMACIÓN-----	105
	ANEXO A. Diseño de diques sumergidos y rebasables -----	109
	ANEXO B. Perfiles de primera etapa -----	117
	ANEXO C. Perfiles de segunda etapa-----	135
	ANEXO D. Resultados experimentales-----	175

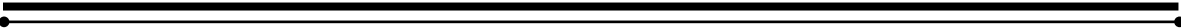
RESUMEN

Las actividades que se desarrollan en las zonas litorales de todo el mundo han generado una presión económica, social y ambiental que en muchos casos supera ya las capacidades de asimilación de los sistemas costeros, deteriorando los ciclos naturales al grado de dañar irreversiblemente una gran cantidad de sitios que habían permanecido intactos durante cientos o quizá miles de años. Ante tal acción humana, no es posible pensar en un retroceso del desarrollo o simplemente eliminar la infraestructura y limitar las actividades costero-marítimas para reducir el impacto que ocasionan.

Así, los asentamientos humanos, la infraestructura industrial y los desarrollos turísticos requieren de nuevas acciones que eviten mayores daños a las costas, pero sigan siendo rentables dentro de su periodo de operación. Tal es el caso de las playas mal explotadas, ya sea por construcciones fuera de sitio o simplemente porque los desarrollos no consideraron la ocurrencia de eventos extremos, luego de los cuales la playa se regeneraba y a causa de la explotación ya no es posible. En todo caso, con el fin de no permitir el decaimiento de la actividad económica, la protección costera es hoy una necesidad imperante en muchos sitios y definitivamente las actuaciones (estructurales o no) que tiendan a disipar la energía del oleaje antes de llegar a las playas son preferenciales.

Dentro de los elementos para reducir la energía del oleaje que además interfieren en menor medida con el aspecto visual de la zona de interés, se encuentran los diques sumergidos. Estos elementos estructurales se colocan por debajo del nivel medio del mar, de ahí que el paisaje quede intacto. Como toda obra de abrigo, su función es disipar una cantidad de energía muy importante mediante la rompiente de las olas, o bien, funcionar como apoyo y protección de un relleno artificial. Su comportamiento hidráulico es función de su geometría, sumersión relativa, el material de construcción, las características mecánicas de las piezas y de las condiciones de oleaje incidente. Dentro del estudio que se presenta en esta Tesis se realiza la evaluación de un dique sumergido construido con diferentes materiales y ensayado en laboratorio bajo diferentes condiciones de oleaje. Detrás del dique se dispuso una playa de arena con la cual se observó la interacción playa-estructura generada por las variaciones de las alturas de ola incidente, reflejada y total. Los resultados obtenidos permiten concluir sobre el comportamiento de los materiales implementados para la construcción y la respuesta morfodinámica de la playa generada en presencia del dique.

Para concluir con esta evaluación se presenta un modelo numérico con el que se buscó representar las condiciones hidrodinámicas y morfológicas debidas a la interacción playa estructura y la relación dique oleaje, para que sin la necesidad de realizar ensayos de laboratorio sea posible aumentar la eficiencia de los diques sumergidos realizando modelaciones que permitan prever el comportamiento del dique bajo condiciones diferentes de las que fue diseñado.



Introducción.

La creciente demanda de infraestructura en las zonas costeras y la necesidad de establecer condiciones de seguridad que permitan un mejor desarrollo, llevan a plantear como objetivo el mejoramiento de los elementos que se utilizan como disipadores de energía del oleaje; asegurando con esto una mayor eficiencia, mayor periodo de vida y un menor costo. Dentro de los elementos disipadores de energía que interfieren en menor medida con el aspecto visual de la zona de interés y que disipan una gran cantidad de energía, se encuentran los diques sumergidos.

La gran variabilidad en el clima marítimo, el gran número de agentes que incluye una zona de proyecto, las condiciones extremas de la zona y la disponibilidad de los materiales para la construcción de diques, han originado que se realicen un gran número de estudios, que buscan observar el comportamiento de las obras de abrigo y la variación asociada de los perfiles de playa de la zona protegida. El fin último es obtener un elemento que asegure la protección de la zona bajo diferentes estados de mar.

Dentro de los desarrollos propuestos para mejorar la eficiencia de diques sumergidos, existen metodologías que permiten establecer la geometría del dique y las características de los elementos que lo conforman, asegurando un nivel de disipación aceptable e intentando predecir las variaciones morfológicas que se generarán dentro de la zona de protegida. Tradicionalmente se ha aceptado que los elementos que constituyen un dique sumergido funcionan todos de la misma manera, lo cual no es totalmente válido. En este sentido, este estudio evalúa la eficiencia de un dique con una geometría establecida y construido por cuatro distintos materiales, de esta forma se plantean los siguientes objetivos:

- Analizar el comportamiento de cada uno de los materiales bajo diferentes estados de mar.
- Establecer los valores de los coeficientes de reflexión para cada uno de los materiales.
- Determinar la eficiencia relacionada con la disipación de energía de cada uno de los materiales.
- Estudiar el comportamiento de cada uno de los materiales bajo eventos extremos.
- Determinar la variación del perfil de playa para las condiciones de la zona de protección provocadas por el dique y los distintos materiales.
- Desarrollar un modelo numérico que permita representar las condiciones de los ensayos.

Para cumplir con los objetivos planteados se presenta a continuación la organización de este documento

Capítulo 1. Estado del arte.

En este capítulo se presenta toda la metodología necesaria para el desarrollo de las pruebas así como los avances más significativos referentes al tema.

Capítulo 2. Metodología de las pruebas en el laboratorio.

Se presenta el desarrollo, la metodología realizada para cada una de las pruebas y la descripción para cada uno de los materiales.

Capítulo 3. Modelación numérica.

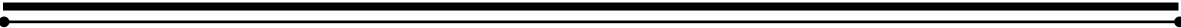
Se desarrolla un modelo numérico que permite representar las condiciones del canal de oleaje, adicionalmente, se describe la metodología y los avances que se han logrado para representar el comportamiento del oleaje de manera numérica y que son la base para el desarrollo del modelo.

Capítulo 4. Resultados.

El análisis de los datos obtenidos en los ensayos es presentado en este capítulo, con esto, se realiza una comparación entre el comportamiento de los diferentes materiales y los efectos generados en el perfil de playa.

Capítulo 5. Conclusiones y futuras líneas de investigación.

Este capítulo incluye las conclusiones después del desarrollo de este estudio y las partes de la investigación que quedan pendientes.



1. Estado del arte

Las estructuras sumergidas, ya sean naturales o artificiales, condicionan fuertemente el comportamiento de las playas. En las dos últimas décadas se ha podido comprobar que en las zonas en donde existen arrecifes, como el Sistema Arrecifal Mesoamericano, las playas no han perdido material y se han conservado no obstante la presencia de condiciones oceanográficas extremas, como oleaje extremo inducido por huracanes y otras por las cuales se han degradado las playas. El cambio del comportamiento de un perfil de playa debido a la presencia de estructuras sumergidas o un relleno artificial está en función de varios parámetros, los cuales serán presentados en este capítulo con la finalidad de establecer de manera concreta la interacción playa-estructura y así determinar las variables más importantes para el análisis objeto de esta Tesis.

1.1. El oleaje

El oleaje se considera como una perturbación dentro de un medio continuo, es este caso agua, esta perturbación es generada por fuerzas externas como son el viento, la atracción de cuerpos celestes, sismos, por mencionar algunas, dichas fuerzas generadoras son las que permiten el desarrollo del oleaje. Existen también fuerzas restauradoras que tratan de restablecer las condiciones de equilibrio iniciales, dentro de las cuales se encuentran, la tensión superficial, el efecto coriolis y la gravedad.

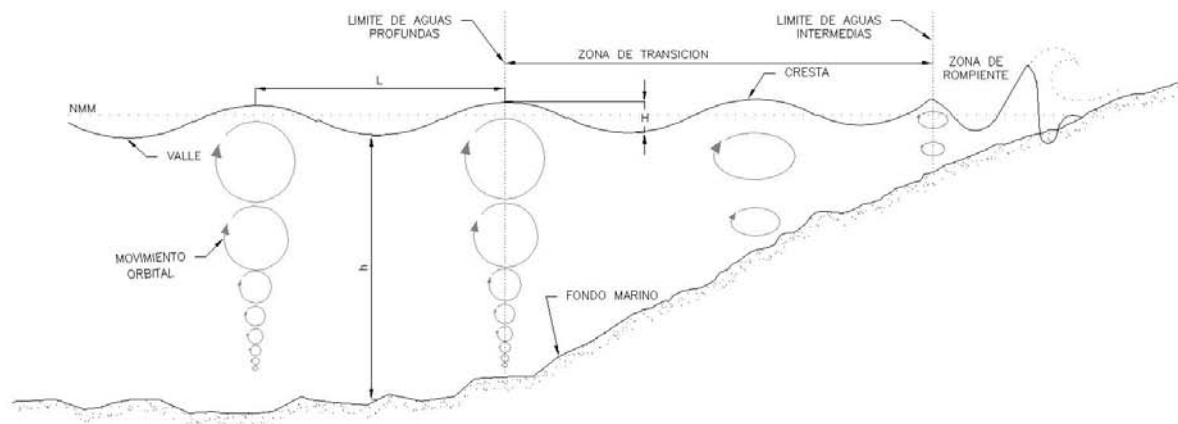


Figura 1.1 Características del oleaje.

El oleaje puede ser idealizado como la superposición de varias ondas sinusoidales que viajan en diferentes direcciones y que provocan un estado de mar aleatorio. El considerar un estado idealizado implica que las ondas cuentan con crestas y valles completamente definidos, así como un periodo único y un movimiento orbital progresivo. Bajo estas consideraciones se presenta, en la Figura 1.1, la propagación de una onda en una dirección y sus parámetros más representativos. Sea L la longitud entre dos crestas o valles consecutivos medida de forma horizontal, la longitud de ola es función de la profundidad y del periodo de la onda; la altura de la ola, H , se define como la distancia que existe, en vertical, entre el máximo de la cresta hasta el fondo del valle; el tiempo necesario para que dos crestas pasen por el mismo punto se denomina periodo, T , de la onda,

siendo el inverso de éste la frecuencia f ; como la ola se mueve en un tiempo T una distancia L la velocidad de desplazamiento se denomina celeridad, $C=L/T$; mientras que la forma de la onda viaja con una celeridad el cuerpo de agua que la conforma no se desplaza en la misma dirección de propagación del oleaje.

Cuando el oleaje se propaga de aguas profundas hacia aguas someras sufre cambios en su comportamiento, dentro de los más importantes se encuentran, el cambio de altura, la disminución de la longitud de onda, y el cambio de dirección. Estos cambios son debidos a la variación en la profundidad, es decir la afectación del fondo al comportamiento de la ola; el fondo provoca una deformación en las velocidades orbitales de la onda, originando una variación en la forma de la ola lo cual da como resultado la condición de rompiente, además del fondo, la presencia de obstáculos como estructuras de protección costera provocan también las variaciones del oleaje. Dentro de los procesos de transformación de oleaje más importantes se cuentan la refracción, reflexión y la difracción, someramiento y rompiente.

1.1.1. Refracción

Proceso mediante el cual se modifica la orientación de los frentes de onda hasta tornarse paralelos a la línea de costa, lo cual ocurre cuando la dirección del oleaje incidente es diferente a la orientación de las líneas de batimetría.

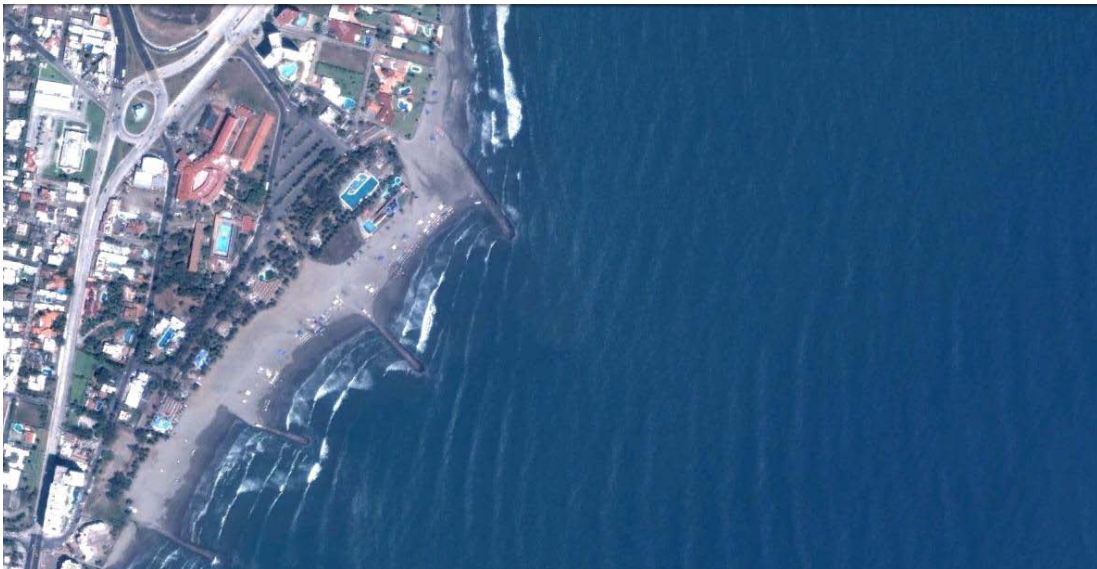


Figura 1.2 Refracción del oleaje.

1.1.2. Reflexión

La reflexión del oleaje se genera por la presencia de un obstáculo, lo cual provoca un nuevo grupo de ondas viajando en dirección totalmente opuesto al oleaje incidente. La energía reflejada por el oleaje es función directamente de las propiedades de la estructura que provoca el cambio de dirección, la pérdida de energía puede ser mínima si se considera un elemento totalmente impermeable, en otros casos puede haber mayor disipación de energía si el elemento es permeable.



Figura 1.3 Reflexión provocada por un dique vertical.

1.1.3. Difracción

La difracción se define como el cambio en la trayectoria del oleaje debido a un obstáculo, provocando así cambio en dirección y magnitud de la ola. El proceso se entiende como una cesión lateral de energía debida al obstáculo que provoca un giro en la trayectoria de los frentes de onda.

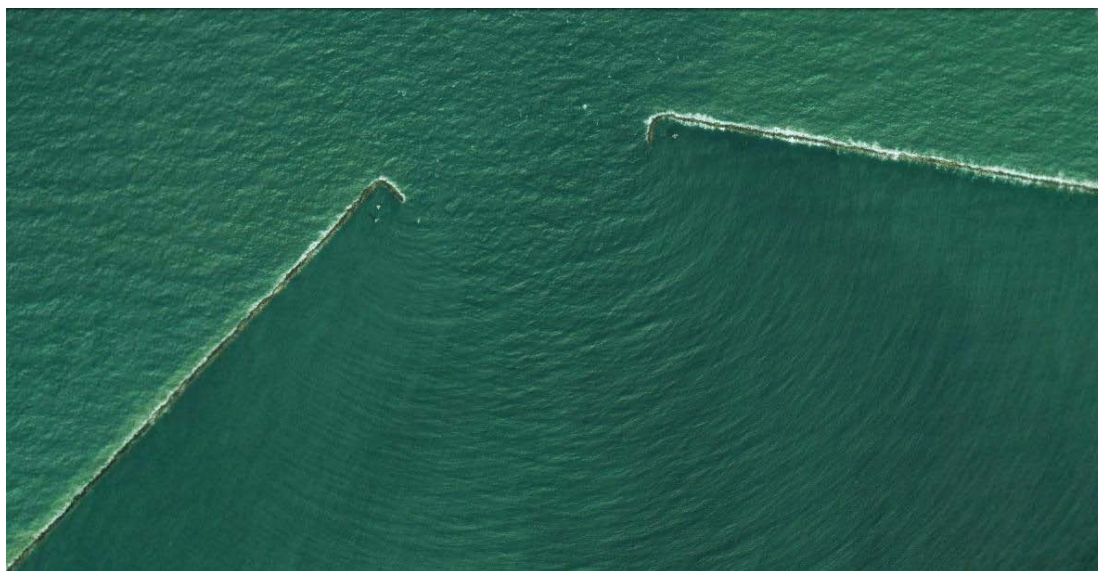


Figura 1.4 Difracción del oleaje.

1.1.4. Rotura

Conforme el oleaje se aproxima a la playa, su velocidad cerca del fondo disminuye por efectos de fricción; debido a la reducción espacial la longitud de la onda decrece y la altura aumenta (peraltamiento). La parte superior de la onda, que no está en contacto con el fondo mantiene una velocidad mayor al grado que la velocidad de las partículas del fluido excede la de avance de la ola. La estructura del agua no es capaz de mantener esta configuración, la ola se hace inestable y rompe. Generalmente este proceso ocurre cuando la profundidad es próxima a la altura de ola. La forma de la rotura se puede clasificar como sigue:

- Decrestamiento (spilling): Se generan burbujas y turbulencia en la cresta de la ola, aquí es donde comienza a descrestarse el perfil de la ola, comenzando la rotura;
- Voluta (plunging): Se forma un peraltamiento por la parte del frente de la onda provocando una voluta que, envolviendo una masa de aire, se precipita contra la base de la onda;
- Colapso (colapsing): La parte inferior del frente de la onda se peralta y se voltea provocando una voluta interrumpida, de esta manera el punto de enfrente donde la ola se voltea se descompone;
- Oscilación (Surging): El frente y cresta de la onda permanecen sin perturbaciones y la onda se desliza por la superficie con una presencia mínima de espuma y turbulencia.

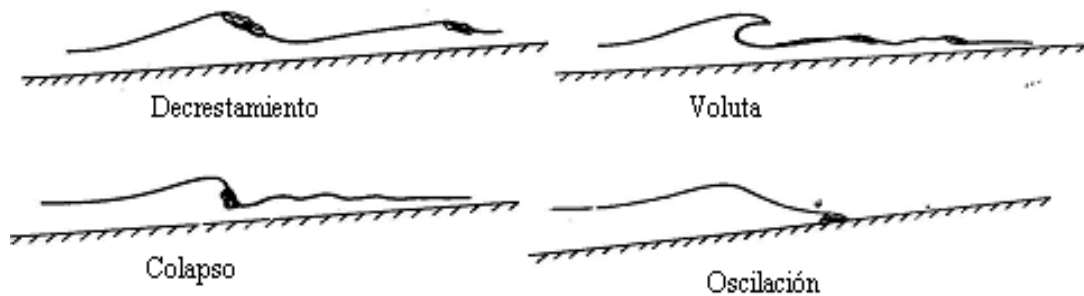


Figura 1.5 Tipos de rotura.

Con las condiciones batimétricas y las características del oleaje se puede caracterizar el fenómeno de rotura, es decir, conforme varía la pendiente y las condiciones del oleaje se pueden presentar los diferentes tipos de rotura. Para establecer un parámetro de referencia se presenta a continuación la formulación de Iribarren y Nogales (1949), la cual permite establecer la rotura franca de la no rotura.

$$Ir = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

$\tan\beta$; Pendiente de la estructura

H; Altura de la ola incidente

L_0 ; Longitud de la ola en aguas profundas

A continuación se presentan los intervalos del número de Iribarren para cada uno de los tipos de rotura:

Tipo de rotura	Número de Iribarren $Ir = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}}$
Decrestamiento (spilling)	$Ir < 1.0$
Voluta (plunging)	$1.0 < Ir < 2.6$
Colapso (colapsing)	$2.6 < Ir < 3.1$
Oscilación (Surging)	$3.1 < Ir$

Tabla 1.1 Rango de valores del número de Iribarren para los distintos tipos de roturas, Silva, 1997.

1.2. Diques sumergidos

Los diques sumergidos son estructuras que se construyen con el objeto de disipar una parte de la energía que contiene el oleaje; estas estructuras se encuentran coronadas por debajo del nivel medio del mar con la finalidad de reducir el impacto visual negativo. Los diques sumergidos se encuentran separados de la línea de costa, lo cual favorece el desarrollo turístico, deportivo y de pesca de la zona. Además de esto, la ubicación de este tipo de diques puede volverse habitable para algunas especies de la zona, contribuyendo de esta forma al medio ambiente del lugar. Debido a que se encuentran por debajo del nivel medio del mar, una parte de la energía se transmite hacia la zona de protección, este proceso se realiza mediante el rebase de la estructura. En la mayoría de los casos estos diques son construidos con elementos permeables, como pueden ser rocas o algún tipo de elemento prefabricado, aunque la ubicación de los elementos y el constante movimiento de arena provocan que en un determinado periodo de tiempo estas estructuras se encuentren saturadas de arena provocando así la reducción de su porosidad original.

La disipación de energía inducida por los diques sumergidos, provoca una estabilidad en la línea de costa que puede permitir un incremento de playa seca de forma natural o con un relleno artificial, favoreciendo así un mejor potencial en la zona. Esta nueva estabilidad de la línea de costa y la estabilidad del relleno estarán en función del comportamiento adecuado del dique sumergido. Los perfiles generados por rellenos artificiales y aquellos cuya estabilidad depende de la estructura sumergida son conocidos como perfiles colgados, estos presentan una discontinuidad al pie del dique que es la parte que soporta de dicho perfil.

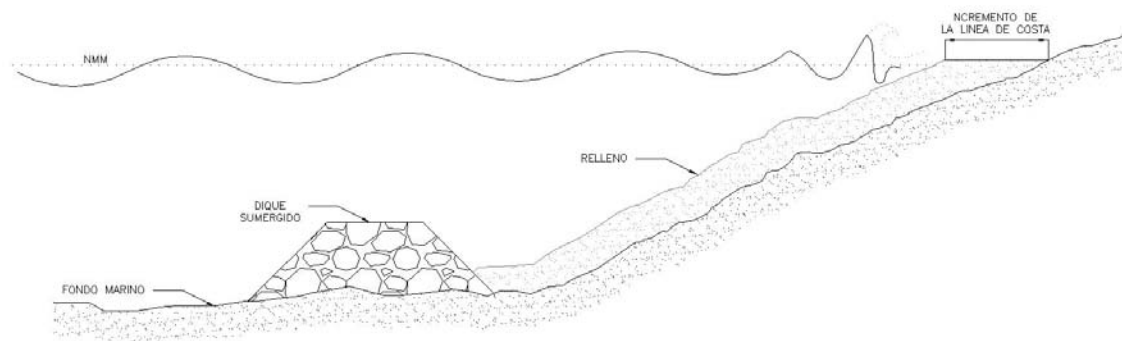


Figura 1.6 Funcionamiento de una estructura sumergida.

Los proyectos de protección costera con diques sumergidos pueden constar de 2 tipos, la protección de la playa con un solo dique largo, lo que genera el crecimiento de una saliente o tómbolo o con la construcción de varios segmentos de dique lo que provocaría que se generaran playas rítmicas o cusps.

Para el diseño de diques sumergidos existen diferentes metodologías que sirven para determinar la geometría y la estabilidad de estas estructuras. A continuación se presenta la metodología de Vidal et. Al. (1992), la cual fue desarrollada considerando los resultados experimentales de autores como Grace (1978), Jensen (1984), van der Meer (1988) y Kobayashi y Wurjanto (1990).

1.2.1. Método de Vidal et al. (1992)

El método se desarrolla bajo una geometría dada de la escollera con un ángulo de $\cot\alpha=1.5$ y un núcleo permeable. De esta forma para calcular el peso de las piezas del manto principal de las distintas partes del dique sumergido es necesario considerar dos hipótesis adicionales:

- Para un sector determinado del dique y un nivel de avería dado, la relación entre los números de estabilidad correspondientes a dos francobordos diferentes, es independiente del tipo de piezas y del ángulo del talud.
- Para un francobordo dado, la relación entre los números de estabilidad correspondientes a dos sectores distintos de un dique sólo depende del tipo de piezas y del ángulo de los taludes.

De acuerdo con estas dos hipótesis se logra que la estabilidad de las piezas y el ángulo del talud sea el mismo para cada uno de los diferentes sectores, de acuerdo con la metodología, dichos valores corresponden al talud exterior de los diques no rebasables.

Para determinar el peso de cada uno de los sectores del dique se utilizan las relaciones que se describen a continuación.

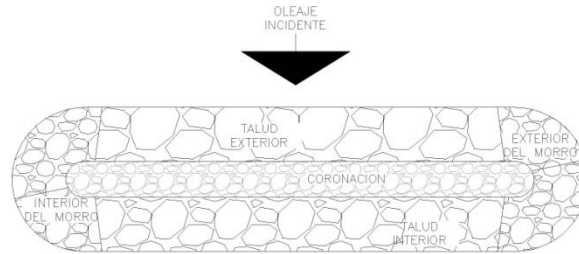


Figura 1.7 Ubicación de los diferentes sectores de un dique rebasable o sumergido.

Talud exterior

El peso de las piezas el manto exterior, se calcula tomando en cuenta las dos hipótesis antes mencionadas y considerando un diseño de diques no rebasables, con las mismas características geométricas del dique se obtiene el peso de las piezas W_{nr} y el diámetro D_{nr} . El diámetro se utiliza para determinar el franco bordo adimensional del dique rebasable:

$$F_{dr} = \frac{F}{D_{nr}} \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

F_{dr} ; Franco bordo adimensional

F ; Franco bordo del dique rebasable o sumergido

D_{nr} ; Diámetro de las piezas de un dique no rebasable con las mismas características de talud y tipo de piezas

Para determinar el número de estabilidad, que es en función del franco bordo adimensional para el talud exterior y para los diferentes niveles de daño es necesario utilizar la Figura 1.8.

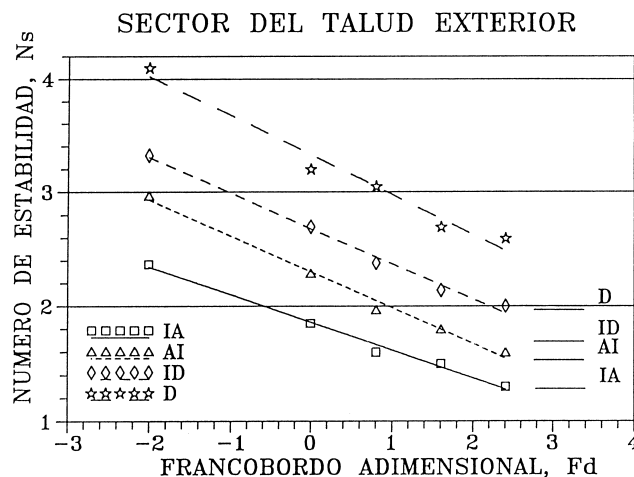


Figura 1.8 Curvas de variación del número de estabilidad con el franco bordo adimensional. Inicio de Avería, talud exterior.
De Vidal et al. (1992)

Las curvas presentadas en la Figura 1.8 se pueden expresar por parábolas del tipo:

$$N_s = A + BF_{dr} + CF_{dr}^2 \dots\dots\dots (3)$$

Donde los coeficientes de la expresión número (3) se presentan en la Tabla 1.2

Avería	Rango de F_d	A	B	C	F_{dnr}
Talud exterior					
IA	-2.01 a 2.41	1.831	-0.245	0.0119	2.40
AI	-2.01 a 2.41	2.256	-0.320	0.0189	2.41
ID	-2.01 a 2.41	2.650	-0.313	0.0129	3.15
D	-2.01 a 2.41	3.237	-0.357	0.0357	3.90
Coronación					
IA	-2.01 a 2.41	1.652	0.0182	0.1590	-----
AI	-2.01 a 2.41	2.122	0.0434	0.1500	-----
ID	-2.01 a 2.41	2.734	0.123	0.1770	-----
D	-2.01 a 1.00	3.210	0.0965	0.1750	-----
Talud interior					
IA	-2.01 a 2.41	2.575	-0.540	-0.1150	-----
AI	0.80 a 2.41	5.628	-1.459	0.0837	-----
ID	1.60 a 2.41	8.669	-2.272	-----	-----
Interior del morro					
IA	-2.01 a 2.41	1.681	-0.474	0.1050	2.40
AI	-2.01 a 2.41	2.046	-0.499	0.0913	2.41
ID	-2.01 a 2.41	2.517	-0.536	0.0613	3.15
D	-0.01 a 2.41	3.027	-0.756	0.1200	3.90

Tabla 1.2 Parámetros de ajuste para la ecuación (3) para cada uno de los sectores de los diques rebasables y no rebasables y niveles de avería.

La expresión número (3) se utiliza para determinar el número de estabilidad del franco bordo de no rebase N_{snr} , como el número de estabilidad para el franco bordo del dique rebasable N_{ste} , como función de F_{dr} .

La relación entre los números de estabilidad N_{snr}/N_{ste} es inversa a la relación de los diámetros de las piezas del manto principal del dique no rebasable D_{nr} y del dique rebasable D_{te} . De esta manera con la ecuación (4), es posible obtener el diámetro de las piezas del talud exterior del dique rebasable.

$$D_{te} = D_{nr} \frac{N_{snr}}{N_{ste}} \dots\dots\dots (4)$$

Donde:

D_{nr} ; Diámetro de piezas para un dique no rebasable

N_{snr} ; Número de estabilidad para francobordo de dique no rebasable

N_{ste} ; Número de estabilidad para francobordo de dique rebasable

D_{te} ; Diámetro de piezas, talud exterior, dique rebasable

Coronación

El peso de las piezas para la coronación, se obtiene mediante la siguiente relación:

$$F_{dte} = F / D_{te} \dots\dots\dots (5)$$

Donde:

F_{dte} ; Franco bordo adimensional para coronación, diques rebasables

F ; Franco bordo del dique rebasable o sumergido

D_{te} ; Diámetro de piezas, talud exterior, dique rebasable

Se continúa con la consideración de que el talud exterior tiene una pendiente 1.5:1. La ecuación número (3), con los valores correspondientes a la coronación y con el nivel de daño dado se determinan los números de estabilidad N_{ste} y N_{sc} como función de F_{dte} . La relación de los números de estabilidad es inversa a la relación de los diámetros de las piezas del talud exterior, D_{te} , y de la coronación D_c , por lo que el valor del diámetro de las piezas de la coronación se obtiene como:

$$D_c = D_{te} \frac{N_{ste}}{N_{sc}} \dots\dots\dots (6)$$

Donde:

D_c ; Diámetro de piezas, coronación, dique rebasable

D_{te} ; Diámetro de piezas, talud exterior, dique rebasable

N_{ste} ; Número de estabilidad para francobordo de dique rebasable

N_{sc} ; Número de estabilidad para coronación de dique rebasable

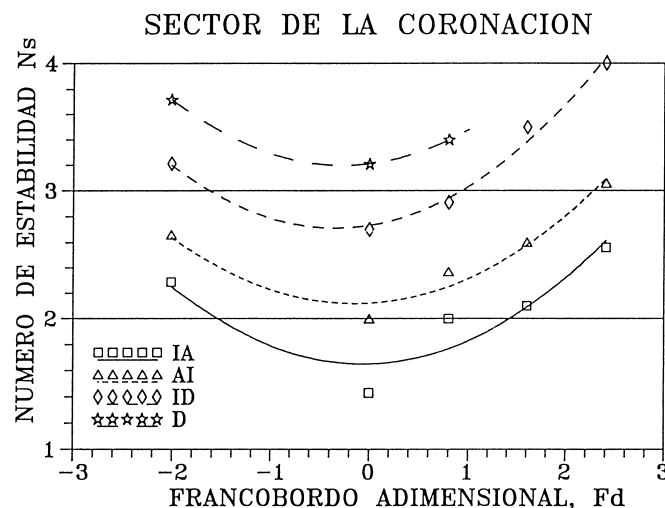


Figura 1.9 Curvas de variación del número de estabilidad con el franco bordo adimensional. Inicio de avería, coronación. De Vidal et al. (1992)

Talud interior

Se realiza un procedimiento similar al de la coronación, comparando el talud exterior del francobordo adimensional con el correspondiente F_{dte} . En el caso de que las pendientes del talud exterior e interior no sean las mismas, es necesario volver a calcular el peso y el diámetro de las piezas del talud exterior con la pendiente del talud interior, de esta forma es posible calcular el diámetro de las piezas en el interior, de no contar con diferentes pendientes entre talud exterior e interior el procedimiento se aplica de manera directa.

$$D_{ti} = D_{te} \frac{N_{ste}}{N_{sti}} \dots\dots\dots (7)$$

Donde:

D_{ti} ; Diámetro de piezas, talud interior, dique rebasable

D_{te} ; Diámetro de piezas, talud exterior, dique rebasable

N_{ste} ; Número de estabilidad para francobordo de dique rebasable

N_{sti} ; Número de estabilidad para talud interior de dique rebasable

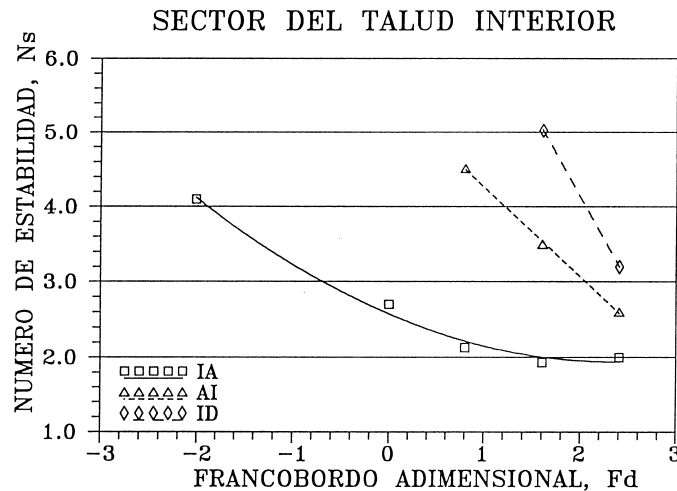


Figura 1.10 Curvas de variación del número de estabilidad con el francobordo adimensional. Inicio de avería, talud interior.
De Vidal et al. (1992)

Morros

Para determinar el diámetro de las piezas del dique sumergido en la sección del morro, se sigue un procedimiento similar considerando un dique no rebasable, con las mismas características de talud y tipo de piezas en el morro; una vez calculado el peso y diámetro de las piezas D_{mnr} se procede de igual manera que en los casos anteriores.

El morro es más inestable en la zona interior, debido a esto, se diseñan tanto el exterior como el interior con el mismo diámetro de piezas, así se siguen las siguientes ecuaciones:

$$F_{dmr} = \frac{F}{D_{mnr}} \dots\dots\dots (8)$$

Donde:

F_{dmr} ; Francobordo adimensional del morro

F ; Francobordo del dique sumergido o rebasable

D_{mnr} ; Diámetro de las piezas en el morro del dique no rebasable

$$D_{mr} = D_{mnr} \frac{N_{smnr}}{N_{smr}} \dots\dots\dots (9)$$

Donde:

D_{mr} ; Diámetro de las piezas en el morro del dique rebasable

N_{smnr} ; Número de estabilidad en el morro para diques no rebasables

N_{smr} ; Número de estabilidad en diques en diques rebasables

D_{mnr} ; Diámetro de las piezas en el morro del dique no rebasable

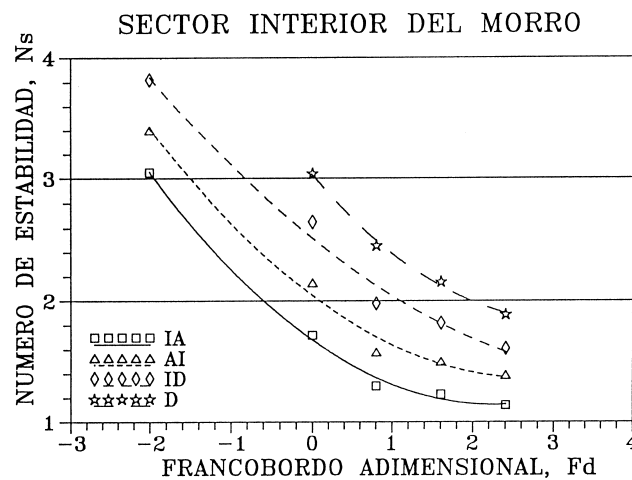


Figura 1.11 Curvas de variación del número de estabilidad con el francobordo adimensional. Inicio de avería, talud interior del morro. De Vidal et al. (1992)

Para determinar el peso y el diámetro de las piezas del talud exterior para un dique no rebasable existen muchos estudios, en este desarrollo se propone la formulación de Van Der Meer para aguas someras, debido a la ubicación de las estructuras y que este método da como resultado valores medios al compararlo con resultados obtenidos por las formulaciones de Losada y Gimenez-Curto y la formulación de Hudson, la formulación se muestra a continuación:

Pendiente	Daño inicial	Daño intermedio	Falla
1:1.5	2	3 – 5	8
1:2	2	4 – 6	8
1:3	2	6 – 9	12
1:4	3	8 – 12	17
1:6	3	8 - 12	17

Tabla 1.3 Valores de daño, S, para la formulación de van Der Meer (1988).

Material	Porosidad P
Dolos	0.56
Tetrapodos	0.5
Cubos	0.47
Escollera clasificada	0.4
Escollera sin clasificar	0.31

Tabla 1.4 Valores de porosidad P, para diferentes tipos de estructuras.

La ecuación (10) permite calcular la longitud de onda para aguas intermedias, mediante un proceso de iteraciones debido a que es una ecuación trascendente.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L}h\right) \dots\dots\dots (10)$$

Donde:

T; Periodo de la ola [s]

H; profundidad del lugar [m]

L; Longitud de la ola [m]

Las ecuaciones de Van Der Meer, para aguas someras son las siguientes:

$$S_r = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \dots\dots\dots (11)$$

$$N_s = \frac{H}{(S_r - 1)D_{50}} \dots\dots\dots (12)$$

$$N_s = 8.7P^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} Ir^{-0.5} \quad Ir < Ir_{crit} \dots\dots\dots (13)$$

$$N_s = 1.4P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right) \sqrt{\cot \alpha} Ir^P \quad Ir > Ir_{crit} \dots\dots\dots (14)$$

$$Ir_{crit} = (6.2P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha})^{1/(P+0.5)} \dots\dots\dots (15)$$

Donde:

Ir; Número de Iribarren

Ir_{crit} ; Número de Iribarren crítico

S_d ; Coeficiente experimental, criterio de daño

N; Número de olas del estado de mar, es este caso N=3000

L; longitud de la ola

H; Altura de la ola

H; Profundidad

1.2.2. Coeficiente de transmisión diques rebasables.

A continuación se presenta la formulación de d'Angremond et al. (1996), para determinar la transmisión en diques rebasables

Para $0.075 < K_T < 0.8$ y dique permeable, y

$$K_T = -0.4 \frac{F}{H} + 0.64 \left(\frac{B}{H} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5Ir}) \dots\dots\dots (16)$$

Para $0.075 < K_T < 0.8$ y dique impermeable.

$$K_T = -0.4 \frac{F}{H} + 0.80 \left(\frac{B}{H} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5Ir}) \dots\dots\dots (17)$$

Donde:

K_T ; Coeficiente de transmisión

H; Altura de ola

Ir; Número de Iribarren

F; Franco bordo

B; ancho de la corona del dique sumergido

1.2.3. Coeficiente de reflexión en diques sumergidos

Uno de los pocos estudios realizados para la reflexión en estructuras demostró que depende del franco bordo y peralte de la ola así como de la disipación y la transmisión. Vidal et. al. (1992) realizó experimentos que comprobaron esta suposición y cuyos resultados se muestran en la Figura 1.12.

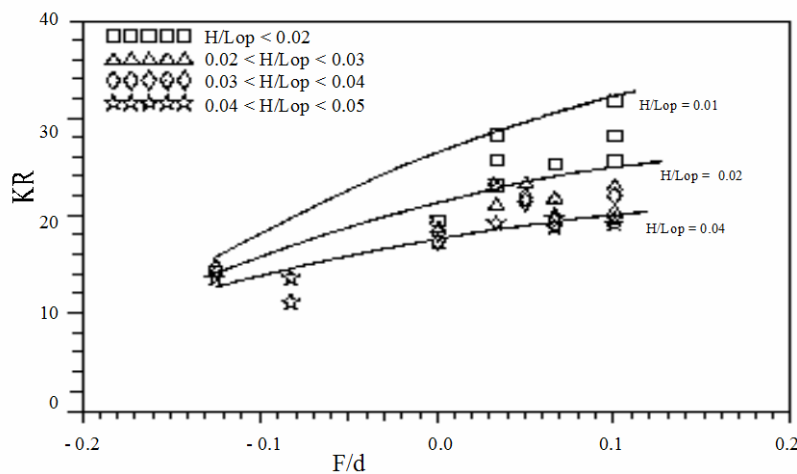


Figura 1.12 Coeficiente de reflexión en diques rebasables de escollera, Vidal et. al (1992)

Donde:

K_R ; Coeficiente de reflexión den diques rebasables

L_{op} ; Longitud de la ola en aguas profundas

d ; Profundidad donde se encuentra ubicada la estructura

1.3. Perfiles de playa colgados

Los perfiles de playa colgados son un incremento en el ancho de playa seca, ya sea debido a un relleno artificial de arena o por medio de la acumulación de sedimento en un determinado periodo de tiempo de manera natural. El perfil generado presenta una discontinuidad en el fondo por la presencia del dique sumergido, éste a su vez es el elemento que genera estabilidad a la nueva línea de costa.

La estructura sumergida, además de generar estabilidad al perfil de playa colgada, tiene la función también de disipar energía del oleaje, lo que permitirá obtener un perfil de equilibrio más estable, asegurando el incremento en ancho de playa seca y/o limitando la pérdida del material, si fuera el caso de un relleno artificial.

Aunque se han realizado un gran número de estudios (Silvard, 1971; Douglass and Weggel, 1987; Ferrante et al., 1992; Dean et al., 1997.) para poder evaluar el comportamiento del perfil colgado debido a una estructura sumergida, y así determinar la variación en el transporte de sedimento; no existe una formulación que establezca las condiciones de un perfil de equilibrio para playas colgadas.

Los conceptos de equilibrio de playa son muy utilizados para el diseño de proyectos de rellenos artificiales (Houston, 1996, Dean 1991); varios estudios presentan la utilidad de las expresiones para analizar del equilibrio y calcular el volumen necesario de arena en diferentes proyectos. En particular Dean (1991) analizó la reducción del volumen de arena por un perfil colgado de un relleno de playa en la costa; Dean supone que es posible alcanzar el equilibrio de la playa en $h_i=d$ (Ver fig1.13).

En la mayor parte de los casos el incremento de playa es con fines turísticos y recreativos, debido a esto el contar con un incremento en la línea de costa con ayuda de una estructura que genera un aspecto visual nulo favorece en gran medida este objetivo. Los diques sumergidos, que son utilizados como base del perfil de playa colgado son paralelos a la costa y de forma continua, esto para obtener mayor estabilidad en el perfil y garantizar la acumulación de sedimento sin perturbaciones originas por brechas en el dique si fuera el caso, si no se realiza un relleno artificial, la acumulación de sedimentos forma tómbolos.

El diseño en los perfiles colgados depende las condiciones oceanográficas del lugar, tanto normales como extremas, batimetría, tipo de sedimento, la longitud que se desee incrementar la línea de costa, la viabilidad de contar con material para realizar un relleno artificial de acuerdo con las dimensiones del proyecto, la diferencia entre la granulometría del lugar y la prevista, si se trata un relleno artificial, así como todas las variables que son necesarias para el diseño de un dique sumergido.

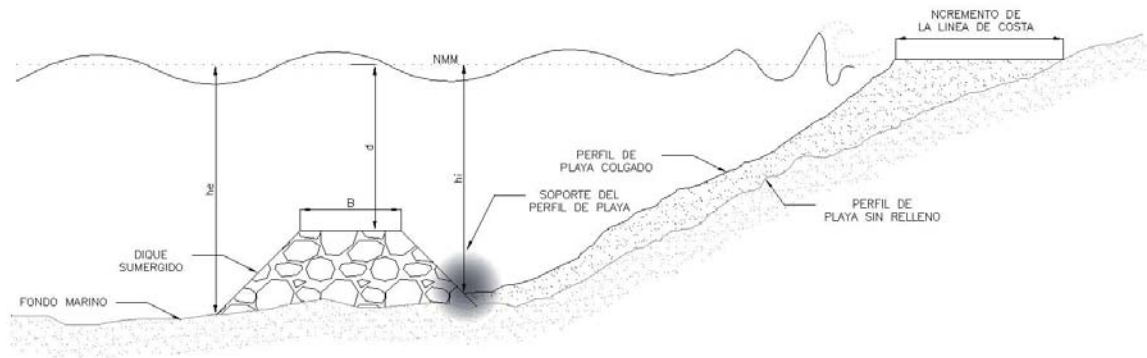


Figura 1.13 Esquema de un perfil colgado

Detrás de la hipótesis del perfil de equilibrio de playa, las playas responden a las fuerzas del oleaje para ajustarse a la forma de equilibrio o perfil constante, ambas atribuibles al oleaje incidente y al tipo de sedimento. Dean (1977) propuso que el equilibrio del perfil de playa depende solo del tamaño del sedimento. La altura de ola no tiene influencia en la forma pero regula la situación de la costa. En caso de que la energía del oleaje actual sea sobrepasada en un punto, el perfil retrocede (Kriebel y Dean 1985). Consecuentemente la modificación de la propagación del oleaje debido a un dique sumergido deberá resultar en una modificación de la línea de costa.

Dentro de las condiciones necesarias para determinar de manera correcta un aumento en el desarrollo de la playa, es necesario determinar el perfil de equilibrio de la zona de proyecto, el cual está en función de las condiciones oceanográficas, extremas y normales, características del sedimento y batimetría. A continuación se presenta el modelo de Dean (1977) para determinar esta condición.

1.3.1. Perfil de equilibrio

Dean (1977), propuso un modelo dinámico basado en el balance de las fuerzas que acarrearán sedimento a la costa y las fuerzas que lo arrastran hacia el mar, bajo las siguientes hipótesis:

- En una playa en equilibrio, el transporte neto longitudinal es nulo o constante, e independiente del transporte transversal, por tal motivo el perfil de equilibrio se estudia como un fenómeno bidimensional donde no hay transferencia lateral de energía.
- La disipación de energía por unidad de volumen, D^* , en la zona de rotura es constante.
- La evolución de la altura de la ola en la zona de rompiente es gradual y sigue una ley lineal de la forma $(H=h)$, donde h es el índice de la rompiente que se asume constante y toma valores en el rango de (0.7-1.0)
- No hay variaciones del nivel del mar.

La formación del perfil de playa en sección transversal es de tipo parabólico

$$h = Ax^{2/3} \dots\dots\dots (18)$$

Donde:

H; Profundidad de agua a una distancia x de la costa en [m]

X; Ubicación del punto de interés partiendo de la costa [m]

A; Parámetro de escala del sedimento

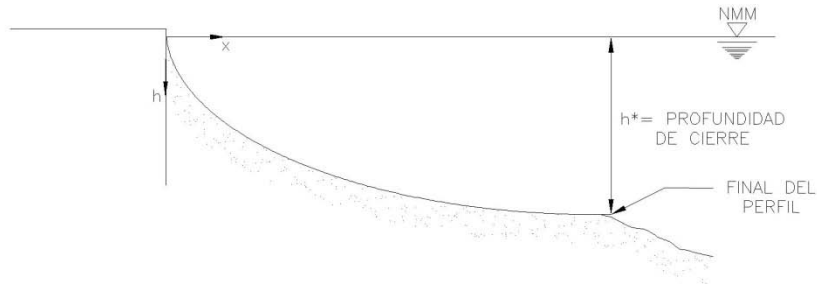


Figura 1.14 Perfil de equilibrio.

El modelo de Dean es válido dentro de la zona de rompiente, por lo que el límite de esta se establece en la zona conocida como profundidad de cierre y que se obtiene por la ecuación propuesta por Hallemeier (1978) y que fue modificada por Birkemeier (1985).

$$h_c = 1.75H_{s12} - 57.9 \left(\frac{H_{s12}}{gT_s^2} \right) \dots\dots\dots (19)$$

Donde:

h_c ; Profundidad de cierre

H_{s12} ; Altura de ola significativa que es excedida doce horas al año y que es medida en la playa a una profundidad h

T_s ; Periodo asociado a la ola H_{s12}

g; Aceleración de la gravedad.

La altura de ola que exceda las doce horas al año puede ser determina por la ecuación (18) según:

$$H_{s12} = \bar{H} + 5.6\sigma_H \dots\dots\dots (20)$$

Donde:

$\bar{H}$; Altura de ola significativa media anual

σ_H ; Desviación estándar de la altura de ola

Mientras que la profundidad de cierre se calcula como:

$$h_c = \frac{A^3}{\tan^2 \beta} \dots\dots\dots (21)$$

Donde:

β ; Pendiente de la playa

A; Parámetro de escala del sedimento

El parámetro de escala del sedimento, es un coeficiente que define la estabilidad de las características del material de fondo de una playa y es función de la disipación de energía que se presenta en ella. De acuerdo con Moore (1982) existe una relación entre el tamaño medio del sedimento y la velocidad de caída de este, lo cual afecta de manera directa la estabilidad de la playa, de acuerdo con lo anterior y ajustando la expresión para hacerla dimensionalmente homogénea, se expresa como sigue:

$$A = 0.508 \omega_f^{0.44} \dots\dots\dots (22)$$

Donde:

ω_f ; Velocidad de caída del sedimento [cm/s]

1.4. Protección de playas

Los diques sumergidos son construidos para lograr la atenuación del oleaje, su diseño tiene como objetivo disipar la energía de una altura de ola determinada y generar una acreción de playa en la zona protegida, además; existe un mejor flujo de agua entre la zona protegida y la expuesta lo cual es muy desfavorable en diques emergidos.

Se han realizado varios esfuerzos por determinar la estabilidad de playas detrás de diques sumergidos Sagari (1988). Sorensen y Beil (1988) trabajaron en un tanque para determinar la respuesta de perfiles colgados sobre condiciones de tormenta. Chatham (1972) realizó un estudio de laboratorio más global para determinar el volumen de arena que se pierde debido a la sobre elevación del nivel del mar y por condiciones de oleaje de tormenta, así también para determinar las dimensiones optimas de la geometría del dique.

Los diques sumergidos pueden ser generados en forma continua, sin ser seccionado, origina una interrupción en las corrientes provocando irregularidades en la costa y formando tómbolos sin afectar las condiciones ambientales y resultando en estructuras de bajo costo comparadas con diques emergidos. Tanto diques sumergidos como emergidos como posible solución de protección costera, sufren de vibraciones en el fondo y transporte de sedimentos.

Los diques sumergidos similares a los diques emergidos, están destinados a prevenir la erosión en playas. Esta función se logra por la retención de sólidos suspendidos que viajan del exterior al interior de la zona de protección, ocasionado por el movimiento de flujo generado por el oleaje. Este transporte del sedimento se deposita al pie del dique y otra parte es la que forma los tómbolos originando el cambio en el perfil de playa.

En el apartado 1.2 se estableció que el flujo de energía transmitido al perfil colgado dependerá de la altura del dique sumergido, la optimización de esta altura para poder establecer un perfil de equilibrio dentro del perfil colgado es de gran importancia. Estudios recientes realizados por González (1999), demostraron que el intervalo de optimización de la altura debe de ser mayor que la mitad de la profundidad debido a que si este valor es menor, la disipación de la estructura no es importante, sin embargo la altura de corona del dique sumergido no deberá ser igual a la profundidad, ya que se puede generar el fenómeno de resonancia, teniendo como resultado una estructura totalmente ineficiente.

A continuación se presentan en las Figura 1.15 y Figura 1.16 los resultados obtenidos por González (1999) y que muestran la importancia de la optimización de la altura del dique como medio para disipar el flujo de energía ocasionado por el oleaje sin que se genere un efecto de resonancia que provoque un dique poco eficiente.

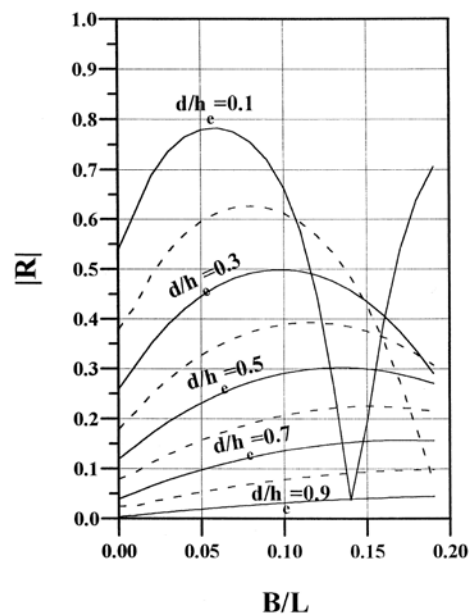


Figura 1.15 Coeficiente de reflexión R contra ancho relativo del dique, para diferentes diques sumergidos, donde B es el ancho de la estructura y L es la longitud de onda. González (1999).

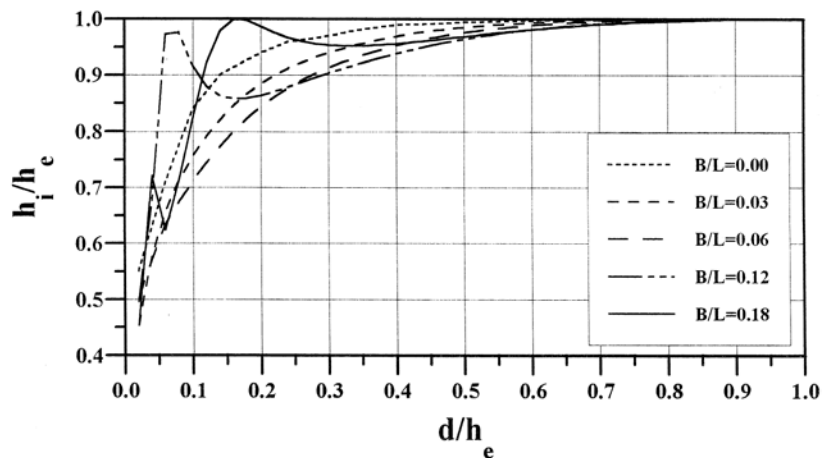


Figura 1.16 Relación de profundidades contra altura del dique para diferentes anchos. González 1999.

1.5. Interacción Playa-estructura

La naturaleza del sitio específico de cada proyecto, el número de variables que envuelve, la interacción morfodinámica de los diques sumergidos, y la escasa información del registro del comportamiento de los rompeolas durante su periodo de vida, hace que el comportamiento entre playa y estructura sea un campo que aun se encuentra en desarrollo y que no puede ser orientado con una formulación estándar.

Dean (1977) propuso que el flujo de energía del oleaje disipado por unidad de volumen en la zona de surf es uniforme. Asumiendo que esta hipótesis es válida, el equilibrio del perfil de playa para un perfil colgado depende del flujo de la cantidad de energía que es transmitido por encima de la estructura. Consecuentemente el diseño de los perfiles colgados requiere un conocimiento de cómo el oleaje es reflejado en la estructura sumergida y como son disipadas las olas en medida que viajan por la parte superior de la estructura.

La morfodinámica costera en presencia de estructuras, tales como diques sumergidos o rompeolas, es afectada por muchos factores hidromecánicos, propiedades playa costa y un gran número de interacciones entre agua, suelo y estructura. Ejemplo de esto es la variación del nivel medio del mar, pendiente del perfil de playa y la transformación de los patrones de sedimentación debido a las estructuras.

En lo que respecta al oleaje, un punto de interés en particular es la difracción y las características de la ola de diseño que afecta la línea de costa, con altura, periodo y ángulo de incidencia. Un punto adicional es el espaciamiento entre diques, si fuera el caso, de diques sumergidos seccionados, así como los efectos causados por una ola que no sufre perturbaciones si esta se transmite por dichas estrechos entre diques.

La reflexión de oleaje de aguas profundas podría traer 2 efectos negativos. El primero consiste en que existe un arrastre en el fondo debido a las tormentas lo cual es asociado con el asentamiento de varias estructuras mientras la otra es el fenómeno de licuefacción por lo tanto el desplazamiento de la estructura por suelo de mala calidad; las estructuras están asentadas en varias profundidades lo que significa que su ubicación es variable con respecto a la línea de rompiente del oleaje, esto podría afectar el fenómeno de la reflexión de forma diferente.

El ángulo de incidencia del oleaje controla el equilibrio y la intensidad de la acreción de la playa; la incidencia del oleaje oblicuo provoca un incremento en el movimiento litoral dentro de la zona de protección, resultando en el aumento de sedimento dentro de la zona de resguardo. En ocasiones es posible utilizar estructuras sumergidas muy largas con el objeto de controlar el oleaje incidente oblicuo.

La eficiencia de una estructura de protección costera también depende de la variación del nivel medio del mar, ya que de acuerdo con la variabilidad del nivel, la estructura tendrá un diferente funcionamiento bajo las consideraciones a la que fue diseñada y será afectado el perfil de la línea de costa de la zona de protección. La variación en el nivel medio del mar, está condicionada también a las circunstancias climatológicas en las diferentes épocas del año.

Existen varias formulaciones para determinar el ancho de la estructura; dentro de ellas, Gurlay (1994) realizó estudios para establecer esta propiedad, dentro de su análisis determinó un coeficiente no lineal para clasificar la transformación del oleaje en el dique,

$$F_{c0} = \frac{g^{1.25} H_e^{0.5} T^{2.5}}{d^{1.25}} \dots\dots\dots (23)$$

Donde:

H_e ; Altura de ola que llega el dique

T ; Periodo de la ola

d ; Es la profundidad del agua sobre el arrecife

De este modelo se puede definir que sí; $F_{c0} > 150$, el oleaje es afectado de manera importante por el dique, de esta manera la energía que llega a la costa es menor; mientras que si $150 > F_{c0} > 100$, la afectación provocada por el dique sobre el oleaje, resulta en un incremento de la altura de ola sobre el dique de hasta 1.2 veces la altura de ola entrante, provocando así, una mayor cantidad de energía sobre la costa, de acuerdo con Gourlay se establece que este incremento de energía puede presentar en al menos una longitud de ola; además; el proceso de rompiente tomara una distancia de entre dos y tres longitudes de ola para reducir este flujo de energía a un valor estable.

La existencia de una estabilidad en la forma de la costa depende de un suministro suficiente de sedimentos en el caso de un relleno artificial, mientras que el equilibrio en tómbolos y salientes depende de los sólidos suspendidos y la longitud de la estructura, así como de la dirección de incidencia del oleaje.

1.6. Espectro Jonswap

Hasselmann et al. (1973) propusieron el espectro JONSWAP, este fue generado a finales de los años sesentas por medio de un proyecto de medición conocido como JONSWAP (Joint North Sea Wave Project). Este espectro fue generado por estados de mar formados por viento, con fetch limitado y para una profundidad de agua definida,

$$S_j(f) = S_p(f) \phi_{PM} \left(\frac{f}{f_p} \right) \phi_J(f, f_p, \gamma, \sigma) \dots\dots\dots (24)$$

Donde:

$S_p(f)$; Ecuación de Phillips y se expresa como sigue

$$S(f) = \alpha g^2 f^{-5} (2\pi)^{-4} \dots\dots\dots (25)$$

Donde:

g ; aceleración de la gravedad

α ; Depende del fetch y del viento

$\phi_{PM} (f / f_p)$; Función de forma de Pierson-Moskowitz

$$\phi_{PM} \left(\frac{f}{f_p} \right) = e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^4} \dots\dots\dots (26)$$

ϕ_J ; Factor de forma del espectro Jonswap

$$\phi_J = \gamma e^{\left[\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right]} \dots\dots\dots (27)$$

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_A & f_p \leq f \\ \sigma_B & f_p > f \end{pmatrix} \dots\dots\dots (28)$$

Sustituyendo las ecuaciones (25), (26) y (27), se tiene:

$$S(f) = \alpha g^2 f^{-5} (2\pi)^{-4} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^4} \gamma e^{\left[\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right]} \dots\dots\dots (29)$$

Los valores medios de los parámetros utilizados para generar este espectro, son los siguientes:

γ ; Factor de forma pico del espectro; $\gamma=3.3$

σ ; Ancho de la base del espectro antes (σ_A) y después (σ_B) de la frecuencia pico; los valores más comunes son: (σ_A)=0.07 y (σ_B)=0.09

α ; Factor de escala que asociado con la energía total de espectro; este parámetro es función directa del fetch y la velocidad del viento;

$$\alpha = 0.076 (\bar{x})^{-0.22} \dots\dots\dots (30)$$

La frecuencia pico del espectro relacionada también con el fetch y la velocidad del viento,

$$f_p = 3.5 \left(\frac{g}{U_{10}} \right) (\bar{x})^{-0.33} \dots\dots\dots (31)$$

Donde:

$$\bar{x} = \frac{gx}{U_{10}^2} \dots\dots\dots (32)$$

x ; Fetch

U_{10} ; Velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie

Goda (1988) desarrollo una expresión aproximada del espectro JONSWAP en función de la altura de ola significativa H_s y de la frecuencia pico espectral f_p

$$S(f) = B_J H_s^2 f_p^4 f^{-5} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4}} \gamma^{e^{\left[\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right]}} \dots\dots\dots (33)$$

$$B_j = \frac{0.0624(1.094 - 0.01915 \ln \gamma)}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \dots\dots\dots (34)$$

Si en la ecuación anterior $\gamma=1$, el espectro se reduce al espectro Pierson-Moskowitz.

Para determinar el periodo del pico espectral T_p , Goda (1988), sugiere la siguiente relación:

$$T_p \cong \frac{T_s}{1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}} \dots\dots\dots (35)$$

Este espectro tiene como característica importante, que cuenta con la posibilidad de modificar la forma en la cual se distribuye la energía

1.7. Método de Mansard y Funke para la separación de la ola incidente y Reflejada

El método que se presenta a continuación fue desarrolla por Mansard y Funke en 1980 y tiene como base los estudios realizados por Marcou (1969) que son una extensión natural del método de Goda y Suzuki (1976).

Se asume que la superficie del agua es un campo en dos dimensiones y que puede ser representada por la composición de N ondas con diferentes características; de acuerdo con Silva (2005), el perfil de la superficie libre del agua puede expresarse como:

$$\eta(x, t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_n) \dots\dots\dots (36)$$

Si se presenta el efecto de reflexión el perfil sufre una afectación. Así, el perfil original ahora formado por la superposición del perfil de oleaje incidente y el perfil originado por la reflexión, debido a esto la ecuación (37) se reescribe como sigue:

$$\eta(x, t) = \sum_{n=1}^N a_{I,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_{In}) + \sum_{n=1}^N a_{R,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_{Rn}) \quad (37)$$

Para poder compensar el posible error de medición entre la estructura y los sensores es necesario introducir una fase θ_s , además, se introduce una función que considera otro tipo de errores, reescribiendo la ecuación anterior se obtiene:

$$\eta(x, t) = \sum_{n=1}^N a_{I,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_{In}) + \sum_{n=1}^N a_{R,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_n + \theta_s) + \Omega(t) \quad (38)$$

Si:

$$\eta_p = \eta(X_p, t)$$

Donde p está referida al número del sensor; por lo tanto:

$$\eta_p = \sum_{n=1}^N a_I \cos(k(x_1 + \Delta x) - \sigma t + \Phi) + a_R \cos(k(x_1 + 2x_{R,1} - \Delta x) + \sigma t + \Phi + \theta_s) + \Omega_p(t) \quad (39)$$

Como objetivo se tiene el minimizar la función de error de fase $\Omega(t)$, esto se logra aplicando la transformada de Fourier en la ecuación (39), para obtener una ecuación algebraica y que resulta como base para poder minimizar la función de error.

Al aplicar dicha transformación se obtiene:

$$A_p + iB_p = a_I e^{(ik(x_1 + \Delta x) + i\Phi)} + a_R e^{(ik(x_1 + 2x_{R,1} - \Delta x) + i(\Phi + \theta_s))} + Y_p e^{(i\rho_p)} \quad (40)$$

Donde:

A_p y B_p ; Coeficientes de Fourier

Entonces, si:

$$\begin{aligned} Z_I &= a_I e^{(ik(x_1 + \Delta x) + i\Phi)} \\ Z_R &= a_R e^{(ik(x_1 + 2x_{R,1} - \Delta x) + i(\Phi + \theta_s))} \\ Z_{N,p} &= Y_p e^{(i\rho_p)} \end{aligned} \quad (41)$$

Con lo anterior la ecuación (40) puede reescribirse de la siguiente manera:

$$A_p + iB_p = Z_I e^{(ikx_{1,p})} + Z_R e^{(-ikx_{1,p})} + Z_{N,p} \quad (42)$$

Desarrollando la expresión (42), para cada uno de los sensores, se tiene que:

$$\begin{aligned} A_1 + iB_1 &= Z_I + Z_R + Z_{N,1} \\ A_2 + iB_2 &= Z_I e^{(ik\Delta x_{1,2})} + Z_R e^{(-ik\Delta x_{1,2})} + Z_{N,2} \\ A_3 + iB_3 &= Z_I e^{(ik\Delta x_{1,3})} + Z_R e^{(-ik\Delta x_{1,3})} + Z_{N,3} \end{aligned}$$

De las expresiones anteriores se despeja la función error, la cual se quiere minimizar, y se tiene para cada sensor:

$$\varepsilon_1 = Z_I + Z_R - (A_1 + iB_1) \quad (43)$$

$$\varepsilon_2 = Z_I e^{(ik\Delta x_{1,2})} + Z_R e^{(-ik\Delta x_{1,2})} - (A_2 + iB_2) \quad (44)$$

$$\varepsilon_3 = Z_I e^{(ik\Delta x_{1,3})} + Z_R e^{(-ik\Delta x_{1,3})} - (A_3 + iB_3) \quad (45)$$

Donde:

$$\varepsilon_p = -Z_{N,p} + f_e(Z_I, Z_R) \quad (46)$$

Para minimizar la función de error $\Omega(t)$, la cual toma valores no negativos, se busca ahora un punto Z_I y Z_R , con sentido matemático y físico, tal que dicha función sea mínima.

El proceso anterior equivale a minimizar la suma de los cuadrados de ε_p , por lo tanto se tiene:

$$\sum_{p=1}^3 (\varepsilon_p)^2 = \sum_{p=1}^3 (Z_I e^{(ikx_{1,p})} + Z_R e^{(-ikx_{1,p})} - (A_p + iB_p))^2 \quad (47)$$

Este mínimo debe verificar:

$$\frac{\partial \sum_{p=1}^3 \varepsilon_p^2}{\partial Z_I} = \frac{\partial \sum_{p=1}^3 \varepsilon_p^2}{\partial Z_R} \quad (48)$$

Desarrollando se obtiene:

$$2 \sum_{p=1}^3 (Z_I e^{(ikx_{1,p})} + Z_R e^{(-ikx_{1,p})} - (A_p + iB_p)) e^{(ikx_{1,p})} = 0 \quad (49)$$

$$2 \sum_{p=1}^3 (Z_I e^{(ikx_{1,p})} + Z_R e^{(-ikx_{1,p})} - (A_p + iB_p)) e^{(-ikx_{1,p})} = 0 \quad \dots\dots\dots (50)$$

Desarrollando e incluyendo el subíndice n en las ecuaciones (47) y (48) se obtiene:

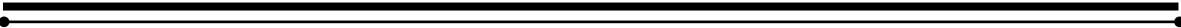
$$\begin{aligned} Z_{i,n} (1 + e^{(i2k_n x_{1,2})} + e^{(i2k_n x_{1,3})}) + 3Z_{R,n} &= (A_{i,n} + iB_{i,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n}) e^{(ik_n x_{1,2})} + (A_{3,n} + iB_{3,n}) e^{(ik_n x_{1,3})} \\ Z_{R,n} (1 + e^{(i2k_n x_{1,2})} + e^{(i2k_n x_{1,3})}) + 3Z_{I,n} &= (A_{i,n} + iB_{i,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n}) e^{(-ik_n x_{1,2})} + (A_{3,n} + iB_{3,n}) e^{(-ik_n x_{1,3})} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (51)$$

La solución está determinada por Mansard y Funke como:

$$\begin{aligned} Z_{I,n} &= \frac{1}{D_n} [(A_{1,n} + iB_{1,n})(R_{1,n} + iQ_{1,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n})(R_{2,n} + iQ_{2,n}) + (A_{3,n} + iB_{3,n})(R_{3,n} + iQ_{3,n})] \\ Z_{R,n} &= \frac{1}{D_n} [(A_{1,n} + iB_{1,n})(R_{1,n} - iQ_{1,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n})(R_{2,n} - iQ_{2,n}) + (A_{3,n} + iB_{3,n})(R_{3,n} - iQ_{3,n})] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (52)$$

Donde:

$$\begin{aligned} D_n &= 2(\sin^2(k_n x_{1,2}) + \sin^2(k_n x_{1,3}) + \sin^2((k_n x_{1,3}) + (k_n x_{1,2}))) \\ R_{1,n} &= \sin^2(k_n x_{1,2}) + \sin^2(k_n x_{1,3}) \\ Q_{1,n} &= \sin(k_n x_{1,2}) \cos(k_n x_{1,2}) + \sin(k_n x_{1,3}) \cos(k_n x_{1,3}) \\ R_{2,n} &= \sin(k_n x_{1,3}) \sin(k_n x_{1,3} - k_n x_{1,2}) \\ Q_{2,n} &= \sin(k_n x_{1,3}) \cos(k_n x_{1,3} - k_n x_{1,2}) - 2 \sin(k_n x_{1,2}) \\ R_{3,n} &= -\sin(k_n x_{1,2}) \sin(k_n x_{1,3} - k_n x_{1,2}) \\ Q_{3,n} &= \sin(k_n x_{1,2}) \cos(k_n x_{1,3} - k_n x_{1,2}) - 2 \sin(k_n x_{1,2}) \end{aligned}$$



2. Metodología de pruebas en el laboratorio

En este capítulo se describen las condiciones de modelado en el Laboratorio de Oleaje del Instituto de Ingeniería. Con el objeto de caracterizar la interacción entre las estructuras sumergidas y la playa, se modelaron diferentes estados de mar, cubriendo un rango de periodos, alturas de ola, y profundidades. En cuanto al material de construcción, se fabricaron cuatro modelos con distintas propiedades mecánicas que son: cubos, geotubos®, WAD® (wave Attenuation Device) y rocas.

Dado que con esta investigación se pretenden explicar los procesos y establecer criterios de diseño, se optó por trabajar sin restricciones de escala de un problema en particular y simplemente se consideraron condiciones medias extremas que se presentan en los litorales mexicanos en una escala de 1:33.33 aproximadamente.

2.1. Canal de oleaje

El canal de oleaje tiene una longitud de 37 metros, con un ancho de 80 centímetros y una profundidad de 120 centímetros. Está construido, en unos de sus costados y en el fondo, con lámina de acero inoxidable, mientras que el otro costado está compuesto por vidrio con un espesor de 20 mm y acero en los extremos del canal. El canal se encuentra a una altura de 80 centímetros y está soportado por una estructura tubular de acero (ver Figura 2.1).



Figura 2.1 Canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM

El llenado máximo del canal es una profundidad de 80 centímetros, con una capacidad aproximada de 24000 litros de agua, este volumen de agua es almacenado dentro de una cisterna y es re-circulada por 3 bombas conectadas en paralelo, con una potencia de 10 hp cada una. El arreglo del sistema de tubos permite suministrar el agua al canal por ambos extremos, o si se requiere es posible invertir la dirección del fluido para almacenarlo nuevamente en la cisterna.

El canal cuenta con un sistema de generación de oleaje adquirido a la empresa HR Wallingford y que es capaz de generar oleaje regular y oleaje irregular con espectros pre-cargados o con el que el usuario defina, por ejemplo Moskowitz y JONSWAP, este último, es el que se utilizó para el desarrollo de las pruebas. El generador es de tipo pistón y consiste en una placa de acero sostenida por un riel, que permite un movimiento hacia adelante y atrás; este elemento está sostenido por una estructura que se encuentra fija al piso del laboratorio.



Figura 2.2 De izquierda a derecha; soporte del sistema de generación de oleaje y motor eléctrico

La placa de acero puede alcanzar un desplazamiento máximo de 85 centímetros a una velocidad de 0.81 cm/s y con una fuerza de 3.5 kN, el mecanismo se mueve con base a un motor eléctrico controlado por un software, HR WaveMaker, el cual permite determinar las características del oleaje. El motor es de inercia baja, necesaria para operar frecuencias altas y con la ayuda del diseño de engranes puede trabajar a velocidades altas.

El sistema de generación de oleaje cuenta con un sistema de absorción que permite disipar el oleaje reflejado que es generado cuando se coloca una estructura reflejante, que de acuerdo con la geometría del canal, pueda provocar que las olas viajen en ambos sentidos y que los datos obtenidos de esta forma se contaminen por las re-reflexiones.

El sistema de absorción funciona de la siguiente manera: El sistema cuenta con dos sensores de nivel adheridos a la pala que toman mediciones durante el ensayo, sobre la superposición del oleaje generado por la placa y el reflejado, estas medidas se comparan con los datos del oleaje que se desea generar, así se obtiene el desplazamiento necesario para eliminar la diferencia de niveles.

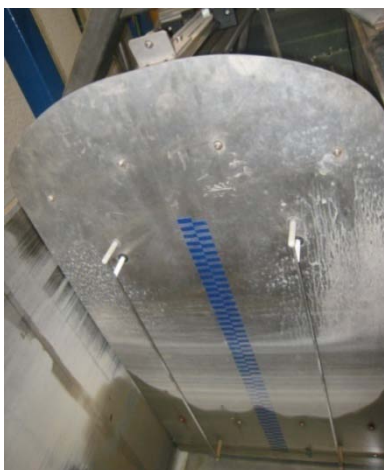


Figura 2.3 Placa de acero y sistema de absorción

2.2. Instrumentos de medición.

Dentro de este apartado se presentan los diferentes instrumentos que existen en el laboratorio, se presentan con la finalidad de caracterizar por completo el equipo del laboratorio que es también utilizado para otro tipo de pruebas.

Sensores de nivel

El laboratorio cuenta con once sensores de nivel, su mecanismo de funcionamiento es el siguiente: para registrar un nivel de superficie del agua en un instante determinado, utiliza las propiedades conductivas del agua y las propiedades aislantes del aire, así, al generar un voltaje en dicho sensor, el circuito se cierra solo en la parte sumergida, de acuerdo con esto, se puede obtener la relación entre el voltaje y la longitud sumergida, determinando así la profundidad en cada instante dado, su rango de operación es de acuerdo con su longitud de 600 mm y cuentan con una precisión de 0.01 mm



Figura 2.4 Sensores de nivel

Estación total

Para determinar los cambios en la variación del perfil de una playa de arena, de grava o de otro tipo de elementos se cuenta con una estación total Leyca Geosystems® modelo TCR407 power. Este instrumento permite obtener puntos a cierta distancia que son representativos del perfil, su ubicación, nivel, número de datos capturados, son la base para poder realizar la comparación entre un perfil inicial y uno deformado después de un evento determinado.



Figura 2.5 Estación total, modelo TCR407 power

Sensores de presión

El laboratorio cuenta con 14 sensores de presión con una capacidad de respuesta rápida, permite medir los cambios de presión generados en los perfiles de playa provocados por los impactos del oleaje. Las celdas de presión están compuestas por un diafragma capaz de registrar variaciones muy pequeñas del medio que las rodea, estas, son conectadas a un circuito con corriente que transforma las señales a diferencias de voltaje, lo cual es transformado a metros de columna de agua.



Figura 2.6 Sensores de presión

Velocímetro Acústico doppler

Instrumento de alta definición que permite conocer los tres componentes de la velocidad en un punto. El principio de operación consiste en una señal acústica que después de reflejar en las partículas del agua de un volumen de control ubicado cinco centímetros arriba de la fuente sonora, es registrada por tres transductores.

La velocidad del fluido se puede estimar a través de relacionar la frecuencia de la onda inicial con las frecuencias deformadas que son captadas.

La frecuencia de muestreo es de 0.1 a 50 Hz; para obtener mejores resultados es posible sincronizar la frecuencia de este aparato con el resto del equipo; el dispositivo cuenta con una resolución de 0.01 cm/s y es posible programarlo para un rango de ± 3 , ± 10 , ± 30 , ± 100 y ± 250 cm/s

Velocímetro por trazado de partículas

El dispositivo PIV por sus siglas en ingles (Paticle Image Velocimeter) se compone de un emisor láser que ilumina las partículas en el fluido y una cámara fotográfica que registra el movimiento de éstas. El software del equipo realiza una malla en la imagen y determina la velocidad al centro de cada una. La resolución mínima de la malla puede ser de hasta un pixel, el cálculo se realiza por correlación adaptativa entre dos imágenes sucesivas, debido a esto el utilizar mallas muy pequeñas puede tener como resultado un tiempo más largo en el proceso de análisis de datos.

Es muy importante realizar ensayos previos sobre la forma en que serán medidos los datos, ya que si se toma un intervalo de muestreo reducido las partículas pueden parecer estáticas y generar además archivos con mucha información y de gran volumen, mientras que si es muy amplio el intervalo, el dispositivo no podrá realizar la correlación de manera correcta, generando así, un error muy grande en los resultados.

2.3. Variables de estudio

Dependiendo de la disponibilidad y tipo de arena, condiciones de oleaje, corrientes costeras, niveles de la marea astronómica y meteorológica, la presencia de estructuras, vegetación, nivel freático de la playa, origen geológico de la costa, entre otros, se tendrá como resultado una determinada configuración de las playas, las cuales en condiciones naturales siempre están inmersas en un proceso dinámico. En teoría, la presencia de estructuras sumergidas reduce la vulnerabilidad de las playas, ya que por un lado disipan parcialmente energía y por otro, sirven de pie de las mismas. En virtud que las condiciones son cambiantes el funcionamiento hidrodinámico y morfológico de las estructuras sumergidas es también variable en el tiempo.

La cantidad de parámetros involucrados en el diseño de diques arrecife es muy extensa, para el desarrollo del presente trabajo se decidió analizar la influencia de: la geometría, sumergencia relativa, tipología y ubicación de la estructura bajo diferentes condiciones de oleaje, representadas por la variación de la altura y periodo de ola.

2.3.1. Altura de ola significativa

Cuando la ola se aproxima a la costa, en la mayoría de los casos generada por el viento, sufre procesos que originan un cambio en su comportamiento, uno de estos cambios es la variación de la velocidad de las partículas debido a los efectos de fondo, mientras que la celeridad de la ola es solo función del periodo en aguas profundas, cuando comienza a acercarse a la costa hasta llegar a aguas someras la celeridad es función también de la profundidad. El oleaje describe un movimiento de sus partículas de manera circular en aguas profundas, es decir, en la zona donde el fondo no afectan las propiedades del oleaje; cuando el fondo afecta el oleaje, el comportamiento de las trayectorias de las partículas describe un movimiento elíptico (ver Figura 1.1). Este efecto es debido a que la presencia del fondo comienza a provocar una pérdida de energía en el oleaje, afectando la velocidad de la partícula en el fondo y provocando un peralte en la altura de ola que eventualmente culmina en una rompiente.

En aguas profundas las velocidades orbitales son función de la altura de ola y periodo, mientras que en la zona de aguas someras son función de la altura de ola, periodo y profundidad. A continuación se muestran los parámetros más relevantes utilizando teoría lineal (Airy, 1841):

Donde:

L; Longitud de onda

T; Periodo de ola

G; aceleración de la gravedad

C; Celeridad de la onda

C_g ; Celeridad de grupo

u; Velocidad orbital en dirección horizontal

v; Velocidad orbita en dirección vertical
 z; Profundidad del fondo marino
 h; Profundidad del punto de interés
 x; Valor del desplazamiento desde el punto de interés
 t; Variación del desplazamiento en un punto

AGUAS SOMERAS	AGUAS INTERMEDIAS	AGUAS PROFUNDAS
$C = \frac{L}{T\pi} = \sqrt{\frac{gh}{L}}$	$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$	$C = \frac{gT^2}{2\pi}$
$L = T\sqrt{gd}$	$L = \frac{gT^2 h}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$	$L = \frac{gT^2}{2\pi}$
$C_g = \sqrt{gh}$	$C_g = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4\pi h / L}{\sinh(2\pi h / L)}\right)$	$C_g = \frac{gT}{4\pi}$
$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos \theta$	$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+h)/L]}{\cosh(2\pi h/L)} \cos \theta$	$u = \frac{H}{2} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \cos \theta$
$v = \frac{H\pi}{T} \left(1 + \frac{z}{\pi h L}\right) \sin \theta$	$v = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+h)/L]}{\cosh(2\pi h/L)} \sin \theta$	$v = \frac{H\pi}{T} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \sin \theta$
$\cos \theta = \cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right)$	$\sin \theta = \sin\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right)$	

2.3.2. Periodo

La longitud de ola es función del periodo de la onda y de la profundidad local. Bajo la presencia de periodos largos, la longitud del oleaje se modifica más rápidamente que cuando se tienen periodos de onda cortos. Si el peralte de la ola, H/L , supera un umbral determinado se presentará una disipación asociada a los efectos de turbulencia que se generan durante el proceso de rotura. Una de las funciones que se busca cumplir con los diques arrecifes es la de abrigo a la playa, la cual se logra a través de la inducción de la rotura de los oleajes más energéticos sobre los diques.

2.3.3. Variación del nivel medio del mar

Las variaciones del nivel medio del mar pueden provocar un cambio importante en el funcionamiento de la estructura y del perfil de playa, esto como consecuencia del cambio de la sumergencia relativa, así por ejemplo cuando ésta aumenta la protección disminuye. El resultado de este fenómeno para el comportamiento de la estructura, es que el dique sumergido disipa menos energía, ya que un menor número de olas rompen y la capacidad de movimiento de los áridos es más dinámica.

Durante el periodo de vida de la estructura es muy probable que se presente una combinación entre fenómenos atmosféricos y meteorológicos desfavorables en el funcionamiento hidráulico de las estructuras sumergidas, los cuales deben ser considerados en el proceso de diseño.

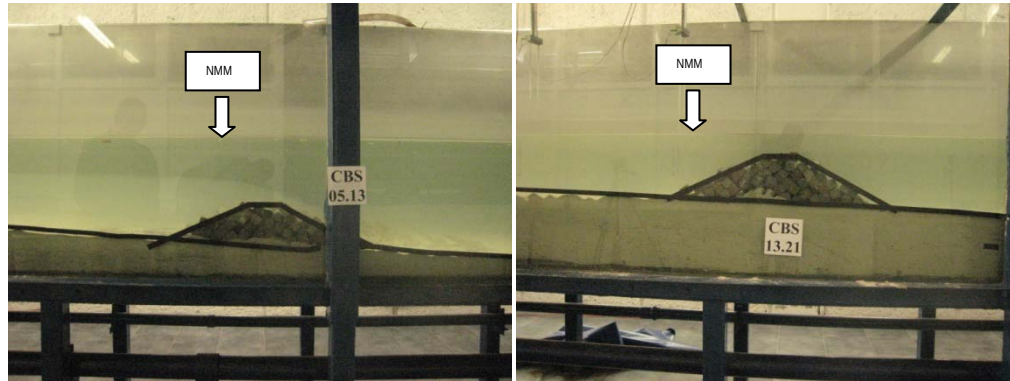


Figura 2.7 Incremento en el nivel medio del mar para dos ubicaciones y diferentes estados de mar

2.3.4. Profundidad de desplante de la estructura

En el proceso de diseño de estructuras sumergidas una de las preguntas más importantes a resolver es qué profundidad es la óptima para desplantar los diques rompeolas. La respuesta normalmente impactará en todos los aspectos, desde los económicos, ambientales hasta los geométricos para conseguir una protección de playa adecuada. Esta pregunta normalmente no se puede resolver de forma inmediata, generalmente implica un proceso iterativo ya que para la misma sumergencia, entre más alejada esté la estructura de protección de la costa, mayor será el área abrigada, sin embargo esta ubicación tendrá un mayor costo en material y la posibilidad de regeneración del oleaje.

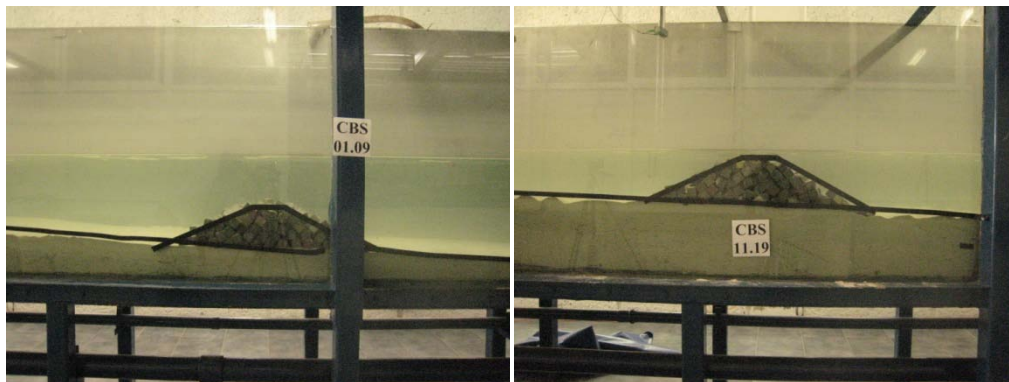


Figura 2.8 Ubicación de la estructura de acuerdo a las diferentes profundidades: De izquierda a derecha, profundidad de 30 cm y profundidad de 16.5 cm

2.3.5. Geometría de la estructura

Un diseño geométrico adecuado de diques sumergidos implica una optimización del material, sin que esto origine una disminución de sus capacidades de trabajo hidrodinámico y mecánico. El diseño de la estructura debe garantizar que los taludes, peso y volumen de las piezas de los elementos sean las apropiadas para soportar los efectos del oleaje, que la anchura de la coronación y altura de la estructura tengan una longitud tal que disipen un porcentaje dado de energía que garantice su eficiencia hidrodinámica.

En el desarrollo experimental se modeló la geometría que se muestra en la Figura 2.9. Para su diseño mecánico se utilizó el método de Vidal et. al. (1992), presentado en el Capítulo 1, la memoria de cálculo se presenta en el Anexo A.

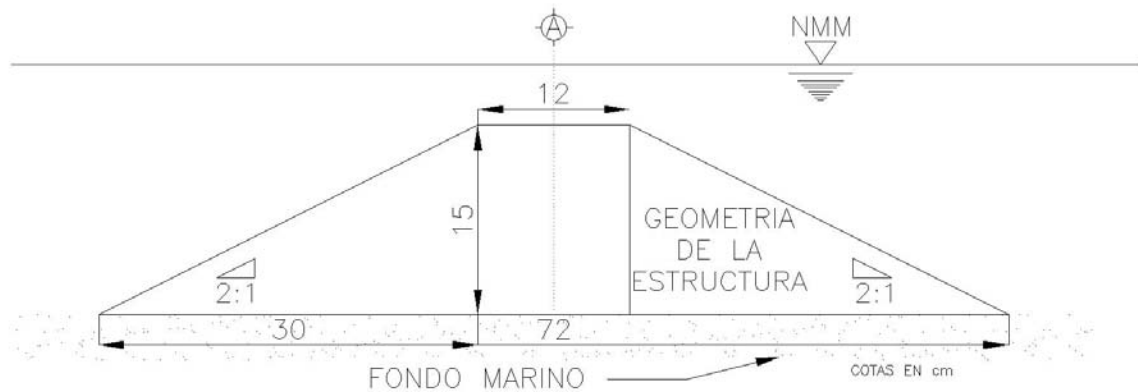


Figura 2.9 Geometría propuesta para el estudio

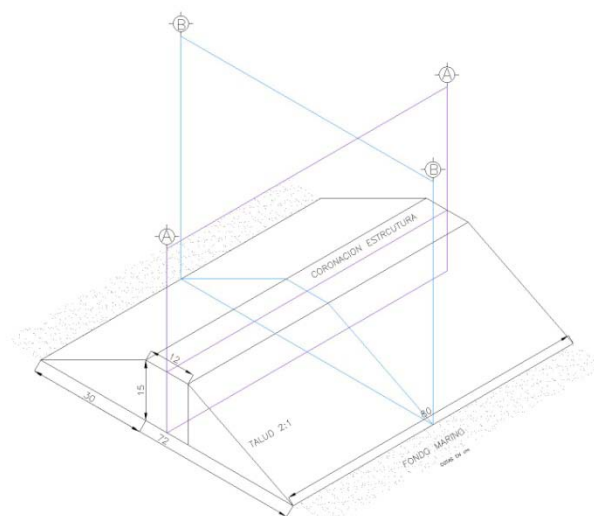


Figura 2.10 Isométrico de la geometría propuesta

2.3.6. Material de construcción

Cuando el oleaje que viaja de aguas profundas hacia la costa se encuentra una estructura parte de la energía es reflejada de nuevo hacia mar abierto. Si la estructura es sumergida parte del oleaje la rebasará y dependiendo de su sumergencia eventualmente se presentará el proceso de disipación de energía asociada a la rotura del oleaje. En muchas ocasiones las estructuras se construyen de material suelto, entonces adicionalmente se disipa otra parte de la energía incidente por efectos de turbulencia y de fricción dentro de los intersticios que dejan las piezas y otra parte se transmitirá a través del manto poroso. En todo este proceso, dependiendo del costo-beneficio, disponibilidad de materiales y de equipo, la selección de la tipología a utilizar también resulta importante de definir. Por ese motivo se modelaron cuatro tipos de materiales de

construcción para la estructura sumergida: cubos, geotubos®, WAD(Wave Attenuation Devices®), y rocas, estos materiales se describen de manera detallada en el apartado 2.3.7.

2.3.7. Modelos ensayados

Dentro de las características más importantes de los elementos de construcción de los diques sumergidos se encuentran: el peso del material, dimensiones, densidad y porosidad. A continuación se describen cada una de estas características para los diferentes materiales.

2.3.7.1. Cubos

Hoy en día con las restricciones ambientales para la explotación de bancos de roca o la ausencia de ésta en sitios cercanos, los cubos son uno de los elementos más comunes para el diseño de protecciones costeras, ya que presentan un comportamiento mecánico adecuado, aunque en ocasiones, el cabeceo de las piezas provoca que las esquinas del cubo sufran un redondeo que les restan parte de la trabazón entre las piezas. El movimiento de sedimento en el fondo puede funcionar como cementante y provocar que después de un determinado periodo de tiempo parte del dique funcione como una estructura impermeable. En general este tipo de elementos funciona de manera adecuada y su proceso constructivo no es muy complicado, además que de su forma provee de una zona ambientalmente favorable para el desarrollo de especies marinas del lugar.

Tipo de material	Concreto
Peso [kg]	0.060
Dimensiones [cm]	3x3x3
Densidad [kg/m ³]	2200
Porosidad [P]	0.47
Escala	1:33.3333
Dimensiones ESC.[m]	1x1x1

Tabla 2.1 Caracterización del material, cubos



Figura 2.11 Modelo fabricado con cubos

2.3.7.2. Geotubos®

Estos elementos prefabricados están compuestos de dos partes. El primero es un elemento geotextil tejido de alta resistencia que sirve para contener el material de relleno, permite el flujo de agua en su interior, garantiza la retención de partículas finas del elemento que contiene, es resistente a las presiones de llenado, tiene la permeabilidad suficiente para disipar el exceso de presión de agua, resistencia a la luz ultra violeta, genera

poco impacto al medio ambiente, las dimensiones de este geotextil varían de acuerdo con las características del proyecto. El segundo componente es el relleno, que puede ser introducido por un acoplamiento directo a un sistema de bombeo hidráulico de material de dragado o de relleno, en algunos casos, también el relleno es a base de material granular, que cumple con las mismas funciones que el anterior, estos elementos por sus dimensiones y peso también pueden presentar un asentamiento importante e incluso un desplazamiento lateral si las condiciones oceanográficas son extremas.

Los geotextiles son una solución de bajo costo en el proceso constructivo, sin embargo existen un gran número de empresas que se dedican a la implementación de este tipo de elementos lo cual de acuerdo con la zona y la empresa puede variar el costo.

Tipo de material	Geotextil y sedimento
Peso [kg]	40
Dimensiones [cm]	75x25x20
Densidad [kg/m ³]	1067
Porosidad [P]	0.20
Escala	1:33.3333
Dimensiones ESC.[m]	25x8.4x6.7

Tabla 2.2 Caracterización del material, geotubos®



Figura 2.12 Modelo fabricado con geotubos®

2.3.7.3. WAD; Wave Attenuation Devices®

Un elemento más reciente en el mercado son piezas prefabricadas por la empresa Coastal Restoration Inc. De acuerdo con el fabricante son especialmente diseñados para la protección de playas, generan un mínimo impacto visual, sus dimensiones pueden variar de acuerdo con las necesidades del proyecto, funcionan también como elementos de producción y protección de arrecifes de coral y la disipación de energía que generan permite utilizar la zona con fines turísticos o de acuacultura.

La colocación de estos elementos es fundamental para un buen funcionamiento y de acuerdo a su ubicación estos elementos prefabricados pueden disipar una gran cantidad de energía sin que una parte importante del oleaje sea reflejada. Aunque la permeabilidad de los elementos varía en su vida útil, siempre permite cierta transmisión de flujo de agua en su interior, por lo que este elemento no trabaja como impermeable, además, no se presenta algún referente a su asentamiento debido a los movimientos del sedimento en su base y el hundimiento por su propio peso. Este elemento ya se ha implementado en diferentes lugares del mundo (ref. 35,36), obteniéndose buenos resultados.

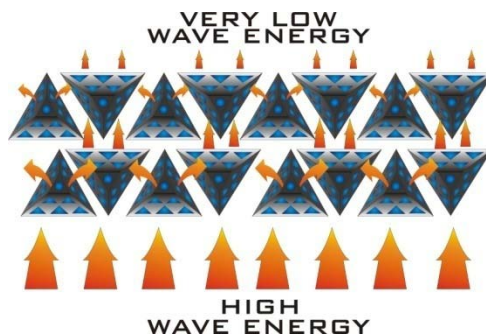


Figura 2.13 Disipación de energía debido a los elementos prefabricados y su arreglo

Tipo de material	Concreto
Peso [kg]	2.10
Dimensiones [cm]	27x13x26
Densidad [kg/m ³]	2200
Porosidad [P]	No determinada
Escala	1:33.3333
Dimensiones ESC.[m]	9x4.5x8.7

Tabla 2.3 Caracterización del material, WAD®



Figura 2.14 Modelo fabricado con WAD®

2.3.7.4. Rocas

Tradicionalmente la roca ha sido el elemento que más se ha utilizado para la protección costera. Para los proyectos en los cuales exista la posibilidad y los costos hagan factible la utilización de rocas que cumplan con el peso y dimensiones necesarias. El comportamiento de este material, es favorecido por el sedimento que puede hacerlo funcionar como cementante, de igual manera que en los cubos, este elemento puede presentar un asentamiento debido al movimiento de material en el fondo; así también, después de un periodo de tiempo, estas estructuras trabajan como elemento menos permeable.

Tipo de material	Roca
Peso [kg]	2.10
Diámetro [in]	2
Densidad [kg/m ³]	2200
Porosidad [P]	0.4
Escala	1:33.3333
Diámetro ESC.[m]	1.7

Tabla 2.4 Caracterización del material, rocas

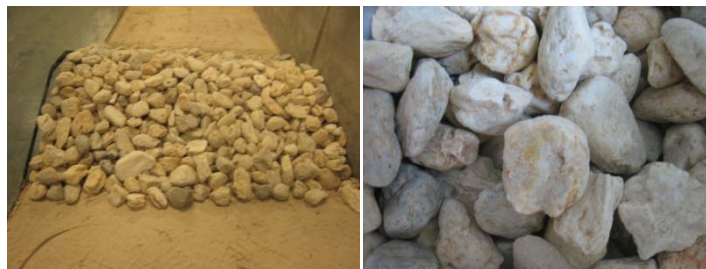


Figura 2.15 Modelo fabricado de rocas

2.3.8. Metodología experimental

En esta sección se presenta el procedimiento empleado para la realización de las pruebas experimentales. Para tener un marco general de referencia, para todos los casos se decidió modelar la misma geometría de los diques arrecife y se variaron el resto de los parámetros: altura de ola, periodo de ola, profundidad, sumergencia relativa y tipología, tal como se muestra en la Tabla 2.5

	Tipología	Posición de la estructura [cm]	Variación del NMM [cm]	Altura de ola [cm]	Periodo de ola [s]
Factor de escala 1:33.33	CUBOS	30	45	10	1
	GEOTUBOS				
	WAD	16.5	50	15	2
	ROCAS				
Núm. Variables	4	2	2	2	2
Sin Material	1	0	2	2	2
Total	72				

Tabla 2.5 Resumen de variables de estudio.

Los estados de mar simulados corresponden a un espectro tipo JONSWAP y para la generación de las series de tiempo se utilizó el método de fases aleatorias, Silva (2007).

Para evaluar el comportamiento hidrodinámico y morfológico de cada una de las condiciones modeladas, se compararon: (a) las evoluciones temporales de la reflexión y transmisión y (b) el perfil inicial y final de cada uno de los ensayos.

En virtud que los sensores registran el oleaje total, incidente más reflejado, fue necesario separar el oleaje que viajaba hacia la costa del que se reflejaba producto de la presencia de la playa y la estructura. Para tal fin, se implementó el método de Mansad y Funke (1981) y que luego fue modificado por Baquerizo (1995).

Tomando en consideración las recomendaciones del método de Mansard y Funke (1981), se estableció un arreglo inicial para ubicar los sensores de nivel, los cuales fueron complementados en función de los objetivos del presente estudio. La disposición final de los sensores se muestra en la Figura 2.16.

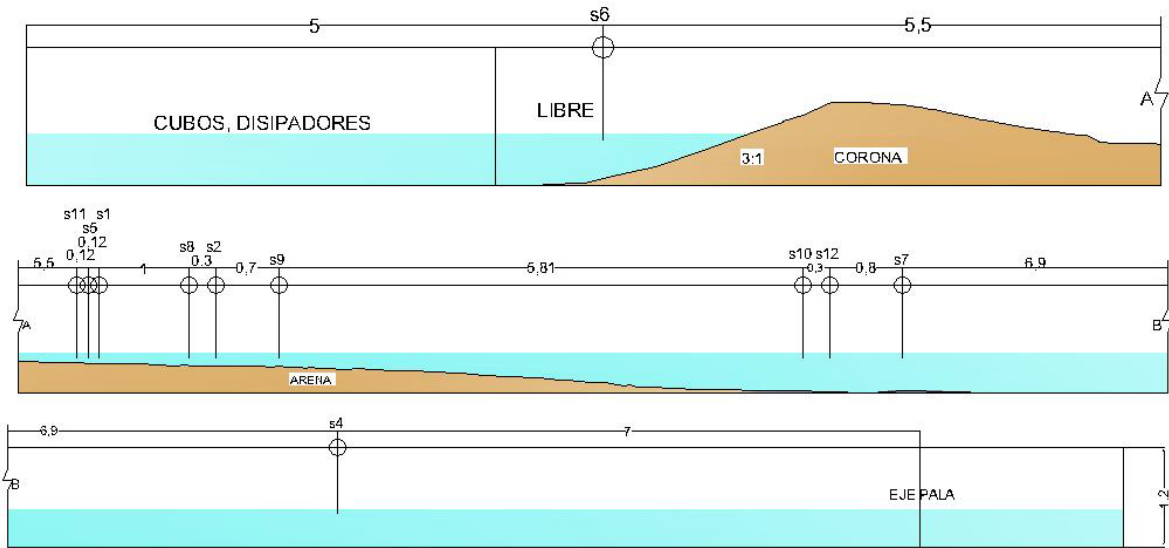


Figura 2.16 Ubicación de los sensores dentro del canal de oleaje y del perfil inicial, cotas en metros.

Los sensores s6 y s4 se colocaron para registrar el comportamiento de posibles oscilaciones de muy largo periodo y para estimar las condiciones de generación, respectivamente. Las señales registradas por los sensores s7, s12 y s10 se utilizaron para evaluar el oleaje incidente y reflejado tanto por la estructura como la playa. Con los señores s8, s2 y s9 se registraron las señales afectadas directamente por la estructura sumergida, mientras que las señales medidas por os sensores s11, s5 y s1 se ubicaron en la zona de rompiente.

La duración de cada uno de los experimentos fue de tres horas. En intervalos de una hora se registró por alrededor de doce minutos las señales con una frecuencia de 20 Hz, obteniéndose 16384 datos en cada sensor.

Por otro lado, se midió el perfil inicial de la playa antes de iniciar los ensayos, de acuerdo con cada uno de los arreglos, playa-sin estructura, playa-cubos, playa-geotubos, playa-WAD, playa-rocas, y al final de cada una de las pruebas. Cada uno de los perfiles se referenció al mismo eje (ver Figura 2.10), el cual corresponde al eje del centro del canal y la posición media del dique sumergido.

Para establecer el perfil inicial de referencia, primero se colocaron 6 m³ de arena con un talud de 1:6 y luego dejó evolucionar libremente el perfil con un oleaje equivalente a una tormenta (2 s de periodo y 0.18 m de altura de ola) por 48 horas continuas. Una vez que se llegó a una condición de pseudo-equilibrio se registró el perfil de referencia, el cual presentó una pendiente aproximada de 1:30, ver Figura 2.17. Para evitar posibles movimientos del pie de la playa y suavizar la transición de materiales, al final del perfil de equilibrio se colocó una cama de grava de un metro de longitud.

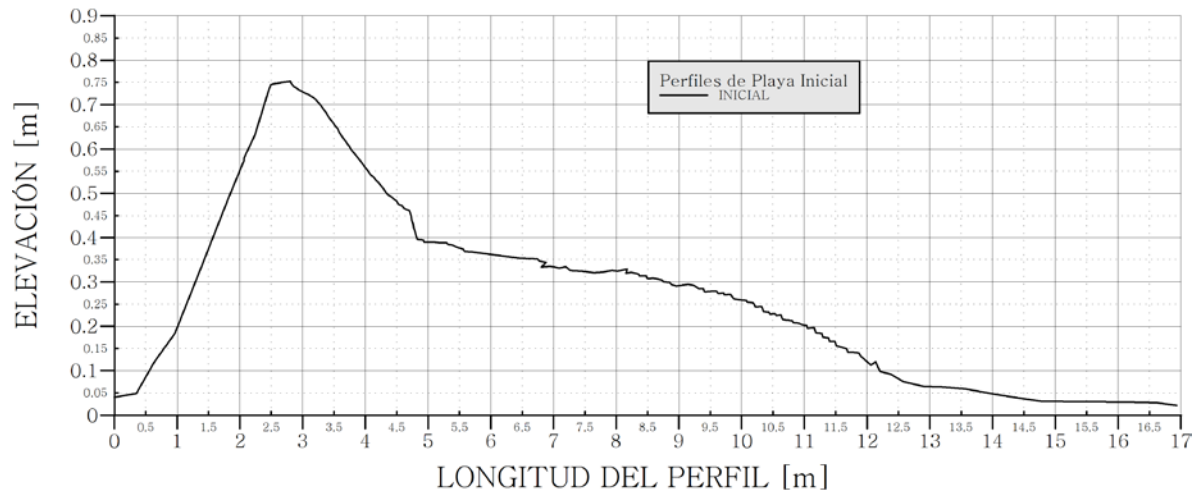


Figura 2.17 Perfil Inicial completo de la playa

El material utilizado para la playa fue tomado de la zona de Puerto Morelos en Cancún Quintana Roo, esta arena cuenta con las siguientes propiedades:

- Diámetro medio de $D_{50}=0.26408$ [mm]
- De acuerdo con la clasificación S.U.C.S. se puede establecer que es una arena mal graduada con poco o nada de finos (SP),
- Porcentaje fino del 1%
- Densidad relativa del material dentro del agua de 1.6315[1]
- Densidad de las partículas de la muestra de 2631.5 [kg/cm³]
- Relación de vacíos de 1.0309
- Gradiente de presión para la licuefacción de 8093.426 [N/m³]

Complementariamente se registró la evolución espacio-temporal de cada uno de los experimentos con el auxilio de una cámara digital y una videocámara. De igual manera que los perfiles, se tomaron fotografías de las condiciones iniciales y finales de la playa y de la estructura para cada una de las pruebas. Se tomaron videos en la estructura con una duración de cinco minutos, veinte minutos antes del final de la prueba y se grabaron videos de quince minutos en los últimos minutos de cada prueba.

La metodología anterior se realizó en dos etapas. En la primera etapa se realizaron las ocho pruebas correspondientes a los efectos inducidos por los diferentes estados de mar en los escenarios de playa sin y con la estructura formada por cubos para las dos profundidades. Para la segunda etapa, primero se analizaron los datos registrados y con base en estos se realizaron modificaciones al número de pruebas.

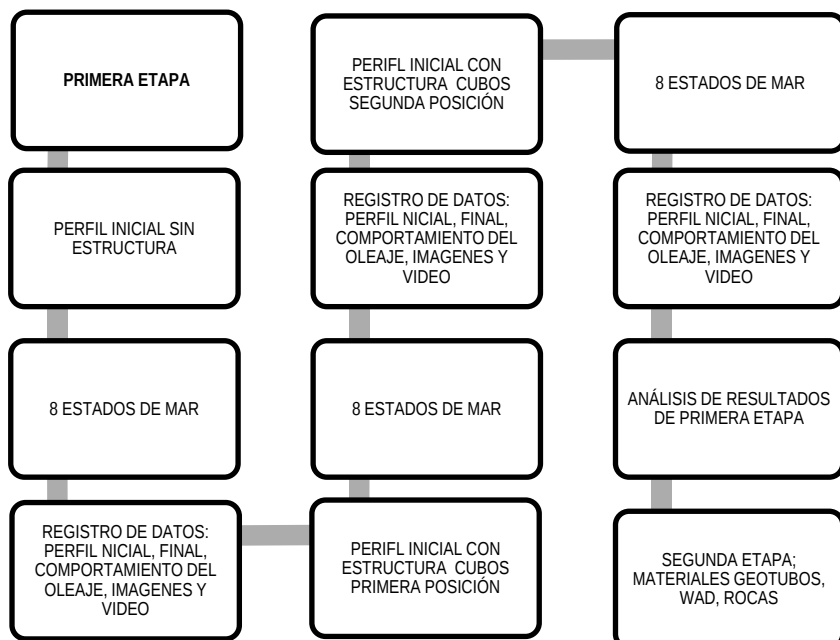
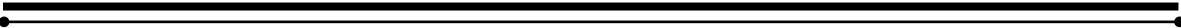


Figura 2.18 Diagrama de flujo de la metodología experimental



3. Modelación numérica

Debido al costo de tiempo y de recursos, en muy pocas ocasiones los proyectos de ingeniería integran modelaciones experimentales específicas, sin embargo, con el tiempo se ha convertido en una práctica común la utilización de modelos numéricos. Por tal motivo, en este trabajo se extiende la metodología presentada por Medina et al. (1999) y Mendoza et al. (2004), para condiciones de perfiles colgados, utilizando el modelo de propagación de oleaje de Silva et al. (2005b).

3.1. Antecedentes

Los diques sumergidos son construidos, en la mayoría de los casos, para evitar la erosión en playas y como elementos de protección de la costa. El diseño de una playa colgada incluye tanto la estabilidad de la estructura sumergida como la del nuevo perfil de playa. Este capítulo se enfocará a la evaluación numérica de la transformación del oleaje en playas con la presencia de estructuras sumergidas.

En la literatura especializada existen varios estudios para evaluar la transformación del oleaje extendiendo el concepto de teoría lineal, siendo los modelos numéricos basados en la extensión del desarrollo de las ecuaciones de pendiente suave los más convenientes para tal fin. La ecuación de pendiente suave fue originalmente presentada por Berkhoff (1972), posteriormente este modelo fue modificado incluyendo los modos evanescentes por Massel (1993), mas tarde, se incluyeron los términos de segundo orden (Chamberlain y Porter, 1995 y Porter y Staziker, 1995) y posteriormente se incluyeron términos de disipación (Dingemans, 1997). Todos estos avances supusieron una condición de fondo impermeable en su derivación; para lograr una mejor aproximación a las condiciones naturales, se realizó la consideración de una capa con fondo permeable sobre uno impermeable, esta solución incluye la derivación de la ecuación base de la pendiente suave para condiciones de rompiente y no rompiente de un tren de olas que viaja sobre un fondo poroso finito dada por Rojanakamthorn et al. (1989), Rojanakamthorn et al. (1990), Losada et al. (1996a) y Losada et al. (1996b). Más tarde Silva et al. (2002b) presento una derivación de la ecuación de la pendiente suave la cual incluye términos de segundo orden y también Silva et al. (2002a) extendió dicha solución considerando los modos evanescentes.

Las derivaciones anteriores fueron realizadas bajo el concepto de un armónico simple, sin embargo, en la naturaleza el oleaje puede ser considerado como una superposición lineal de una serie de armónicos, Silva (1995). Una forma sencilla para reproducir oleaje aleatorio es con el uso del método de fases independientes, un espectro de energía dado y un grupo de funciones de transferencia. Hasselman et. al (1973) propuso el espectro JONSWAP, el cual representa adecuadamente condiciones reales. Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó la metodología propuesta por Silva (2005b), la cual tiene como base un modelo de oleaje lineal para evaluar la transformación de éste debido a estructuras sumergidas, dicho modelo también es validado para condiciones de oleaje irregular y fue validado con resultados de un desarrollo analítico.

Para establecer el comportamiento de un perfil de playa bajo la influencia de un elemento de protección sumergido, se han realizado varios estudios, dentro de los cuales se destaca el modelo presentado por González et al. (1999). En este modelo se propone una formulación para estimar el equilibrio y posible avance del perfil de playa hacia mar adentro suponiendo que la reflexión de mar adentro y la provocada por la estructura son los factores representativos del proceso. Por otro lado, el modelo lo que predice es el ancho de

playa seca ganado y para establecer la nueva forma de la playa se utiliza el perfil de Dean. Las hipótesis más importantes que presenta este modelo son (ver Figura 3.1):

- El dique sumergido es muy angosto en comparación con la longitud de onda, $B \ll L$, por lo que el oleaje que arriba a la playa es el transmitido (incidente menos reflejado).
- Solo la parte del movimiento oscilatorio que no está incluida en la rotura contribuye a la reflexión.
- Sobre la corona del dique se permite una altura de $H > 0.78h$, provocando que la ola no tenga la distancia suficiente para reacomodarse a la nueva profundidad.
- Una playa responde a las fuerzas del oleaje, ajustando el perfil de equilibrio debido a cada estado de mar y la tipo de sedimento.

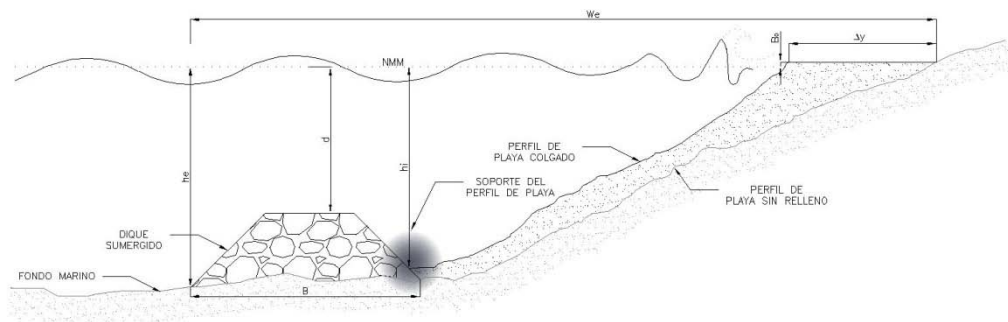


Figura 3.1 Esquema de playa colgada.

3.1.1. Modelo de transformación de oleaje bajo la presencia de estructuras sumergidas

Este modelo considera, en principio, una onda plana que se propaga sobre un fondo impermeable, cuya única variación espacial es el sentido de la propagación. Estas condiciones se cumplen con la ecuación modificada de la pendiente suave presentada por Chamberlain y Porter (1995), modificando los términos de disipación de energía por rotura y por fricción de fondo. Para ilustrar el desarrollo de dicho modelo se presenta la Figura 3.2

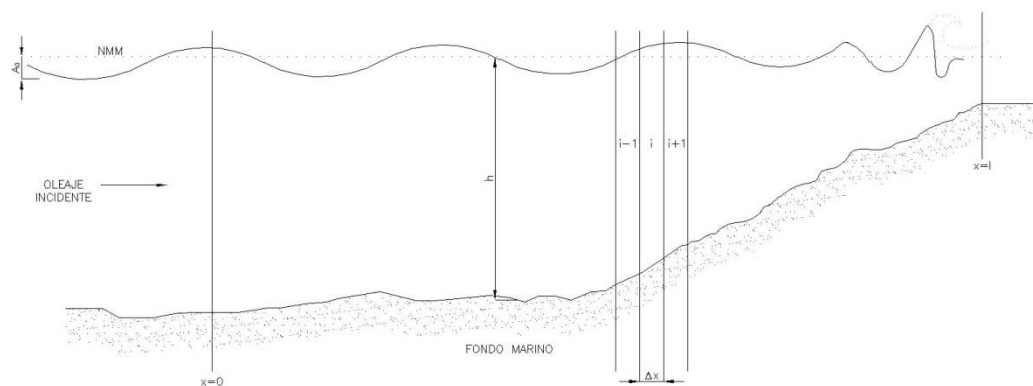


Figura 3.2 Sección transversal del caso unidireccional.

De acuerdo con Chamberlain y Porter (1995), para el intervalo definido entre $0 < x < l$; la ecuación de gobierno queda definida como sigue:

$$\nabla_h I_1 \nabla_h \phi + \left((k^2 - i\sigma W) I_1 + r(h) \right) = 0 \quad (53)$$

Donde:

H; profundidad

K; número de onda

ϕ ; potencial de velocidades plano

σ ; frecuencia angular

W; termino disipativo

$$\nabla_h = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$$

$$I_1 = \int_{-h}^0 I(z)^2 dz$$

$$I(z) = \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}$$

$$r(h) = \nabla_h I_3 - I_4$$

$$I_3 = \int_{-h}^0 I \nabla_h I dz$$

$$I_4 = \int_{-h}^0 (\nabla_h I)^2 dz$$

El termino disipativo W considera las pérdidas de energía debidas a la fricción de fondo y la rotura del oleaje, por lo que se define como sigue:

$$W = f_B + f_D \quad (54)$$

f_B ; es el factor de disipación por fricción de fondo definido en la ecuación (55), donde $\hat{U}_e$ es la amplitud efectiva de u y α es el ángulo del fondo con la horizontal (Dingemans, 1997).

$$f_B = \frac{4}{3\pi} \frac{f_w}{h} \frac{\hat{U}_e}{\cosh^2 kh} \quad (55)$$

$$\hat{U}_e = |v| \cos \alpha$$

El factor de fricción f_w , para régimen turbulento, se obtiene de la expresión (56)

$$f_w = \begin{cases} 0.3 & \frac{\sigma r}{u} \geq 0.683 \\ \exp \left[5.5 \left(\frac{\sigma r}{u} \right)^{0.2} - 6.3 \right] & \frac{\sigma r}{u} < 0.683 \end{cases} \dots\dots\dots (56)$$

Donde r es el parámetro de rugosidad de Nikuradse definido por $r = 2.5D_{50}$, donde D_{50} es el diámetro medio del grano.

El factor de disipación por fondo f_D , se estima por medio de la siguiente ecuación (Silva et al., 2002),

$$f_D = \frac{0.15k}{\sigma h} \left[1 - \left(\frac{0.4h}{H_B} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (57)$$

En la ecuación (57), H_B , es la altura de ola de rotura, determinada con la relación $H_B = 0.78h$

Para la definición de las condiciones de frontera (Figura 3.2), en la frontera de mar abierto, $x=0$, se considera la llegada una ola incidente con amplitud A_0 , que se propaga de aguas profundas sobre un fondo plano sin afectar las condiciones del oleaje, además también, el potencial de velocidades en $x \leq 0$ está compuesto por la superposición de una onda incidente de amplitud A_0 , y una reflejada de amplitud R_0 ;

$$\phi_{x \leq 0} = A_0 I e^{-ikx} + R_0 I e^{ikx} \dots\dots\dots (58)$$

La frontera cerca de la línea de costa cuando $x=l$, se considera como elemento no reflejante y la amplitud en ese punto se define como T_0

$$\phi_{x=l} = T_0 I e^{-ikx} \dots\dots\dots (59)$$

Después de una serie de sustituciones, con las ecuaciones 53, 58 y 59 se genera una matriz tridiagonal compleja, de la cual el vector solución del sistema de ecuaciones contiene el potencial de velocidades en cada uno de los segmentos del dominio.

3.1.2. Descripción del modelo de avance de playa

El modelo del perfil de playa presentado por González et al. (1999), Figura 3.1, depende de los siguientes parámetros:

- Δy ; avance de la playa
- B_0 ; altura de la berma de la playa
- h_i ; profundidad a pie de dique dentro de la zona protegida
- d ; profundidad sobre la corona

h_e ; profundidad a pie de dique en la zona expuesta

B ; ancho de la estructura

We ; distancia desde la línea de costa original hasta el pie de dique en la zona expuesta.

La estimación de los perfiles de equilibrio utiliza las expresiones propuestas por Brunn (1954) y Dean (1977), las cuales son las siguientes:

$$h = Ax^{2/3} \dots\dots\dots (60)$$

Donde:

X ; distancia desde la costa hacia mar adentro

A ; parámetro de forma, el cual se expresa como sigue: $A = 0.51\omega^{0.44}$, mientras que ω , es la velocidad de caída del sedimento, calculada como:

$$\omega = \begin{cases} 1.1 \cdot 10^6 D_{50}^2 & D_{50} < 0.1mm \\ 273 D_{50}^{1.1} & 0.1mm \leq D_{50} \leq 1mm \\ 4.36 D_{50}^{0.5} & D_{50} > 1mm \end{cases} \dots\dots\dots (61)$$

Conocidas las condiciones iniciales de la estructura y el desarrollo de los diferentes estados de mar, es posible obtener el coeficiente de reflexión en la estructura; con este coeficiente se calcula la profundidad en la zona de protección del dique, con la expresión:

$$h_i = h_e (1 - R)^{2/5} \dots\dots\dots (62)$$

Donde:

R ; Coeficiente de reflexión.

El coeficiente de reflexión está definido como la relación entre la altura de ola reflejada entre la incidente, estos valores se estiman a partir del potencial de velocidades que fue obtenido del modelo de propagación, de acuerdo con la expresión (63)

$$\phi = A_0 Ie^{-ikx} + R_0 Ie^{ikx} \dots\dots\dots (63)$$

Derivando la ecuación y evaluando en $x=0$, se obtiene

$$\frac{\delta\phi}{\delta x} = ik(-A_0 + R_0) \dots\dots\dots (64)$$

Ahora, sustituyendo 63 en 64 se obtiene

$$\frac{\delta\phi}{\delta x} = ik\phi - 2ikR_0 = 0 \dots\dots\dots (65)$$

Despejando la amplitud reflejada y para el caso en que la altura de ola incidente es unitaria, obteniendo:

$$R = R_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{-i}{k} \left(\frac{\delta\phi}{\delta x} \right) + \phi \right] \dots\dots\dots (66)$$

El avance de playa se determina a partir de asegurar que el comportamiento del coeficiente de reflexión y h_i convergen.

$$\Delta y = W_e - B - X \dots\dots\dots (67)$$

De donde x representa la distancia desde la costa hasta el pie de dique y se determina a partir del perfil de equilibrio como sigue:

$$x = \left(\frac{h_i}{A} \right)^{3/2} \dots\dots\dots (68)$$

3.2. Implementación numérica

En este apartado se presentan los aspectos generales utilizados para la implementación numérica. Para evaluar el efecto del oleaje irregular se supuso válida la superposición lineal de componentes a través de una función de transferencia, que de acuerdo con Silva (1995) y Losada et al. (1996a), éstas se establecen como sigue:

$$S_p(f_j, x, y) = |\phi(x)|^2 S_\eta(f_j) \dots\dots\dots (69)$$

Donde $|\phi(x)|^2$ es el coeficiente de propagación y $S_\eta(f_j)$ es el espectro incidente.

En la Figura 3.3 se presenta un ejemplo de un espectro de oleaje incidente. En la implementación numérica, primero se discretizó el espectro, después se propagó utilizando el modelo de la ecuación de la pendiente suave cada una de sus componentes discretas con una amplitud incidente unitaria, con el coeficiente de propagación local y utilizando la ecuación (69) se obtuvo el espectro propagado local. En cada una de las posiciones se revisó la condición de rotura, en caso de romper se evaluó el coeficiente de disipación y se repitió el proceso, lo cual se realizó hasta que no hubiese localizaciones que no cumplieran con el criterio de rotura.

Los parámetros espectrales asociados a la altura de ola significativa y cuadrática media se calcularon utilizando las siguientes expresiones:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (70)$$

$$H_{rms} = \sqrt{8m_0} \quad (71)$$

$$H_{m_0} = 4.004\sqrt{m_0} \quad (72)$$

Donde $S(f)$ es la función de densidad espectral y f es la frecuencia.

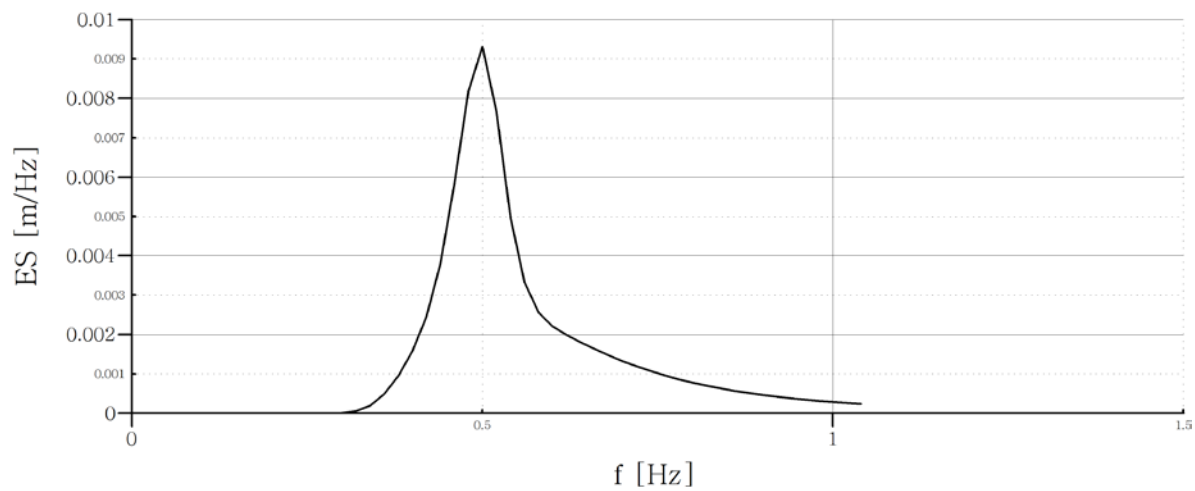


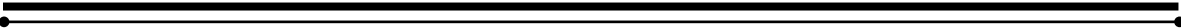
Figura 3.3 Espectro de oleaje.

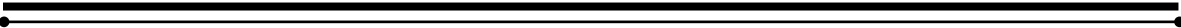
Con la discretización realizada y con los valores de momento presentados por la ecuación (70), se obtiene la caracterización del oleaje en cada una de las dovelas, con esto se establece el comportamiento del oleaje irregular desde aguas profundas hasta aguas someras.

Para evaluar el coeficiente de reflexión se utilizó la siguiente formulación de Mendoza (2002).

$$R(i) = \frac{1}{2} \left| \frac{\phi_{i+2} - \phi_i}{2 * DX * k} + \phi_{i+1} \right| \quad (73)$$

La validación del modelo numérico se presenta en el siguiente capítulo.





4. Resultados

Este capítulo está dedicado al análisis de los datos obtenidos en las pruebas experimentales. El estudio de los resultados obedece a las dos etapas en las que fueron realizados los ensayos, en la primera se deformó un perfil de playa en dos condiciones a) con la acción únicamente del oleaje y b) con una protección sumergida construida con cubos desplantada a dos profundidades distintas y una segunda etapa en la que se registró la interacción oleaje-estructura-playa para los casos de tres diques sumergidos restantes construidos de distintos materiales (geotubos®, WADs®, y rocas). La primera etapa, cumplió una función muy importante ya que los resultados obtenidos en el caso sin estructura se utilizaron como testigos para el resto del estudio, también se compararon con los resultados de la protección a mayor desplante, para evaluar el funcionamiento del dique como dissipador de energía, así se determinó que colocar el dique sumergido en la posición más alejada de la playa (mayor profundidad de desplante) limita fuertemente su uso como dissipador, por ello la segunda etapa solo incluyó una sola posición de los diques.

El capítulo presenta también la validación del modelo numérico de avance de playa en presencia de diques sumergidos, para ello se compara entre los valores obtenidos en los ensayos y los resultados del modelo. Para obtener una mejor aproximación, los valores utilizados de altura de ola y periodo son el promedio de los datos registrados en los ensayos. Con estos datos se establece la correlación entre el comportamiento generado por cada uno de los diques ensayados y los valores estimados por el modelo.

El desarrollo experimental se organizó de tal modo que a cada prueba (material de construcción, nivel de agua en reposo y clima de oleaje) le corresponde una nomenclatura específica, la cual se resumen en la Tabla 4.1.

Sin Material – SM					Cubos – CBS (Z = 30) ¹					Cubos – CBS (Z = 16.5) ¹					Geotubos® - GTBS (Z = 16.5) ¹				
#	Fb ¹	h ¹	H ¹	T ²	#	Fb ¹	h ¹	H ¹	T ²	#	Fb ¹	h ¹	H ¹	T ²	#	Fb ¹	h ¹	H ¹	T ²
0101	1.5	45	10	1	0109	15	45	10	1	0917	1.5	45	10	1	0125	1.5	45	10	1
0202	1.5	45	10	2	0210	15	45	10	2	1018	1.5	45	10	2	0226	1.5	45	10	2
0303	1.5	45	15	1	0311	15	45	15	1	1119	1.5	45	15	1	0327	1.5	45	15	1
0404	1.5	45	15	2	0412	15	45	15	2	1220	1.5	45	15	2	0428	1.5	45	15	2
0505	6.5	50	10	1	0513	20	50	10	1	1321	6.5	50	10	1	0529	6.5	50	10	1
0606	6.5	50	10	2	0614	20	50	10	2	1422	6.5	50	10	2	0630	6.5	50	10	2
0707	6.5	50	15	1	0715	20	50	15	1	1523	6.5	50	15	1	0731	6.5	50	15	1
0808	6.5	50	15	2	0816	20	50	15	2	1624	6.5	50	15	2	0832	6.5	50	15	2

WADs® - WAD (Z = 14.5) ¹					WADs® - WAD (Z = 14.5) ¹					ROCAS – RCS (Z = 16.5) ¹					Geotubos® - GTBS (Z = 16.5) ¹				
#	Fb ¹	h ¹	H ¹	T ²	#	Fb ¹	h ¹	H ¹	T ²	#	Fb ¹	h ¹	H ¹	T ²	#	Fb ¹	h ¹	H ¹	T ²
0133	15	45	10	1	0941	1.5	42	15	1	0143	1.5	45	10	1	0151	1.5	45	12	2
0234	15	45	10	2	1042	1.5	45	15	1	0244	1.5	45	10	2	0252	1.5	45	12	1.3
0335	15	45	15	1						0345	1.5	45	15	1	0353	1.5	45	12	1.6
0436	15	45	15	2						0446	1.5	45	15	2	0454	6.5	50	12	1.3
0537	20	50	10	1						0547	6.5	50	10	1					
0638	20	50	10	2						0648	6.5	50	10	2					
0739	20	50	15	1						0749	6.5	50	15	1					
0840	20	50	15	2						0850	6.5	50	15	2					

Z = profundidad de desplante Fb = Francobordo, h = profundidad de agua en reposo, H = altura de ola, T = periodo

¹ Valores en centímetros, ² Valores en segundos

Tabla 4.1 Nomenclatura utilizada y condiciones ensayadas en cada una de las pruebas

Durante el desarrollo de las pruebas se realizaron algunas adecuaciones para procurar que el comportamiento mecánico fuera similar para cada uno de los materiales utilizados. Las modificaciones

realizadas fueron las siguientes: el uso de un tapete antisocavación para los geotubos® y el cambio en la posición de los WAD® para mantener el francobordo. Dada la baja eficiencia de estos últimos en condiciones de construcción, se realizó una prueba con una combinación de materiales rocas-elementos prefabricados tratando de simular el efecto que generaría mayor permeabilidad en su interior y con ello aumentar el porcentaje de disipación de energía.

Considerando que para algunos estados de mar las estructuras sufrieron deformaciones importantes, se decidió analizar los resultados de dichas pruebas por separado a fin de mantener una consistencia en las comparaciones de resultados. El diseño mecánico del dique fue realizado para soportar las condiciones más extremas que se modelaron (anexo A), sin embargo en algunos ensayos si se presentó una deformación que puede considerarse como falla de la estructura. Las pruebas donde el dique presentó falla son: CBS1220, GTB0428, WAD0436, RCS0446.

Para cubrir un rango más amplio de condiciones sobre la eficiencia hidrodinámica y morfodinámica, se realizaron cuatro pruebas adicionales para el dique formado por geotubos®, éstas son: GTBS1051, GTBS0252, GTBS0353 y GTBS 0454, las características de estos ensayos se muestran también en la Tabla 4.1.

4.1. Primera etapa

En este apartado se presenta el análisis de las pruebas con protección formada por cubos para la profundidad de $z = 30$ cm, por medio de una comparación con los resultados obtenidos para los casos sin protección, con lo anterior es posible evaluar la eficiencia el dique como disipador de energía. Como se ya se menciona, los datos obtenidos por el comportamiento de playa sin protección son utilizados como testigos para determinar el cambio en el perfil originado por cada tipología por lo que estos valores son utilizados para comparar el comportamiento generado por cada estructura.

4.1.1. Comportamiento estructural

Cuando el oleaje viaja de aguas profundas hacia la costa y se encuentra con una estructura, parte de la energía es reflejada de nuevo hacia mar abierto. Si la estructura es sumergida, parte del oleaje la rebasará y dependiendo de su sumergencia relativa se presentará el proceso de disipación de energía asociada a la rotura del oleaje. En muchas ocasiones las estructuras se construyen de material suelto, de ser así, adicionalmente se disipará otra parte de la energía del oleaje por efectos de turbulencia y fricción dentro de los intersticios que dejan la piezas y otra parte se transmitirá a través del manto poroso.

En el desarrollo de estas pruebas se observó que las condiciones de oleaje se modificaron muy poco por la presencia de las estructuras. Para verificar cualitativamente el grado de modificación, se calculó la disipación de energía del dique para el caso de la estructura a mayor profundidad y se comparó con los resultados de la playa sin protección. En la Figura 4.1 se muestra una comparación entre la altura de ola significativa transmitida medida al pie de la estructura del lado no expuesto al oleaje sin y con la presencia del dique de cubos. Es claro que, al comparar la altura de ola sin dique con la transmitida por el mismo, que la disipación de energía es mínima, por lo cual se consideró que las estructuras desplantadas a una profundidad tan grande son poco eficientes hidrodinámicamente.

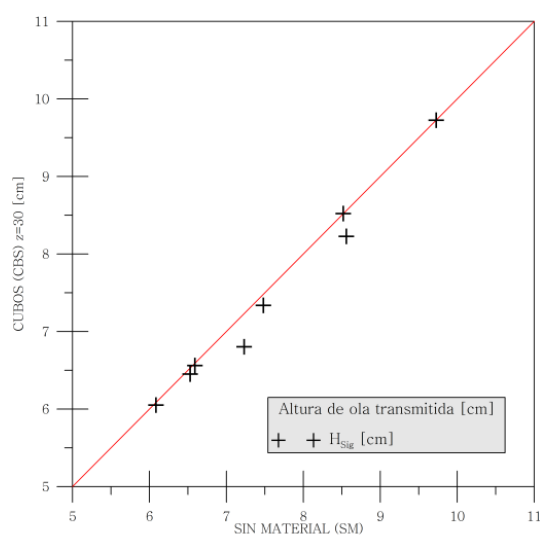


Figura 4.1 Oleaje incidente sobre la playa para SM-CBS z=30[cm]

Para completar el análisis del funcionamiento del dique en esta posición, en la Figura 4.2, se presentan los valores de altura de ola medidos en la zona no protegida por el dique para los casos de altura de ola reflejada (H_{ref}) y altura de ola incidente (H_{inc}). Para el caso de de la altura de ola transmita (H_{tra}), este valor fue registrado después del dique con el objeto de verificar los valores de altura de ola modificado por la estructura. Los resultados muestran que la estructura de protección indujo una disipación muy similar a la condición sin protección.

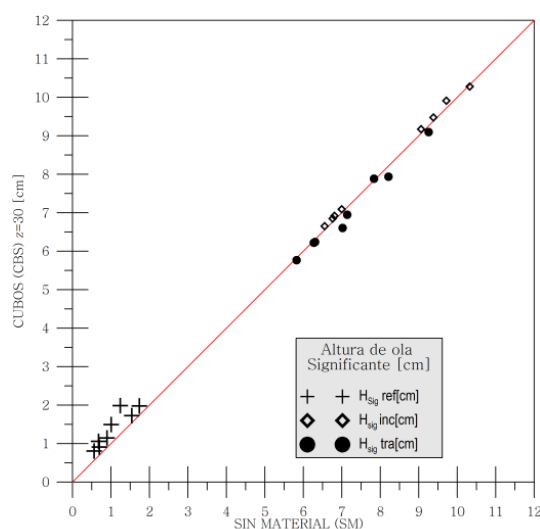


Figura 4.2 Altura de ola significativa en [cm] sobre la estructura.

Con base en el análisis del oleaje, se observó que para estas condiciones los estados de mar afectan de la misma forma el perfil de playa ubicado dentro de la zona de protección para la condiciones sin y con estructura, verificándose una poca disipación por parte de la estructura. Para validar lo anterior, a continuación se presenta el análisis de comportamiento morfodinámico.

El comportamiento de la estructura durante los diferentes estados de mar presentó cambios mínimos en virtud que la ubicación del dique generó poca interacción con las condiciones del oleaje modeladas. Para observar la variación del dique antes y después de los diferentes estados de mar, en el anexo B se muestran las gráficas de los perfiles inicial y final. Con las figuras presentadas en el anexo B, se observa que la estructura sufre un asentamiento mínimo y un movimiento del sedimento al pie del dique que no causa modificaciones importantes.

4.1.2. Comportamiento morfodinámico

Como parte de la metodología empleada para estudiar el comportamiento de la playa, se midieron los perfiles finales para todas las pruebas con y sin la influencia de la estructura sumergida. Los registros finales se presentan de la Figura 4.3 a la Figura 4.10. En ellas se puede observar que el efecto del dique es prácticamente nulo, por lo que no cumple su función como apoyo al perfil de playa.

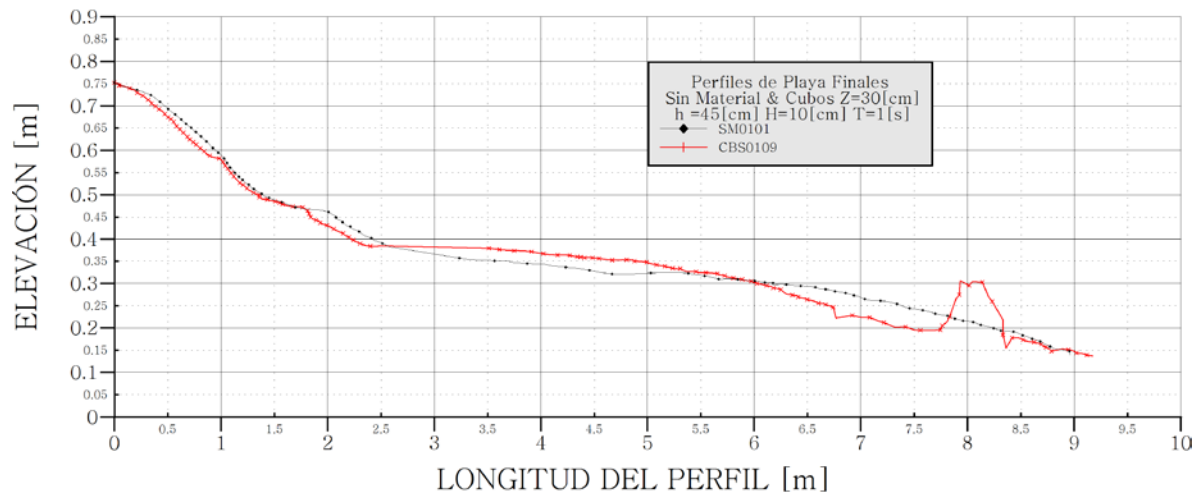


Figura 4.3 Perfiles finales para $h=45$ [cm]; $H=10$ [cm]; $T=1$ [s]

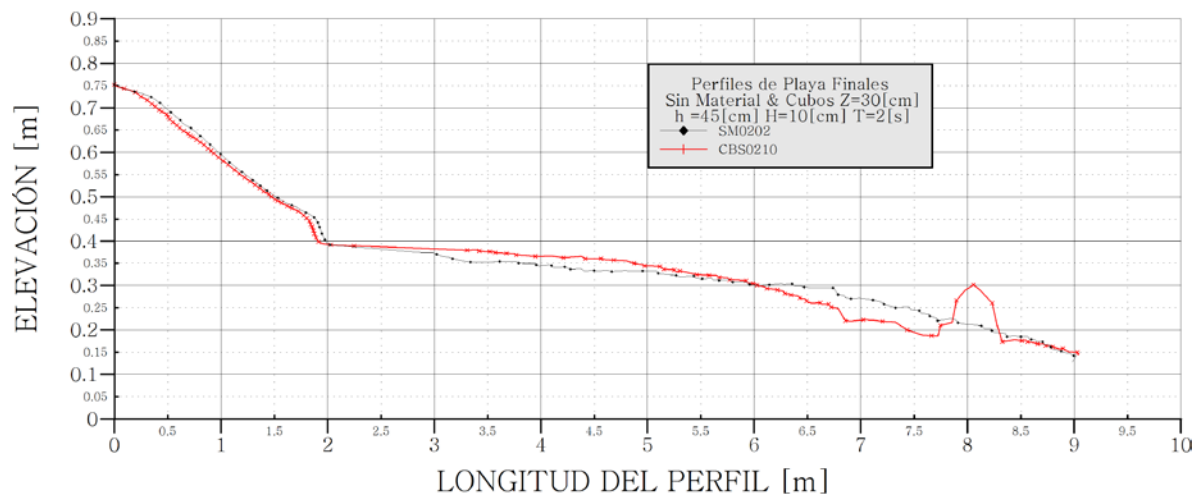


Figura 4.4 Perfiles finales para $h=45$ [cm]; $H=10$ [cm]; $T=2$ [s]

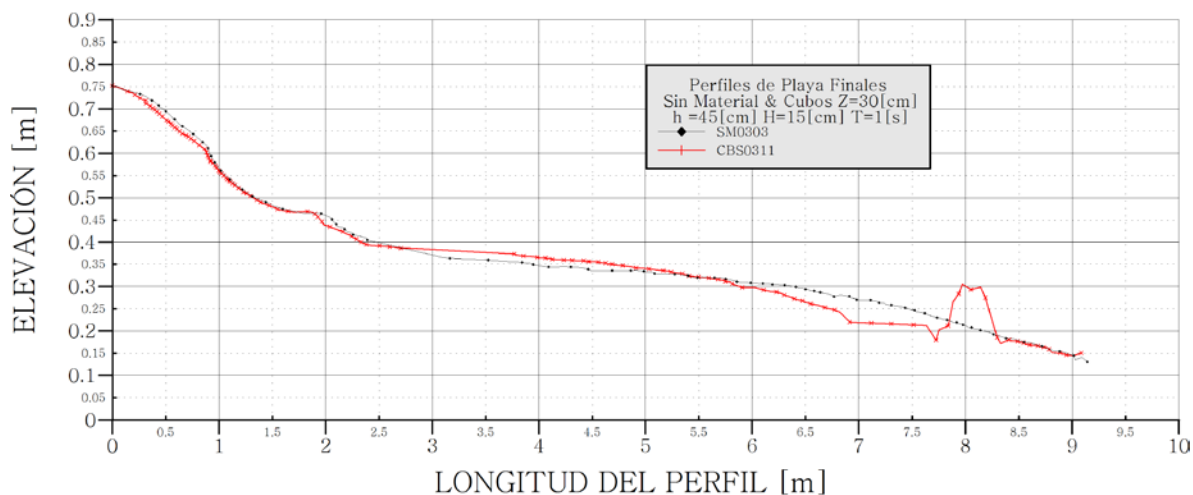


Figura 4.5 Perfiles finales para h=45[cm]; H=15[cm]; T=1[s]

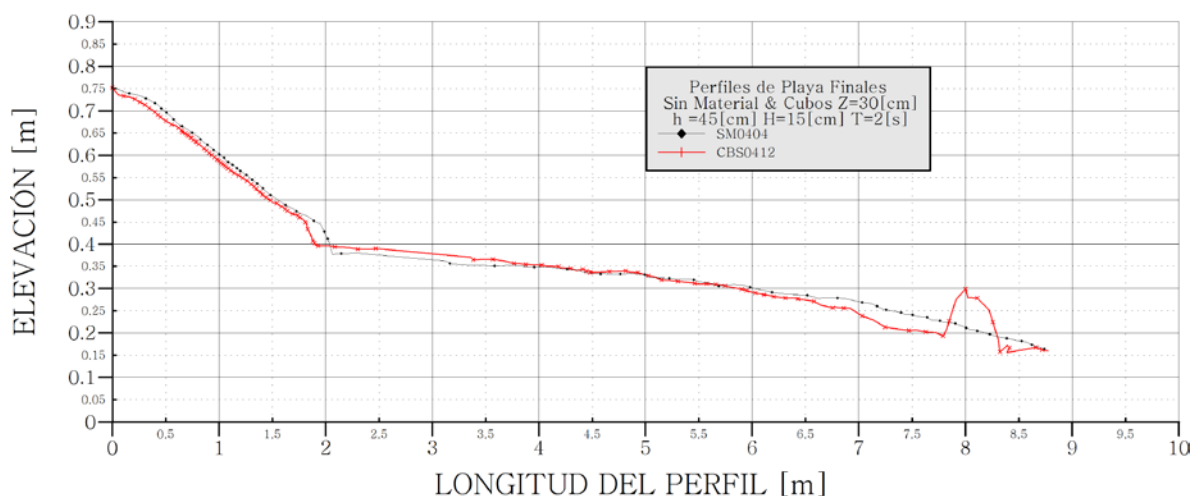


Figura 4.6 Perfiles finales h=45[cm]; H=15[cm]; T=2[s]

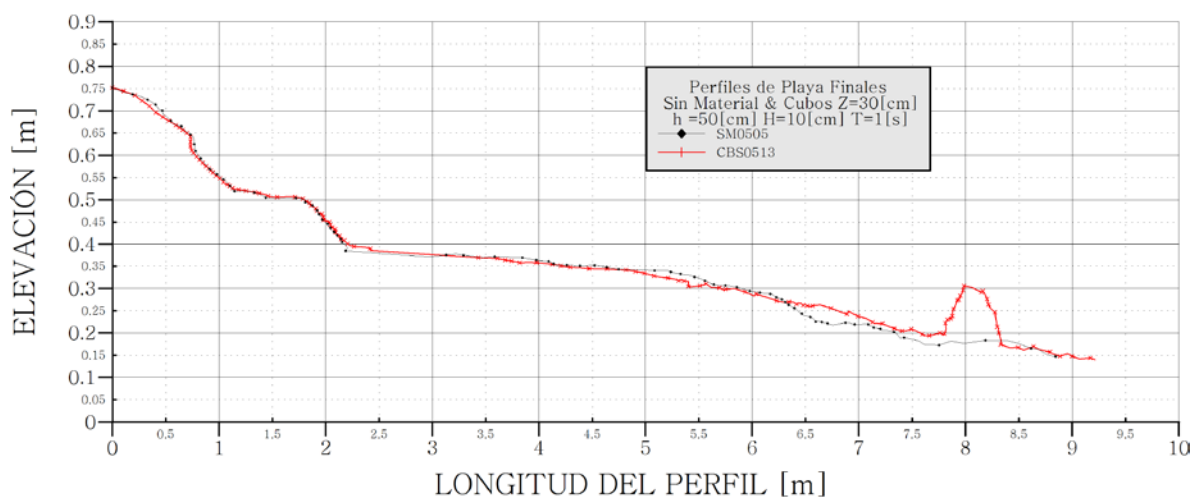


Figura 4.7 Perfiles finales para h=50[cm]; H=10[cm]; T=1[s]

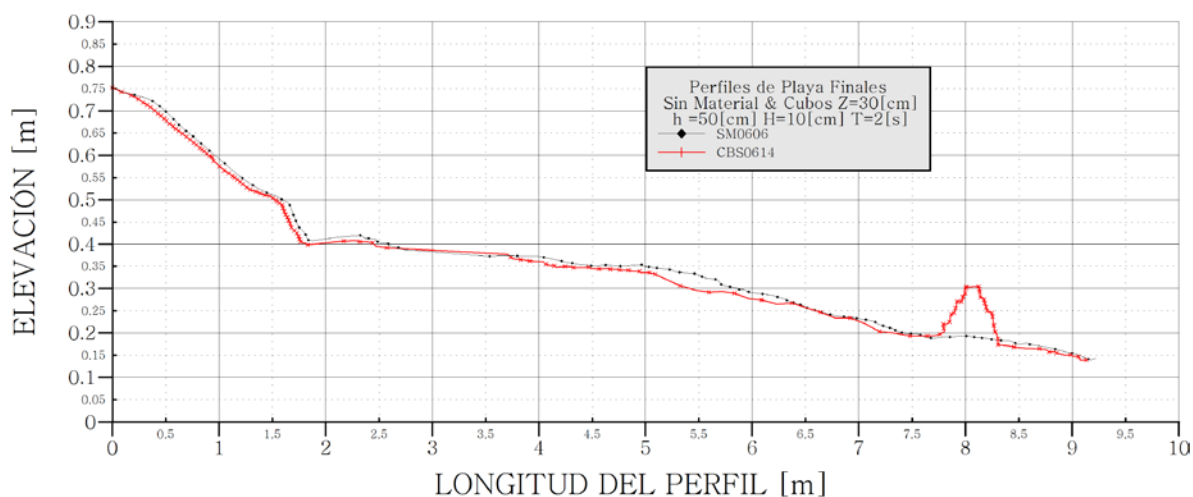


Figura 4.8 Perfiles finales para h=50[cm]; H=10[cm]; T=2[s]

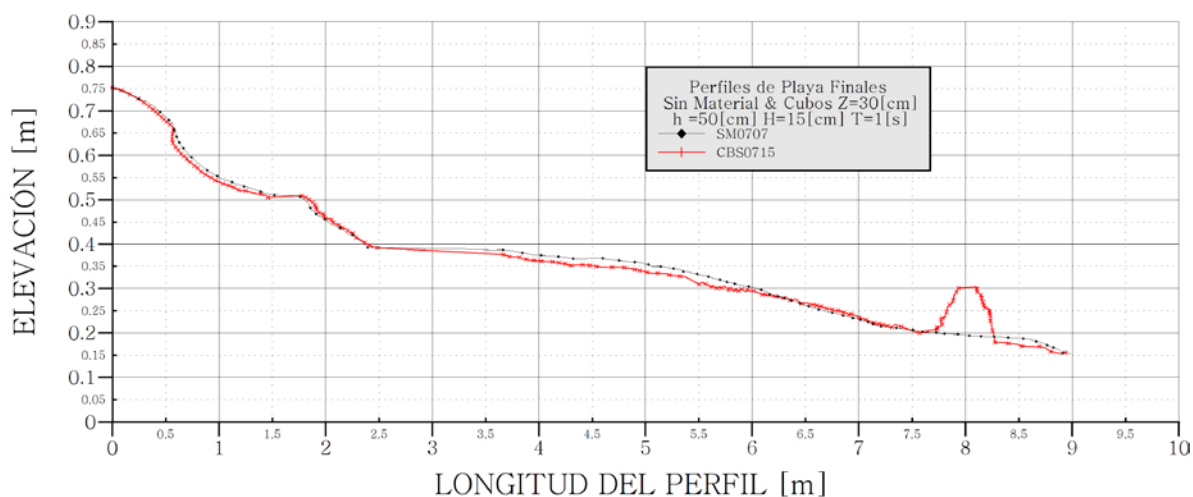


Figura 4.9 Perfiles finales para h=50[cm]; H=15[cm]; T=1[s]

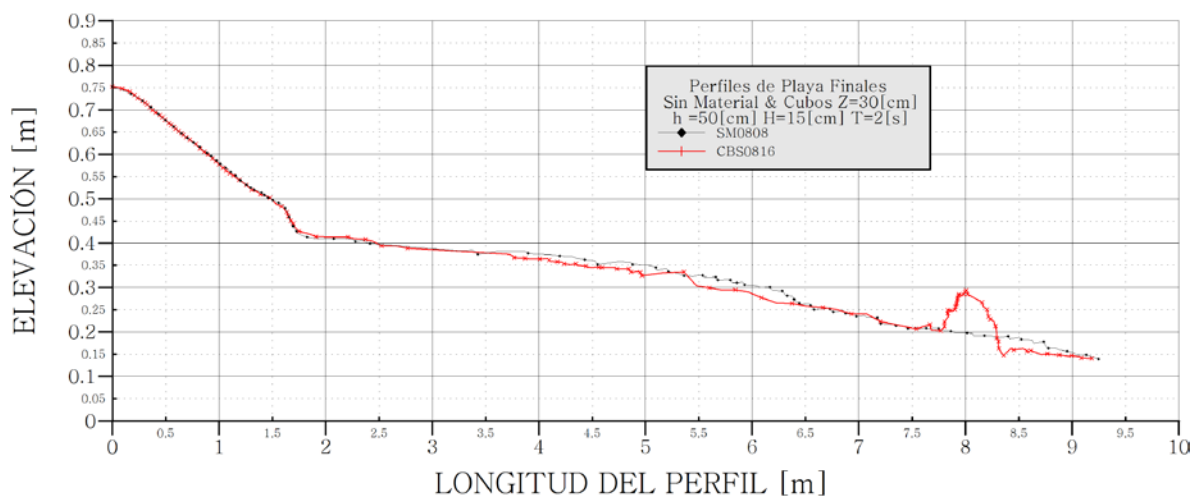


Figura 4.10 Perfiles finales para h=50[cm]; H=15[cm]; T=2[s]

Con el análisis morfodinámico e hidrodinámico se establece que la profundidad de desplante de 30 cm no ofrece información útil y por ello para los diques construidos con otros materiales no fueron ensayados en dicha posición. Con esto para cada los materiales restantes (geotubos®, WAD®, y rocas) se realizaron las pruebas que incluyen: dos periodos, dos alturas de ola y dos niveles del nivel medio del agua en reposo, es decir, en total se realizaran ocho pruebas por cada material.

En lo que respecta a las pruebas para el dique formado por cubos a una profundidad de desplante a $z=16.5$ cm y que fueron realizadas en la primera etapa, si presentaron un cambio en perfil de playa y en algunos casos incluso se presentaron problemas de asentamiento y socavación por lo que los ensayos son analizados más a detalle en la segunda etapa junto con los demás materiales utilizados como elementos de construcción.

4.2. Segunda etapa

El análisis para la condición de $z=16.5$ cm se presenta en este apartado. Como primer paso, se caracteriza la hidrodinámica inducida por la estructura, lo cual demuestra que el comportamiento morfodinámico de la playa está gobernado en buena medida por la geometría del dique, el francobordo, el material de construcción y las condiciones de oleaje incidente. Para completar el estudio de la interacción playa-estructura, se analiza el comportamiento morfodinámico en presencia del dique, particularmente en: la pérdida de ancho seco, la variación de los estados de mar y la evolución del perfil de playa.

4.2.1. Comportamiento estructural

Para el estudio del efecto de los diferentes materiales de construcción ensayados sobre el oleaje, se estableció como condición, que las estructuras no presentaran un nivel de deformación que se pudiera considerar como falla estructural, por lo que las pruebas CBS1220, GTB0428, WAD0436, RCS0446 (en las que sí falló la estructura) no fueron incluidas en el presente análisis. El comportamiento de cada uno de los diques bajo los diferentes estados de mar está desarrollado en el Anexo C, en el cual a través de imágenes y perfiles se muestra los estados iniciales y finales del comportamiento de los perfiles de playa y de las estructuras.

Como primera condición para caracterizar el efecto de los distintos materiales, se presentan los valores de los coeficientes de reflexión asociados a la presencia de cada una de las estructuras. En los coeficientes de reflexión (Figura 4.11) la variación entre el estado inicial y final es mínima en la mayoría de los casos. La reflexión en cubos y rocas presentan, en todas las pruebas, valores muy similares; la diferencia máxima entre el valor más alto y el más bajo del coeficiente de reflexión de aproximadamente 20%. La diferencia es menor en los coeficientes obtenidos para la estructura formada a base de geotubos®, este dique cuenta con los valores de reflexión más altos. Para el caso de los elementos prefabricados, se registró la menor diferencia entre los coeficientes de reflexión, pero también los más bajos en comparación con los demás materiales y por ende menor disipación inducida. Para el elemento combinado correspondiente a la prueba WAD1042 y que es comparado con las condiciones del estado de mar de la prueba WAD0335, es posible observar que si existe un incremento en el valor del coeficiente de reflexión que favorece el comportamiento de la playa.

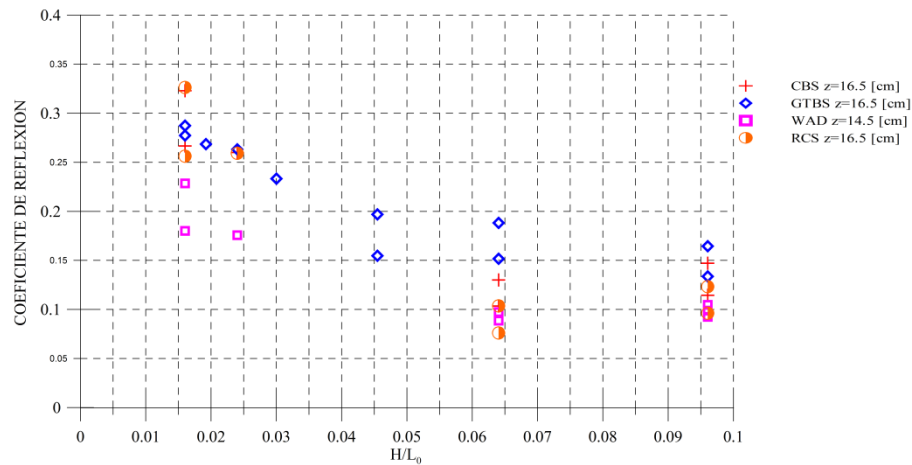


Figura 4.11 Coeficientes de reflexión sobre la estructura.

A través de los ensayos realizados, se observó que los eventos que inducen mayor deformación en la playa están asociados a las menores reflexiones provocadas por la presencia de los diques sumergidos. Esto corresponde con las transmisiones máximas y menor disipación asociada, principalmente, a la sumergencia relativa del francobordo y efectos de fricción.

En términos generales, los ensayos realizados con diques contruidos a base de:

- geotubos® presentan el mayor oleaje reflejado relativo a los otros materiales ensayados.
- rocas y cubos los resultados fueron muy similares.
- WAD® los resultados de altura de ola reflejada son los menores con mayor cantidad de energía transmitida.

En la Figura 4.12 se presentan los valores de altura de ola transmitida (H_{tra}) en la zona de protección para cada uno de los ensayos. Como se puede observar, la estructura que permite menos transmisión del oleaje es la formada por geotubos®, mientras que la formada por los elementos prefabricados permite una transmisión mayor, debido a que geometría y porosidad no permiten disipar y/o reflejar una cantidad de energía importante. Para el caso de los diques formados por cubos y rocas, las alturas de ola transmitida son similares, sin embargo es importante señalar que el dique de cubos presentó un asentamiento mayor por lo que los valores de oleaje transmitido se incrementaron por el cambio de geometría.

Con los valores de altura significativa y coeficientes de reflexión es posible establecer los valores de disipación de la estructura para cada uno de los ensayos realizados, la disipación es calculada con la ecuación (74) y los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4.13.

$$D = \left(\frac{H_{inc}}{H_{inc}} \right)^2 - \left(\frac{H_{ref}}{H_{inc}} \right)^2 - \left(\frac{H_{tra}}{H_{inc}} \right)^2 \quad (74)$$

Donde:

D; Disipación del dique

H_{inc} ; Altura de ola significativa incidente sobre la estructura

H_{ref} ; Altura de ola significativa reflejada por la estructura

H_{tra} ; Altura de ola significativa transmitida, medida después de la estructura.

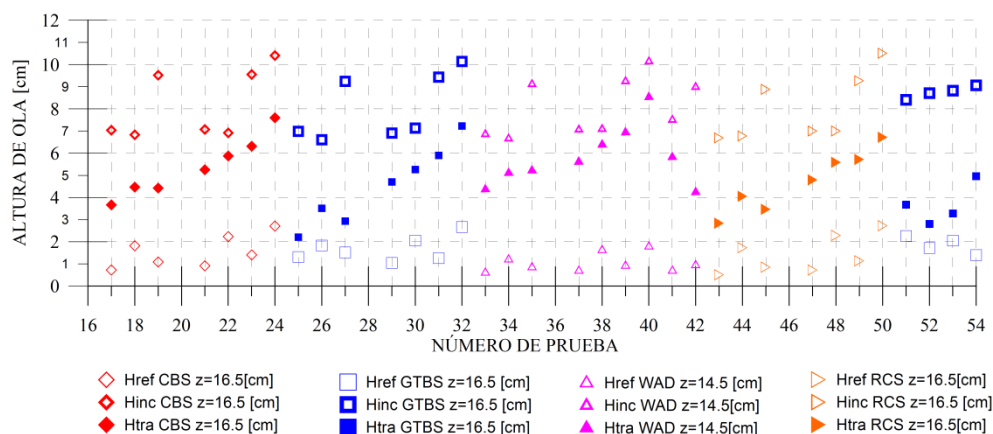


Figura 4.12 Altura de ola significativa en [cm] sobre la estructura, para todos los materiales. (Href; Altura de ola significativa reflejada por la estructura, Hinc; Altura de ola significativa incidente sobre la estructura, Htra; Altura de ola transmitida.

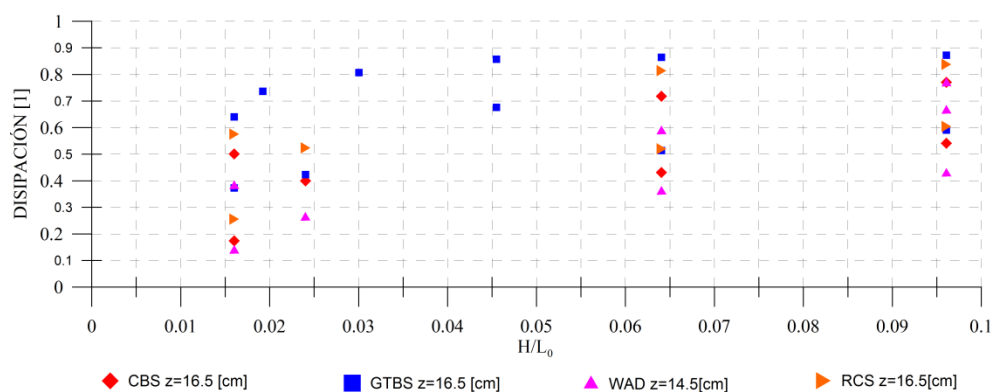


Figura 4.13 Valores de disipación del dique para cada prueba

Bajo las condiciones ensayadas, los valores de disipación son mayores para el caso del dique formado por geotubos®, mientras que para el caso de los cubos y rocas los valores son muy similares. La falta de permeabilidad en la estructura formada por prefabricados provoca una menor disipación de energía que se ve reflejada en una mayor transmisión, las condiciones de poca permeabilidad no generan que el comportamiento mecánico del dique interfiera con las condiciones de oleaje, por lo cual, la transmisión hacia la zona de protección es importante. En las condiciones que cuentan con un incremento del nivel del mar la disipación del dique es reducida indicando como parámetro de afectación principal del oleaje el francobordo.

Como se puede observar en la Figura 4.13, la disipación de energía está asociada al comportamiento mecánico particular del material, la poca deformación del dique durante el ensayo de la estructura, el nivel del francobordo y el tipo de material. Dicho comportamiento así como la forma de disipación de energía de cada material es distinto, así que para completar la caracterización de los diques sumergidos y sus diferentes tipologías es necesario describir el comportamiento mecánico de cada material (este comportamiento se observa dentro del desarrollo del anexo C).

En algunos de los casos ensayados, con el aumento del transporte de sedimentos al pie de las estructuras formadas por cubos y por rocas se presentaron tanto asentamientos como reconfiguración de la geometría, lo cual trajo como consecuencia una disminución de la eficiencia morfohidrodinámica de los diques.

El dique formado por geotubos® experimentó una menor variación en su geometría, sin embargo los asentamientos pueden ser importantes ya que la socavación en el pie del dique es mayor cuando la reflexión aumenta, para ayudar a disminuir este efecto, la colocación de un tapete es una buena opción. Es importante mencionar que para este material, cuando se presenta una socavación y cambio de geometría, su reconfiguración es muy difícil por el peso del elemento.

En las pruebas con las estructuras construidas con WAD®, los elementos parcialmente se asentaron debido al movimiento del sedimento y como consecuencia su geometría cambió provocando una disminución de elevación y un aumento en la transmisión. Sin embargo, en las pruebas con los mismos elementos, pero con un reforzamiento de enrocamiento, no se presentó una variación importante al pie del dique, pero sí existe un cambio con respecto a la corona como resultado del movimiento de las rocas provocado por el efecto del oleaje.

El parámetro establecido por Gourlay (1994), apartado 1.5, permite verificar la eficiencia de las estructuras, así si el valor de F_{c0} , es mayor a 150, el dique sumergido es capaz de disipar una cantidad de energía suficiente para que la línea de costa no sufra cambios importantes; mientras que si el valor de F_{c0} se encuentra entre 150 y 100, la altura de ola se incrementa hasta en un 20% de su valor ocasionando así que una mayor cantidad de energía afecte la costa, por ultimo si el dique se encuentra en un valor menor a 100, el dique sumergido no provocará alteraciones a las condiciones de oleaje presentadas, por lo que resultará en un estado ineficiente y poco disipativo.

En la Tabla 4.2 se presentan en color rojo los valores de F_{c0} , que son mayores a 150, en color amarillo, los valores que están entre 100 y 150 y en color verde los valores que son menores a 100. De acuerdo a los resultados, se puede afirmar que en general todas las estructuras ensayadas disipan muy eficientemente la energía del oleaje, sin embargo esto no se ve reflejado en el comportamiento del perfil de playa,

Para las condiciones presentadas en este estudio el parámetro F_{c0} , no proporciona una información que permita garantizar dicho comportamiento; en la Tabla 4.2 se incluyen todas las pruebas con estructura con la finalidad de poder obtener un mejor comportamiento del parámetro, dicho valor indica que, las estructuras de WAD® presentaría una disipación de energía adecuada, por lo que considerar estas resultaría adecuado, sin embargo con los resultados mostrados fue posible establecer que estos diques sumergidos no disipan la cantidad de energía necesaria para proteger el perfil de playa. Ninguno de los valores presentados se encuentra dentro del intervalo que implicaría un incremento del oleaje por lo que no es posible corroborar estas condiciones dentro de las pruebas realizadas. Este parámetro además, presenta valores demasiado altos en algunos de los estados de mar, mientras que en las graficas presentadas no se observa una disipación de energía tan importante, mostrando de esta manera que aunque el valor de F_{c0} , sea grande no garantiza también que la estructura disipe una mayor cantidad de energía.

CBS		F _{c0}	CBS		F _{c0}	GTBS		F _{c0}	WAD		F _{c0}	RCS		F _{c0}
1	9	58.813	1	17	1045.857	1	25	1045.857	1	33	1045.857	1	43	1045.857
2	10	332.696	2	18	5916.259	2	26	5916.259	2	34	5916.259	2	44	5916.259
3	11	72.031	3	19	1280.908	3	27	1280.908	3	35	1280.908	3	45	1280.908
4	12	407.467	4	20	7245.908	4	28	7245.908	4	36	7245.908	4	46	7245.908
5	13	41.049	5	21	167.280	5	29	167.280	5	37	167.280	5	47	167.280
6	14	232.206	6	22	946.280	6	30	946.280	6	38	946.280	6	48	946.280
7	15	50.274	7	23	204.876	7	31	204.876	7	39	204.876	7	49	204.876
8	16	284.393	8	24	1158.951	8	32	1158.951	8	40	1158.951	8	50	1158.951
						1	51	6480.937	9	41	---			
						2	52	2207.604	10	42	1280.908			
						3	53	3709.905						
						4	54	353.097						

Tabla 4.2 Parámetro de Gourlay, F_{c0}

4.2.2. Morfodinámica del perfil de playa

Tomando en cuenta tanto la disipación, reflexión y transmisión inducida por cada una de las tipologías estudiadas, se analiza el comportamiento morfodinámico del perfil de la playa. En particular, las características morfodinámicas que fueron consideradas para analizar la zona de protección son: la pérdida de zona seca, la variación de acuerdo con los estados de mar y el cambio del perfil de playa a una condición donde disipe o refleje más energía.

Los cambios del perfil de playa inducido por cada una de las tipologías se realizó tomando como base el perfil inicial, de tal forma que la pérdida o ganancia de playa seca se cuantificó tomando como referencia el valor inicial sobre el nivel medio del agua en reposo. Para evaluar los cambios se utilizó el parámetro Δy (ecuación 75), el cual valora la variación del perfil de playa con respecto al eje de la estructura (Figura 4.10).

$$\Delta y = 1 - \frac{Y_B + Y_A}{Y_B} \dots\dots\dots (75)$$

Donde:

Δy ; la variación del perfil de playa con respecto al eje de la estructura

Y_B ; Longitud del eje de la estructura hasta el perfil de playa inicial

Y_A ; Longitud de variación del perfil de la costa

En la Tabla 4.3 se presenta un resumen de los resultados de avance o retroceso para los casos modelados, donde el valor de Y_A es considerado como positivo si la variación de la costa es acresivo (ver Figura 4.14), esto es, la playa se incrementa en longitud de zona seca con relación del nivel medio del mar. Estos resultados solo incluyen las pruebas en las cuales las estructuras no presentaron falla y con un fracobordo relativo F_b/h de 0.033 y 0.13.

De acuerdo con la Figura 4.15 y la Figura 4.16, la caracterización del avance de la línea de costa depende de las condiciones de un oleaje que es capaz de movilizar el sedimento, lo cual es función de la altura y periodo de ola, así como del grado de abrigo que las estructuras generan. Con los valores obtenidos, en este trabajo se presenta un modelo lineal paramétrico para estimar el avance/retroceso de playa para cada una de las tipologías estudiadas.

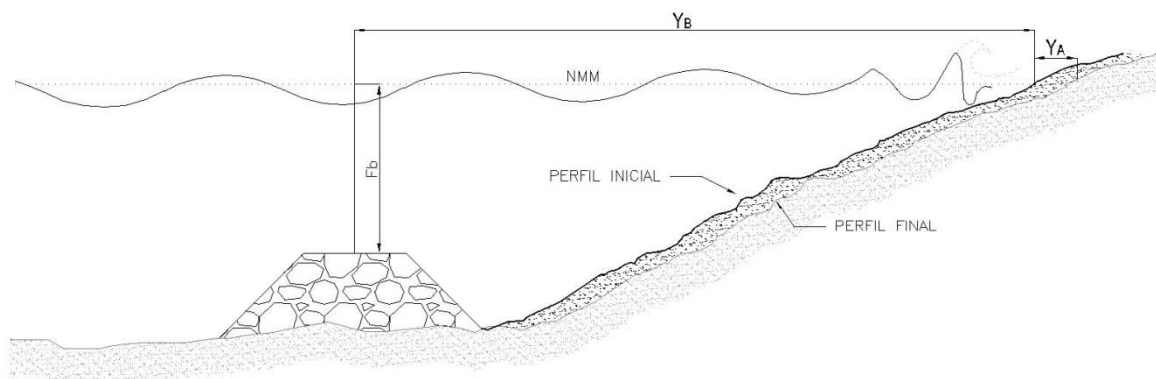


Figura 4.14 Variables para determinar el parámetro Δy .

# Prueba	# Total	YA [m]	YB [m]	Dy[1]	H/L0	# Prueba	# Total	YA [m]	YB [m]	Dy[1]	H/L0
9	17	-0.110	4.05	0.027	0.064	4	36	-0.043	3.15	FALLA ESTR.	0.024
10	18	-0.007	4.05	0.002	0.016	5	37	-0.181	3.45	0.052	0.064
11	19	-0.217	4.05	0.054	0.096	6	38	-0.024	3.45	0.007	0.016
12	20	-0.005	4.05	FALLA ESTR.	0.024	7	39	-0.268	3.45	0.078	0.096
13	21	-0.161	4.35	0.037	0.064	8	40	-0.120	3.45	0.035	0.024
14	22	-0.068	4.35	0.016	0.016	9	41	---	---	---	0.077
15	23	-0.271	4.35	0.062	0.096	10	42	-0.168	3.15	0.053	0.096
16	24	-0.070	4.35	0.016	0.024	1	43	-0.090	4.05	0.022	0.064
1	25	-0.098	4.05	0.024	0.064	2	44	-0.035	4.05	0.009	0.016
2	26	-0.105	4.05	0.026	0.016	3	45	-0.112	4.05	0.028	0.096
3	27	-0.167	4.05	0.041	0.096	4	46	-0.072	4.05	FALLA ESTR.	0.024
4	28	-0.142	4.05	FALLA ESTR.	0.024	5	47	-0.055	4.35	0.013	0.064
5	29	-0.147	4.35	0.034	0.064	6	48	-0.105	4.35	0.024	0.016
6	30	-0.080	4.35	0.018	0.016	7	49	-0.135	4.35	0.031	0.096
7	31	-0.248	4.35	0.057	0.096	8	50	-0.010	4.35	0.002	0.024
8	32	-0.112	4.35	0.026	0.024	1	51	-0.087	4.05	0.021	0.019
1	33	-0.202	3.15	0.064	0.064	2	52	-0.110	4.05	0.027	0.045
2	34	-0.111	3.15	0.035	0.016	3	53	-0.113	4.05	0.028	0.030
3	35	-0.185	3.15	0.059	0.096	4	54	-0.033	4.35	0.008	0.045

Tabla 4.3 Valores para determinar la relación de condiciones de oleaje contra línea de costa

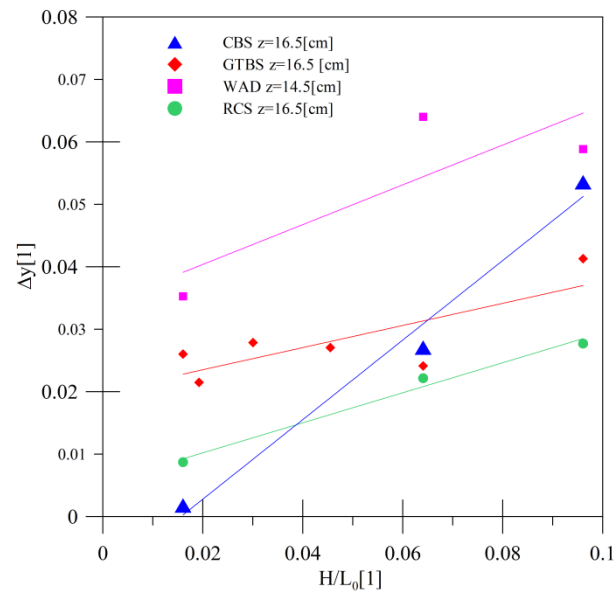


Figura 4.15 Relación de condiciones de oleaje contra línea de costa para $F_b/h=0.033$ [1].

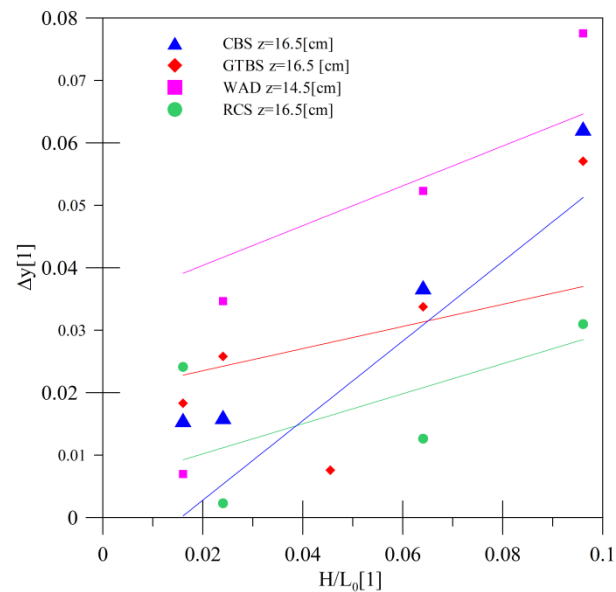


Figura 4.16 Relación de condiciones de oleaje contra línea de costa para $F_b/h= 0.13$ [1].

Los resultados de las figuras anteriores se ajustaron a una ecuación de primer orden para cada tipo de material. Con la relación de la ecuación 76 y los coeficientes a y b de la Tabla 4.4, es posible estimar el avance/retroceso del perfil de playa en función del peralte de la ola en aguas profundas para varias tipologías y dos francobordos relativos.

$$\Delta y = a \frac{H}{L_0} + b \quad (76)$$

Fb/h[1]	Material	a	b	R
0.033	Cubos z=16.5[cm]	0.63694	-0.0099	0.9836
	Geotubos z=16.5 [cm]	0.17720	0.01997	0.6164
	WAD z=14.5[cm]	0.31867	0.03401	0.7013
	Rocas Z=16.5[cm]	0.24051	0.00540	0.9856
0.13	Cubos z=16.5[cm]	0.58644	0.00340	0.9772
	Geotubos z=16.5 [cm]	0.45589	0.00611	0.6225
	WAD z=14.5[cm]	0.76203	0.00474	0.9108
	Rocas Z=16.5[cm]	0.39243	-0.0087	0.9507

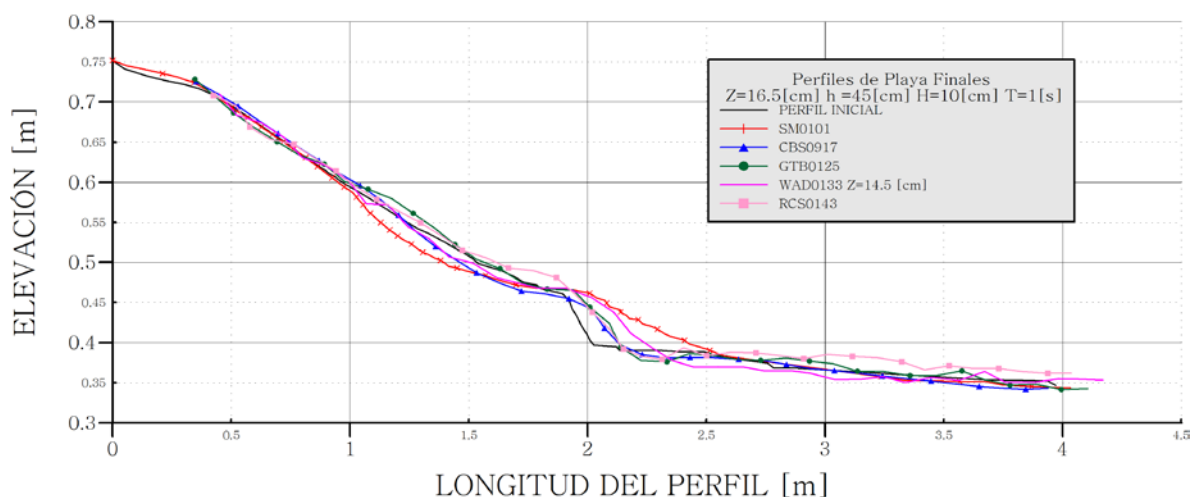
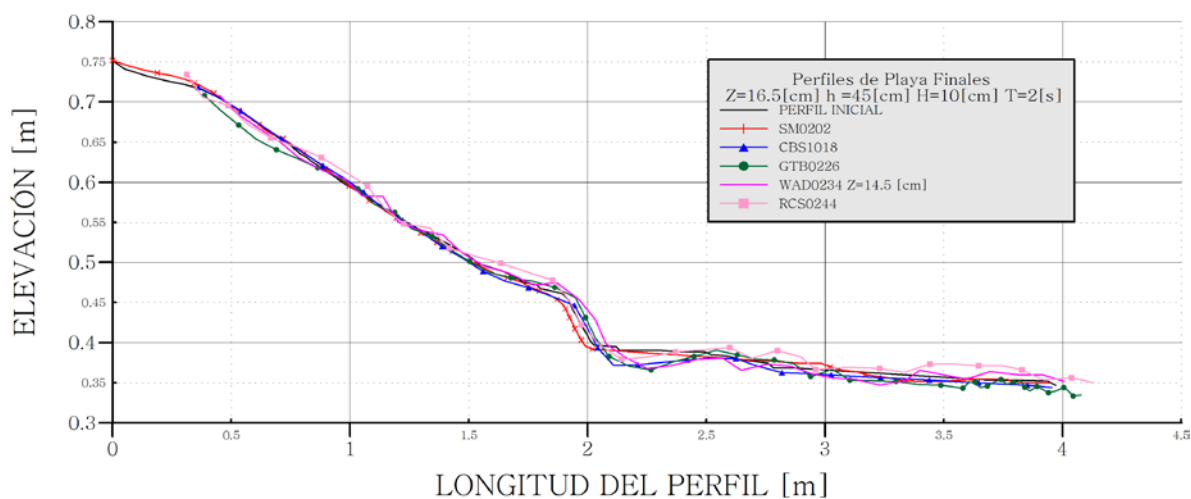
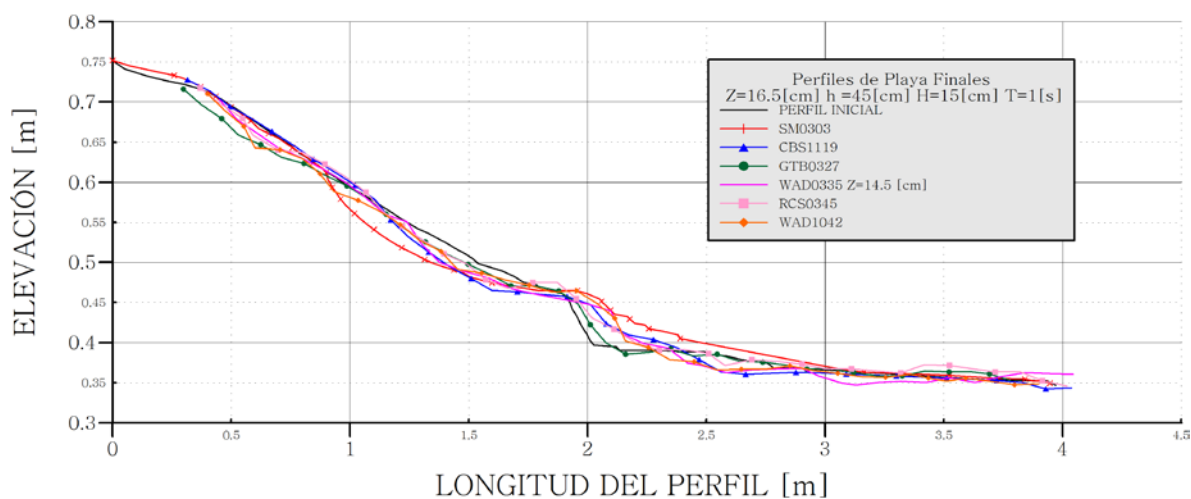
Tabla 4.4 Valores de las líneas de tendencia para cada condición.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se demuestra que el grado de protección a una playa por medio de estructuras sumergidas es altamente dependiente del francobordo relativo, Con el fin de ilustrar el efecto de cada una de las tipologías ensayadas, de la Figura 4.17 a la Figura 4.24 se presenta una comparación de los perfiles finales medidos. A través de estas figuras se puede observar que la condición que provoca la máxima deformación está asociada a la máxima transmisión de oleaje, lo cual corresponde al caso de los elementos prefabricados.

De la Figura 4.17 a la Figura 4.24, se observa solo la parte del perfil que corresponde a la zona de protección, esta zona es el resultado de la interacción entre el dique y el estado de mar correspondiente; de lo cual se observó lo siguiente:

- Los perfiles de playa generados por la presencia de una estructura con geotubos® son los más parecidos al perfil inicial en la zona protegida, sin embargo en la zona expuesta provocan socavaciones importantes al pie de la estructura debido a que reflejan más energía que los otros elementos
- Los perfiles causados por los rompeolas de rocas y cubos sufren un comportamiento muy similar, sin embargo debido a que la deformación que presenta el dique formado por cubos es alta (sin llegar a la falla) en condiciones con valores altos de energía, el retroceso del perfil es mayor.
- El perfil correspondiente a la estructura formada por WAD®, es la que presenta una variación elevada y tiene un comportamiento similar al perfil de playa sin protección, esta tipología presenta la mayor afectación en la zona de protección. Para establecer de manera más clara el comportamiento de los prefabricados se realizó el ensayo con la combinación de WAD® con rocas para un estado de mar muy energético y se logró una playa seca más amplia.

En la Figura 4.25 se presenta el comportamiento del perfil de playa para la estructura formada por WAD® y WAD®-rocas. Como se puede ver existe un mejor desarrollo con el dique con menor porosidad, lo que indica que el ancho de corona debe considerar una condición de elemento más permeable y un ancho menor asegurando así una mayor disipación de energía.

Figura 4.17 Perfiles finales en la zona de protección para $h=45[\text{cm}]$; $H=10[\text{cm}]$; $T=1[\text{s}]$ Figura 4.18 Perfiles finales en la zona de protección para $h=45[\text{cm}]$; $H=10[\text{cm}]$; $T=2[\text{s}]$ Figura 4.19 Perfiles finales en la zona de protección para $h=45[\text{cm}]$; $H=15[\text{cm}]$; $T=1[\text{s}]$

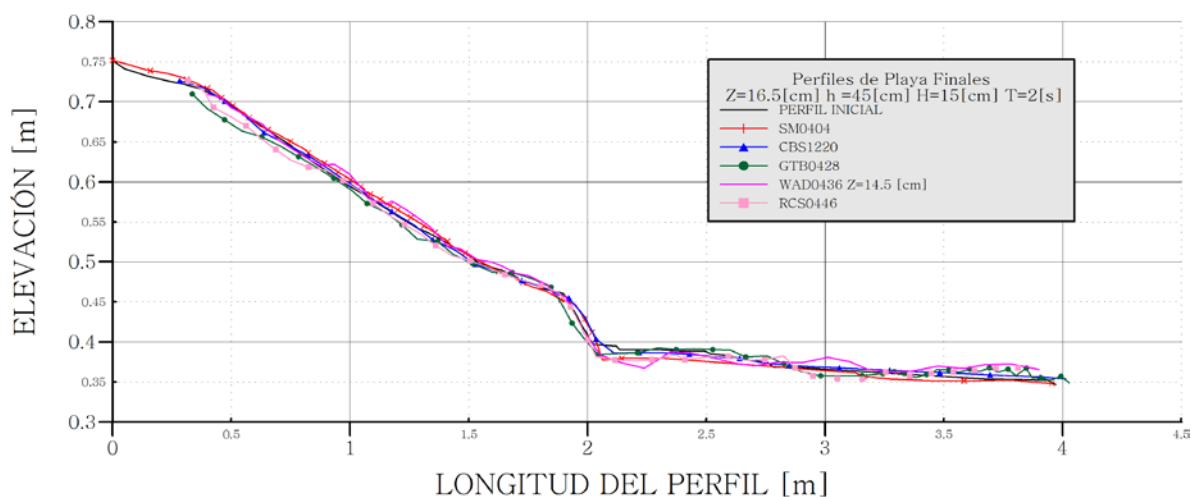


Figura 4.20 Perfis finales en la zona de protección para $h=45[cm]$; $H=15[cm]$; $T=2[s]$

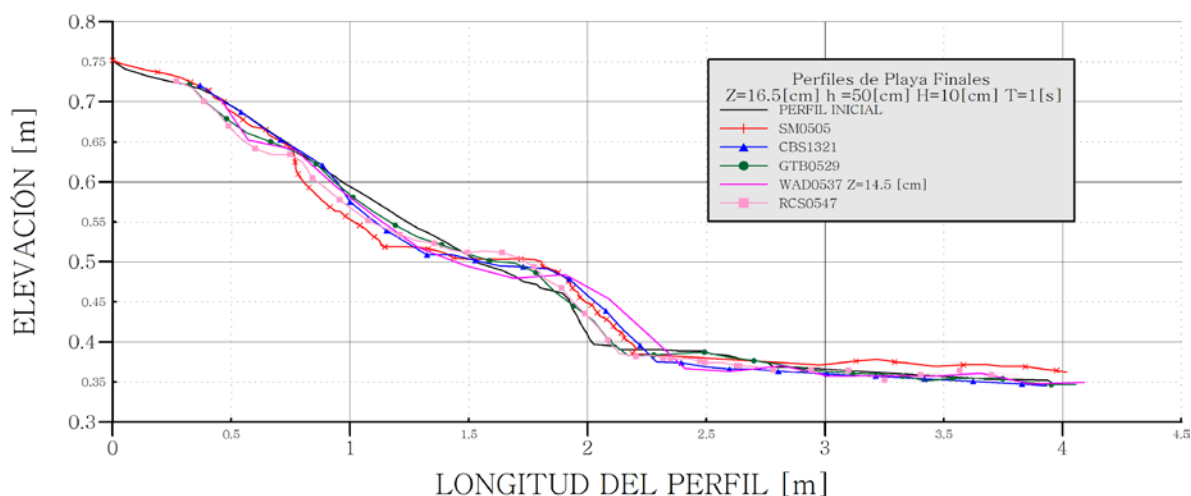


Figura 4.21 Perfis finales en la zona de protección para $h=50[cm]$; $H=10[cm]$; $T=1[s]$

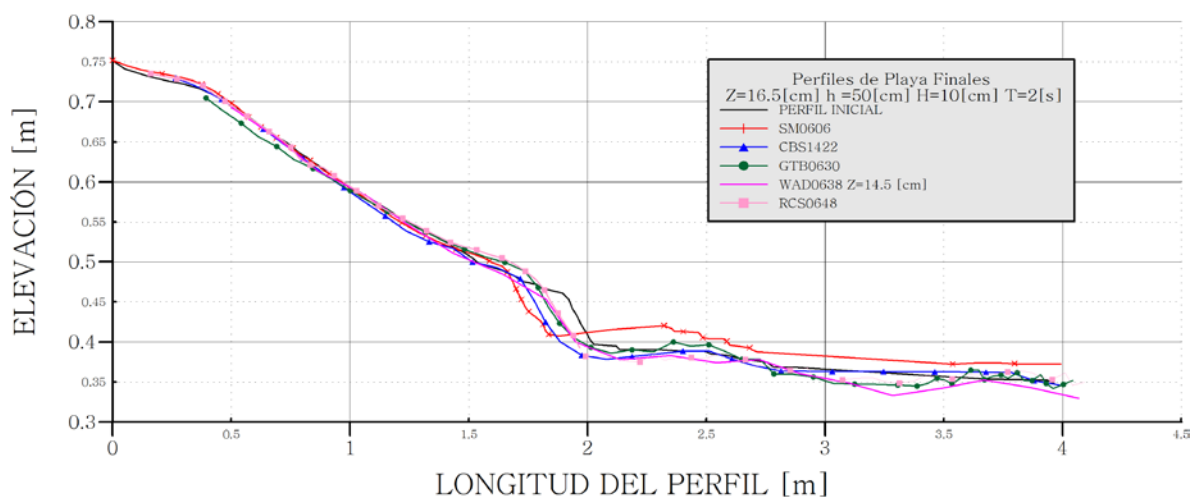


Figura 4.22 Perfis finales en la zona de protección para $h=50[cm]$; $H=10[cm]$; $T=2[s]$

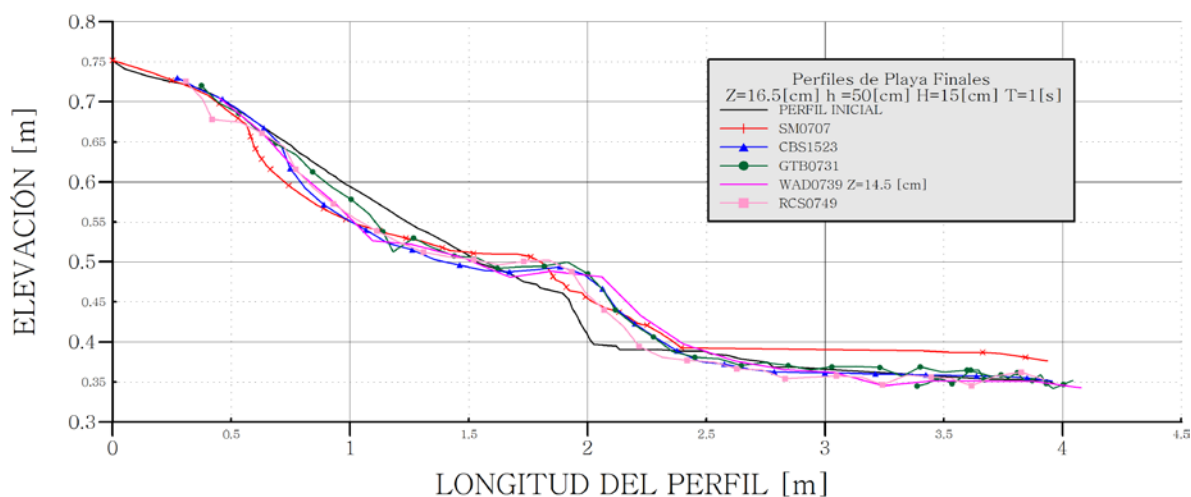


Figura 4.23 Perfiles finales en la zona de protección para h=50[cm]; H=15[cm]; T=1[s]

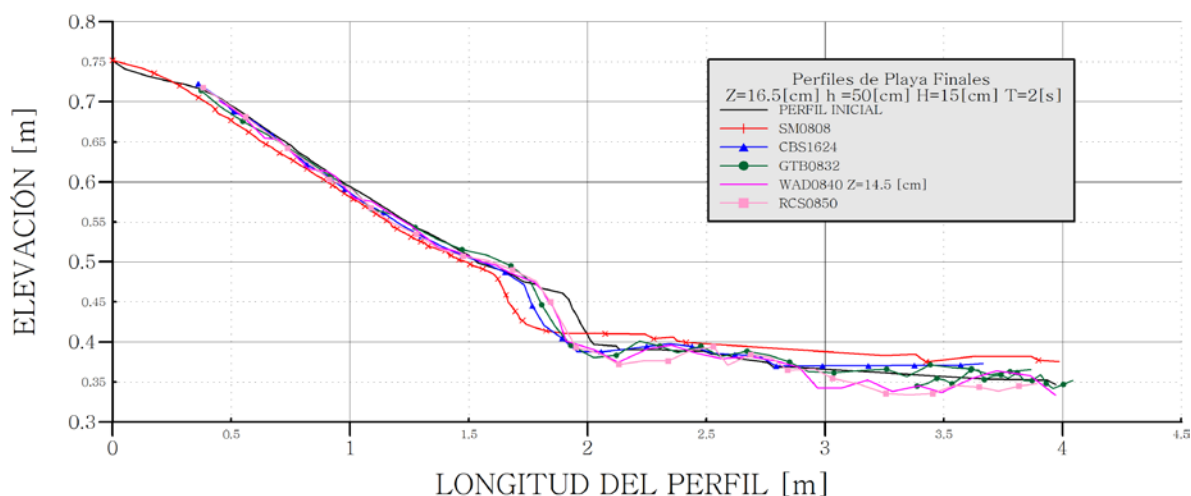


Figura 4.24 Perfiles finales en la zona de protección para h=50[cm]; H=15[cm]; T=2[s]

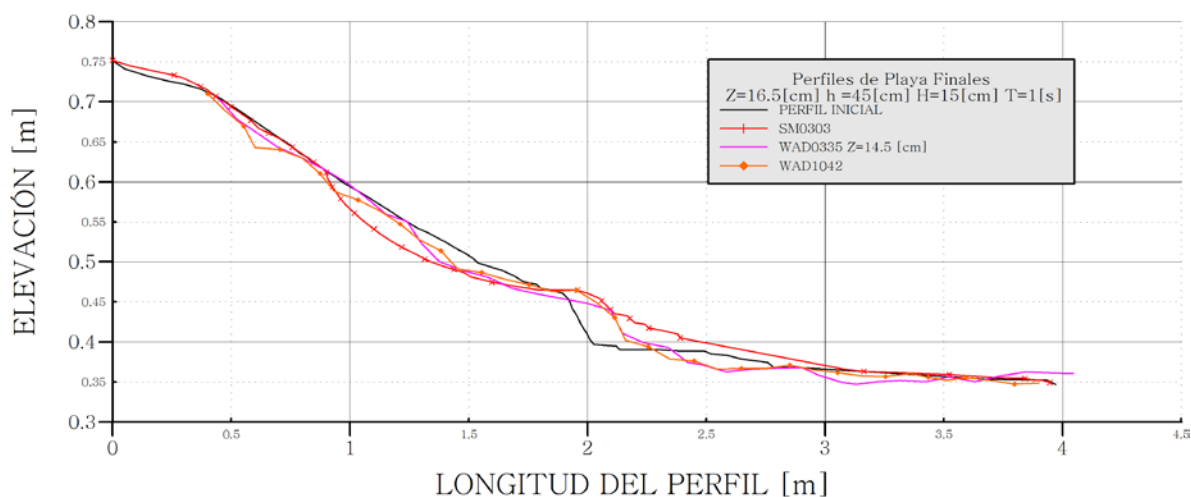


Figura 4.25 Variación entre el perfil generado por WAD y WAD-RCS, para las mismas condiciones de oleaje.

Para completar la caracterización de la zona de protección, se analizó la evolución de la pendiente en la zona protegida para todos los ensayos, con esto se determina la forma en que la playa disipa o refleja la energía. Para esta propiedad, la sección de la zona de protección fue dividida en tres tramos (Figura 4.26) partiendo del perfil inicial de playa, así, se caracterizó cada sección para conocer su comportamiento inicial y final.

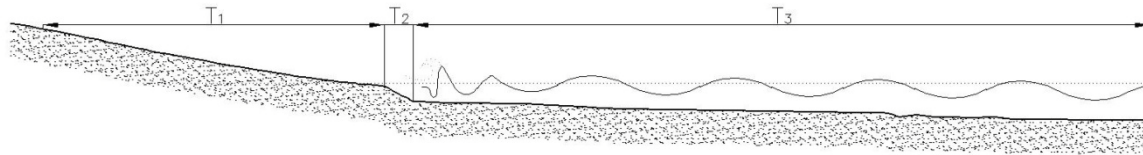


Figura 4.26 Secciones para determinar la pendiente en el perfil inicial

Una de las condiciones más importantes para determinar el comportamiento de la playa, es establecer su estado morfodinámico. Wright y Short (1984), definieron seis estados morfodinámicos de playa, cuatro de ellos intermedios y dos estados límite, estos estados son:

- Disipativa (Disipative, D)
- Barra longitudinal y valle (Longshore Bar and Through, LBT)
- Barra y playa rítmica (Ritmic Bar and Beach, RBB)
- Barra transversal y corriente de retorno (Transverse Bar and Rip, TBR)
- Terrazas mareales (Ridhe Runnel or Low Tide Terraze, RR o LTT)
- Reflejante (Reflective, R)

Los seis estados morfodinámicos anteriores están organizados de generar una mayor disipación del oleaje hasta una disipación prácticamente nula y que incluye las condiciones de reflexión del oleaje. Vidal (1995) propone una relación de la morfodinámica de la playa con el número de Iribarren, esto establece que si se tienen valores del número de Iribarren menores a 0.4 se cuenta con una playa disipativa, mientras que para la condición de playa reflejante, los valores del número de Iribarren son de $Ir > 1$, en cuanto a los estados intermedios estos poseen elementos de condición disipativa y reflejante.

Según Mei (1983), en una playa plana, los parámetros que gobiernan la rotura del oleaje son el peralte de la ola y la pendiente de la playa m . Para valores suficientemente grandes de m o amplitudes suficientemente bajas, una ola incidente no rompe y se refleja completamente. Cuando m y/o k , a decrecen (siendo k el número de onda y a la amplitud), se alcanza un umbral donde empieza la rotura. Iribarren y Nogales (1949) hallaron empíricamente que el parámetro adimensional Ir juega un papel importante en la rotura del oleaje.

$$Ir = \frac{m}{\sqrt{H_0 / L_0}} \dots\dots\dots (25)$$

donde H es la altura de ola y L_0 es la longitud de onda en grandes profundidades. Si $Ir < 2.3$, las olas rompen y el coeficiente de reflexión es menor que 1. A medida que Ir decrece más allá del valor crítico, la reflexión en la playa decrece.

Tipo de rotura	Número de Iribarren
Descrestamiento (Spilling)	$Ir < 1.0$
Voluta (plunging)	$1.0 < Ir < 2.6$
Colapso (colapsing)	$2.6 < Ir < 3.1$
Oscilacion (surging)	$3.1 > Ir$

Tabla 4.5 Rango de valores del número de Iribarren para los distintos tipos de roturas, Silva 1997.

Con cada una de las propiedades desarrolladas, en la Tabla 4.6 se describen los valores para cada tramo del perfil inicial sin dique, acorde con las primeras 8 pruebas realizadas y con el objetivo de identificar las condiciones naturales de la playa. La caracterización del perfil inicial (con cuatro estados de mar diferentes en los que las condiciones de profundidad de rotura son desarrolladas en el tramo 3) se completa con la condición morfodinámica de cada tramo. De esta forma se determina la disipación o reflexión para cada prueba, el tramo 1 va desde el comienzo de registro del perfil hasta el cambio de pendiente y el tramo 3 termina al pie del dique.

	m [1]	H [m]	T [s]	Hr [m]	Lo[m]	Ir	Estado Morfodinámico	Tipo rotura
tramo 1	0.1604	0.1	1	0.1282	1.5613	0.6338	Intermedio	
		0.1	2	0.1282	6.2452	1.2676	Reflejante	
		0.15	1	0.1923	1.5613	0.5175	Intermedio	
		0.15	2	0.1923	6.2452	1.0350	Reflejante	
tramo 2	0.4608	0.1	1	0.1282	1.5613	1.8210	Reflejante	
		0.1	2	0.1282	6.2452	3.6419	Reflejante	
		0.15	1	0.1923	1.5613	1.4868	Reflejante	
		0.15	2	0.1923	6.2452	2.9736	Reflejante	
tramo 3	0.0176	0.1	1	0.1282	1.5613	0.0695	Disipativa	Descrestamiento
		0.1	2	0.1282	6.2452	0.1389	Disipativa	Descrestamiento
		0.15	1	0.1923	1.5613	0.0567	Disipativa	Descrestamiento
		0.15	2	0.1923	6.2452	0.1134	Disipativa	Descrestamiento

Tabla 4.6 Valores característicos de cada tramo del perfil de playa

Donde:

m; pendiente del tramo

H; Altura de ola

T; Periodo de onda

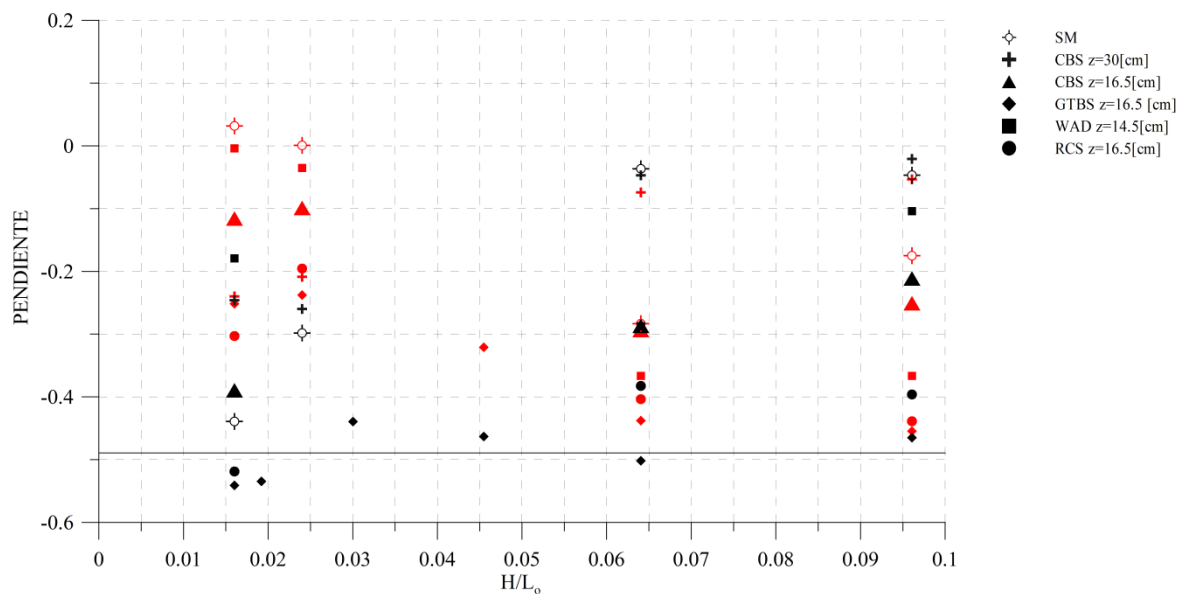
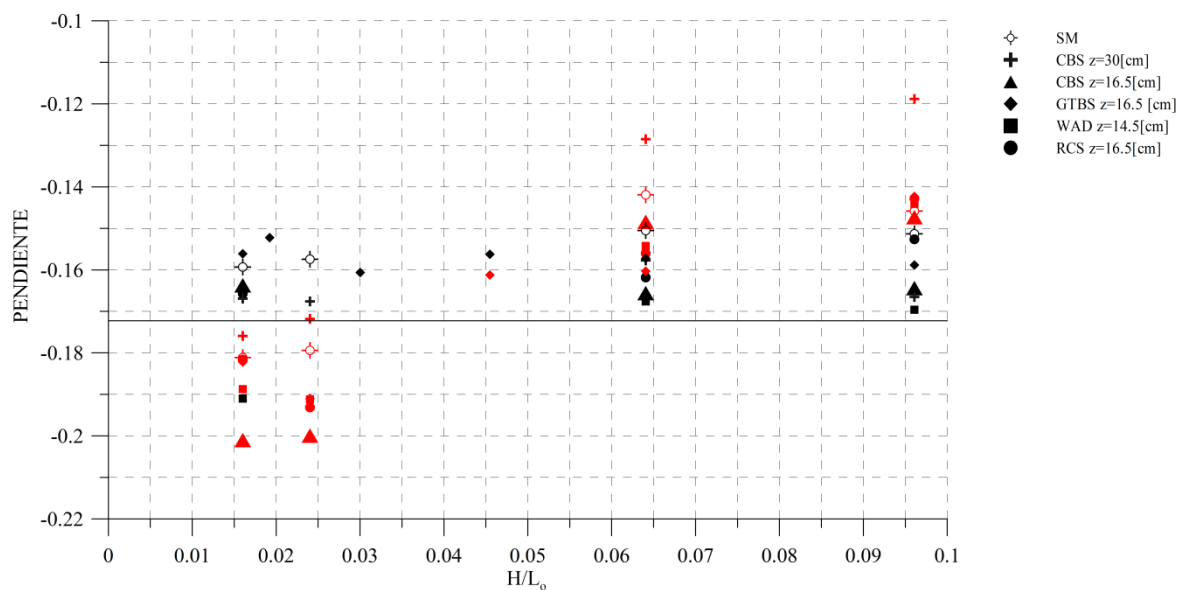
hr; Profundidad de rompiente

Lo; Longitud de onda en aguas profundas

Ir; Número de Iribarren

Con los perfiles finales para cada ensayo y respetando el intervalo de cada uno de los tramos, se determinó la pendiente para cada sección. De la Figura 4.27 a la Figura 4.29 se presenta el valor de la pendiente para

cada uno de los ensayos; los puntos en color rojo indican que el estado de mar considera una sobre elevación del nivel medio y la línea indica el valor de la pendiente inicial para el tramo.



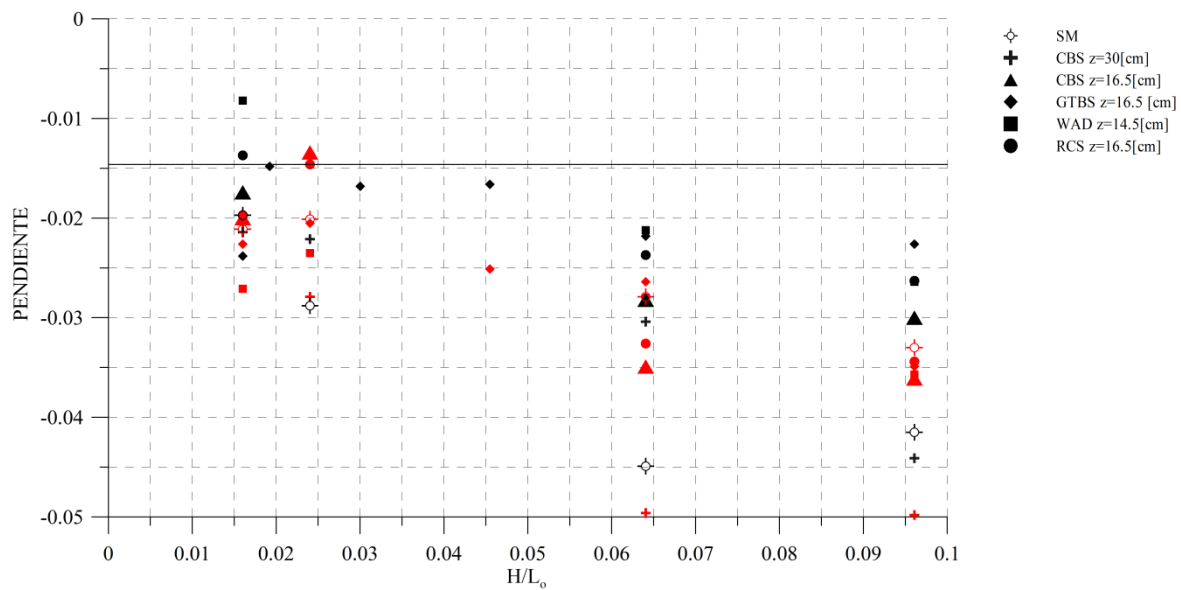


Figura 4.29 Variación de pendiente para el tramo 3

Con los valores de pendiente para cada ensayo, se determinó nuevamente el número de Iribarren para establecer la condición morfodinámica de la playa. Es conveniente destacar que en las condiciones que fueron realizados los ensayos no es posible establecer el tipo de rotura, ya que la disipación de energía generada por el elemento de protección provoca un oleaje de diferentes condiciones que el que llega desde aguas más profundas. Los valores de pendiente y número de Iribarren para cada tramo se presentan en la Tabla 4.7.

El tramo 1 en la mayoría de los casos se convierte a una condición mas disipativa, excepto para la condición de periodo de 2 segundos con un incremento en el nivel del mar. Mientras que para el tramo 2 el comportamiento morfodinámico es muy similar ya que tiende a una playa más disipativa y para el tramo 3 el perfil se vuelve a una condición mas reflejante para la mayoría de los casos, esto se puede observar en un incremento de la pendiente y por lo tanto en el número de Iribarren.

4.3. Validación del modelo numérico

Para establecer las condiciones de validación del modelo presentado en el capítulo 3, se presentan en la Tabla 4.8 los datos de las mediciones de altura de ola significativa y periodo asociado que se registraron en el canal de oleaje para los diferentes estados de mar, con estos valores se modelaron numéricamente cada uno de los casos ensayados en el laboratorio.

Una de las condiciones iniciales para evaluar el desarrollo numérico, es considerar la misma distancia con respecto a la playa, para los valores del modelo de donde fueron medidos los datos del oleaje en las pruebas. Como primer paso, se presenta un desarrollo para cada condición oceanográfica sin considerar ningún tipo de estructura para el modelo. Para este caso no existe una modificación morfodinámica del perfil; los resultados obtenidos se muestran en las Figura 4.30 y Figura 4.31 y que son comparados con los valores medidos en laboratorio. Los valores obtenidos del modelo presentan un incremento con respecto a los coeficientes de

reflexión medidos del 25%; para los valores de las condiciones de oleaje total existe una diferencia aproximada del 8%, con un incremento en los datos medidos en el canal de oleaje.

#	tot	mT1	mT2	mT3	lr T1	lr T2	lr T3	#	tot	mT1	mT2	mT3	lr T1	lr T2	lr T3
1	1	-0.1505	-0.0367	-0.0449	0.5947	0.1450	0.1774	4	28	Falla	Falla	Falla	Falla	Falla	Falla
2	2	-0.1593	-0.4392	-0.0197	1.2589	3.4709	0.1557	1	51	-0.1522	-0.5345	-0.0148	1.0980	3.8560	0.1068
3	3	-0.1513	-0.0467	-0.0415	0.4881	0.1507	0.1339	2	52	-0.1562	-0.4632	-0.0166	0.7325	2.1720	0.0778
4	4	-0.1574	-0.2983	-0.0288	1.0156	1.9248	0.1858	3	53	-0.1606	-0.4395	-0.0168	0.9269	2.5365	0.0970
5	5	-0.1419	-0.2833	-0.0279	0.5607	1.1194	0.1102	5	29	-0.1603	-0.4377	-0.0264	0.6334	1.7295	0.1043
6	6	-0.1811	0.0317	-0.0211	1.4312	-0.2505	0.1667	6	30	-0.1822	-0.2518	-0.0226	1.4399	1.9899	0.1786
7	7	-0.1458	-0.175	-0.033	0.4704	0.5646	0.1065	7	31	-0.1423	-0.4545	-0.0349	0.4591	1.4663	0.1126
8	8	-0.1794	0.0008	-0.0201	1.1576	-0.0052	0.1297	8	32	-0.191	-0.2377	-0.0205	1.2324	1.5338	0.1323
1	9	-0.1577	-0.0471	-0.0304	0.6231	0.1861	0.1201	4	54	-0.1612	-0.3209	-0.0251	0.7559	1.5048	0.1177
2	10	-0.1669	-0.2462	-0.0214	1.3190	1.9456	0.1691	1	33	-0.1676	-0.2873	-0.0212	0.6622	1.1352	0.0838
3	11	-0.1665	-0.0208	-0.0441	0.5372	0.0671	0.1423	2	34	-0.191	-0.1793	-0.0082	1.5094	1.4170	0.0648
4	12	-0.1676	-0.26	-0.0221	1.0814	1.6777	0.1426	3	35	-0.1696	-0.104	-0.0264	0.5472	0.3355	0.0852
5	13	-0.1285	-0.0742	-0.0496	0.5077	0.2932	0.1960	4	36	Falla	Falla	Falla	Falla	Falla	Falla
6	14	-0.1759	-0.24	-0.0205	1.3901	1.8966	0.1620	5	37	-0.1542	-0.3667	-0.028	0.6093	1.4490	0.1106
7	15	-0.1188	-0.0533	-0.0498	0.3833	0.1720	0.1607	6	38	-0.1887	-0.004	-0.0271	1.4912	0.0316	0.2142
8	16	-0.1718	-0.2087	-0.0279	1.1085	1.3466	0.1800	7	39	-0.1441	-0.3667	-0.0357	0.4649	1.1831	0.1152
9	17	-0.1656	-0.287	-0.0282	0.6543	1.1340	0.1114	8	40	-0.1912	-0.0353	-0.0235	1.2337	0.2278	0.1516
10	18	-0.1637	-0.3896	-0.0174	1.2937	3.0789	0.1375	9	41	-0.1693	-0.1733	-0.0329	0.6107	0.6251	0.1187
11	19	-0.1644	-0.2113	-0.03	0.5304	0.6817	0.0968	10	42	-0.1594	-0.3487	-0.0225	0.5143	1.1250	0.0726
12	20	Falla	Falla	Falla	Falla	Falla	Falla	1	43	-0.1618	-0.3825	-0.0237	0.6393	1.5114	0.0936
13	21	-0.1484	-0.2935	-0.0349	0.5864	1.1597	0.1379	2	44	-0.1657	-0.5188	-0.0137	1.3095	4.0999	0.1083
14	22	-0.201	-0.1157	-0.02	1.5884	0.9143	0.1581	3	45	-0.1526	-0.3963	-0.0263	0.4923	1.2786	0.0849
15	23	-0.1473	-0.2509	-0.0361	0.4752	0.8095	0.1165	4	46	Falla	Falla	Falla	Falla	Falla	Falla
16	24	-0.1999	-0.0991	-0.0134	1.2899	0.6394	0.0865	5	47	-0.156	-0.4038	-0.0326	0.6164	1.5956	0.1288
1	25	-0.1572	-0.5018	-0.0218	0.6212	1.9828	0.0861	6	48	-0.1816	-0.3031	-0.0197	1.4351	2.3953	0.1557
2	26	-0.1561	-0.5409	-0.0238	1.2336	4.2746	0.1881	7	49	-0.1428	-0.4388	-0.0344	0.4607	1.4157	0.1110
3	27	-0.1588	-0.465	-0.0226	0.5123	1.5002	0.0729	8	50	-0.1931	-0.1956	-0.0146	1.2460	1.2621	0.0942

Tabla 4.7 Valores de pendiente y número de lribarren para cada tramo

MODELO		Z=16.5 cm	
# prueba	# Total	Profundidad	H[m]
1	55	45	7
2	56	45	7.3
3	57	45	9.3
4	58	45	10.65
5	59	50	7.18
6	60	50	7.41
7	61	50	9.62
8	62	50	11.06

Tabla 4.8 Condiciones de estados de mar para cada ensayo.

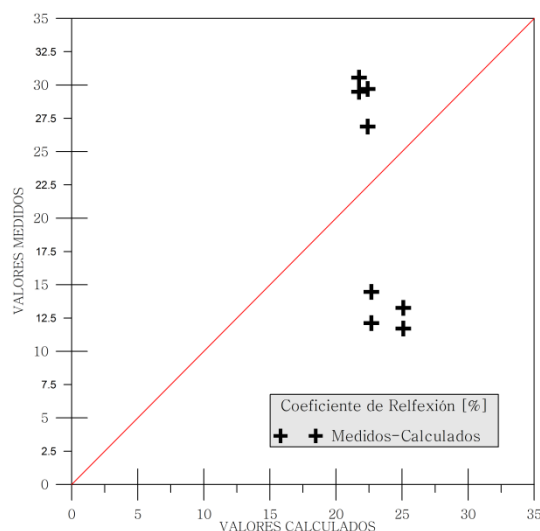


Figura 4.30 Valores de coeficientes de reflexión para la condición sin estructura [%].

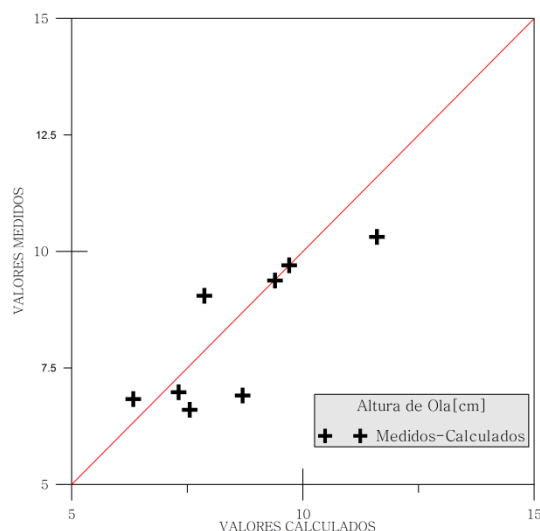


Figura 4.31 Valores de altura de ola para la condición sin estructura.

Con los resultados de la condición sin estructura, se realizó la modelación para cada una de los estados de mar propuestos considerando una estructura impermeable, ubicada en la segunda posición, es decir a $z=16.5$ cm. De acuerdo con las condiciones con las que fue desarrollado el modelo, para cada uno de los puntos presentados en la resolución de la mild-slope es posible obtener los valores de altura de ola incidente y reflejada y por consecuencia el valor del coeficiente de reflexión en dicho punto. Con este desarrollo se presenta a continuación, de la Figura 4.32 a la Figura 4.34, el comportamiento del modelo con respecto a cada una de las pruebas y con esto establecer la variación respecto a cada material.

Por lo que respecta a los datos de altura de ola total de la Figura 4.32, el comportamiento de las condiciones de oleaje medidas en cada ensayo está relacionada con los valores obtenidos en el modelo numérico, para cada estado de mar y antes de la estructura. La variación entre el registro de datos y los del modelo

presentan una variación mínima, por lo que la representación de la altura de ola total en dicho punto sí es acorde con lo esperado por el modelo numérico.

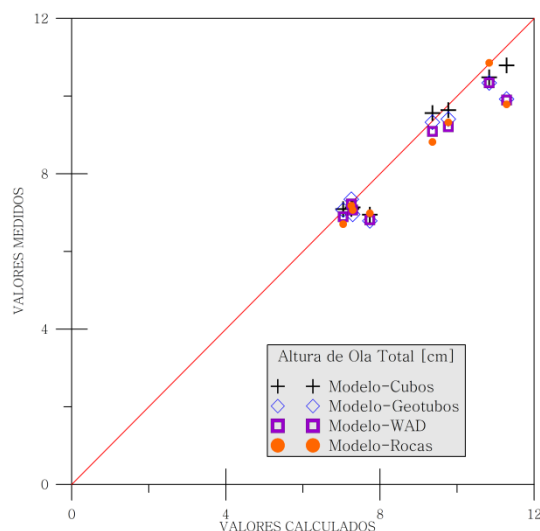


Figura 4.32 Valores medidos contra calculados para altura de ola total en cm.

Para la condición de oleaje reflejado, en la Figura 4.32 se observa que los valores calculados son menores con respecto a los valores medidos; los valores calculados de la altura de ola reflejada fueron obtenidos mediante el producto de la altura de ola por el valor de la ecuación (73); esta variación se presenta en todas las condiciones modeladas.

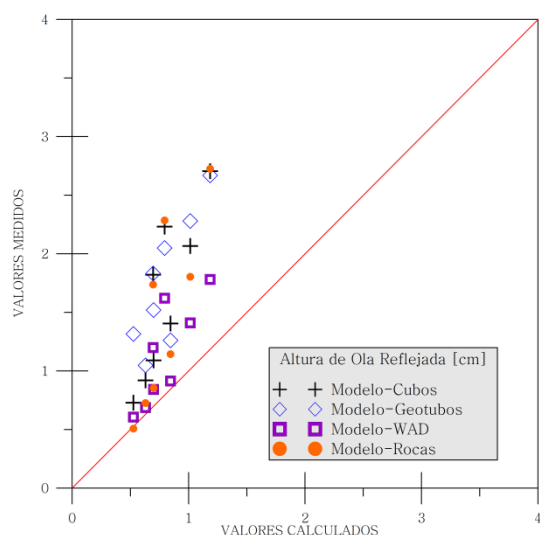


Figura 4.33 Valores medidos contra calculados para altura de ola reflejada en cm.

Para el coeficiente de reflexión, los valores presentados en el dique son mayores que para todas las condiciones del modelo, la aproximación mayor se presenta para el caso de los geotubos, acorde con los resultados de mayor reflexión obtenidos en las pruebas; como se menciona, la condición del dique es considerada como un elemento impermeable lo que puede dar resultados de un coeficiente de reflexión

mayor ya que las estructuras del laboratorio no están totalmente colmatadas de arena y aun influye la condición de elemento poroso; sin embargo, no es posible establecer un efecto de porosidad en el modelo para la estructura, por que no se conocen los coeficientes exactos para cada uno de los materiales.

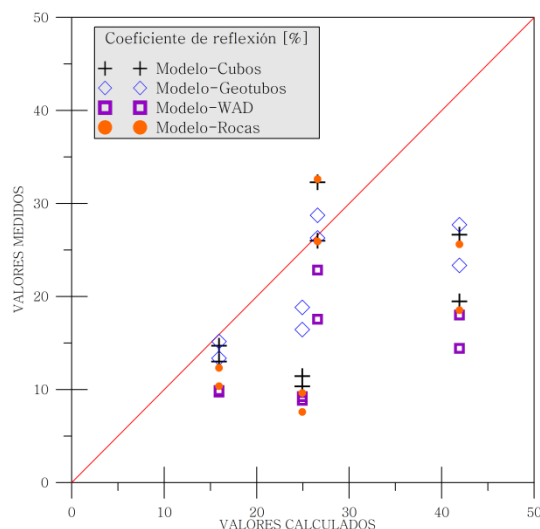


Figura 4.34 Valores medidos contra calculados para coeficientes de reflexión en [%].

Para establecer el comportamiento del sedimento en la parte de la zona protegida, como se mencionó en el apartado 3.1.2, el desarrollo para dicho perfil está en función de la condición de equilibrio suponiendo un perfil de Dean. En particular el perfil de equilibrio para el caso desarrollado dentro del laboratorio no cumple la condición de perfil de Dean, por lo que el modelo se modificó de forma que el perfil se incremente de forma paralela de acuerdo con la condición inicial. Con lo anterior se modeló cada uno de los diferentes estados de mar para obtener la variación del relleno en cada condición después de llegar al equilibrio, obteniéndose así, graficas similares a la Figura 4.36; sin embargo, se observa que el comportamiento del perfil en la modelación es muy diferente al desarrollado en las pruebas por lo que la comparación resulta poco adecuada. El comportamiento del relleno en cada una de las pruebas tiene una variación por encima de nivel medio del mar muy importante, lo cual permite un decremento o incremento de playa dependiendo de las condiciones oceanográficas; en contraparte; el modelo solo proporciona el desarrollo del perfil hasta la parte antes del nivel medio del mar, la cual siempre considera un aumento de material, por lo que los resultados difieren. Estas diferencias se observan en las Figura 4.35 y Figura 4.36, que fueron realizadas con los mismos estados de mar.

Por los resultados mostrados dentro de este apartado, se establece que la modelación numérica difiere de los resultados de laboratorio, tanto en condiciones de oleaje como para condiciones de coeficientes de reflexión y evolución morfodinámica, por lo anterior, el modelo presentado no puede ser utilizado modelar las condiciones oceanográficas, hidrodinámicas y morfológicas presentadas en este estudio, ya que se debe utilizar otra relación para el perfil de playa diferente a la de Dean y que a la fecha no está disponible en la literatura especializada.

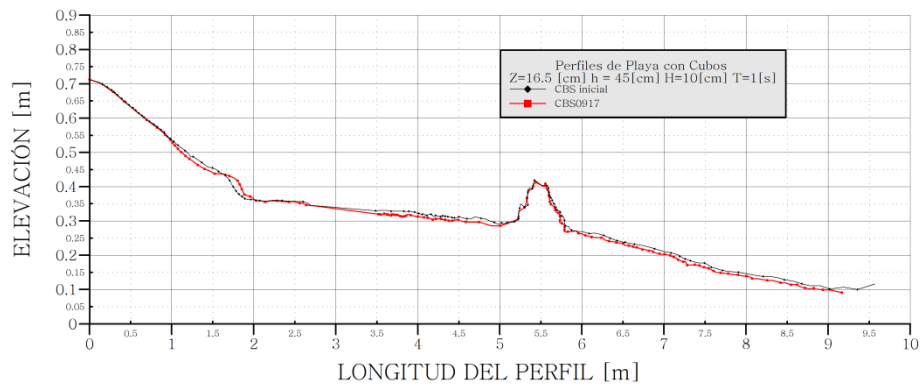


Figura 4.35 Perfiles de playa medidos, para estructura formada por cubos.

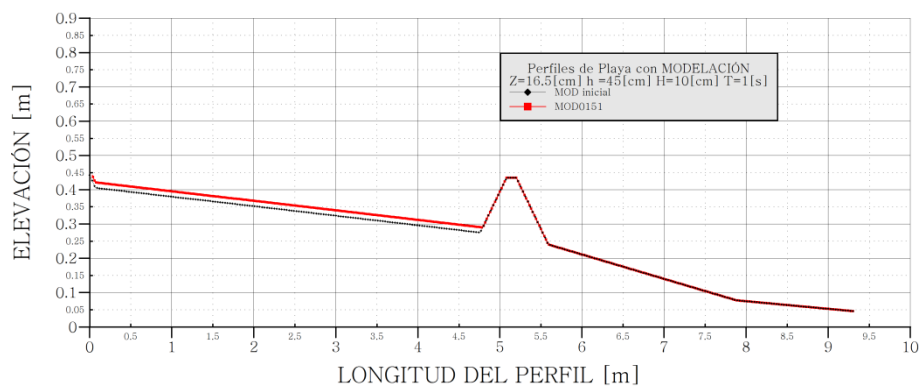


Figura 4.36 Perfiles de playa calculados.

5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

En este trabajo se ha analizado el comportamiento morfológico de una playa bajo la influencia de diques arrecifes construidos utilizando diferentes tipos de elementos. Se estudió la interacción entre el dique y el oleaje, la estabilidad del perfil de playa producto de la disipación de la estructura y se complementó el estudio con el desarrollo de un modelo numérico para simular los eventos realizados en los ensayos.

5.1 Discusión y Conclusiones

Uno de los problemas más importantes que tienen que enfrentar hoy día los ingenieros costeros es el control de la erosión de playas el cual, en la mayoría de los casos es muy complejo, entre otras razones porque se deben proponer soluciones en las que coincidan perspectivas tan diversas como la económica, la ambiental y la social. Desde el punto de vista social las playas son sitio de esparcimiento muy valorado y fuente de trabajo en destinos turísticos. En cuanto al valor ambiental, las playas cumplen con funciones que permiten la existencia de un ecosistema muy rico y a la vez frágil.

En la naturaleza los arrecifes tienen una función de protección de playas muy importante, por un lado reflejan y disipan energía a través de diversos procesos, como fricción y rotura, y por otro lado sirven de apoyo ya que funcionan como pie de playa. Las costas que cuentan con este tipo de elementos poseen playas mejor protegidas y son más aptas para la explotación turística. Aunado a lo anterior, este tipo de estructuras tienen otros valores asociados ya que sirven como zonas de abrigo para el establecimiento de comunidades que son la base de redes alimenticias muy complejas y visualmente generan muy poca afectación.

En las últimas décadas, muchas de las metodologías utilizadas en la ingeniería han sido cuestionadas muy fuertemente por los impactos ambientales que provocan, lo que ha originado la necesidad de ir las adaptando e innovando para cumplir plenamente con las restricciones de tipo legal y social que frecuentemente se imponen para la ejecución de proyectos. Dentro de las posibles soluciones a los problemas de erosión de playas, las que más resistencia generan son las asociadas con el retiro de infraestructura o las que generan pérdida de segmentos de costa. Es por ello que la tendencia actual es implementar, algún tipo de combinación de soluciones de tipo flexible (rellenos de playa) y rígido (con la construcción de estructuras).

Frecuentemente resulta ambientalmente inviable o económicamente muy costosa la explotación de bancos de arena para proyectos de ingeniería costera. Si bien, recientemente se ha avanzado en el entendimiento y desarrollo de herramientas que permiten caracterizar la hidrodinámica para definir la geometría y características de algunos elementos, que pueden ser utilizados para la construcción de diques sumergidos confiables, todavía queda mucho por hacer, especialmente en lo referente a la caracterización de los efectos morfológicos que este tipo de estructuras inducen. Al respecto, se ha trabajado en dos líneas de investigación no abordadas en la literatura, buscando dar respuesta a dos preguntas fundamentales en el desarrollo de alternativas de solución al problema de erosiones en playas de arena:

- a) ¿Qué efectos morfológicos genera, sobre una playa, el uso de diferentes materiales en la construcción de diques arrecifes?

- b) ¿Cómo evoluciona una playa sin proteger y protegida con un dique arrecife bajo diferentes estados de mar?

En relación con la primera pregunta, no obstante la existencia de muchos estudios de estructuras construidas a base de enrocamiento y cubos, poca información se ha generado en relación al uso de elementos con un comportamiento más impermeable, como los geotubos®, o con mayor porosidad, como el WAD®. Por otro lado, cuando una playa está en proceso de erosión o se desea proteger, y no es opción el relleno de playa, es importante evaluar el grado de protección relativo de la playa inestable, de lo que tampoco existe una metodología.

Para el diseño de los experimentos se utilizaron formulaciones para establecer el peso de los elementos para una geometría dada. Los resultados, fueron diferentes a lo esperado, ya que en algunos casos se presentó la falla de los diques en los modos de asentamiento por socavación del lecho y extracción de las piezas del manto principal, lo cual tuvo como consecuencia la reconfiguración geométrica del dique y por tanto una disminución de su función como elemento de abrigo. Estos problemas se pueden solucionar con el uso de técnicas y materiales que mejoren el comportamiento mecánico del suelo en el cual se desplanten las obras, las cuales pueden ir desde el uso de rocas para la construcción de una banquetta al pie de la estructura hasta uso de tapetes antisocavación para evitar la falla del suelo. En cuanto a la falla mecánica de los elementos se deberán realizar más trabajos para reducir las incertidumbres en la selección del peso de los elementos que conforman las estructuras.

Desde el punto de vista hidrodinámico:

- Los diques sumergidos construidos a base de geotubos®, al ser estructuras propiamente impermeables y reflejar una cantidad mayor de energía, proporcionaron mayor protección a los perfiles de playa ensayados.
- Los diques construidos a base de cubos y rocas tuvieron un desempeño muy similar. En comparación con los geotubos®, permiten una mayor transmisión y reflejan menos de energía.
- Si bien el funcionamiento de las estructuras a base de WADs® mejoró al disminuir la porosidad, fueron los elementos menos eficientes para disipar la energía sobre la playa al permitir mayor cantidad de oleaje transmitido.

En cuanto a los efectos morfológicos:

- En virtud que se partió de un perfil de referencia, en todos los casos las playas protegidas con diques ubicados en la menor profundidad presentaron patrones de erosión menores que las playas sin protección.
- En todos los casos la sumergencia relativa es muy importante. Se confirmó que a menor sumergencia menor transmisión y mayor playa seca.

- Tanto los cubos como las rocas ofrecieron mejor protección al perfil de playa para el rango de condiciones ensayadas en el laboratorio
- Los WADs® fueron los elementos que menor protección generaron al perfil de playa
- El perfil inicial de la playa retrocede más cuando el oleaje está más peraltado

Es importante señalar que en cada caso particular deberá decidirse sobre la conveniencia de construir los diques arrecifes, ya que además de la actuación hidrodinámica y morfológica, debe incluirse una evaluación económica-ambiental. A continuación se enlistan algunos aspectos a tomar en cuenta:

- Disponibilidad de materiales en la zona. En ocasiones por razones de distancia o restricciones de tipo ambiental no es posible contar con rocas de la calidad necesaria para el desarrollo del proyecto, lo que obliga a la selección de elementos artificiales como los ensayados para este trabajo de investigación.
- Vida útil del proyecto. Cuando no se tiene certeza sobre algunos procesos es conveniente construir obras con una vida útil que permita monitorear ciertos procesos y eventualmente reubicar o remover dichas estructuras, en este sentido los geotubos® y WADs® son una muy buena alternativa
- Riesgo que se puede asimilar en caso que falle la estructura. Por ejemplo, los geotubos® son estructuras muy económicas, sin embargo, son muy vulnerables en caso que se rompa el geotextil y con menor vida útil que los otros elementos.
- Efectos ambientales, si bien los WADs® son los elementos que menor abrigo ofrecen a las playas, en contraparte son los que generan mayores beneficios en cuanto al establecimiento de comunidades de vida marina.
- Eficiencia contra afectación visual

No obstante el uso de herramientas y criterios recomendados en la literatura especializada, el modelo numérico estudiado presentó poca concordancia con los valores obtenidos en las modelaciones experimentales de laboratorio. En buena medida esto se debió a:

- Las pérdidas de energía por los efectos de fricción, turbulencia dentro del medio poroso y condición de rotura en perfiles reflejantes no están incluidas en el modelo.
- Los criterios recomendados en la literatura parten del hecho que la playa cuenta con suficiente material para llegar a un perfil de equilibrio. Esto es, no existen formulaciones que permitan estudiar los sistemas con escasez de material

En general no hay una solución única para todos los proyectos de ingeniería y cada caso se debe estudiar en función de sus necesidades y condicionantes. Sin embargo, este trabajo pretende ser una guía para el diseño

de protecciones playeras particularmente cuando el relleno artificial no es una opción compatible con las restricciones de proyecto.

5.2 Futuras líneas de investigación

Después del desarrollo de las pruebas y del modelo, existen puntos que son importantes resaltar que no fueron abordados dentro del desarrollo de este escrito y que podrán contribuir a un mejor conocimiento del comportamiento hidrodinámico y morfodinámico ocasionado por estructuras de protección sumergidas.

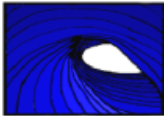
- Diseñar un ancho de corona adecuado que permita disipar mayor cantidad de energía para periodos de onda mayores y verificar con modelaciones dentro del laboratorio su comportamiento.
- Construir las condiciones necesarias en el dique para evitar su asentamiento y una deformación importante, de acuerdo con el tipo de material y su comportamiento mecánico.
- Realizar un mayor número de pruebas que permitan aumentar las líneas de tendencia presentadas en el capítulo de resultados, así como para diferentes valores de franco bordo con la finalidad de poder extender los resultados y generalizar el comportamiento del que.
- Elaborar un desarrollo que permita representar las condiciones de oleaje en el modelo numérico y en la zona de protección de una forma más precisa.
- Establecer las variables del modelo numérico que permitan representar la variación del perfil de playa originado por los diferentes estados de mar, esto es, representar dentro del modelo, el retroceso del perfil de playa debido al estado de mar.

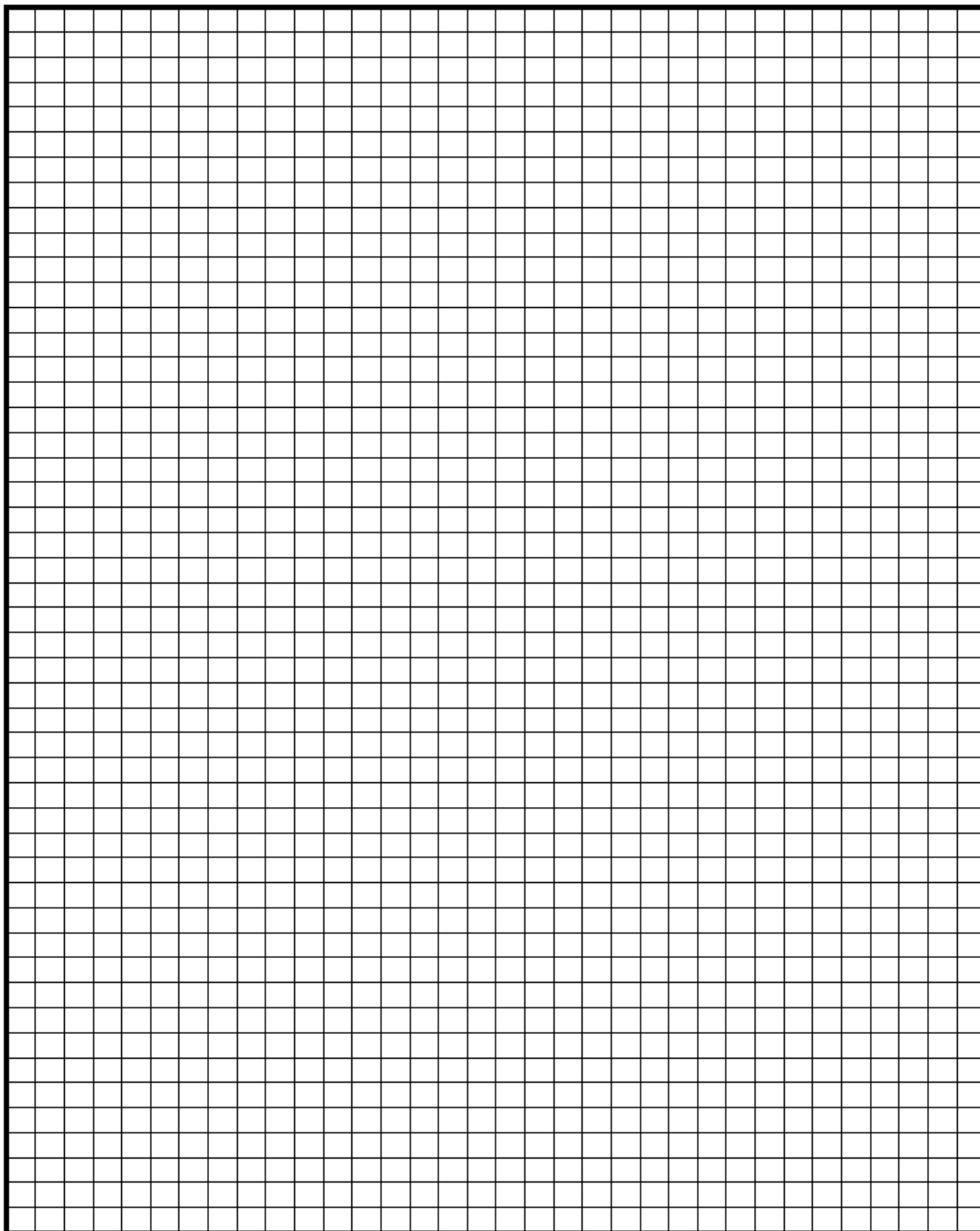
Nota Importante: Este anexo fue realizado en Microsoft Excel® por lo que para ser exportado a Microsoft Word®, fue necesario trabajar la hoja de cálculo como imagen.

 GRUPO DE INGENIERÍA DE COSTAS Y PUERTOS	PROYECTO: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA HIDRODINÁMICA Y MORFOLÓGICA DE DIQUES ARRECIFE	Calculo: JAGV
	Tema: DISEÑO DE DIQUES SUMERGIDOS Y REBASABLES	Fecha MARZO 2009 Hoja 109 de 184

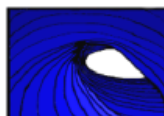
ANEXO A
DISEÑO DE DIQUES SUMERGIDOS Y REBASABLES

Nota Importante: Este anexo fue realizado en Microsoft Excel® por lo que para ser exportado a Microsoft Word®, fue necesario trabajar la hoja de cálculo como imagen.

 GRUPO DE INGENIERÍA DE COSTAS Y PUERTOS	PROYECTO: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA HIDRODINÁMICA Y MORFOLÓGICA DE DIQUES ARRECIFE	Calculó: JAGV
	Tema: DISEÑO DE DIQUES SUMERGIDOS Y REBASABLES	Fecha MARZO 2009
		Hoja 110 de 184



Nota Importante: Este anexo fue realizado en Microsoft Excel® por lo que para ser exportado a Microsoft Word®, fue necesario trabajar la hoja de cálculo como imagen.

 GRUPO DE INGENIERÍA DE COSTAS Y PUERTOS	PROYECTO: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA HIDRODINÁMICA Y MORFOLÓGICA DE DIQUES ARRECIFE		Calculo: JAGV
	Tema: DISEÑO DE DIQUES SUMERGIDOS Y REBASABLES		Fecha MARZO 2009
			Hoja 111 de 184

Método de Vidal et al, 1992

Talud de escollera
Núcleo permeable

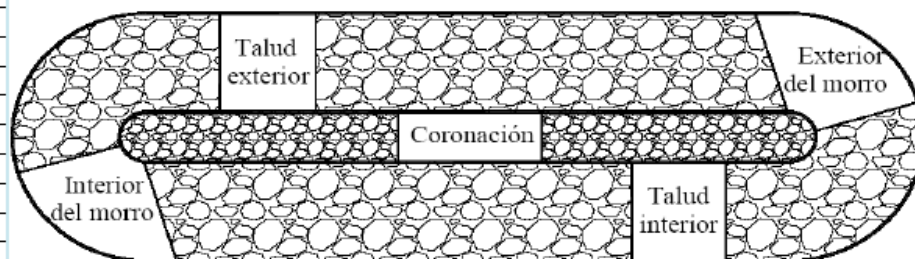
cota= 1.5

Hipotesis:

Para un sector determinado del dique y un nivel de avería dado, la relación entre los números de estabilidad correspondientes a dos francobordos diferentes, es independiente del tipo de piezas y del ángulo del talud.

Para un francobordo dado, la relación entre los números de estabilidad correspondientes a dos sectores distintos de un dique sólo depende del tipo de piezas y del ángulo de los taludes

Oleaje incidente



Calculo de las piezas del talud exterior por medio del diseño utilizado para diques no rebasables

Formulación de Van Der Meer
Aguas someras

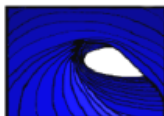
Pendiente	Daño inicial	Daño intermedio	Falla
1:1.5	2	3 - 5	8
1:2	2	4 - 6	8
1:3	2	6 - 9	12
1:4	3	8 - 12	17
1:6	3	8 - 12	17

Valores de Sd

Material	Porosidad P
Dolos	0.56
Terapodos	0.5
Cubos	0.47
Escollera clasificada	0.4
Escollera sin clasificar	0.31

Porosidad

Nota Importante: Este anexo fue realizado en Microsoft Excel® por lo que para ser exportado a Microsoft Word®, fue necesario trabajar la hoja de cálculo como imagen.

 GRUPO DE INGENIERÍA DE COSTAS Y PUERTOS	PROYECTO: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA HIDRODINÁMICA Y MORFOLÓGICA DE DIQUES ARRECIFE		Calculó: JAGV
	Tema: DISEÑO DE DIQUES SUMERGIDOS Y REBASABLES		Fecha MARZO 2009
			Hoja 112 de 184

$$I_r = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L}}}$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L}h\right)$$

$$N_s = 8.7 P^{0.18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} I_r^{-0.5} \quad I_r < I_{r_{crit}}$$

$$N_s = 1.4 P^{-0.13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} I_r^P \quad I_r > I_{r_{crit}}$$

$$I_{r_{crit}} = \left(6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha}\right)^{1/(P+0.5)}$$

$$N_s = \frac{H}{(S_r - 1) D_{50}}$$

$$S_r = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

Donde:

I_r	Número de Iribarren	F	Francobordo
$I_{r_{crit}}$	Número de Iribarren critico		
S_d	Coficiente experimental, criterio de daño		
N	Número de olas		
N=	3000		
L[m]	longitud de ola		
H[m]	Altura de ola		
h[m]	Profundidad		

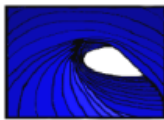
Pendiente de la estructura	q[m/s ²]	9.81	H[m]=	0.15
x[m]=	1.5	g _w [kg/m ³]	T[m]=	2
y[m]=	1	g _s [kg/m ³]	h[m]=	0.45
cota=	1.5			
tana=	0.667			

material	Porosidad	Punto de rotura
Cubos	0.47	$H_B = 0.78h$

Tipos de elementos a utilizar	Criterio de daño	intermedio	5	H _B [m]=	0.351
Cálculo de la longitud de ola	L _{eros} [m]	L _{eros} -L _{cal}	L _{cal} [m]		
	3.8837058	0.0001	3.8836358		

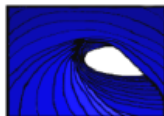
I_r	3.3922071
$I_{r_{crit}}$	4.1815423

Nota Importante: Este anexo fue realizado en Microsoft Excel® por lo que para ser exportado a Microsoft Word®, fue necesario trabajar la hoja de cálculo como imagen.

 GRUPO DE INGENIERÍA DE COSTAS Y PUERTOS	PROYECTO: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA HIDRODINÁMICA Y MORFOLÓGICA DE DIQUES ARRECIFE	Calculo: JAGV
	Tema: DISEÑO DE DIQUES SUMERGIDOS Y REBASABLES	Fecha MARZO 2009
	Hoja 113 de 184	

Si $lr < lr_{crit}$				Si $lr > lr_{crit}$							
$N_s =$		2.5546862		$N_s =$		2.0807003					
$Sr =$		2.7									
$D_{50}[m] =$		0.0345386									
$D_{50}[cm] =$		3.4538604									
$V[m^3] =$		0.00004									
$w_p[kg] =$		0.1112444									
$w_p[gr] =$		111.24438									
Diseño de diques sumergidos o rebasables											
$F[m] =$		0									
$F_{dr}[1] =$		0									
Parametros de ajuste para las curvas, para cada sector de los diques rebasables y niveles de averia											
Averia	Rango de F_d			A		B		C		F_{avr}	
Talud exterior											
IA	-2.01	a	2.41	1.831		-0.245		0.0119		2.4	
AI	-2.01	a	2.41	2.256		-0.32		0.0189		2.41	
ID	-2.01	a	2.41	2.65		-0.313		0.0129		3.15	
D	-2.01	a	2.41	3.237		-0.357		0.0357		3.9	
Coronacion											
IA	-2.01	a	2.41	1.652		0.0182		0.159		-----	
AI	-2.01	a	2.41	2.122		0.0434		0.15		-----	
ID	-2.01	a	2.41	2.734		0.123		0.177		-----	
D	-2.01	a	1	3.21		0.0965		0.175		-----	
Talud interior											
IA	-2.01	a	2.41	2.575		-0.54		-0.115		-----	
AI	0.8	a	2.41	5.628		-1.459		0.0837		-----	
ID	1.6	a	2.41	8.669		-2.272		-----		-----	
Interior del morro											
IA	-2.01	a	2.41	1.681		-0.474		0.105		2.4	
AI	-2.01	a	2.41	2.046		-0.499		0.0913		2.41	
ID	-2.01	a	2.41	2.517		-0.536		0.0613		3.15	
D	-0.01	a	2.41	3.027		-0.756		0.12		3.9	

Nota Importante: Este anexo fue realizado en Microsoft Excel® por lo que para ser exportado a Microsoft Word®, fue necesario trabajar la hoja de cálculo como imagen.

 GRUPO DE INGENIERÍA DE COSTAS Y PUERTOS	PROYECTO: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA HIDRODINÁMICA Y MORFOLÓGICA DE DIQUES ARRECIFE		Calculó: JAGV
	Tema: DISEÑO DE DIQUES SUMERGIDOS Y REBASABLES		Fecha MARZO 2009
			Hoja 114 de 184

Talud exterior			
Avería	ID	$N_{ste} =$	2.65
A	2.65	$N_{snr} =$	1.7920503
B	-0.313	$D_{te}[m] =$	0.0233566
C	0.0129	$D_{te}[cm] =$	2.3356571
F_{dnr}	3.15		
Coronación			
$F_{dte} =$	0		
Avería	ID	$N_{ste} =$	2.65
A	2.734	$N_{sc} =$	2.734
B	0.123	$D_c[m] =$	0.022639
C	0.177	$D_c[cm] =$	2.2638959
F_{dnr}	-----		
Talud interior			
$F_{dte} =$	0		
Avería	ID	$N_{ste} =$	2.65
A	8.669	$N_{sti} =$	8.669
B	-2.272	$D_{ti}[m] =$	0.0071398
C	-----	$D_{ti}[cm] =$	0.7139799
F_{dnr}	-----		
Morros			
$F_{dnr} =$	0	$D_{nnr}[m] =$	0.0345386
Avería	ID	$N_{snr} =$	1.4368493
A	2.517	$N_{snr} =$	2.517
B	-0.536	$D_{nr}[m] =$	0.0197166
C	0.0613	$D_{nr}[cm] =$	1.9716634
F_{dnr}	3.15		

$$N_s = A + BF_{dr} + CF_{dr}^2$$

Talud exterior

Determinar W_{nr} y D_{nr}

$$F_{dr} = F / D_{nr}$$
$$N_s = A + BF_{dr} + CF_{dr}^2 \langle \text{rebasable, no rebasable} \rangle$$
$$D_{te} = D_{nr} \frac{N_{snr}}{N_{ste}}$$

Coronacion

$$F_{dte} = F / D_{te}$$
$$N_s = A + BF_{dr} + CF_{dr}^2 \langle \text{rebasable, no rebasable} \rangle$$
$$D_c = D_{te} \frac{N_{ste}}{N_{sc}}$$

Talud exterior de referencia 1:1.5

Talud interior

$$F_{dte} = F / D_{te}$$
$$N_s = A + BF_{dr} + CF_{dr}^2$$
$$D_{ti} = D_{te} \frac{N_{ste}}{N_{sti}}$$

Talud exterior de referencia con la misma pendiente

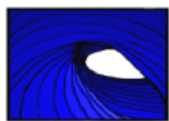
Morro

Determinar W_{nnr} y D_{nnr}

$$F_{dnr} = F / D_{nnr}$$
$$N_s = A + BF_{dr} + CF_{dr}^2 \langle \text{rebasable, no rebasable} \rangle$$
$$D_{nr} = D_{nnr} \frac{N_{snr}}{N_{snr}}$$

Dimensiones de dique sumergido			
Altura del dique[m] =	0.15	Material del elemento:	concreto
Ancho de coronación[m] =	0.12	Diametro de las piezas	
Pendiente		Talud exterior	$D_{te}[m] =$ 0.0233566
Talud exterior cota =	1.5	Coronación	$D_c[m] =$ 0.022639
Talud interior cota =	1.5	Talud interior	$D_{ti}[m] =$ 0.0071398
Geometria del elemento=	Cubos	Morros	$D_{nr}[m] =$ 0.0197166

Nota Importante: Este anexo fue realizado en Microsoft Excel® por lo que para ser exportado a Microsoft Word®, fue necesario trabajar la hoja de cálculo como imagen.

	GRUPO DE INGENIERÍA DE COSTAS Y PUERTOS	PROYECTO: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA HIDRODINÁMICA Y MORFOLÓGICA DE DIQUES ARRECIFE		Calculó:	JAGV
		Tema: DISEÑO DE DIQUES SUMERGIDOS Y REBASABLES		Fecha	MARZO 2009
				Hoja	115 de 184

Coefficiente de transmisión en diques rebasables

D'Angremond et al. (1996)

para $0.075 < KT < 0.8$ y dique permeable, y

$$K_T = -0.4 \frac{F}{H_s} + 0.64 \left(\frac{B}{H_s} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5Br})$$

H[m]= 0.15 B[m]= 0.12
T[m]= 2 Ir= 3.3922071
h[m]= 0.45 F[m]= 0

$K_T = 0.5600582$

para $0.075 < KT < 0.8$ y dique impermeable.

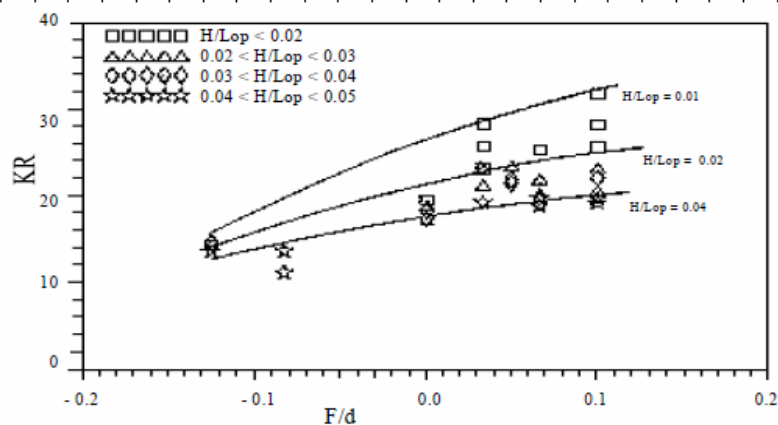
$$K_T = -0.4 \frac{F}{H_s} + 0.80 \left(\frac{B}{H_s} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5Br})$$

$K_T = 0.7000728$

Coefficiente de reflexión en diques rebasables o sumergidos

Vidal et al. (1992)

H/L_{OP} [1]= 0.0386236
F/d[m]= 0
K_R= 12



Ubicación del centro de la estructura

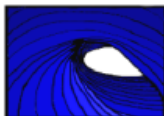
$$H_B = 0.78h$$

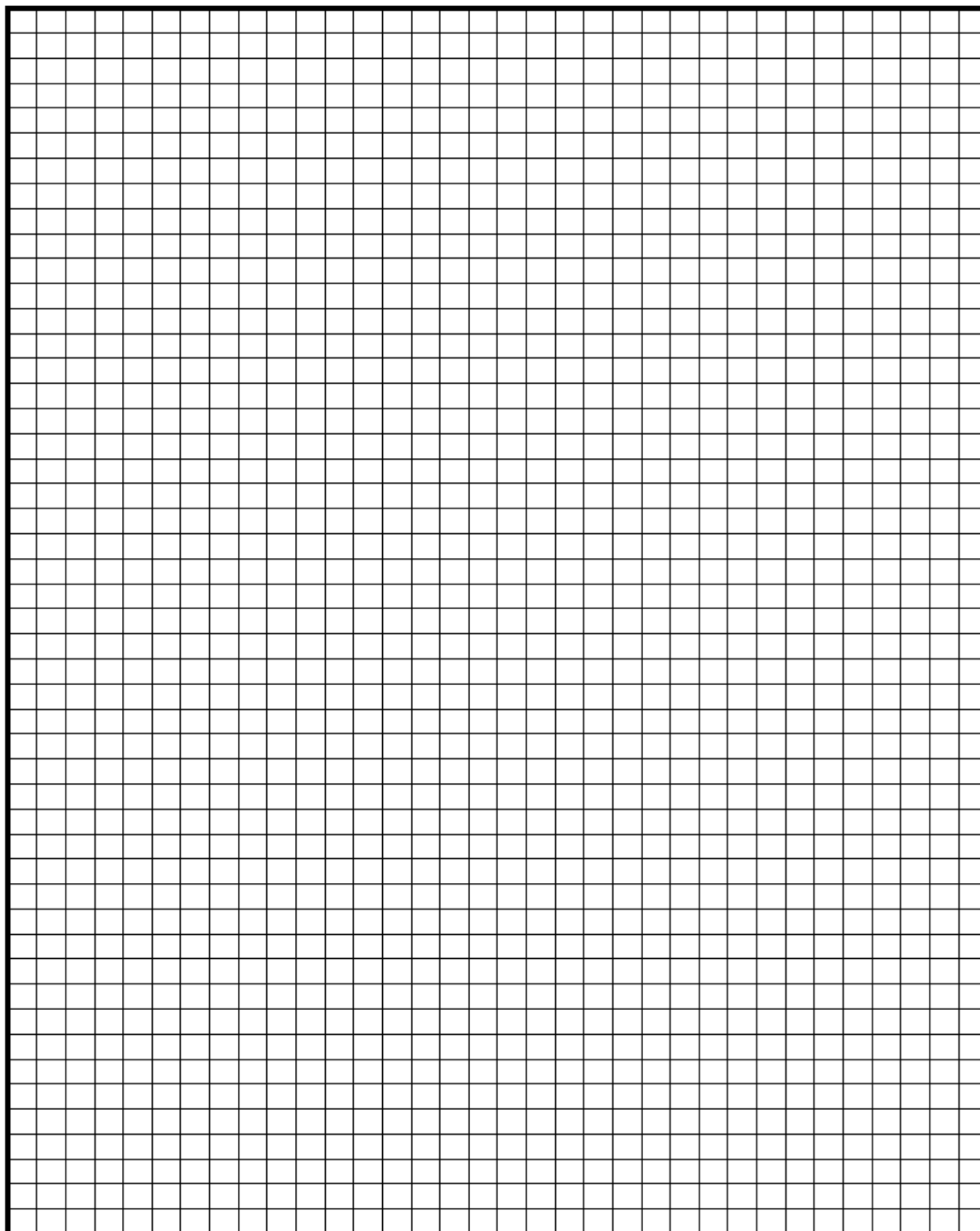
H[m]= 0.15
h[m]= 0.1923077

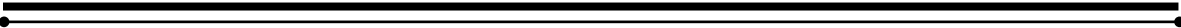
Ubicación del eje de la estructura

a una profundidad de 0.165 [m]

Nota Importante: Este anexo fue realizado en Microsoft Excel® por lo que para ser exportado a Microsoft Word®, fue necesario trabajar la hoja de cálculo como imagen.

 GRUPO DE INGENIERÍA DE COSTAS Y PUERTOS	PROYECTO: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA HIDRODINÁMICA Y MORFOLÓGICA DE DIQUES ARRECIFE		Calculo: JAGV
	Tema: DISEÑO DE DIQUES SUMERGIDOS Y REBASABLES		Fecha MARZO 2009
			Hoja 116 de 184





Anexo B. Perfiles de primera etapa

A continuación se presenta el registro de cada uno de los perfiles obtenidos en la primera etapa de ensayos; se muestran los casos del comportamiento de playa sin protección y el comportamiento de la playa con la estructura a una profundidad de $z=30$ [cm].

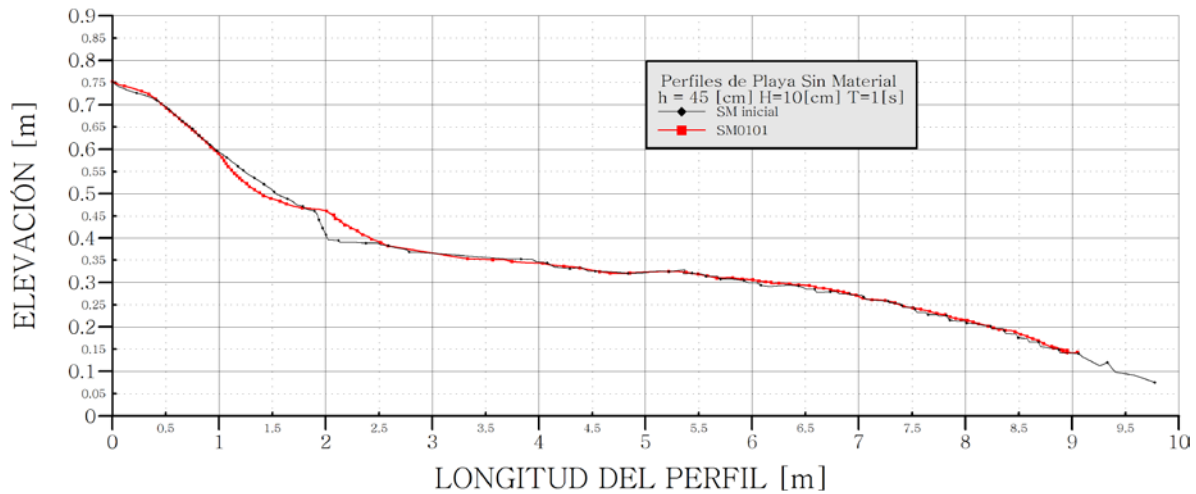
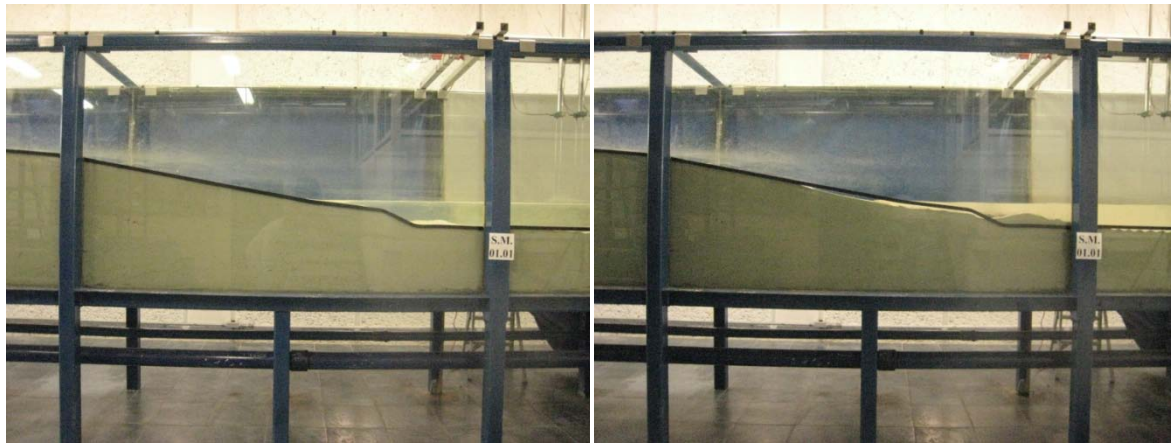


Figura B.1 Perfiles inicial y final de la prueba SM0101



a) b)
 Figura B.2 Condiciones de la prueba SM0101. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa

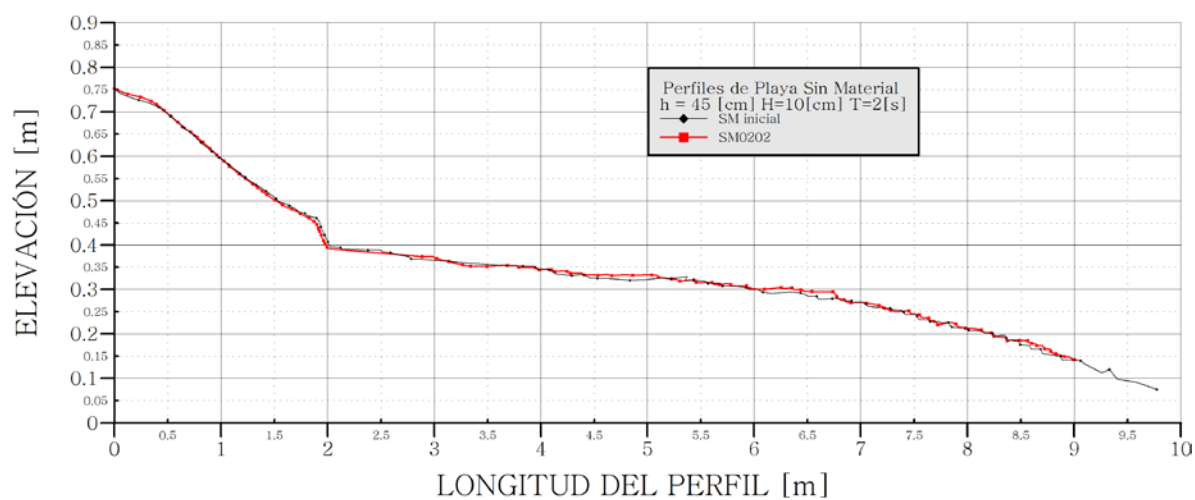


Figura B.3 Perfiles inicial y final de la prueba SM0202



a)

b)

Figura B.4 Condiciones de la prueba SM0202. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa

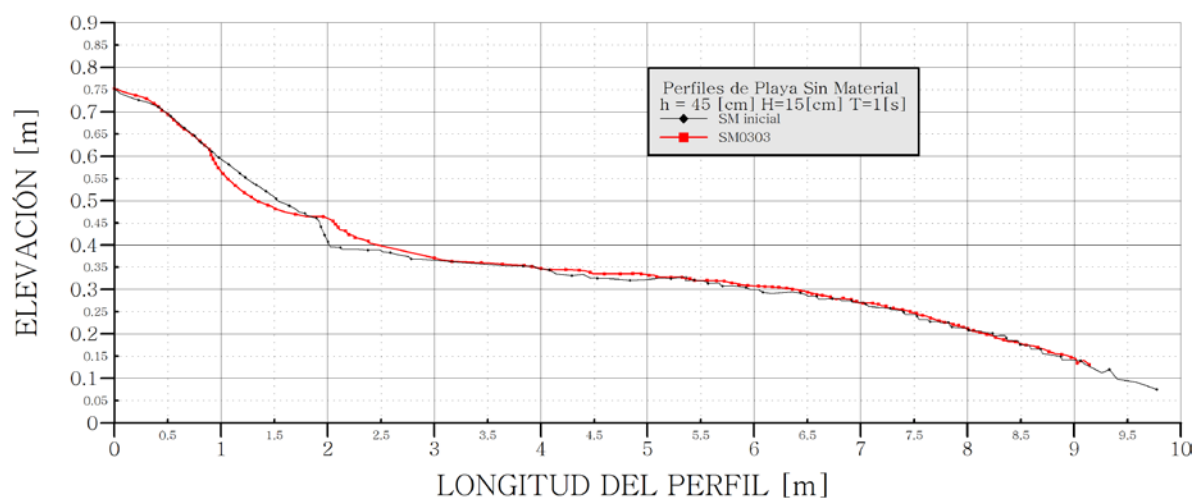


Figura B.5 Perfiles inicial y final de la prueba SM0303

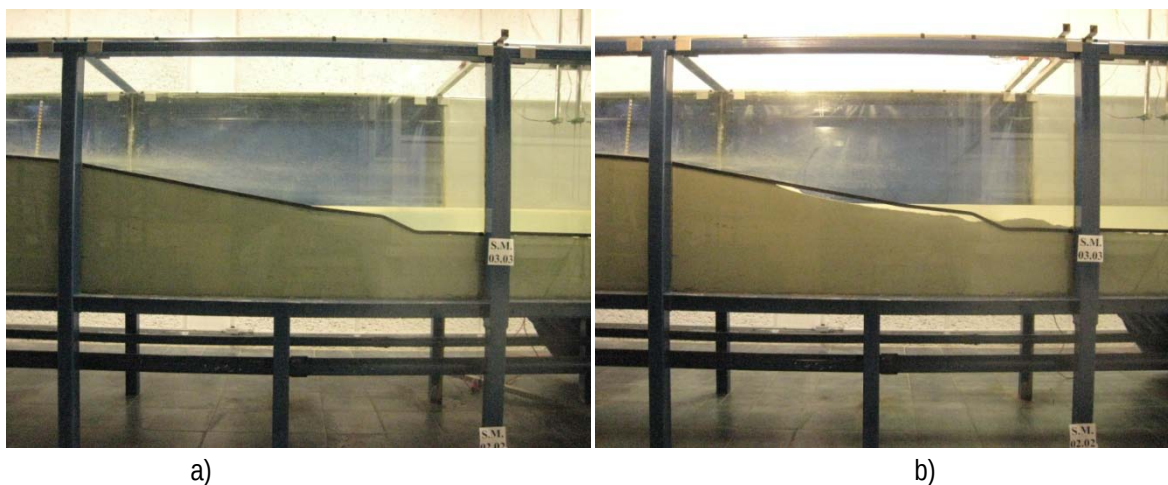


Figura 6 Condiciones de la prueba SM0303. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa

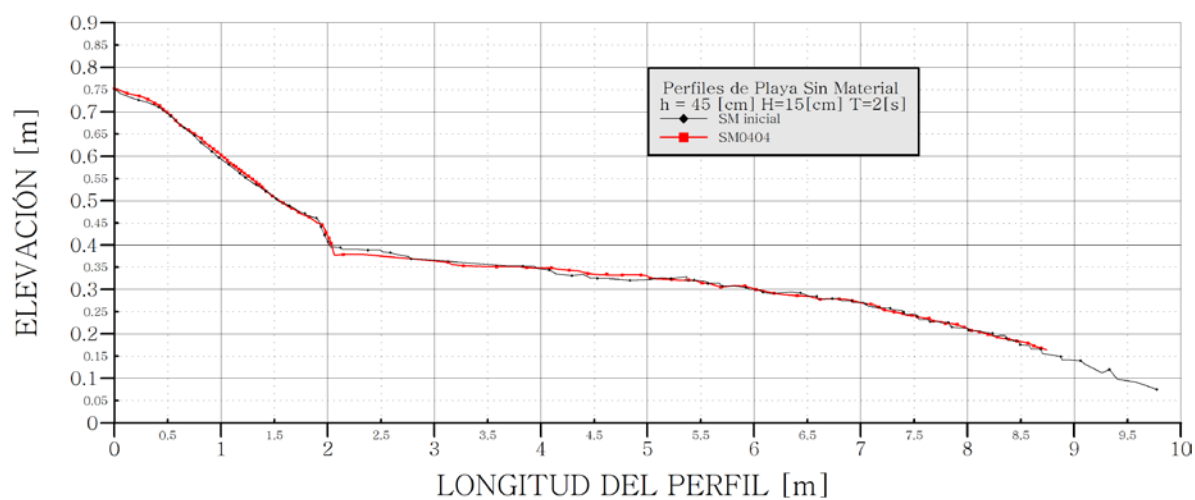


Figura B.7 Perfiles inicial y final de la prueba SM0404

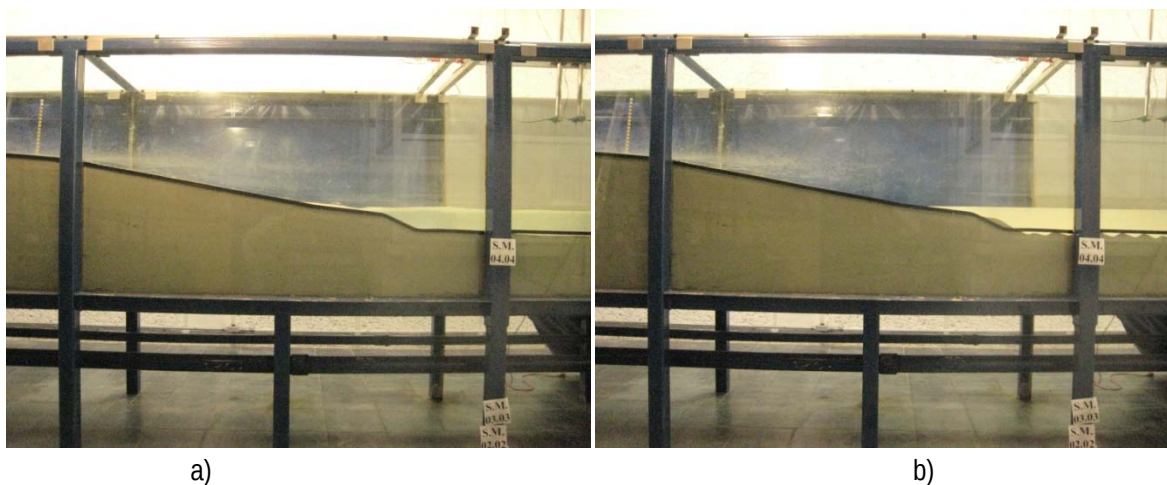


Figura B.8 Condiciones de la prueba SM0404. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa

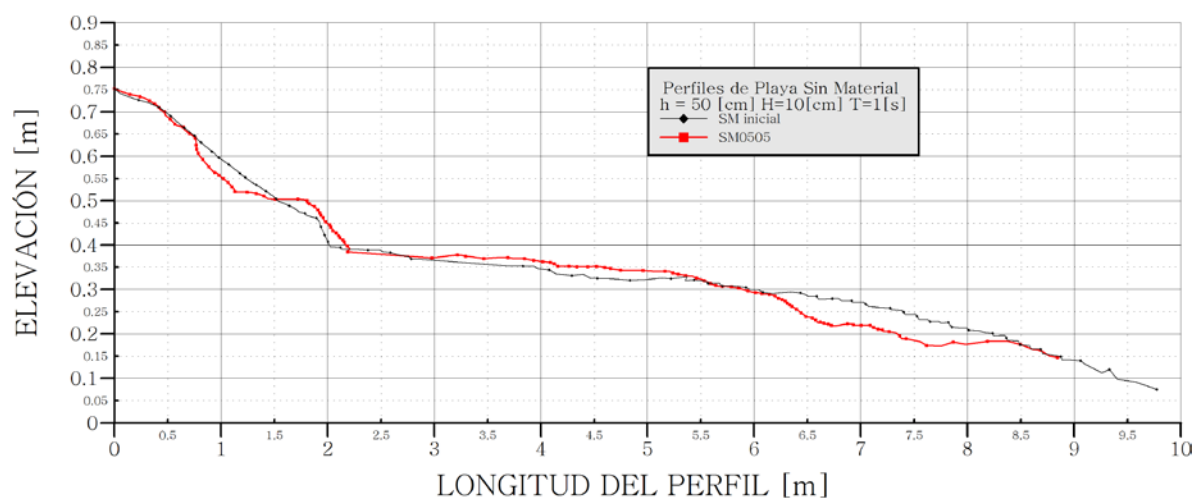


Figura B.9 Perfiles inicial y final de la prueba SM0505



Figura B.10 Condiciones de la prueba SM0505. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa

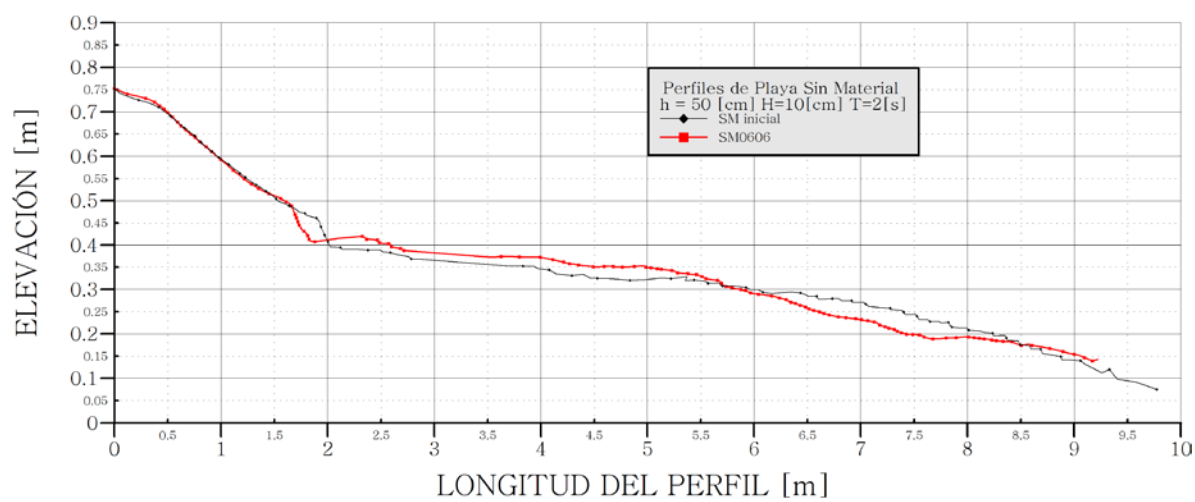


Figura B.11 Perfiles inicial y final de la prueba SM0606

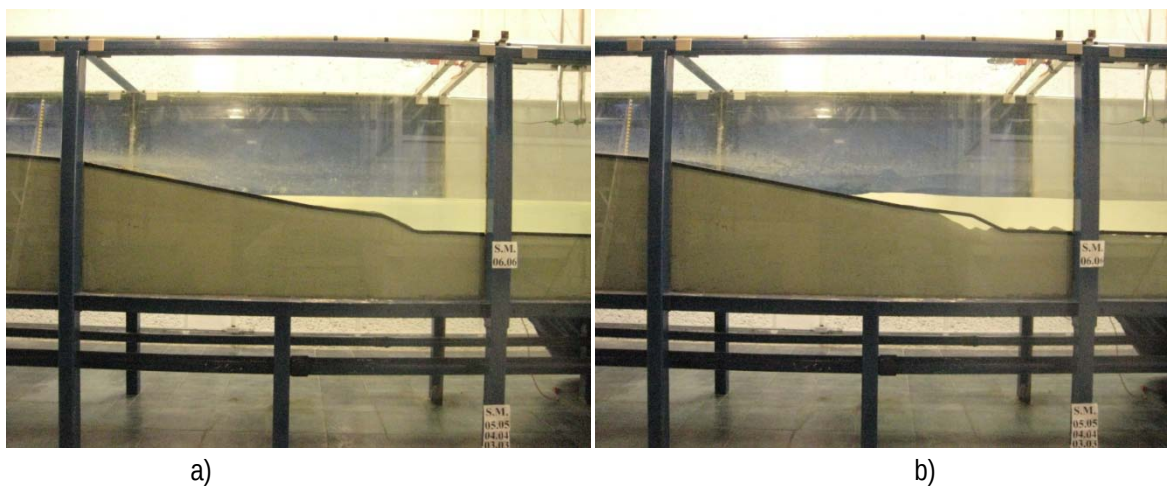


Figura B.12 Condiciones de la prueba SM0606. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa

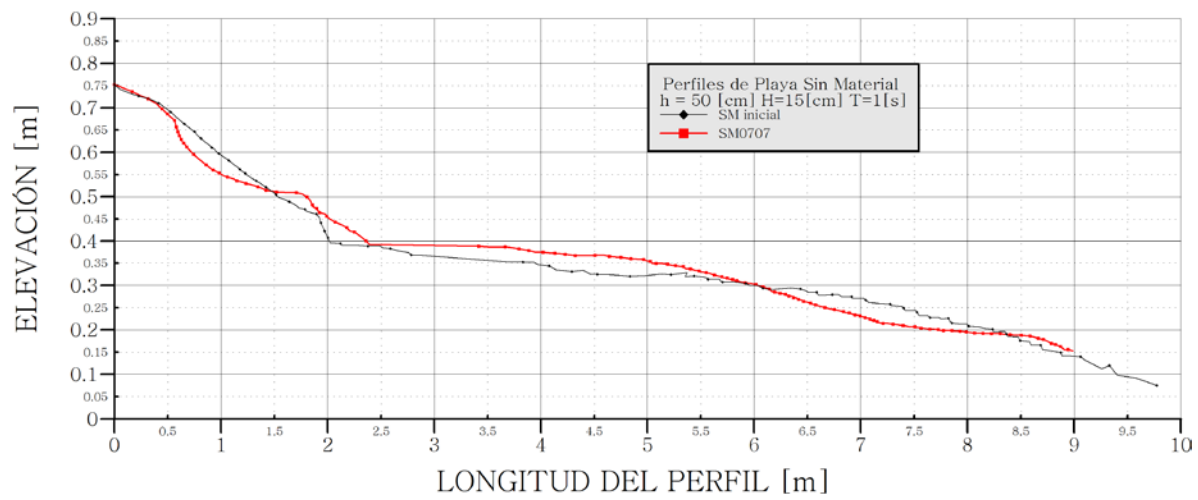


Figura B.13 Perfiles inicial y final de la prueba SM0707

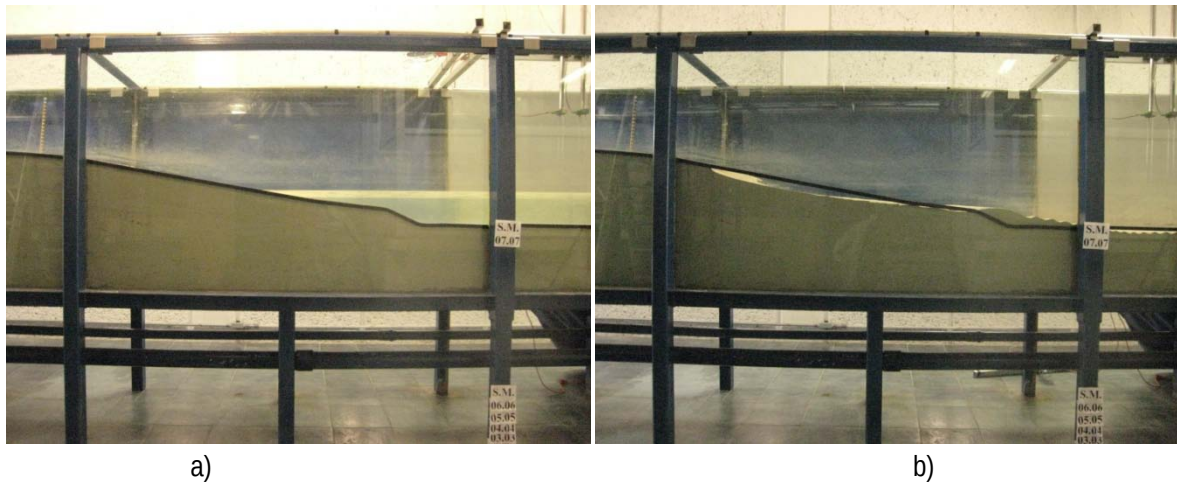


Figura B.14 Condiciones de la prueba SM0707. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa

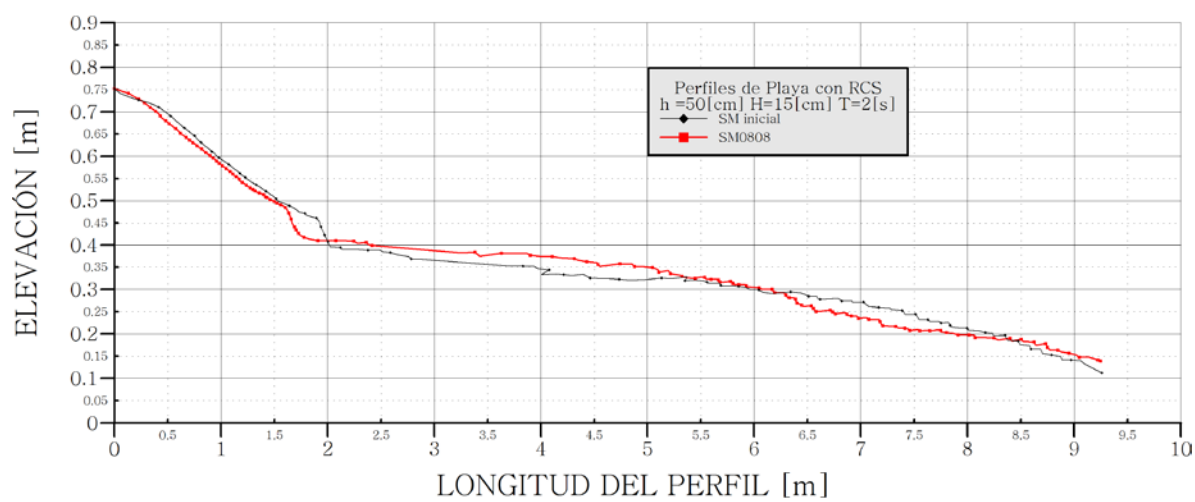


Figura B.15 Perfiles inicial y final de la prueba SM0808.



a)

b)

Figura B.16 Condiciones de la prueba SM0808. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa

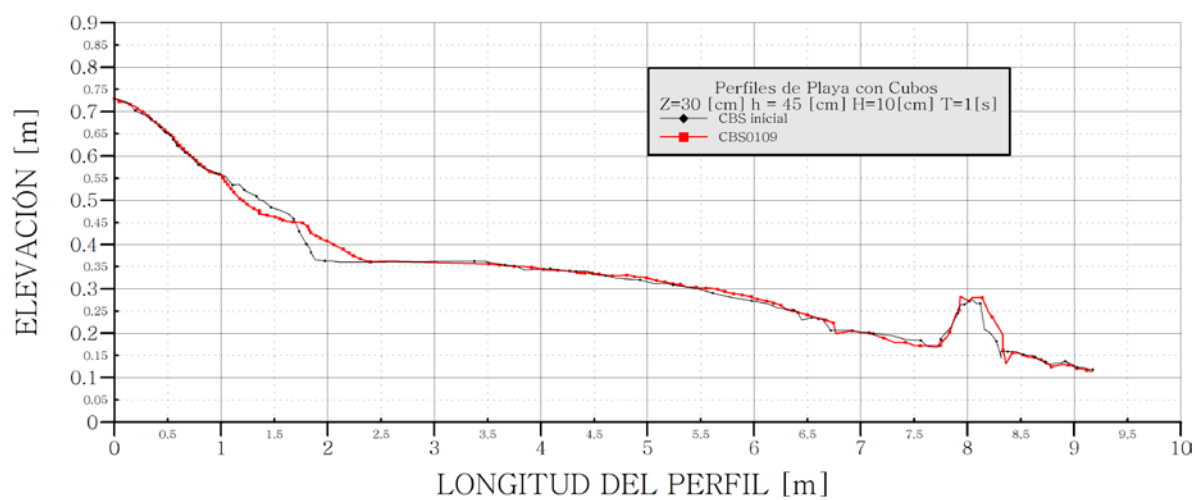


Figura B.17 Perfiles inicial y final de la prueba CBS0109.

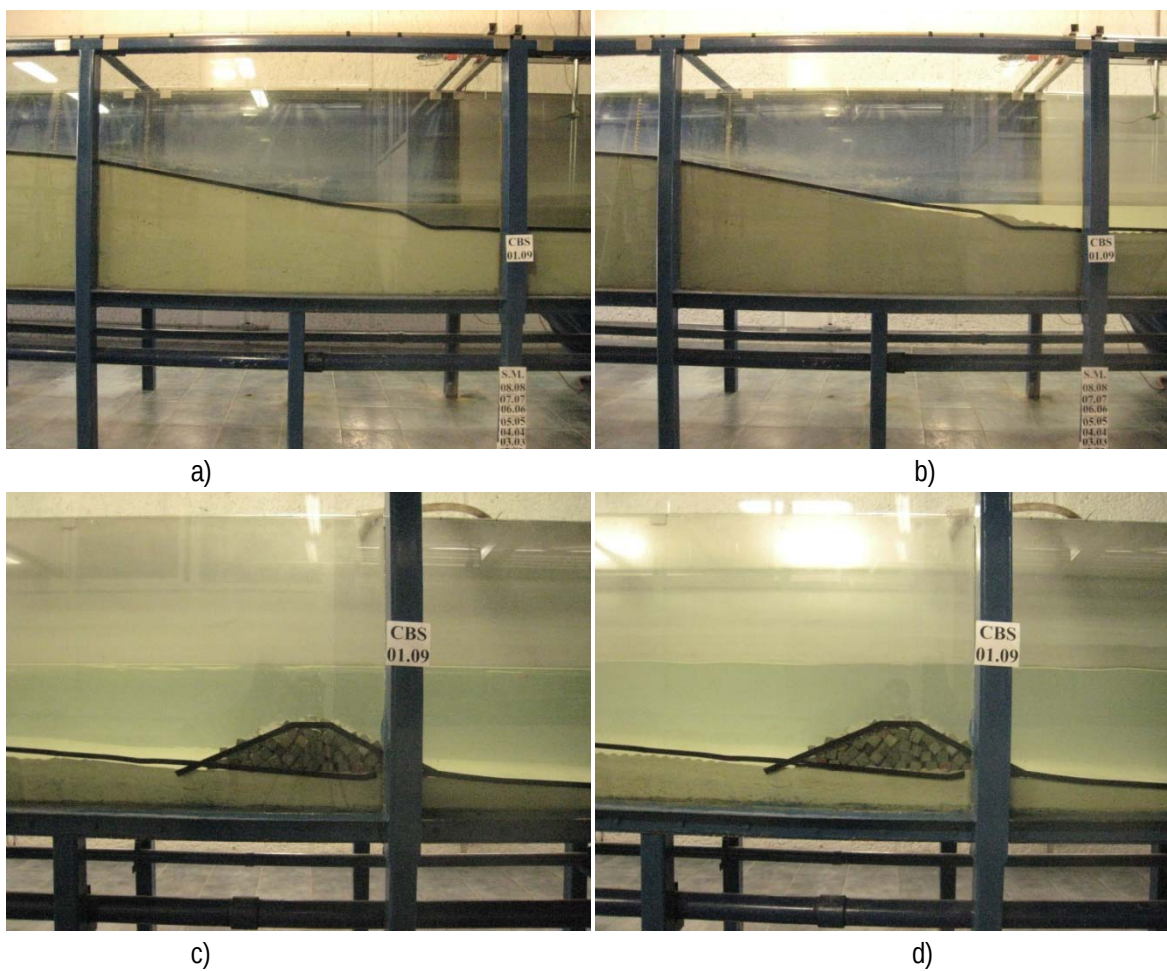


Figura B.18 Condiciones de la prueba CBS0109. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

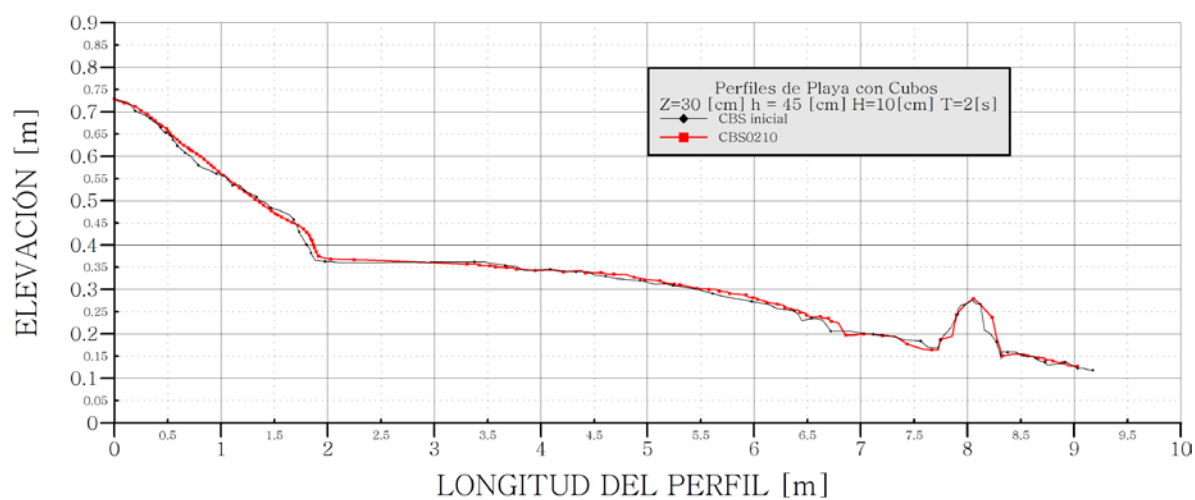


Figura B.19 Perfiles inicial y final de la prueba CBS0210.

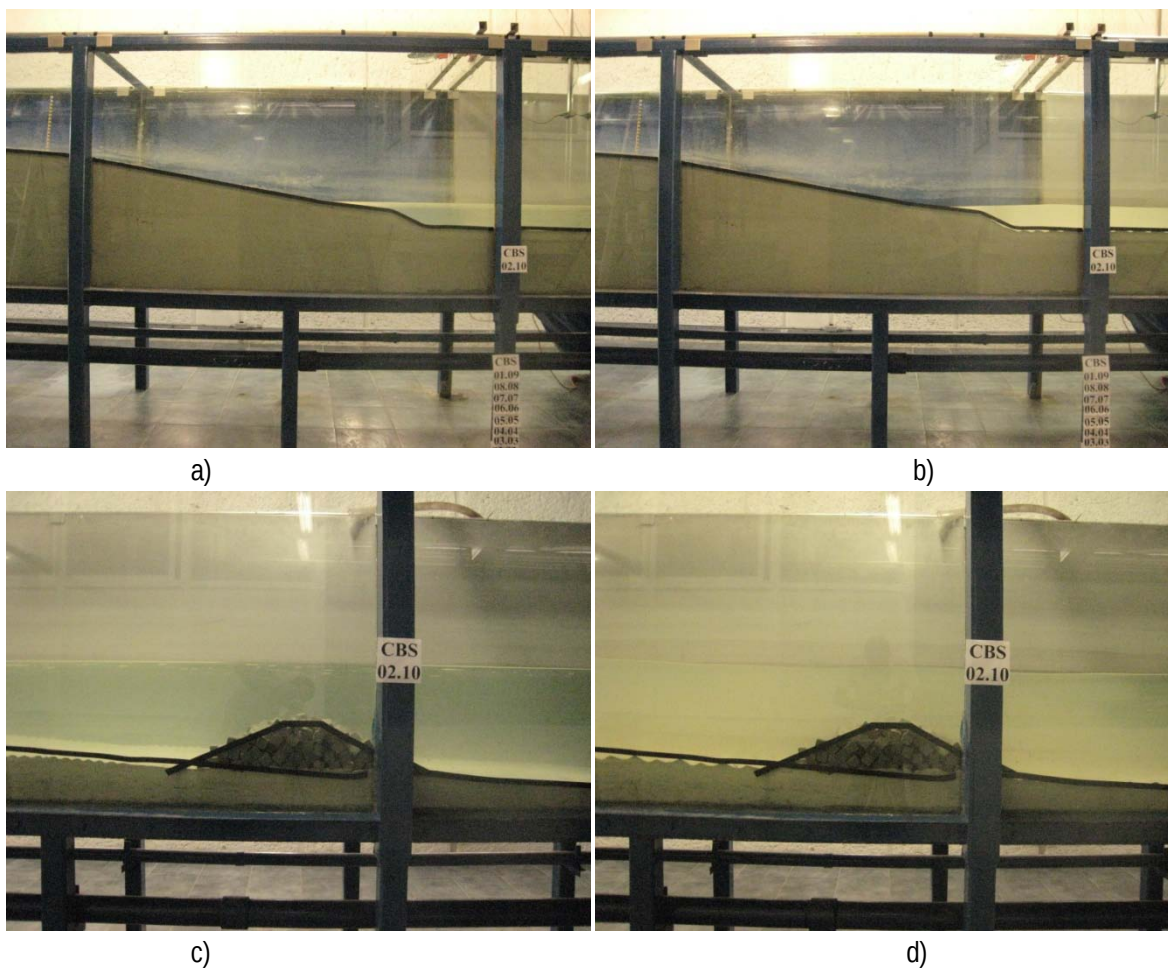


Figura B.20 Condiciones de la prueba CBS0210. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

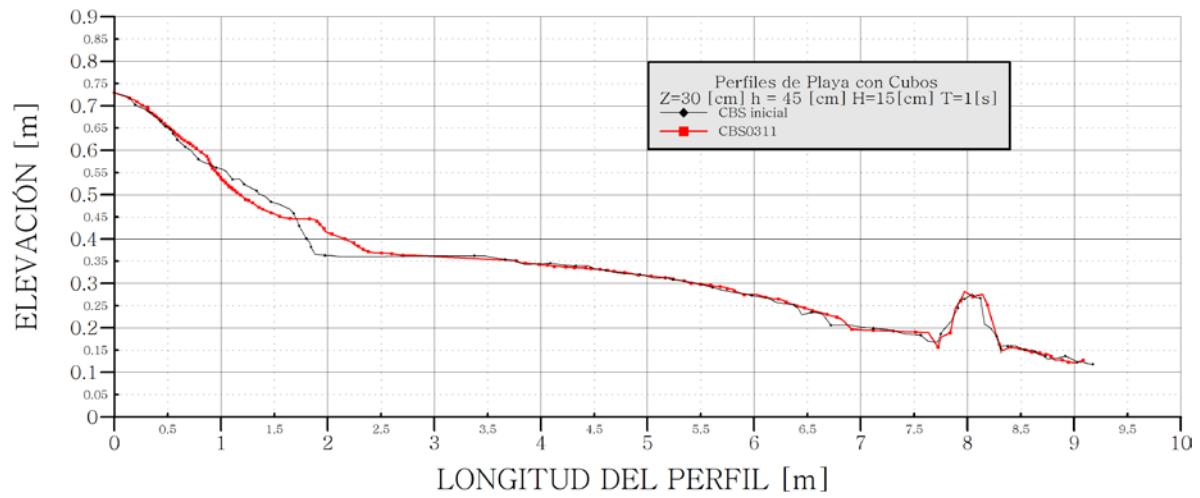


Figura B.21 Perfiles inicial y final de la prueba CBS0311.

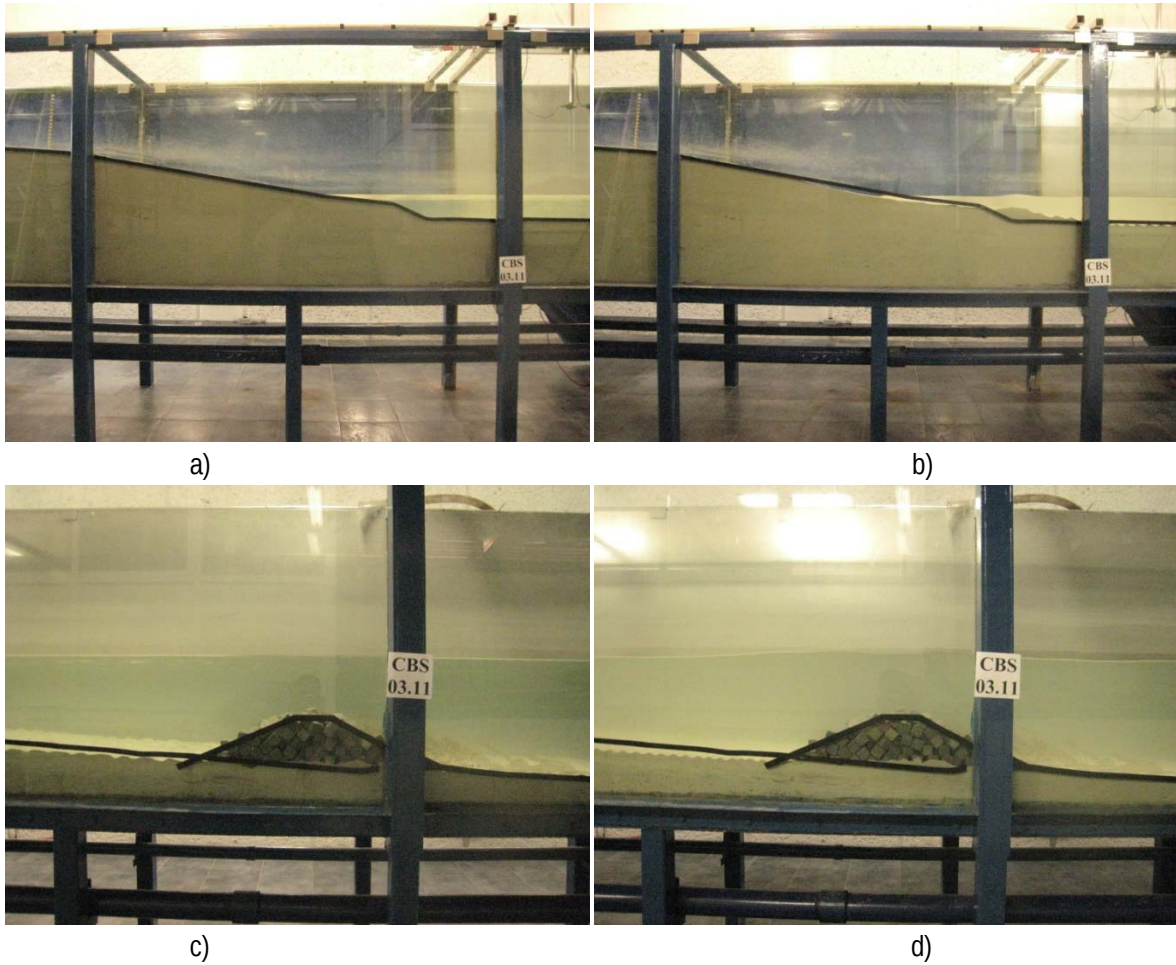


Figura B.22 Condiciones de la prueba CBS0311. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

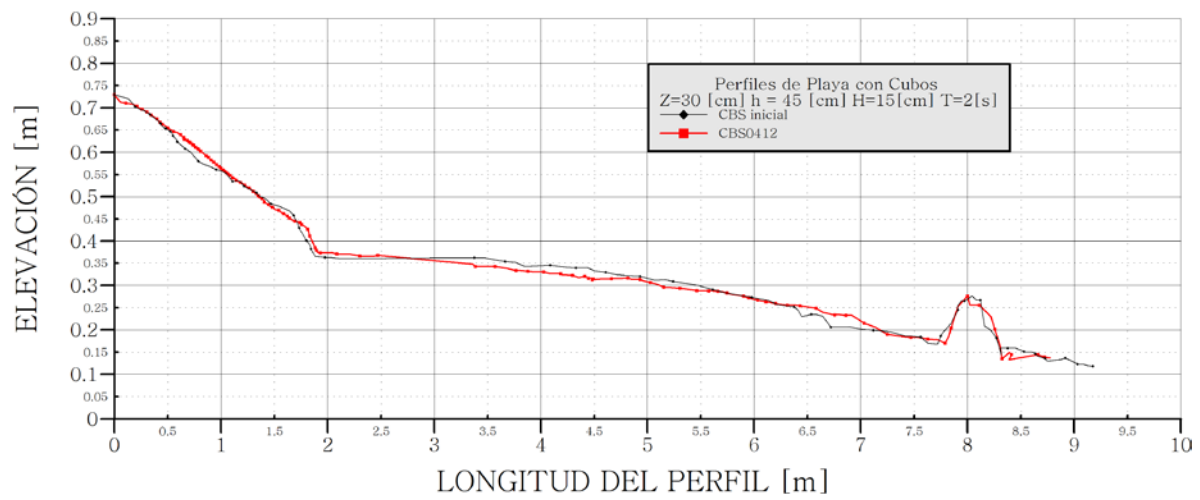


Figura B.23 Perfiles inicial y final de la prueba CBS0412.

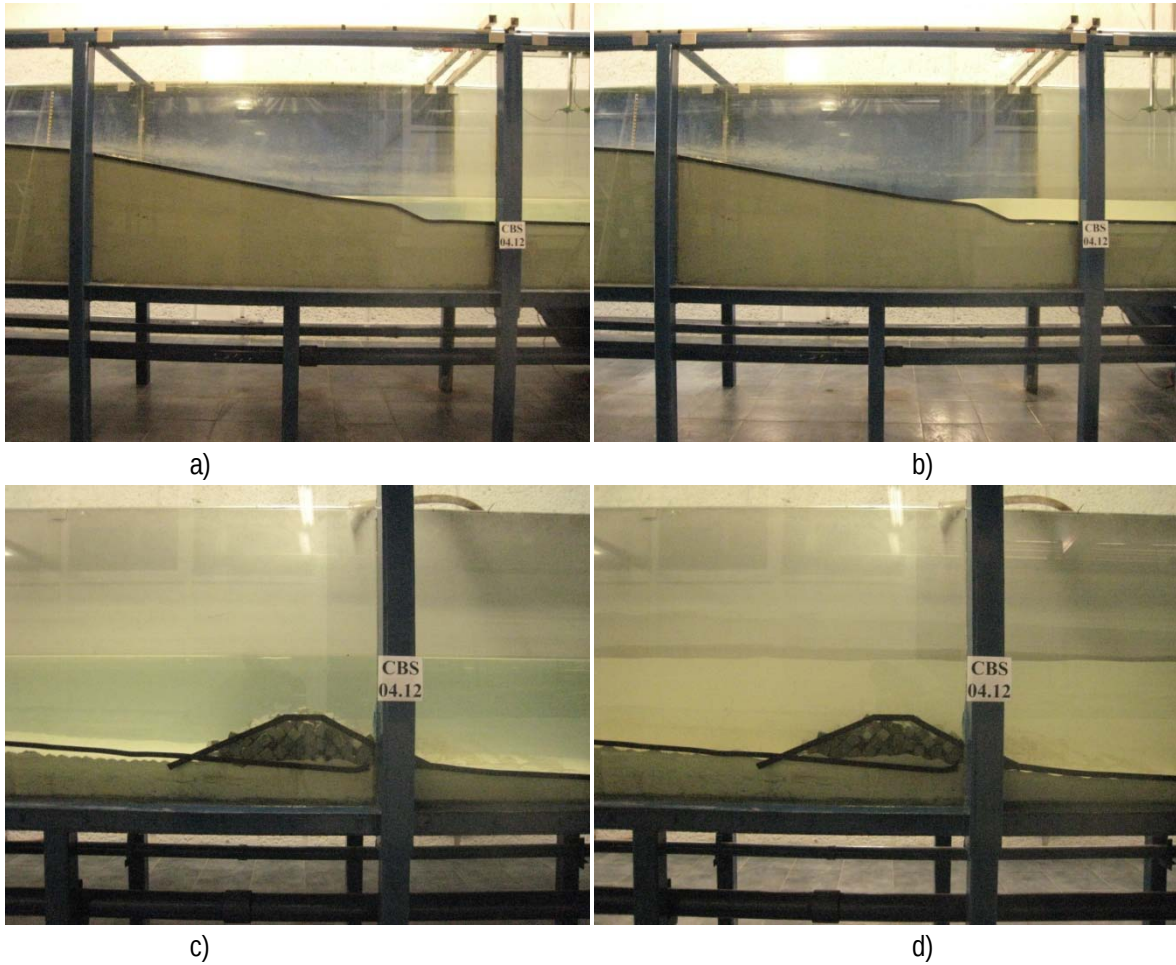


Figura B.24 Condiciones de la prueba CBS0412. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, b) Condición final de la estructura.

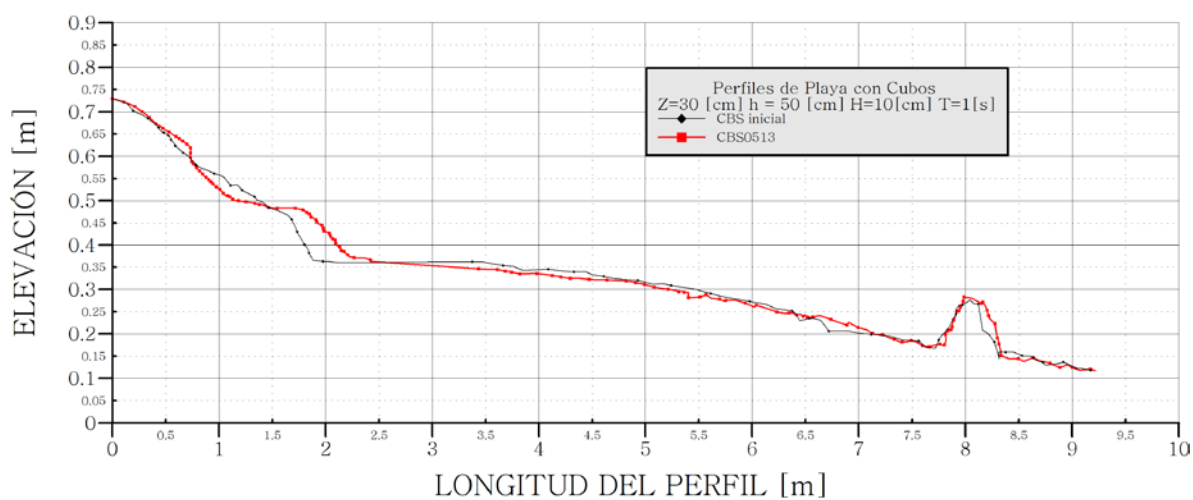


Figura B.25 Perfiles inicial y final de la prueba CBS0513.

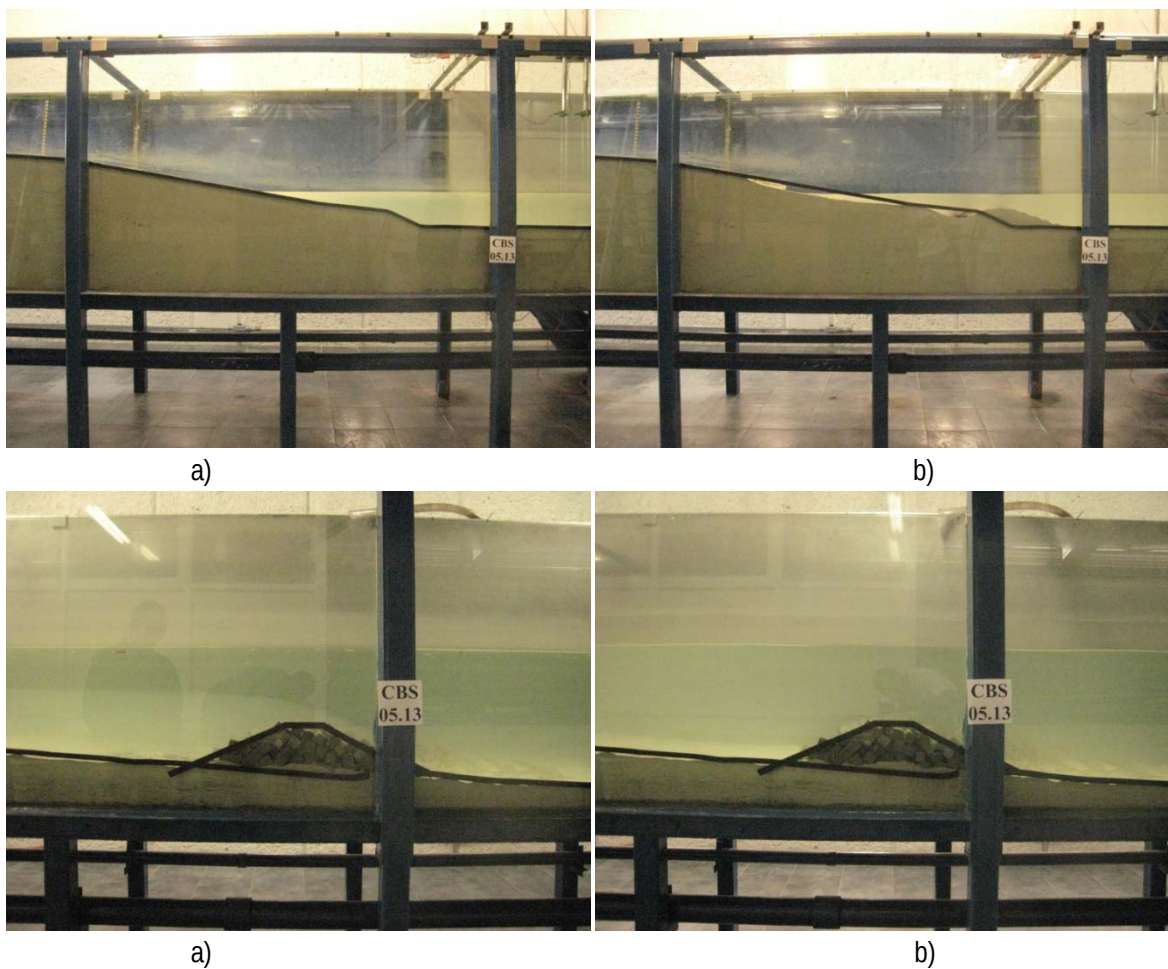


Figura B.26 Condiciones de la prueba CBS0513. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

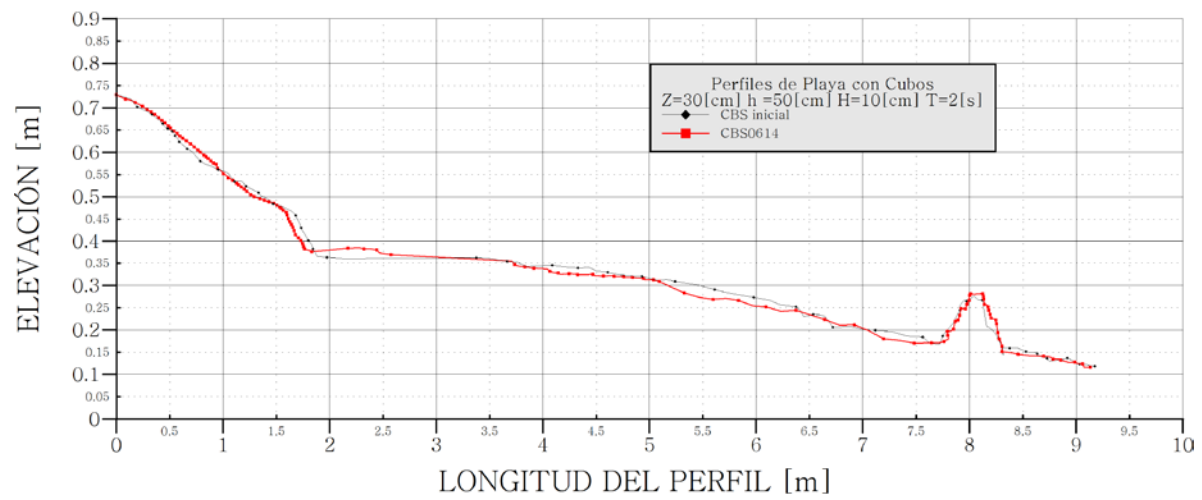


Figura B.27 Perfiles inicial y final de la prueba CBS0614.

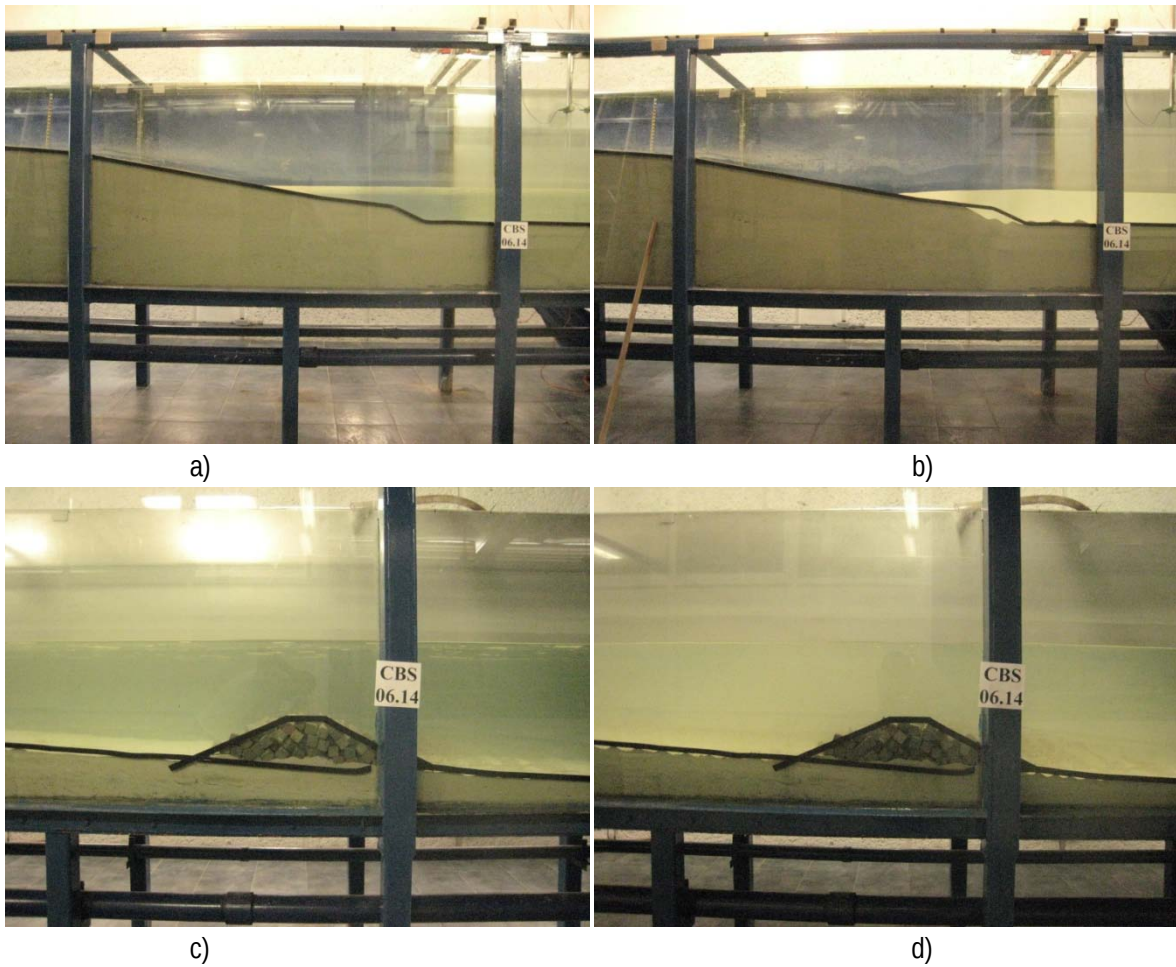


Figura B.28 Condiciones de la prueba CBS0614. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

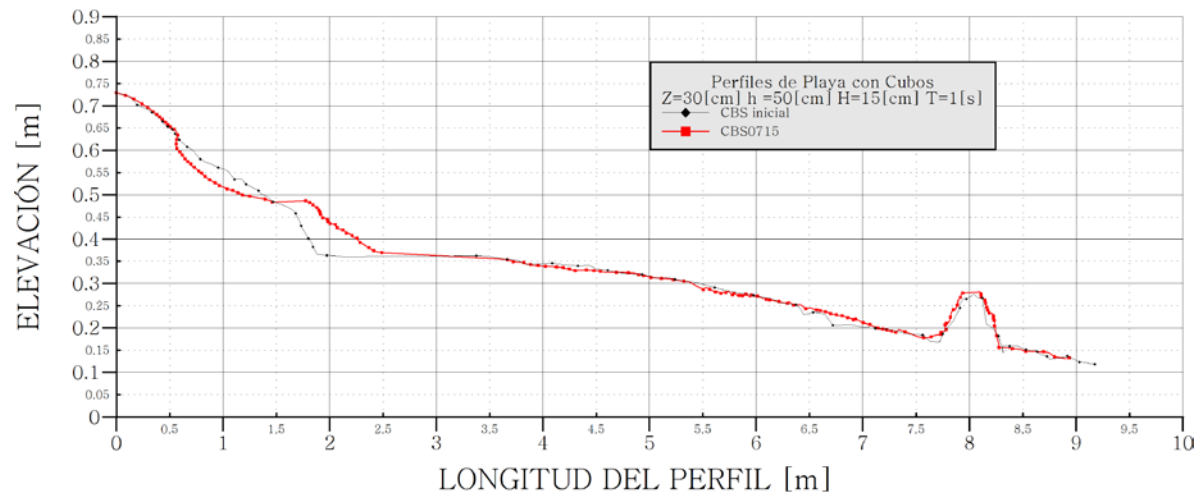


Figura B.29 Perfiles inicial y final de la prueba CBS0715.

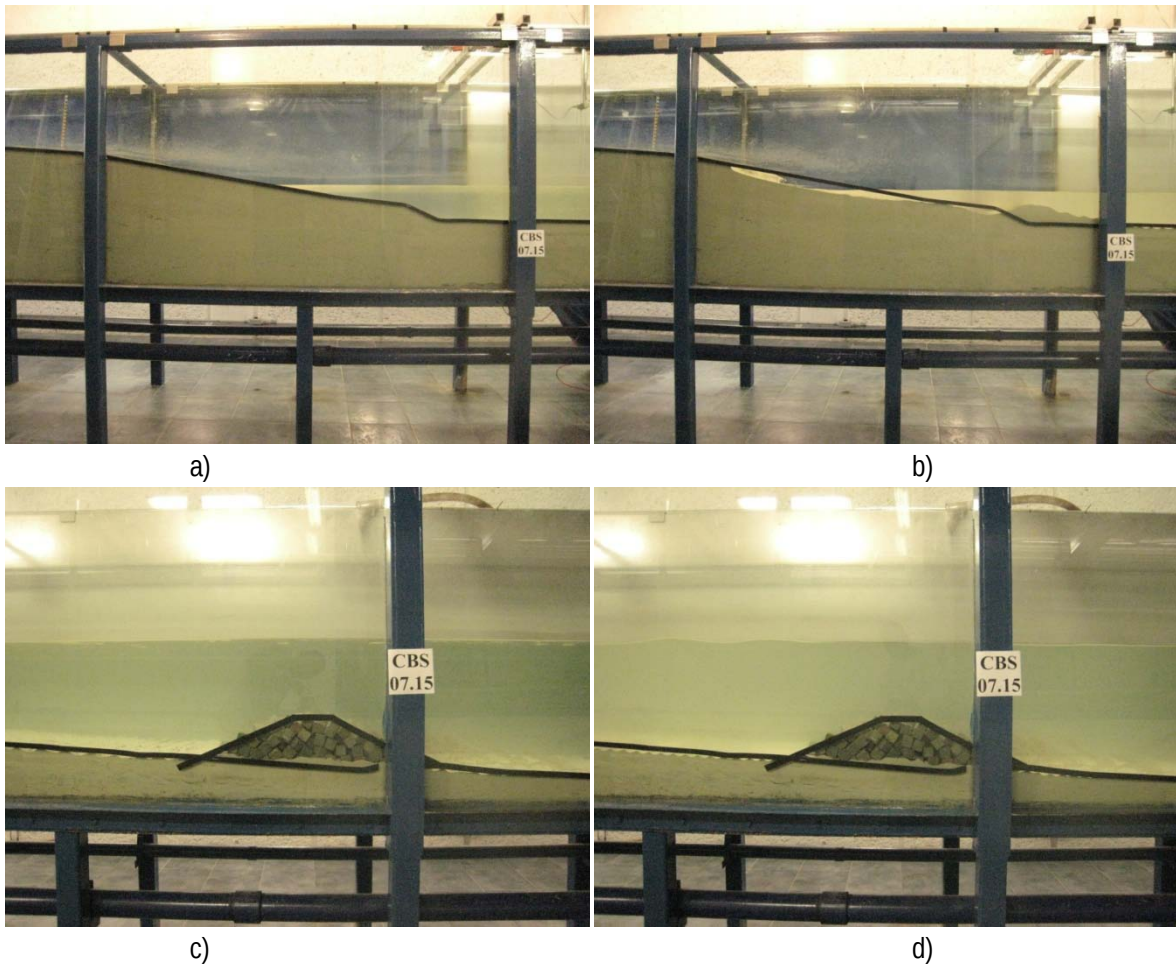


Figura B.30 Condiciones de la prueba CBS0715. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

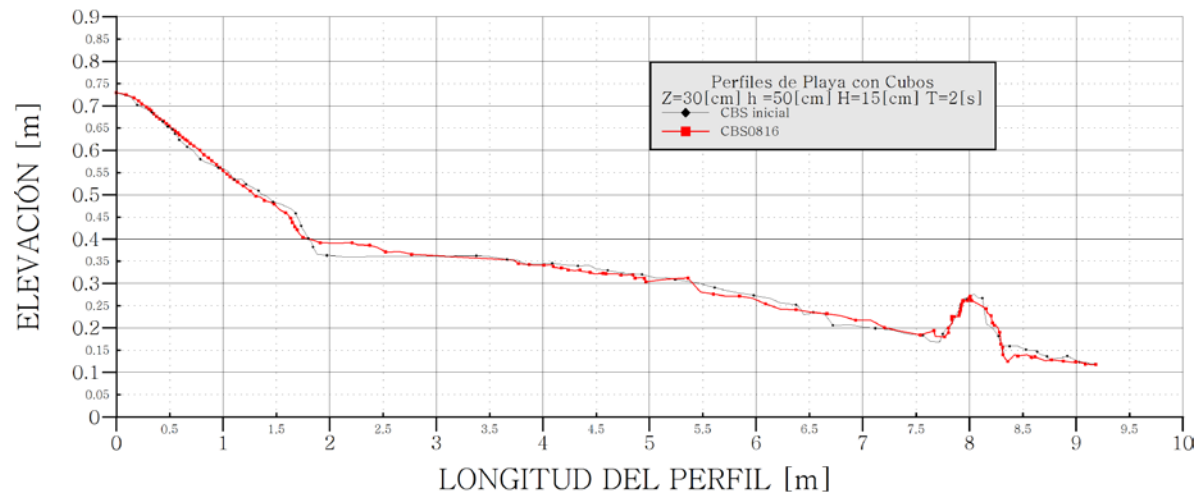


Figura B.31 Perfiles inicial y final de la prueba CBS0816.

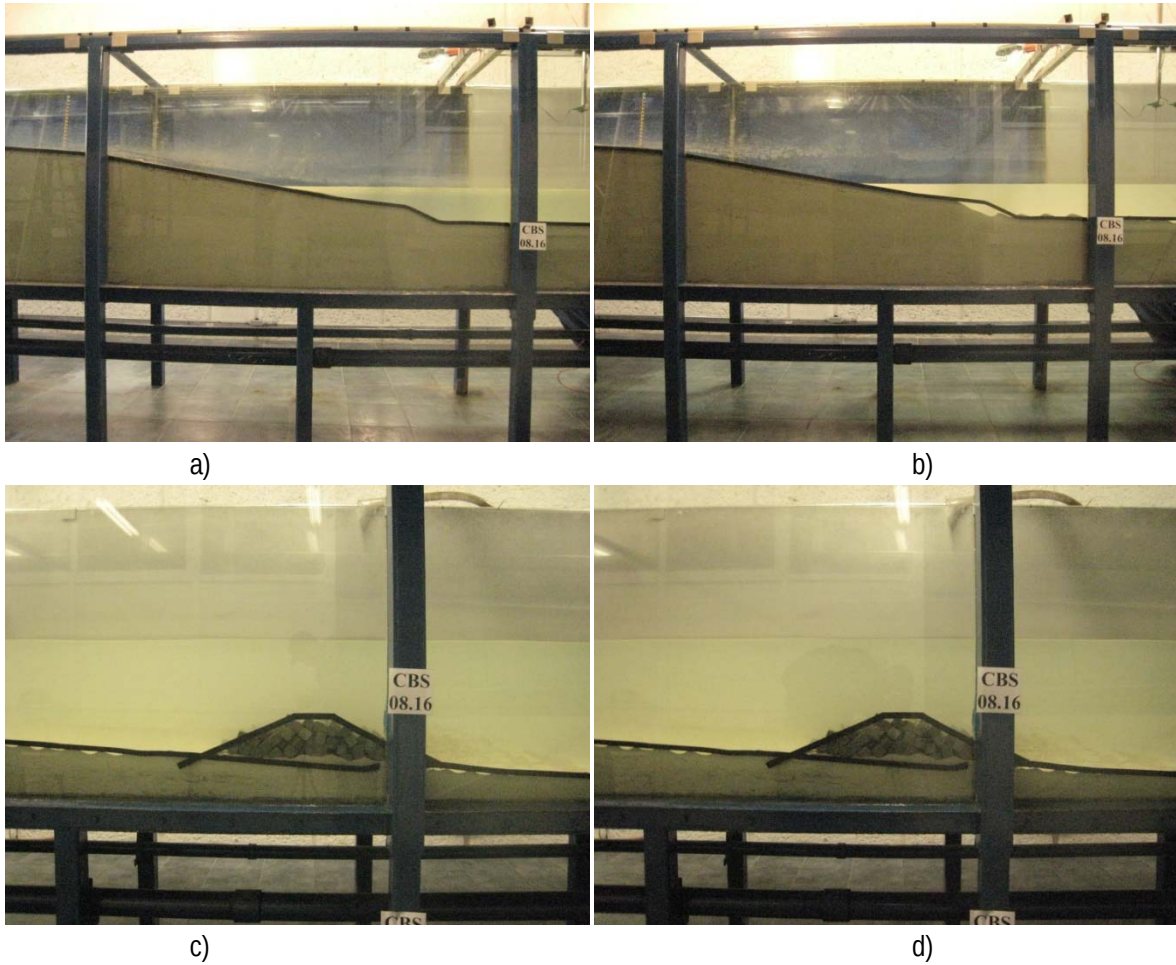
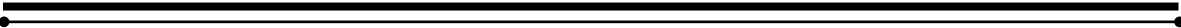
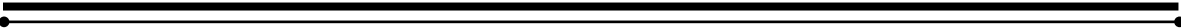


Figura B.32 Condiciones de la prueba CBS0816. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.





Anexo C. Perfiles de segunda etapa

Se presenta el registro de cada uno de los perfiles obtenidos en la segunda etapa de las pruebas; se muestran los casos del comportamiento de playa para todos los materiales a una profundidad de $z=16.5$ [cm]

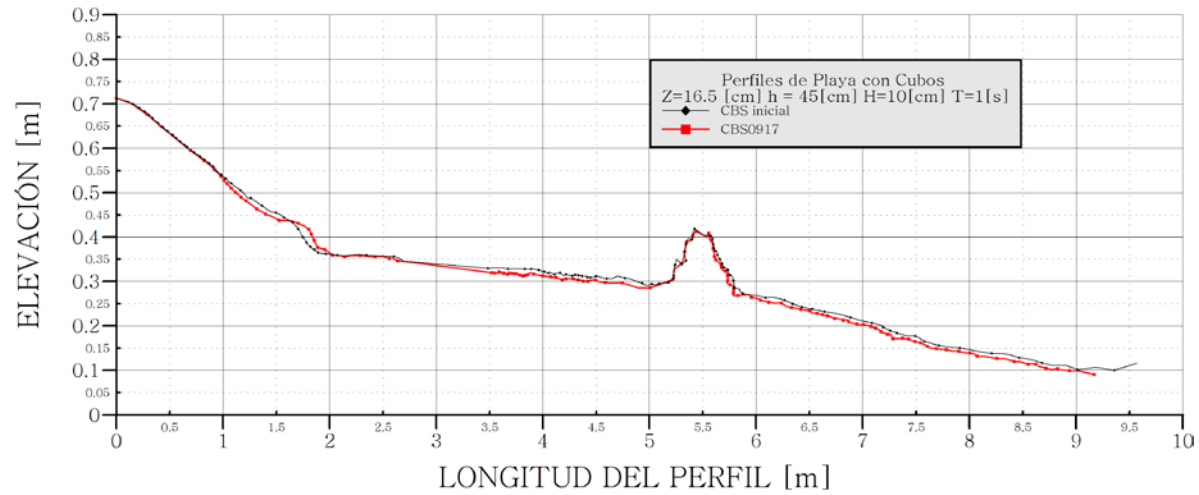


Figura C.1 Perfiles inicial y final de la prueba CBS0917

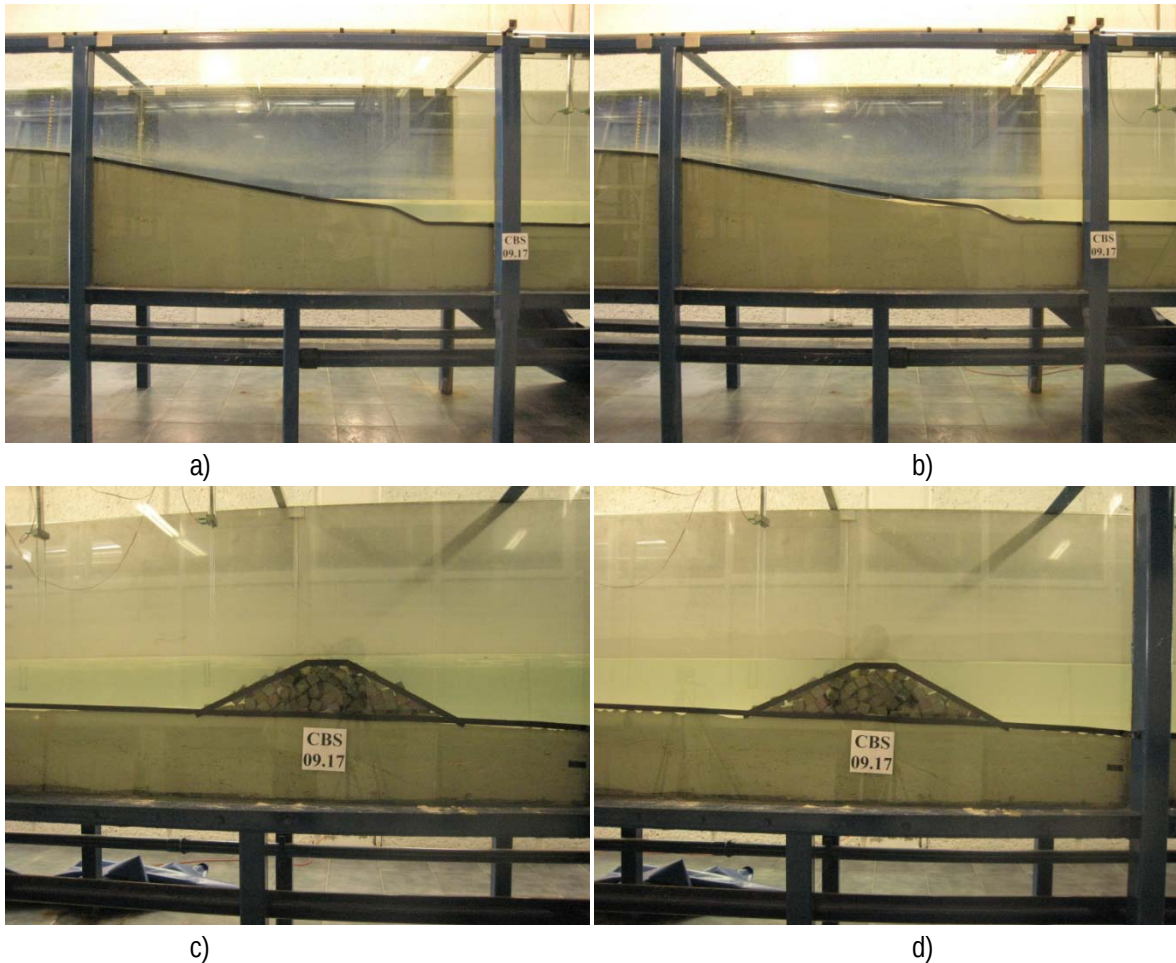


Figura C.2 Condiciones de la prueba CBS0917. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

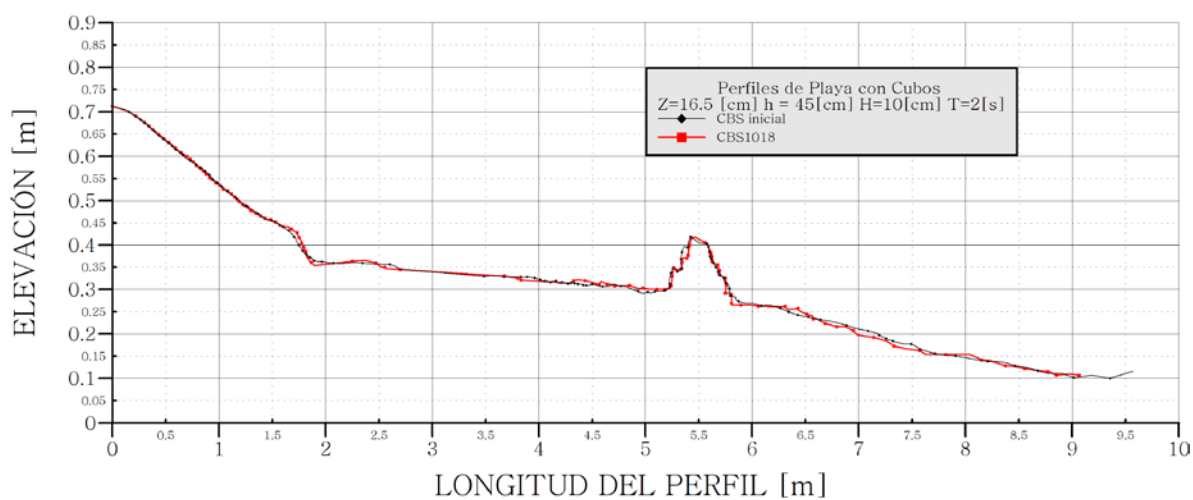


Figura C.3 Perfiles inicial y final de la prueba CBS1018

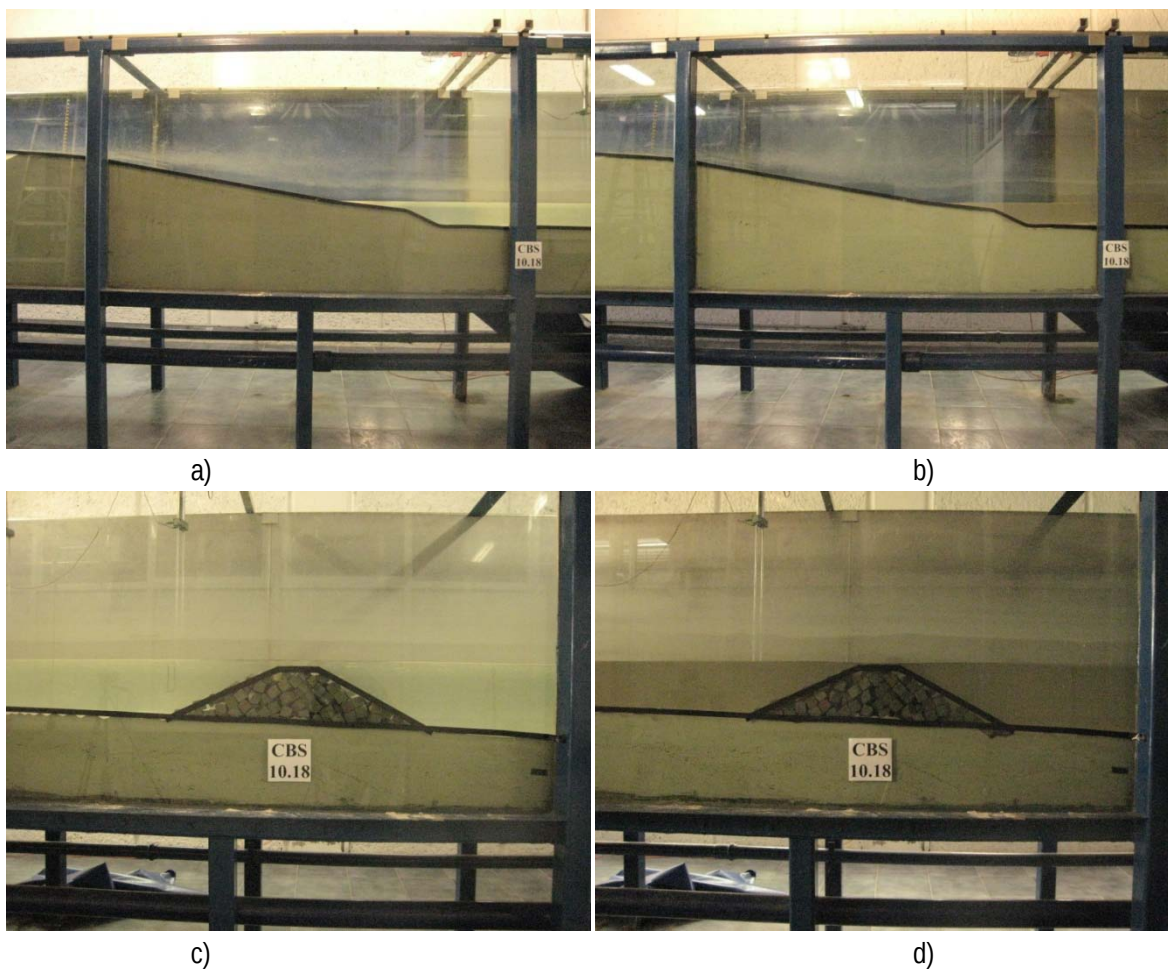


Figura C.4 Condiciones de la prueba CBS1018. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

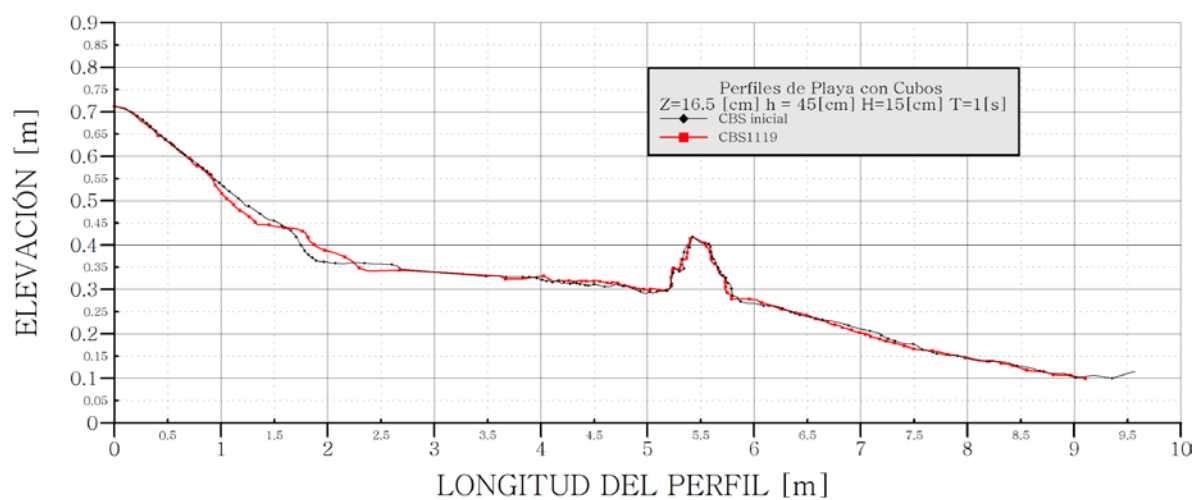


Figura C.5 Perfiles inicial y final de la prueba CBS1119

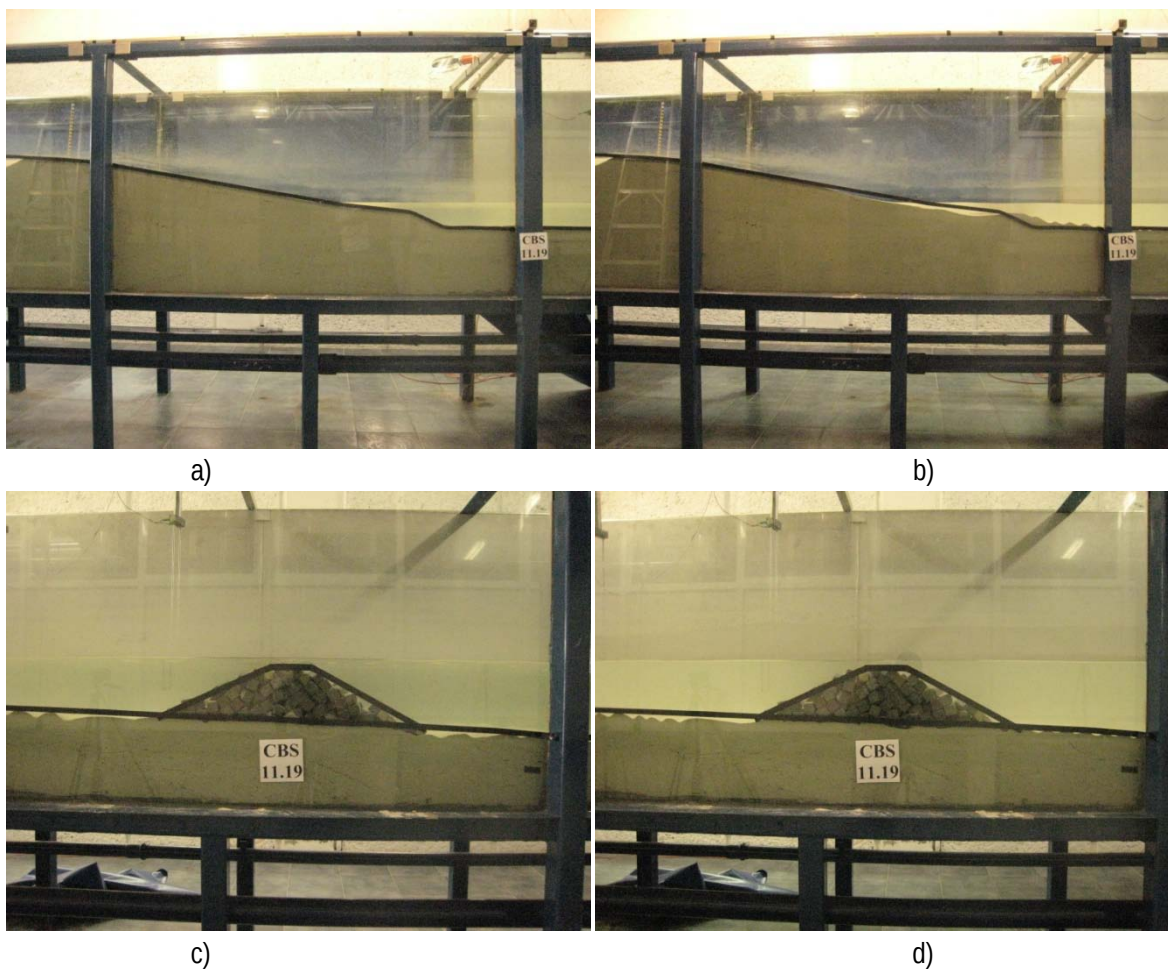


Figura C.6 Condiciones de la prueba CBS1119. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

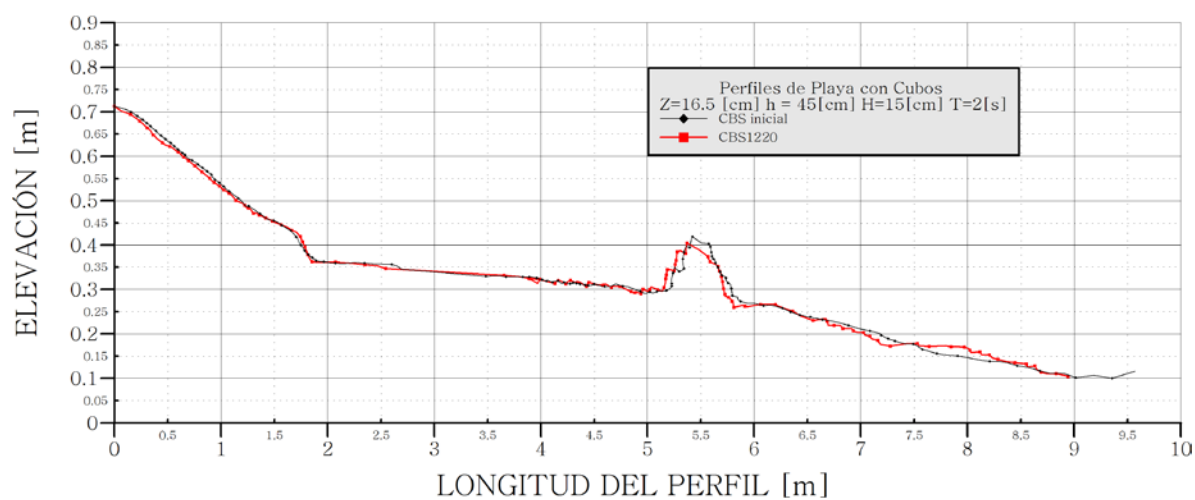


Figura C.7 Perfiles inicial y final de la prueba CBS1220

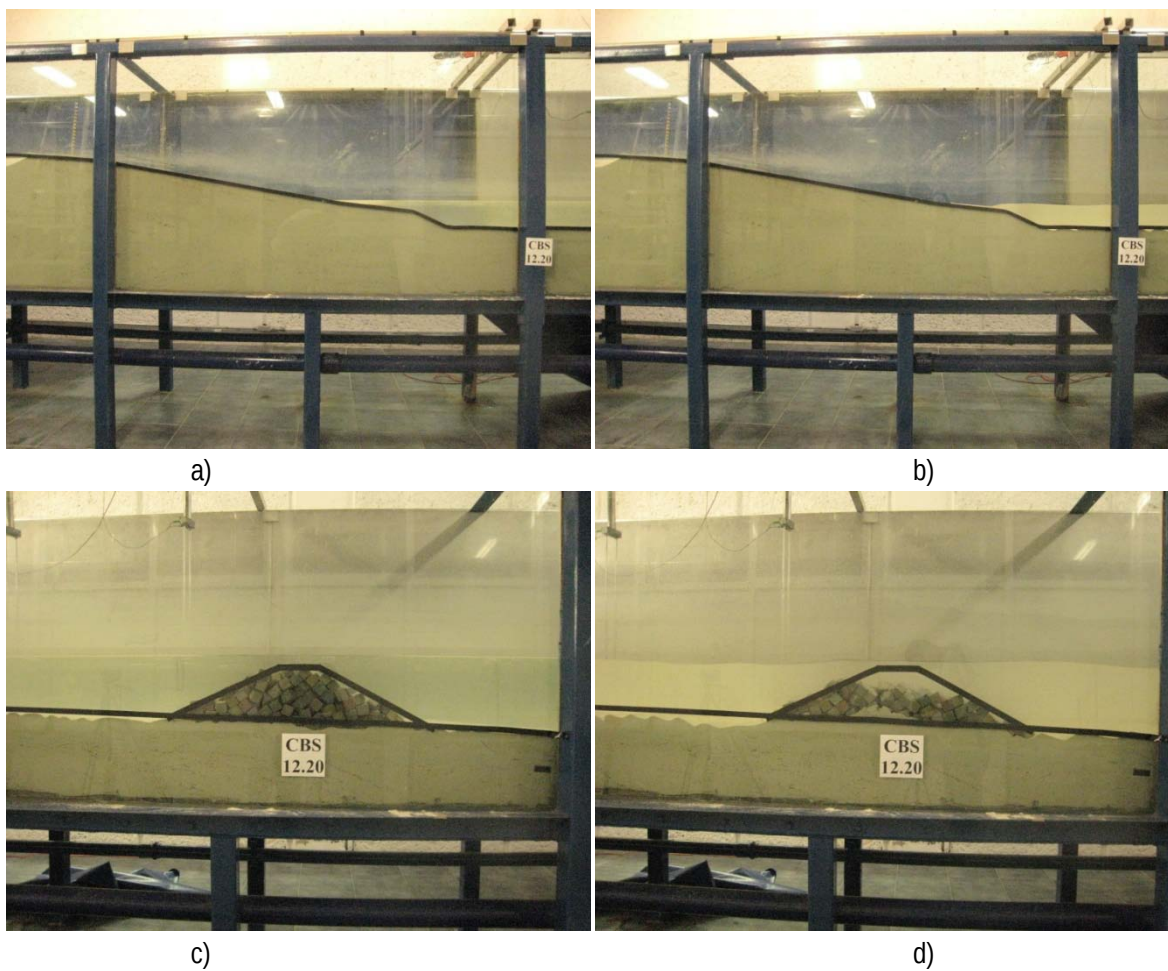


Figura C.8 Condiciones de la prueba CBS1220. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

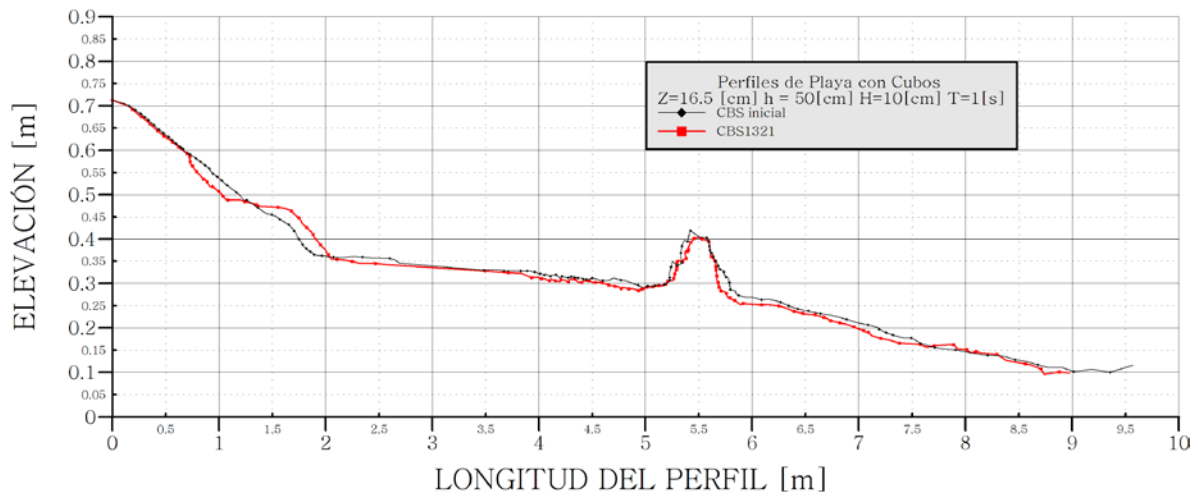


Figura C.9 Perfiles inicial y final de la prueba CBS1321

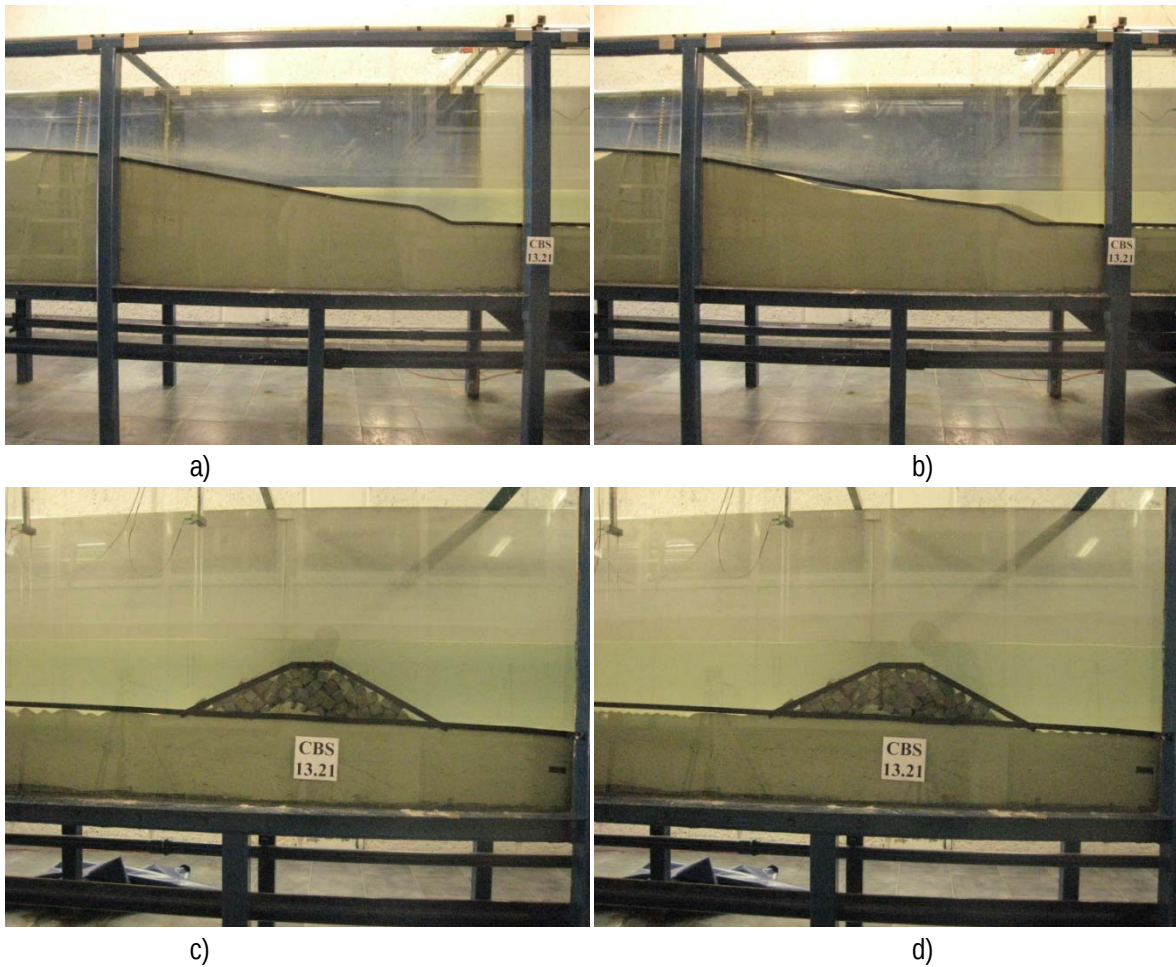


Figura C.10 Condiciones de la prueba CBS1321. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

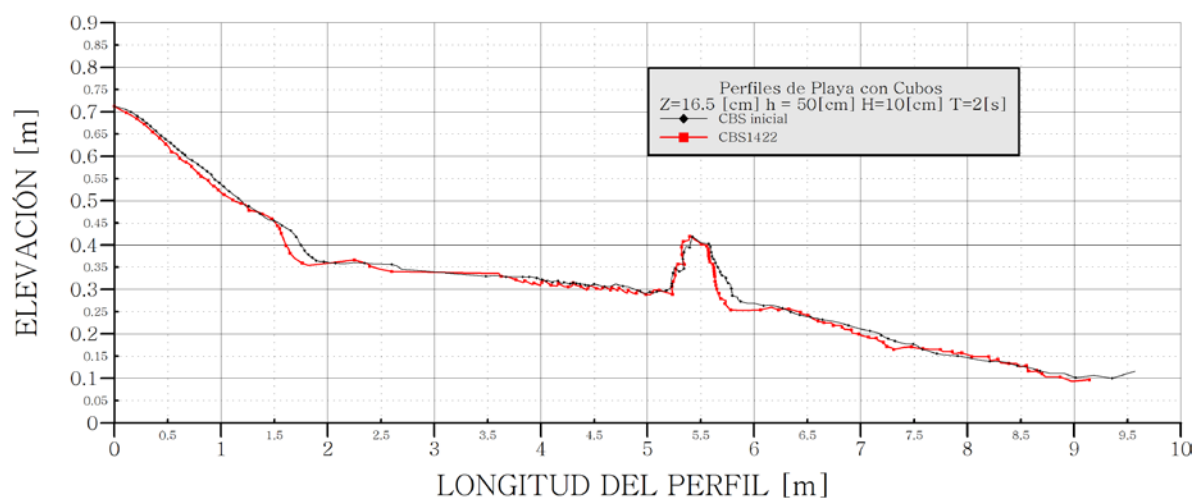


Figura C.11 Perfiles inicial y final de la prueba CBS1422

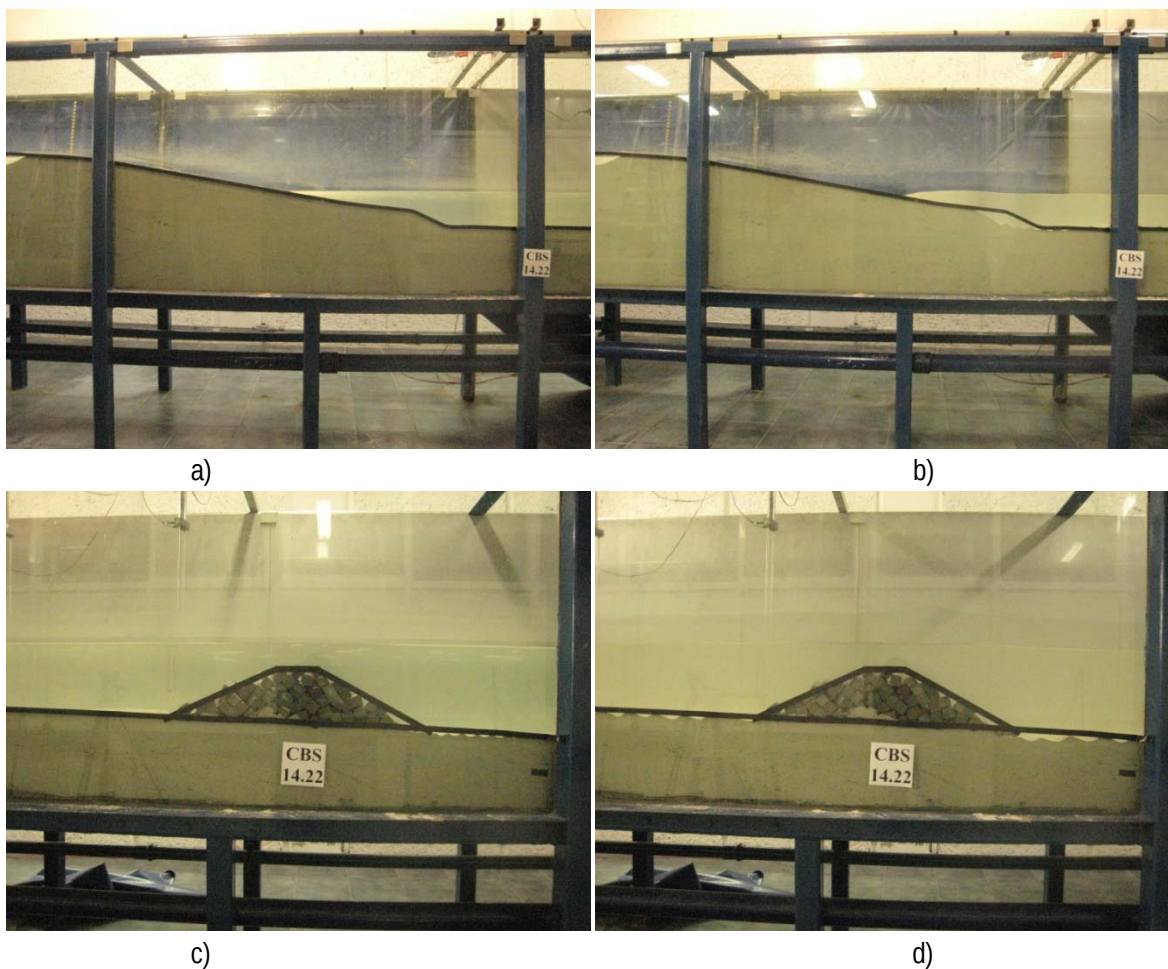


Figura C.12 Condiciones de la prueba CBS1422. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

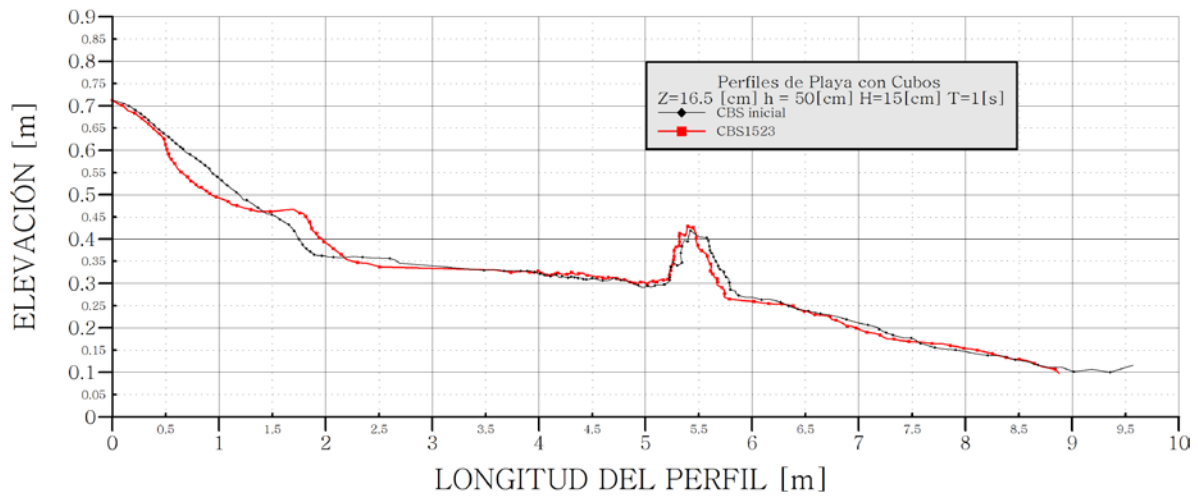


Figura C.13 Perfiles inicial y final de la prueba CBS1523

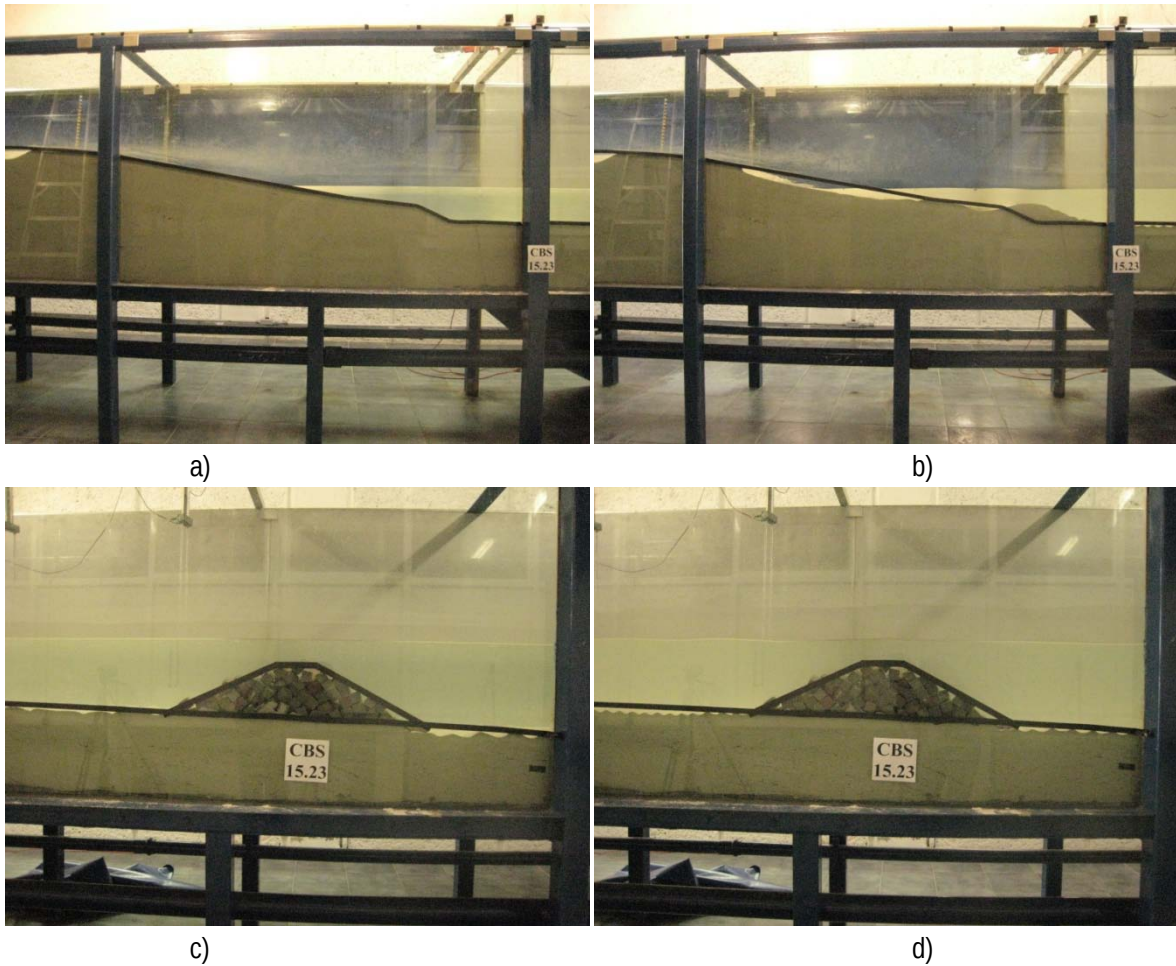


Figura C.14 Condiciones de la prueba CBS1523. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

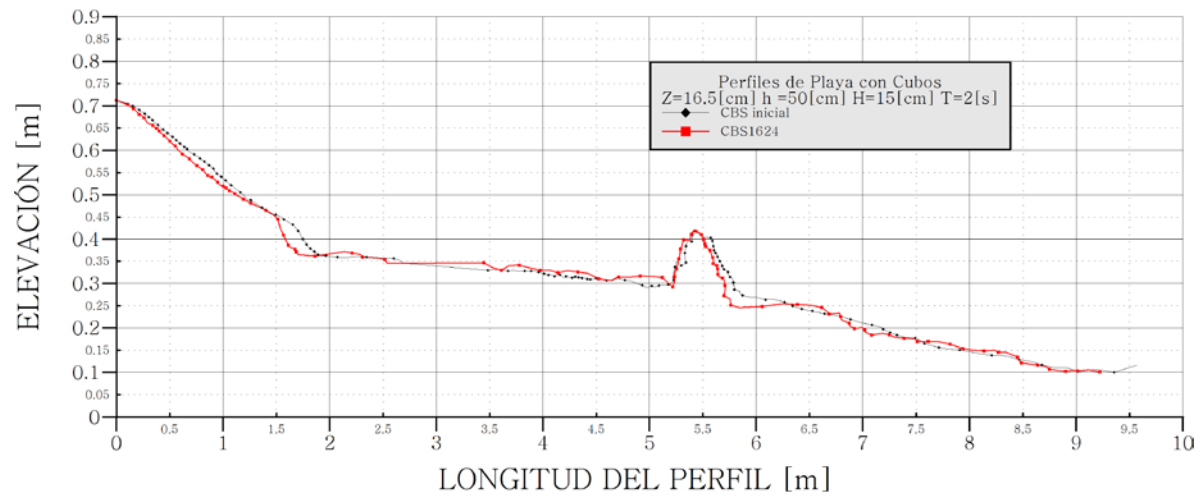


Figura C.15 Perfiles inicial y final de la prueba CBS1624

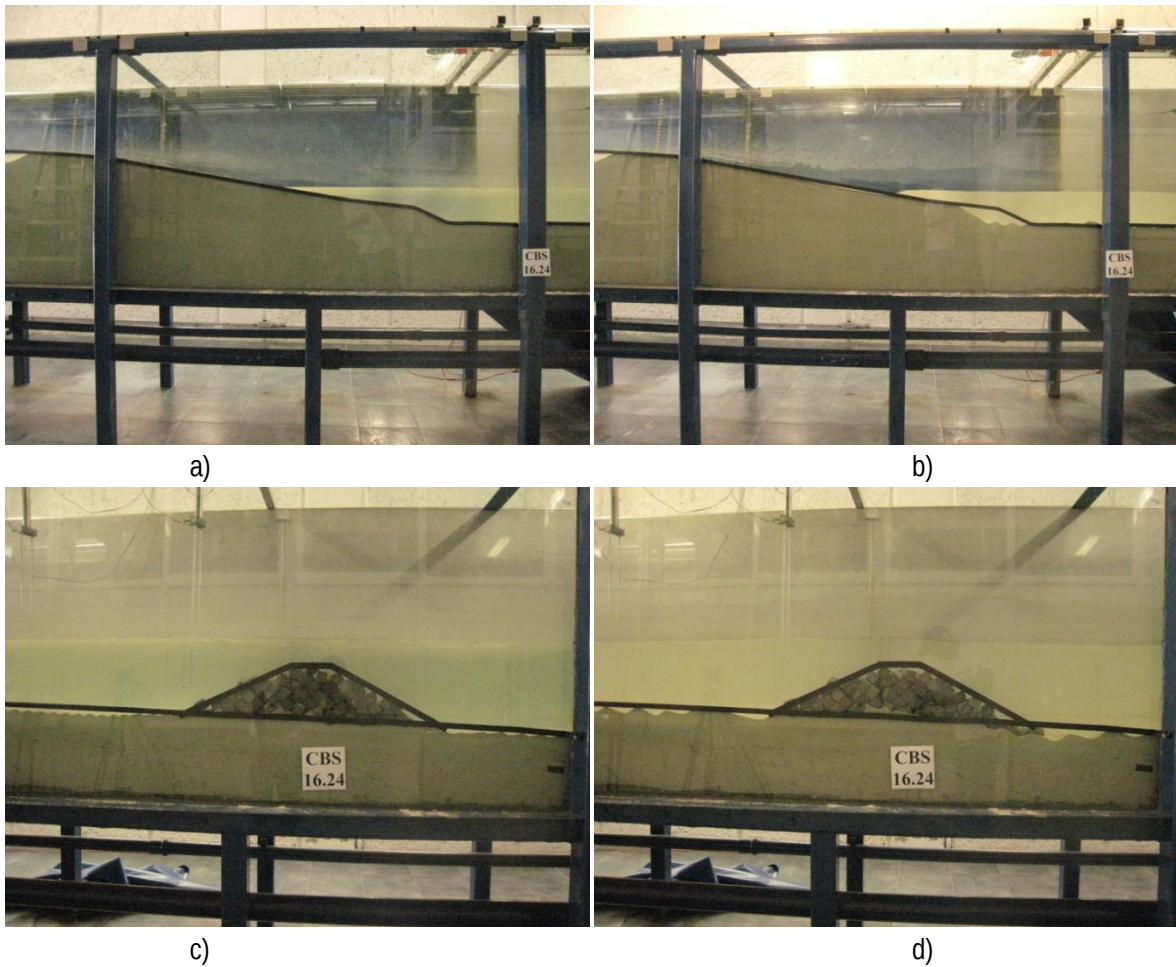


Figura C.16 Condiciones de la prueba CBS1624. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

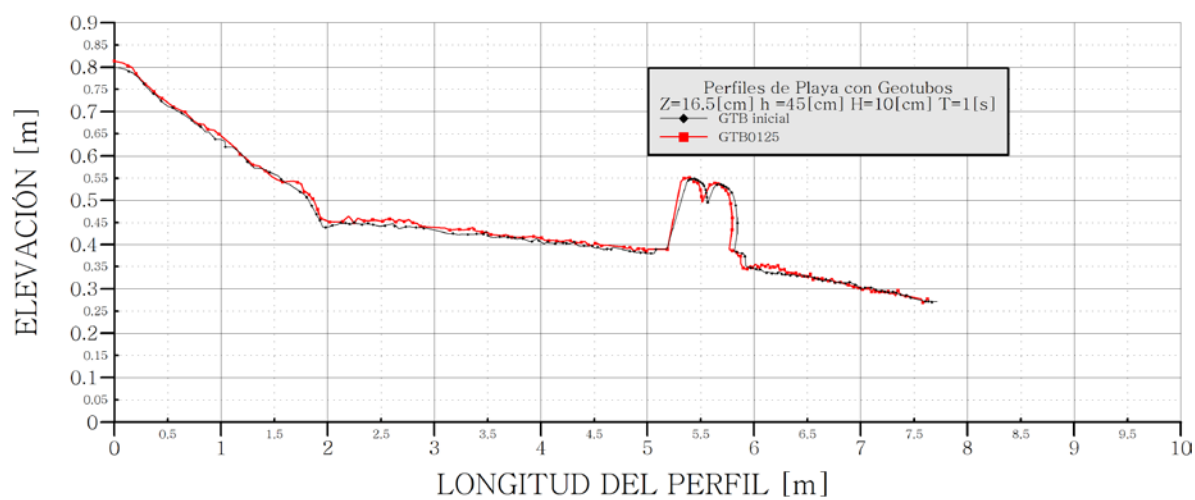


Figura C.17 Perfiles inicial y final de la prueba GTBS0125

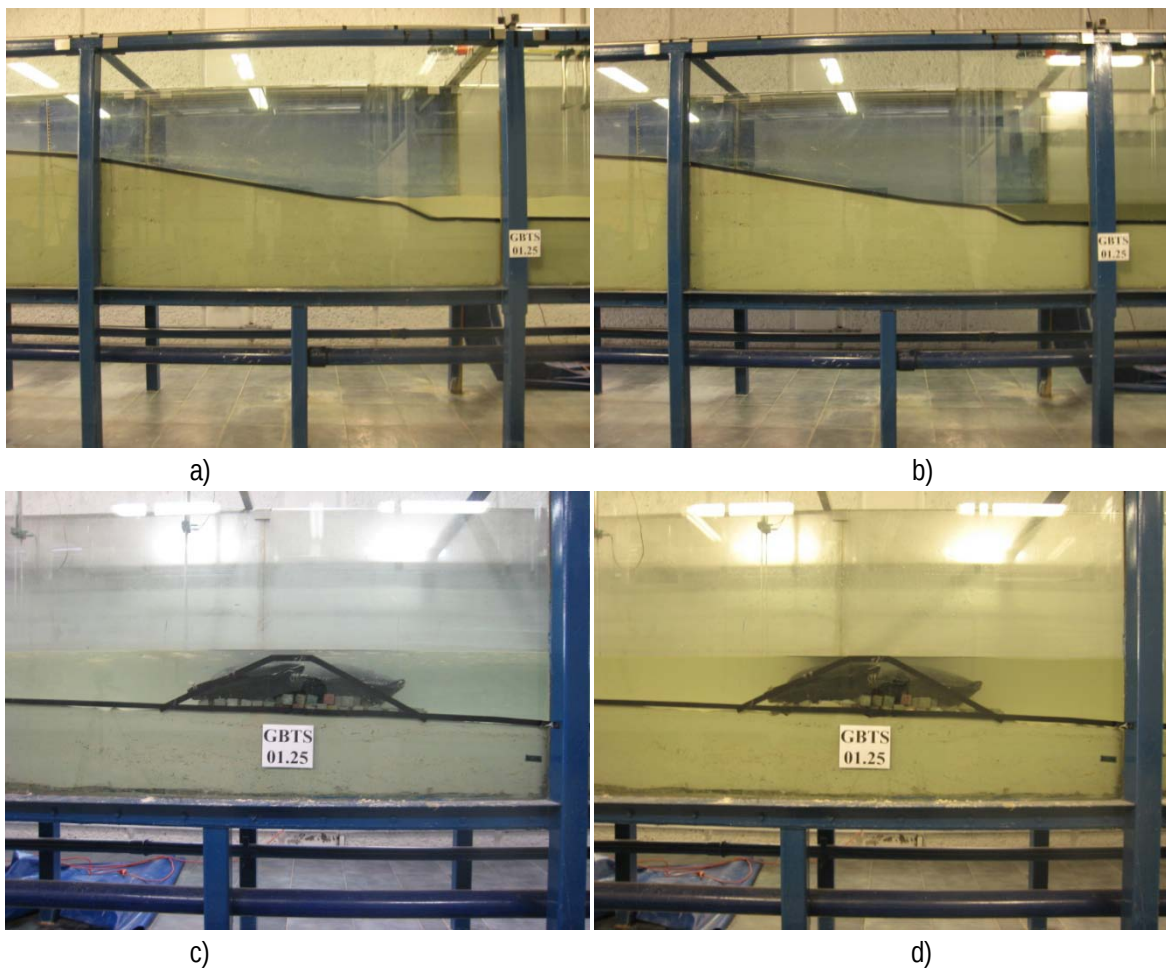


Figura C.18 Condiciones de la prueba GTBS0125. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

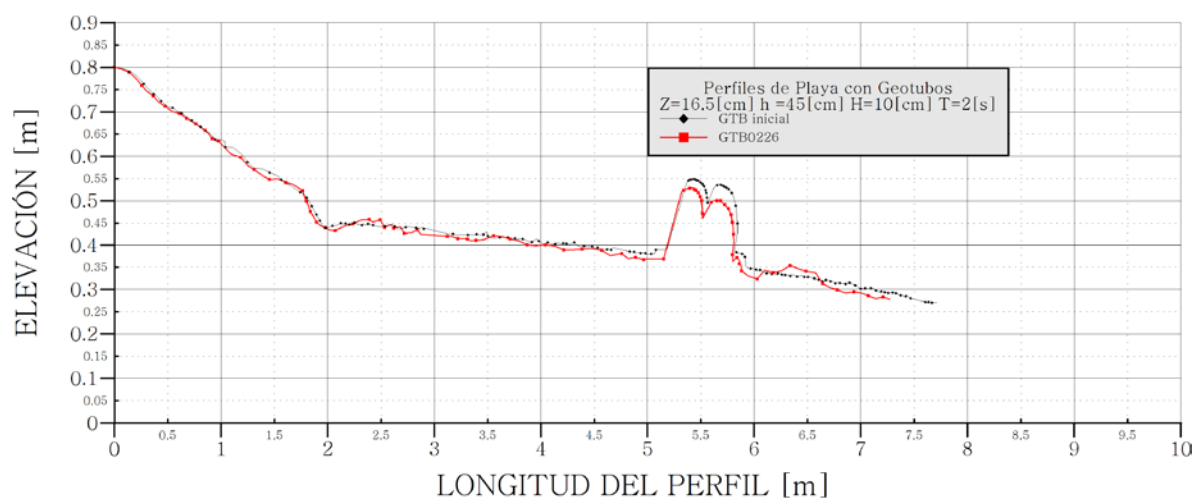


Figura C.19 Perfiles inicial y final de la prueba GTBS0226

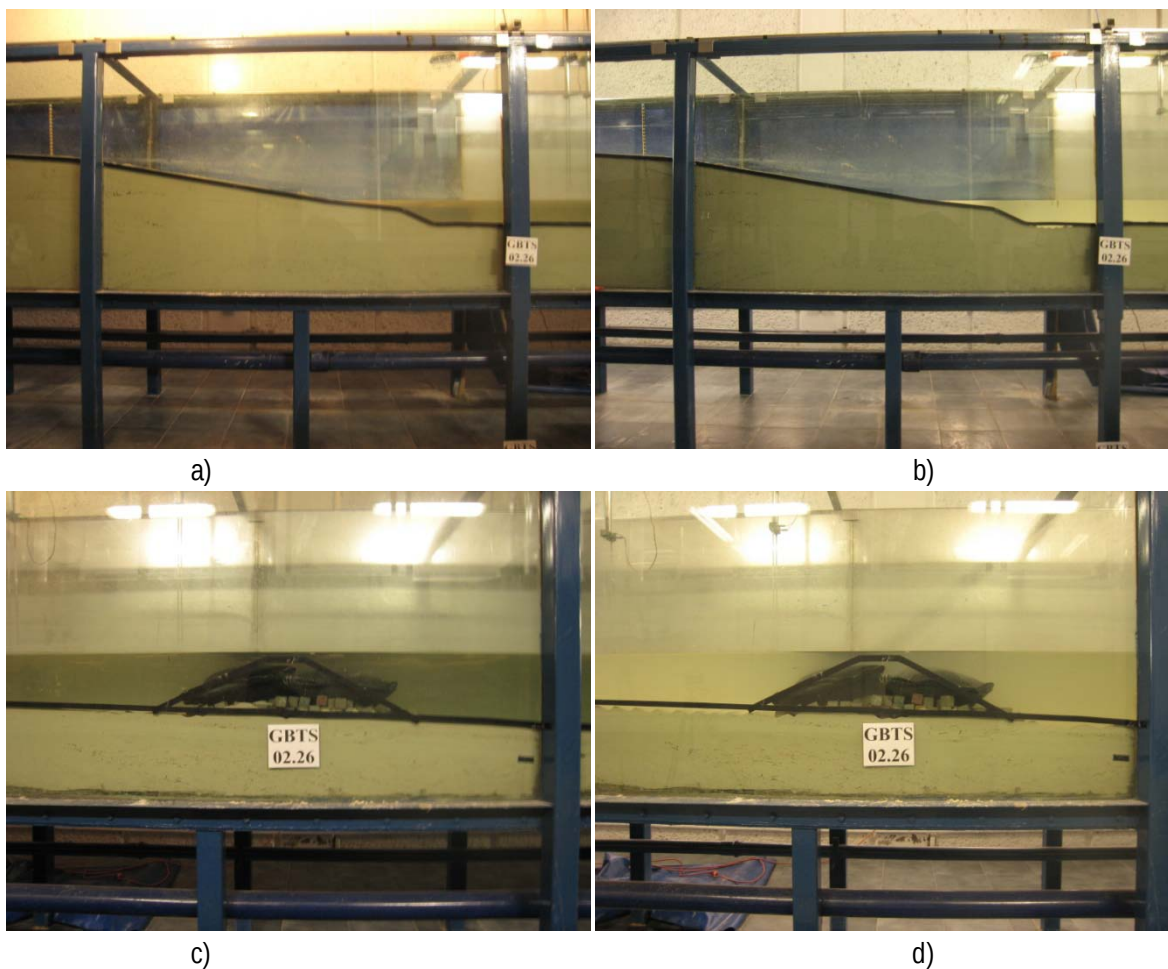


Figura C.20 Condiciones de la prueba GTBS0226. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

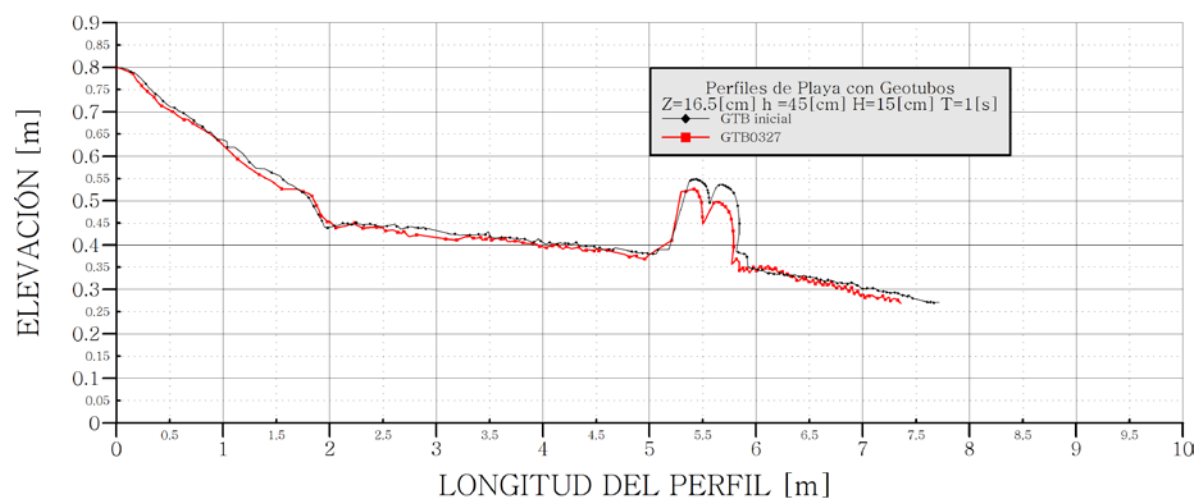


Figura C.21 Perfiles inicial y final de la prueba GTBS0327

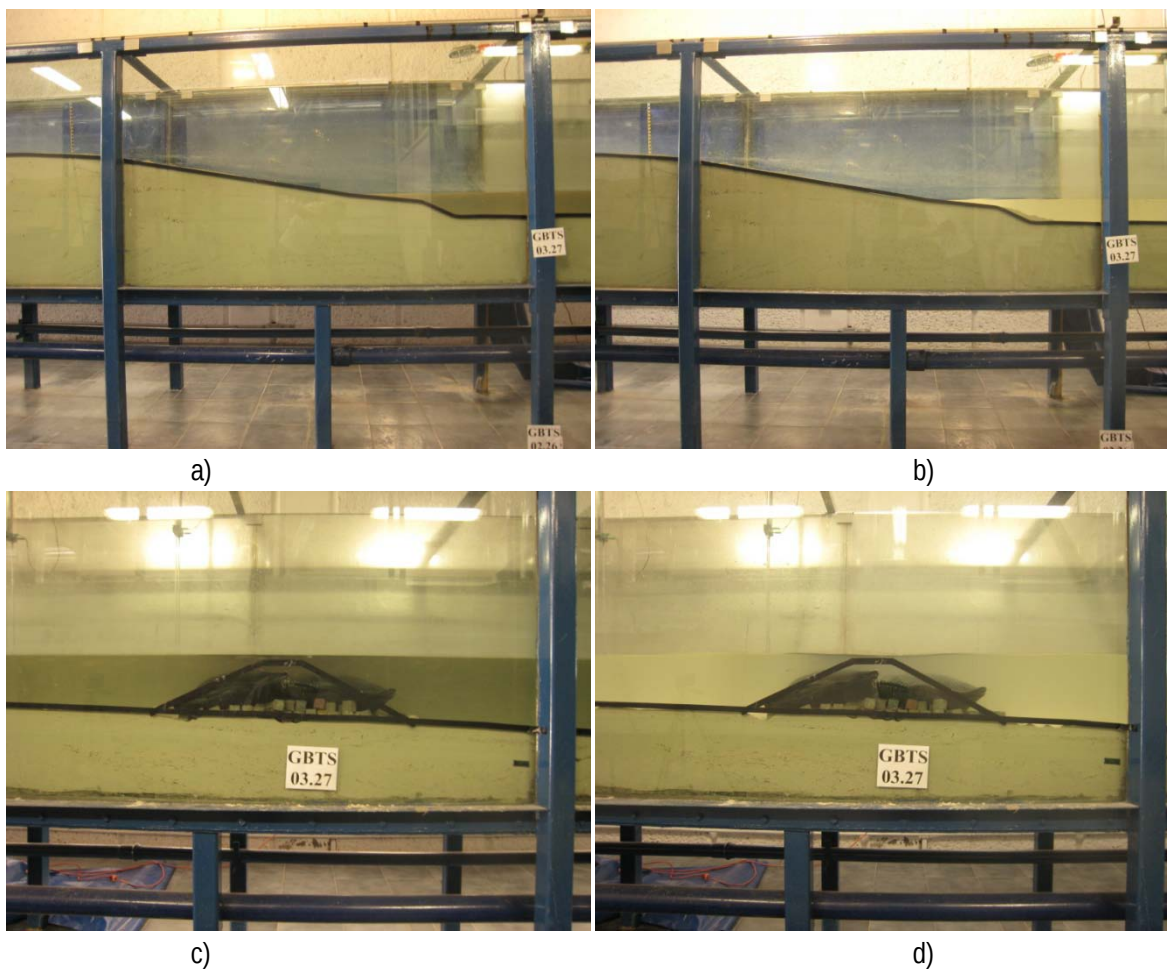


Figura C.22 Condiciones de la prueba GTBS0327. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

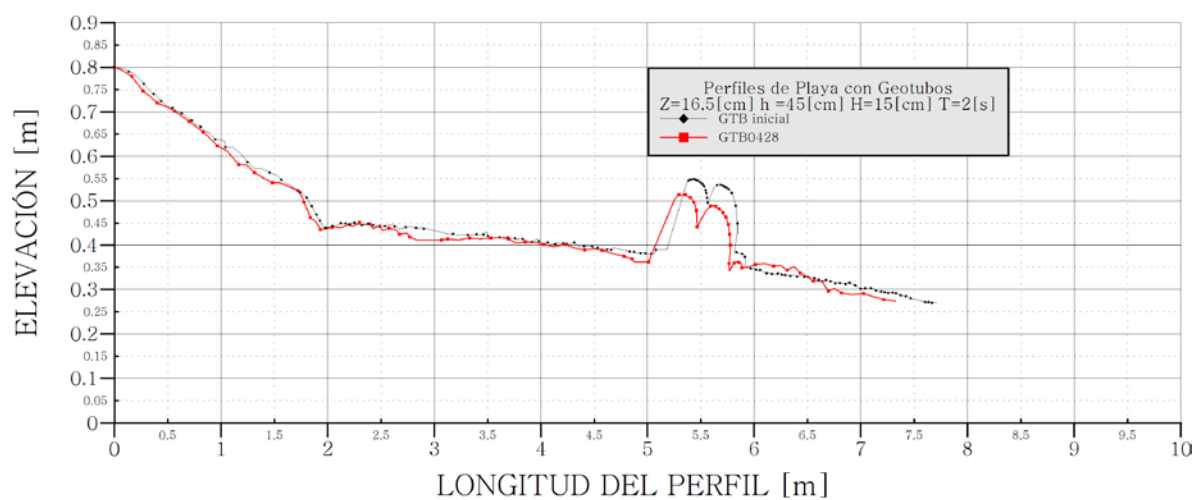


Figura C.23 Perfiles inicial y final de la prueba GTBS0428

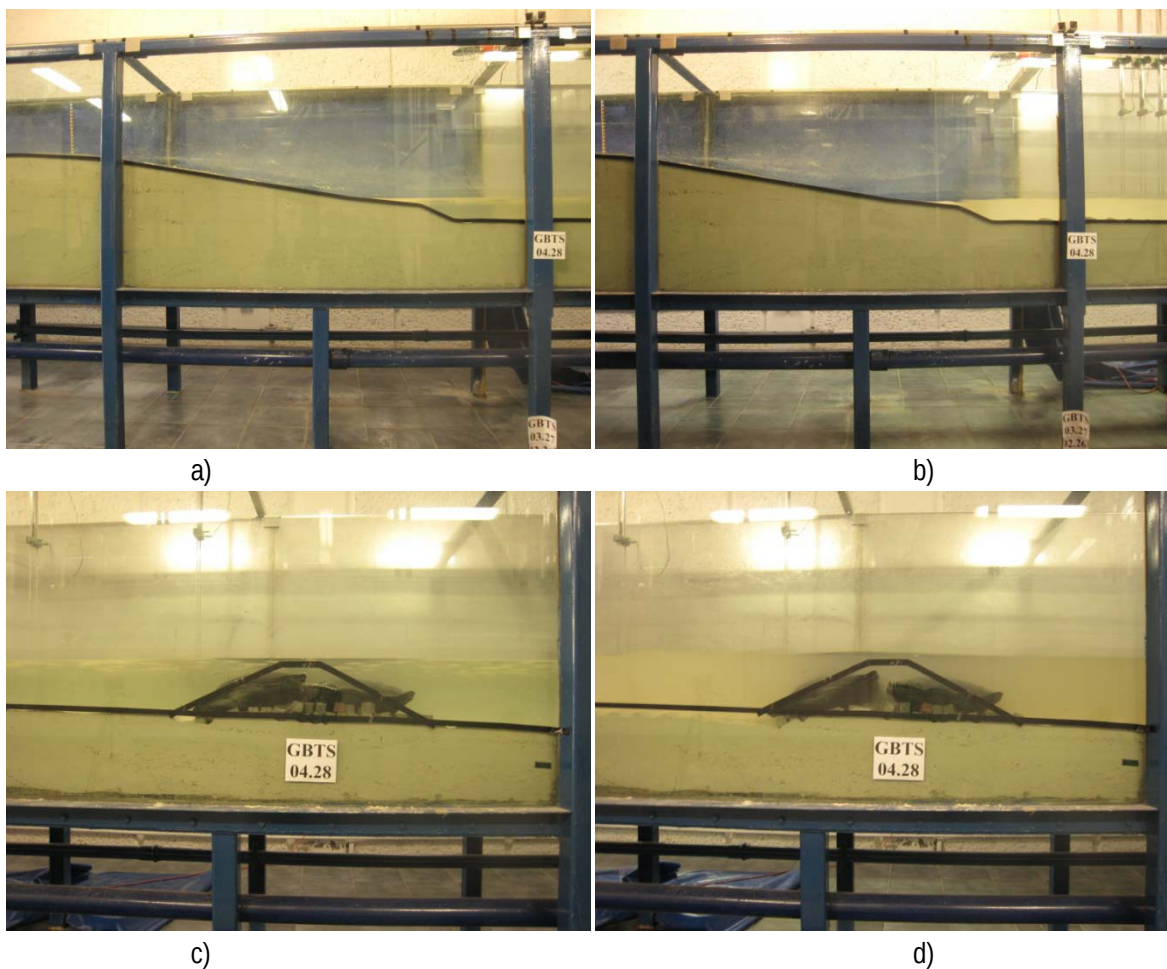


Figura C.24 Condiciones de la prueba GTBS0428. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, b) Condición final de la estructura.

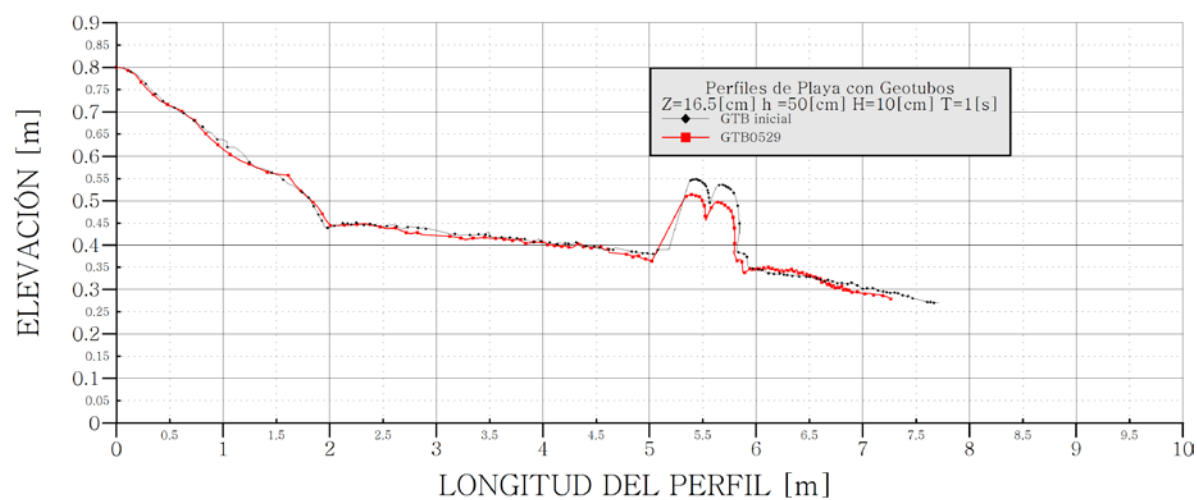


Figura C.25 Perfiles inicial y final de la prueba GTBS0529

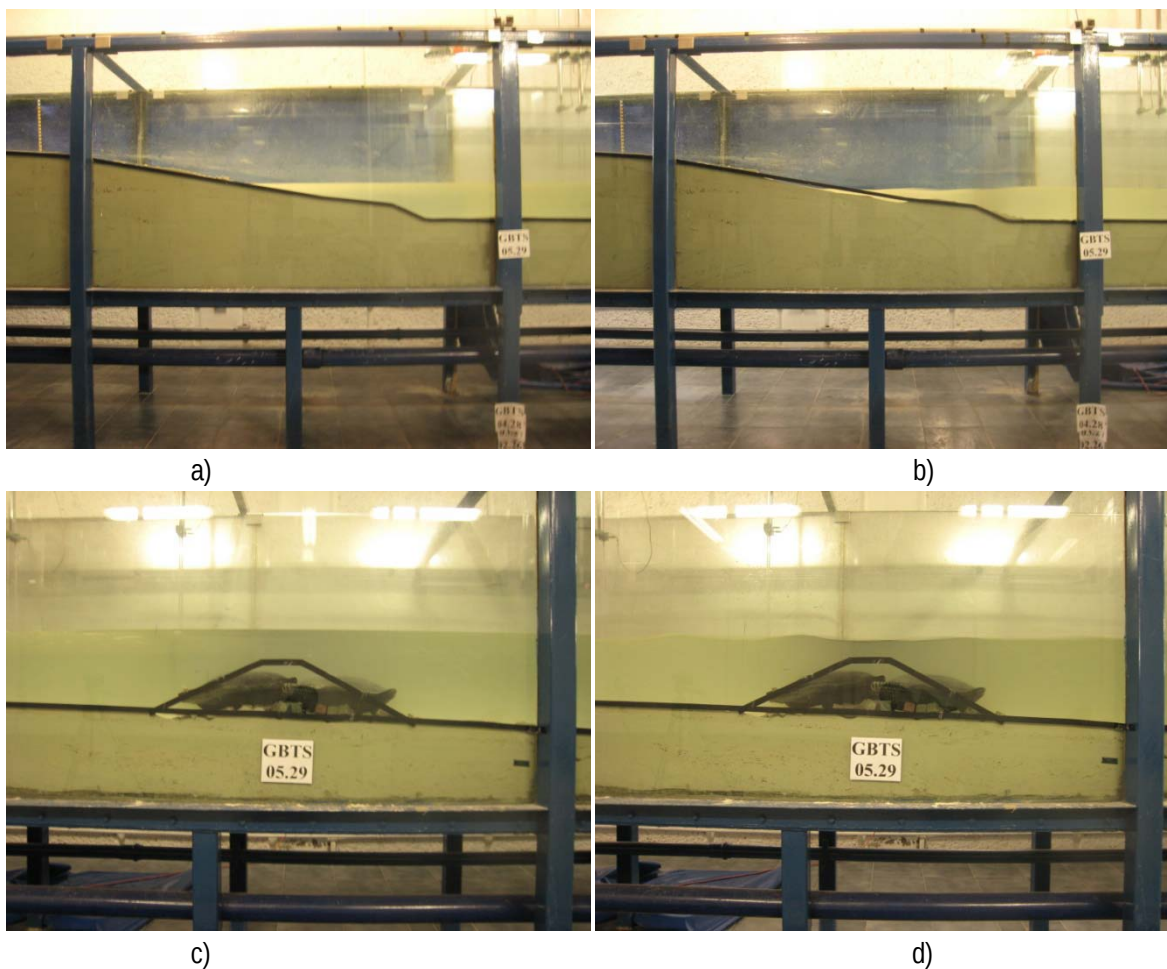


Figura C.26 Condiciones de la prueba GTBS0529. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

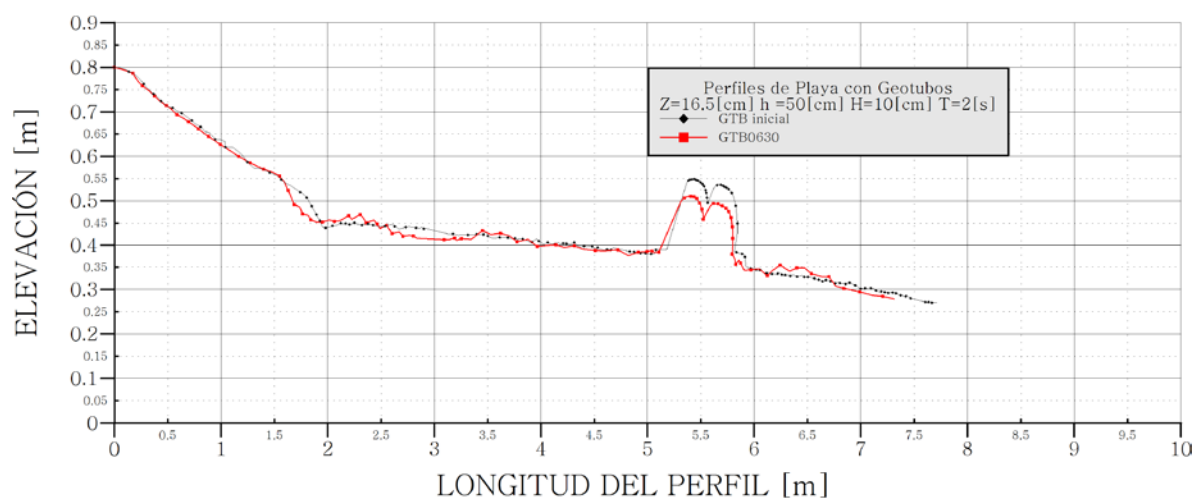


Figura C.27 Perfiles inicial y final de la prueba GTBS0630

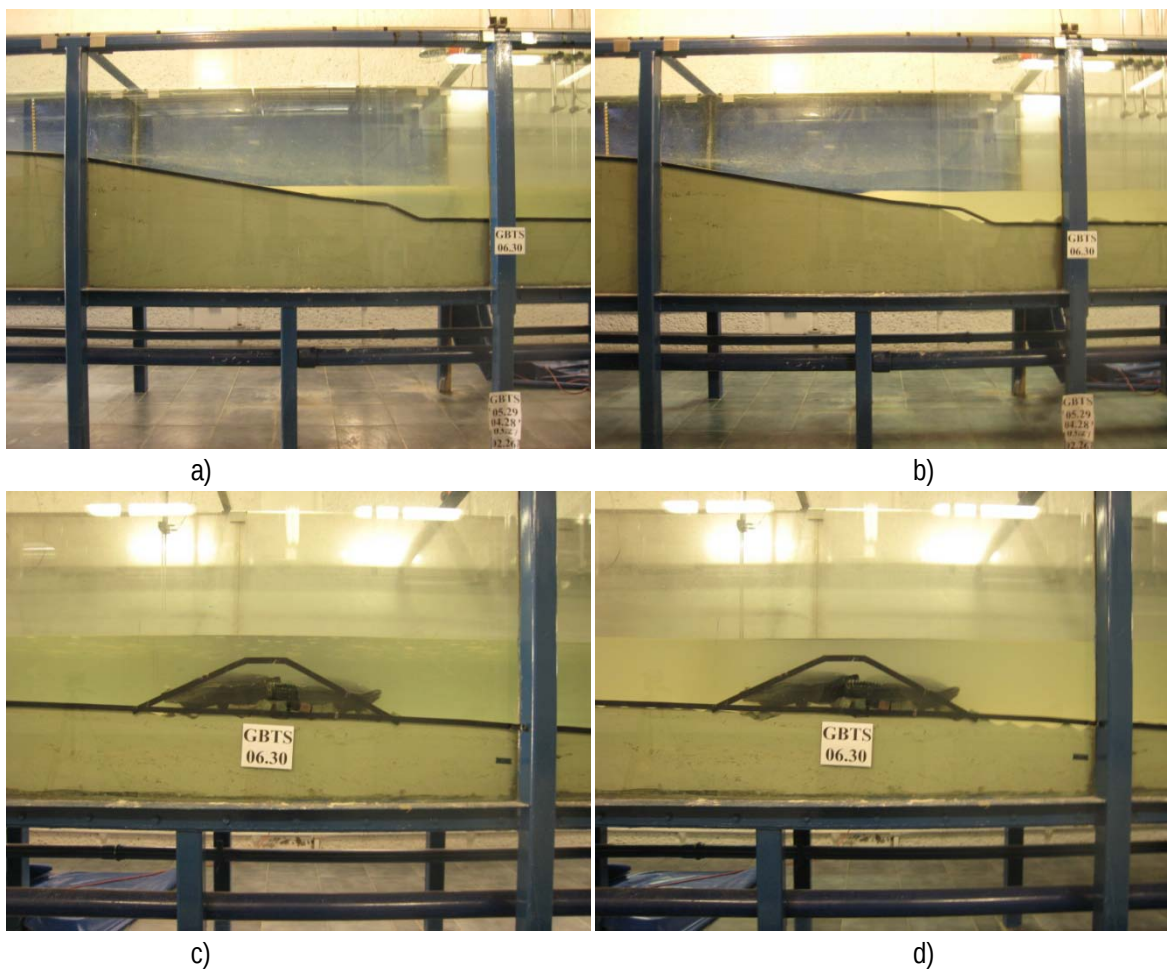


Figura C.28 Condiciones de la prueba GTBS0630. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, b) Condición final de la estructura.

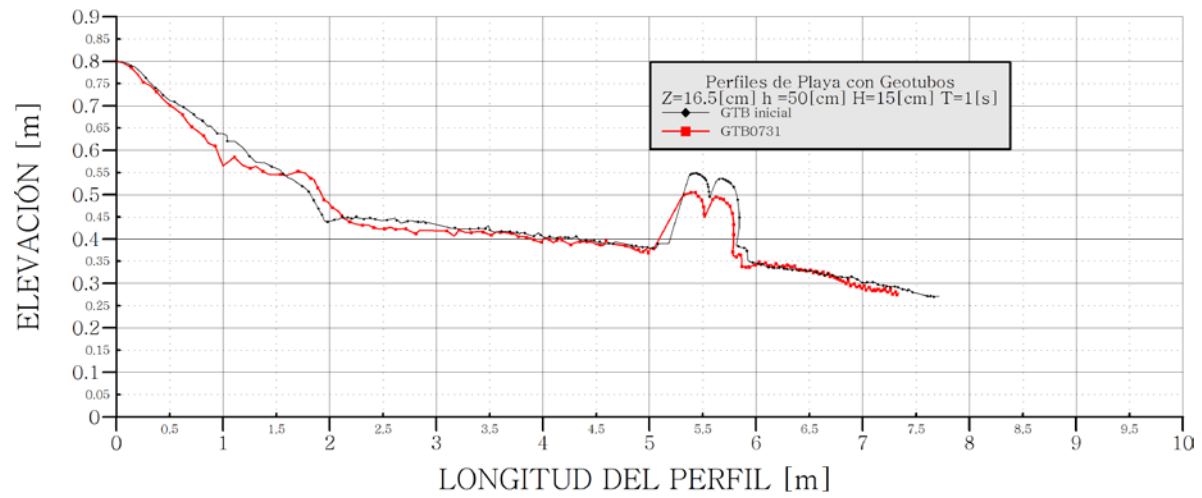


Figura C.29 Perfiles inicial y final de la prueba GTBS0731

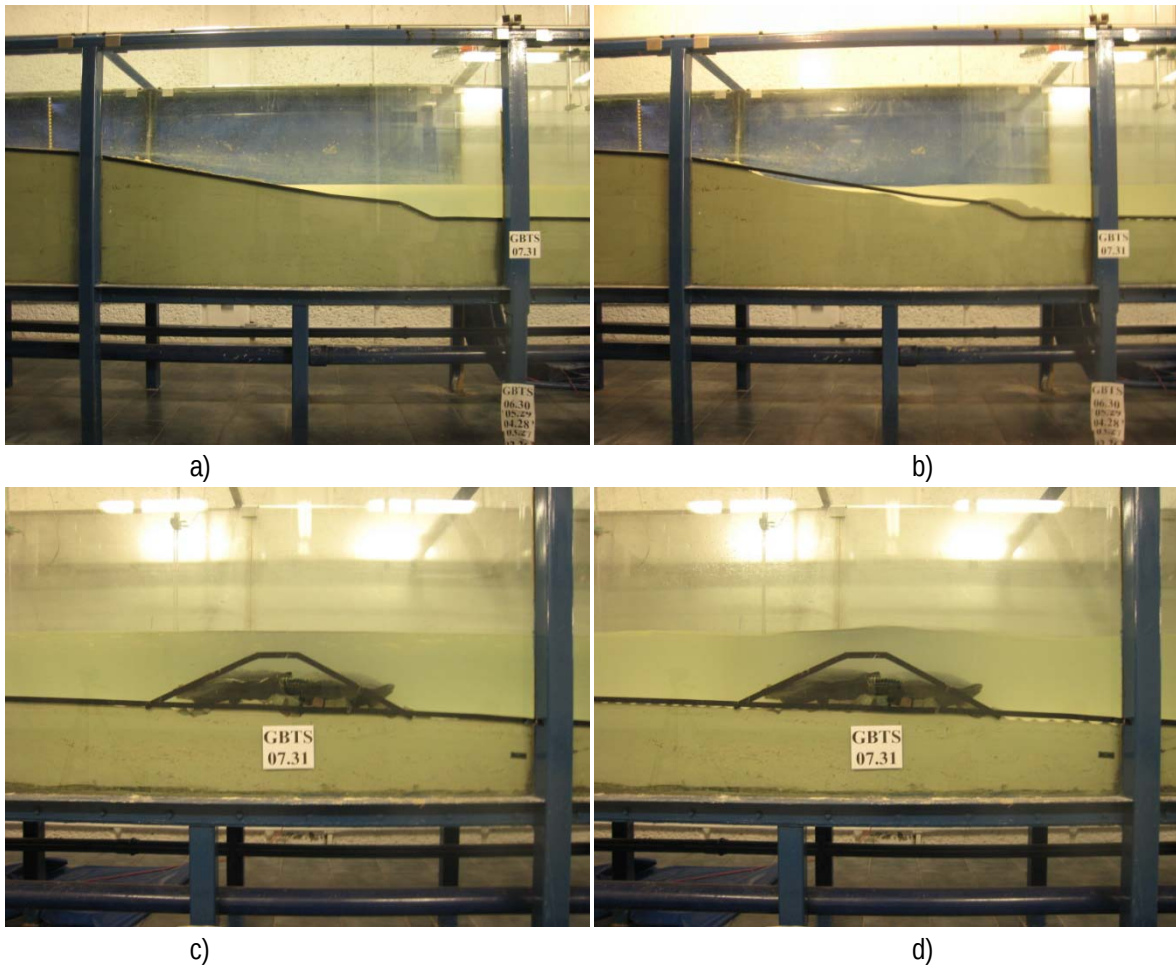


Figura C.30 Condiciones de la prueba GTBS0731. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, b) Condición final de la estructura.

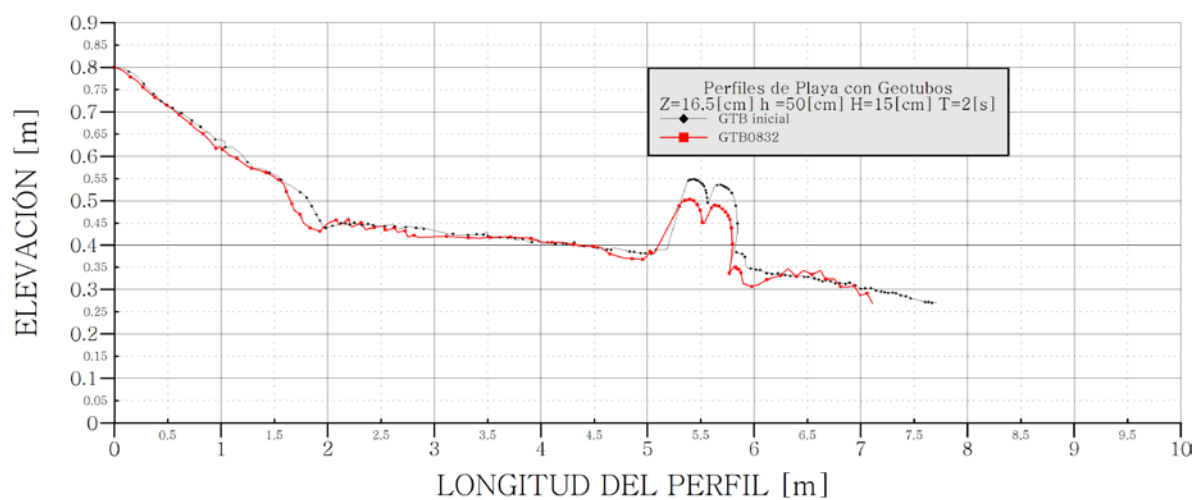


Figura C.31 Perfiles inicial y final de la prueba GTBS0832

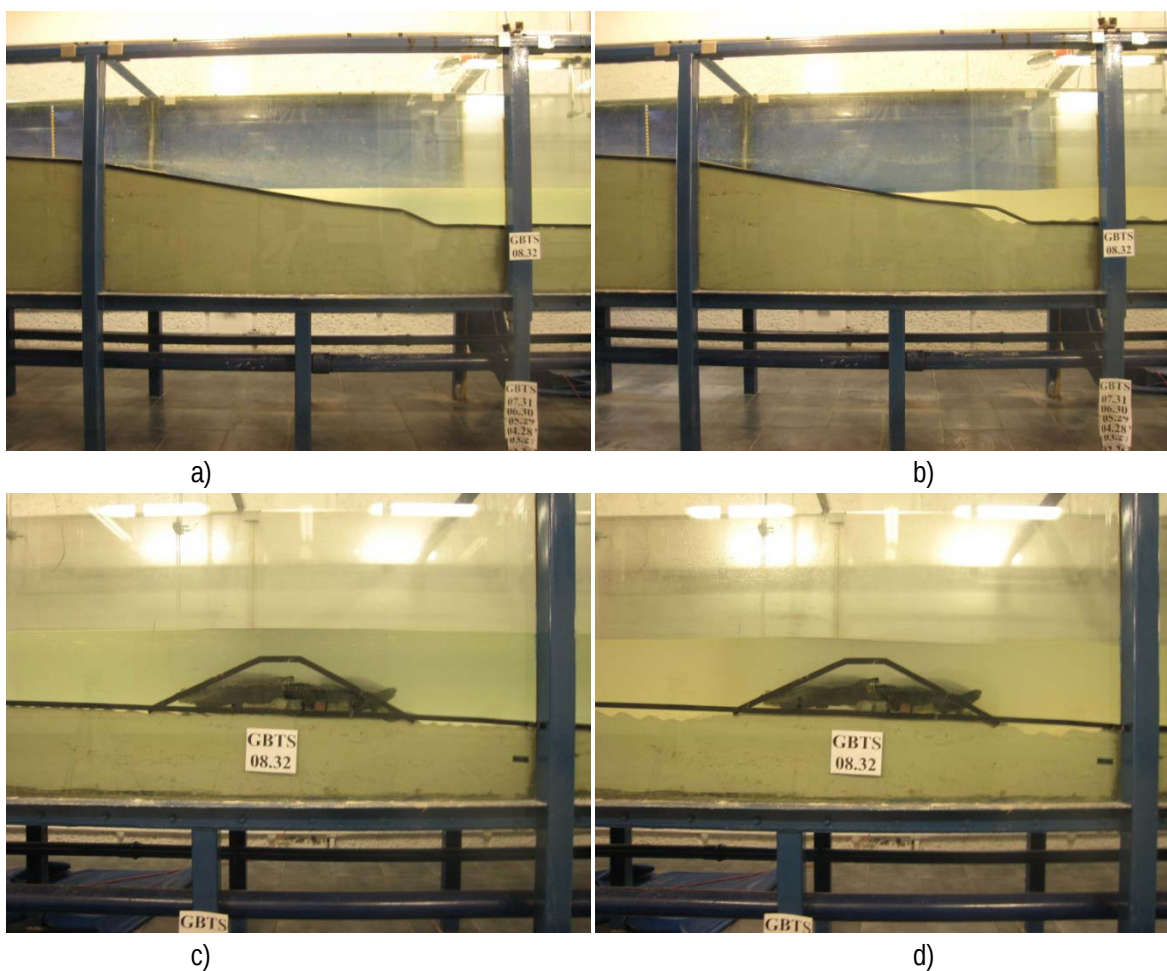


Figura C.32 Condiciones de la prueba GTBS0832. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

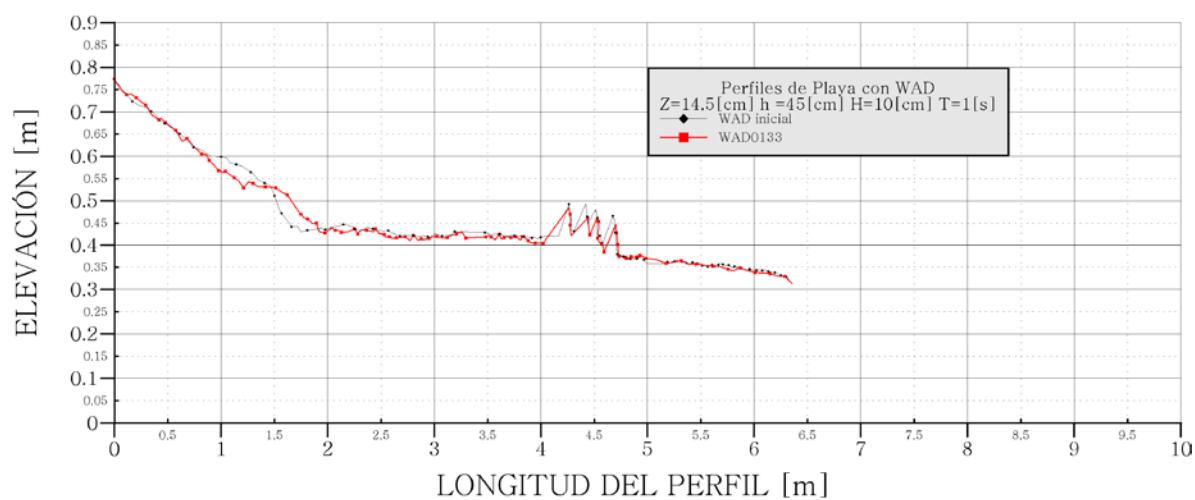


Figura C.33 Perfiles inicial y final de la prueba WAD0133

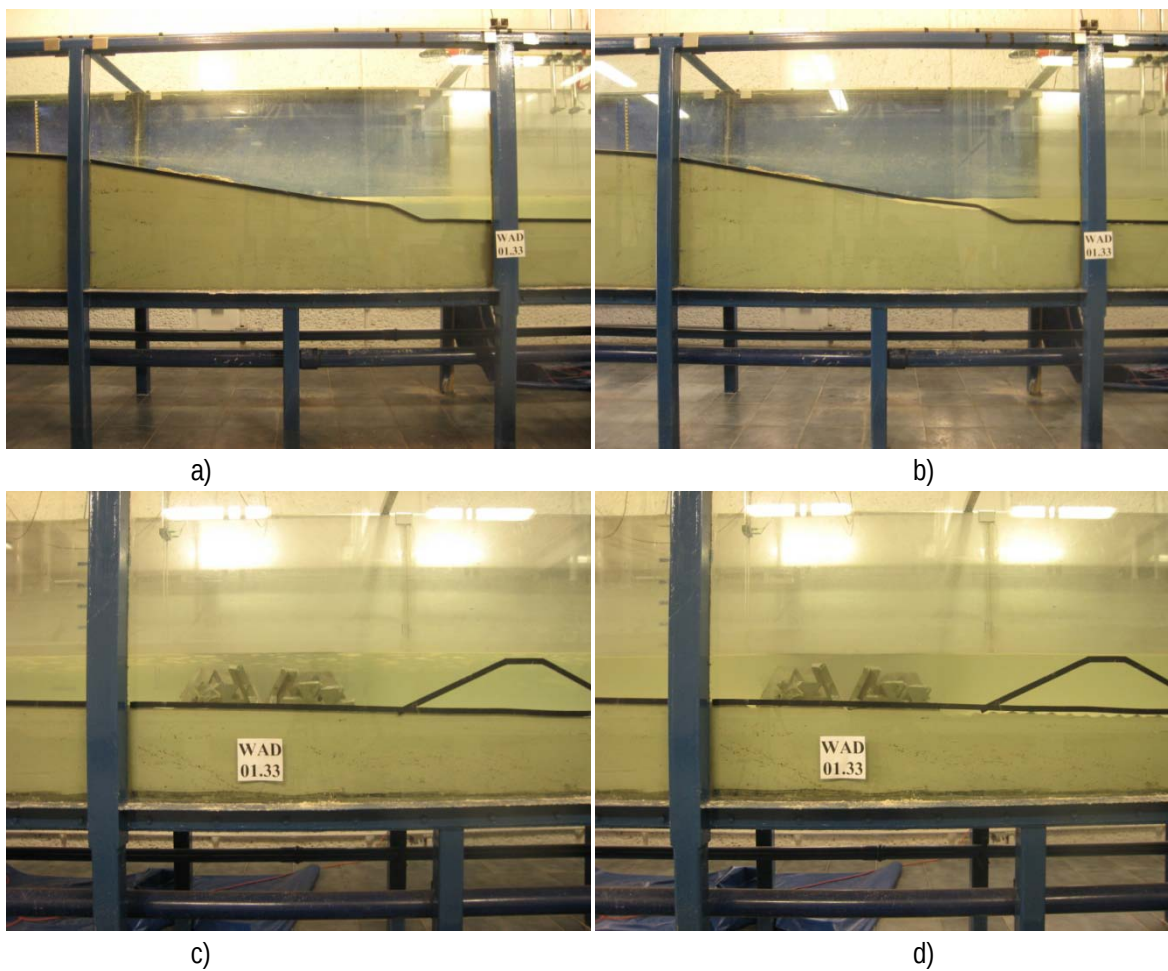


Figura C.34 Condiciones de la prueba WAD0133. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

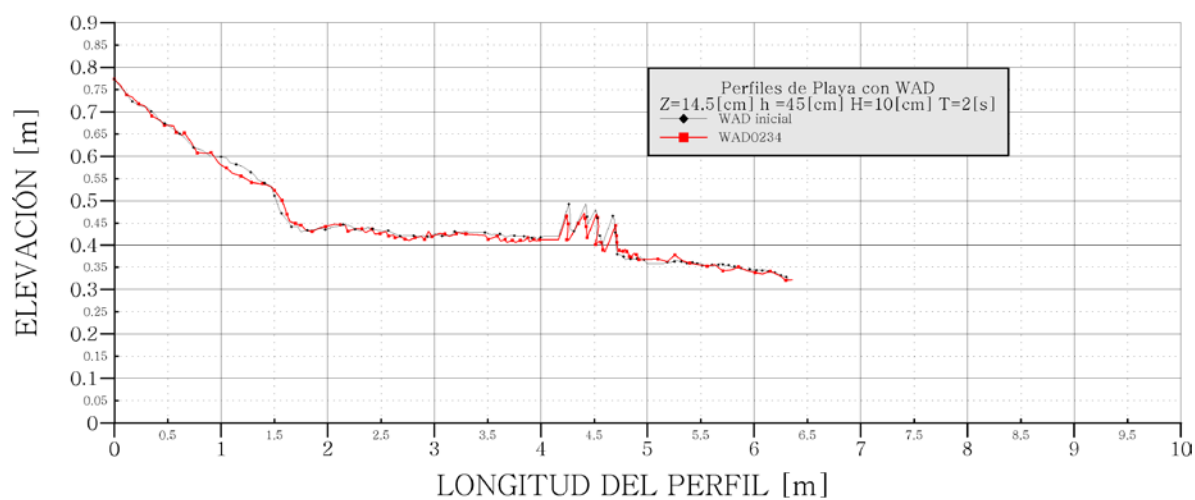


Figura C.35 Perfiles inicial y final de la prueba WAD0234

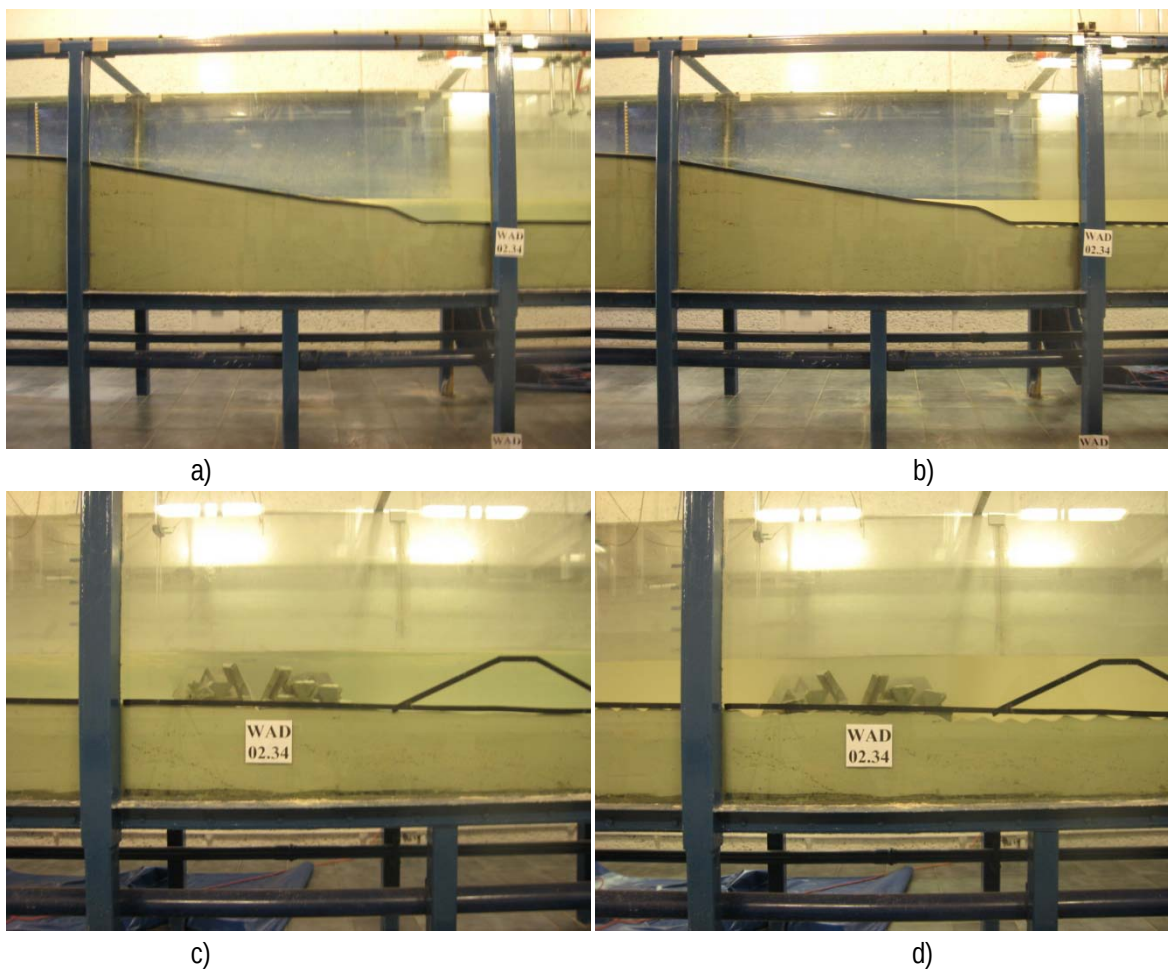


Figura C.36 Condiciones de la prueba WAD0234. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

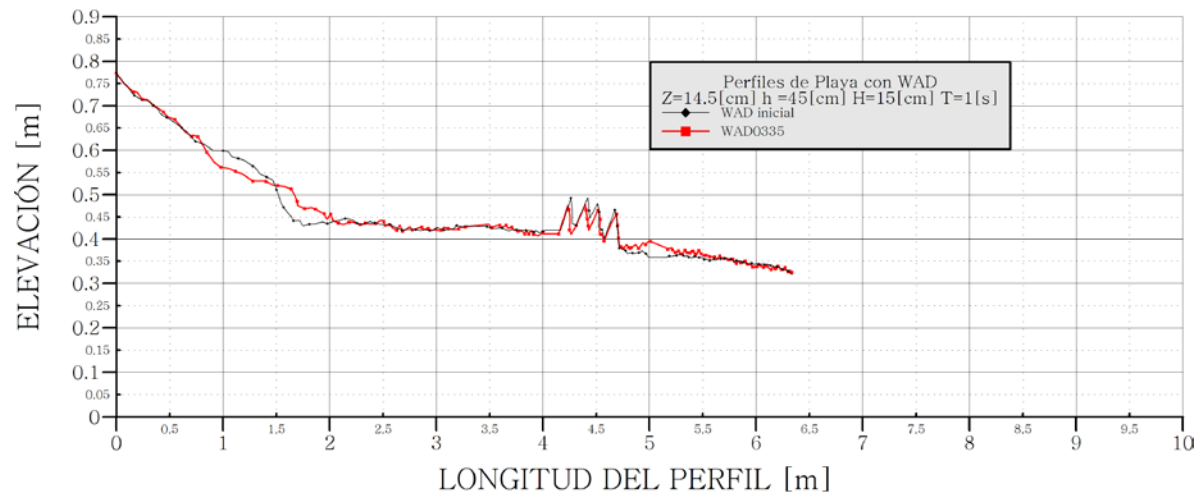


Figura C.37 Perfiles inicial y final de la prueba WAD0335

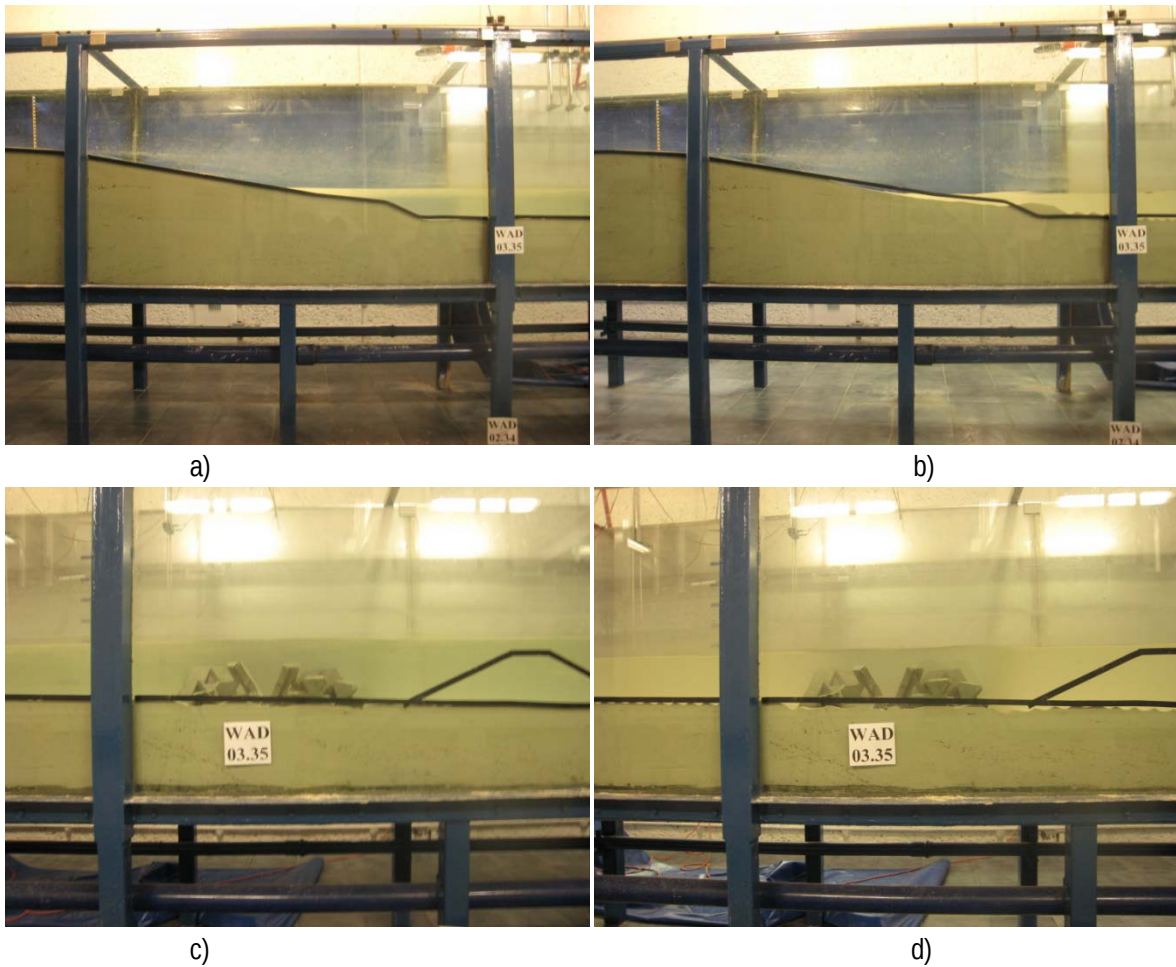


Figura C.38 Condiciones de la prueba WAD0335. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

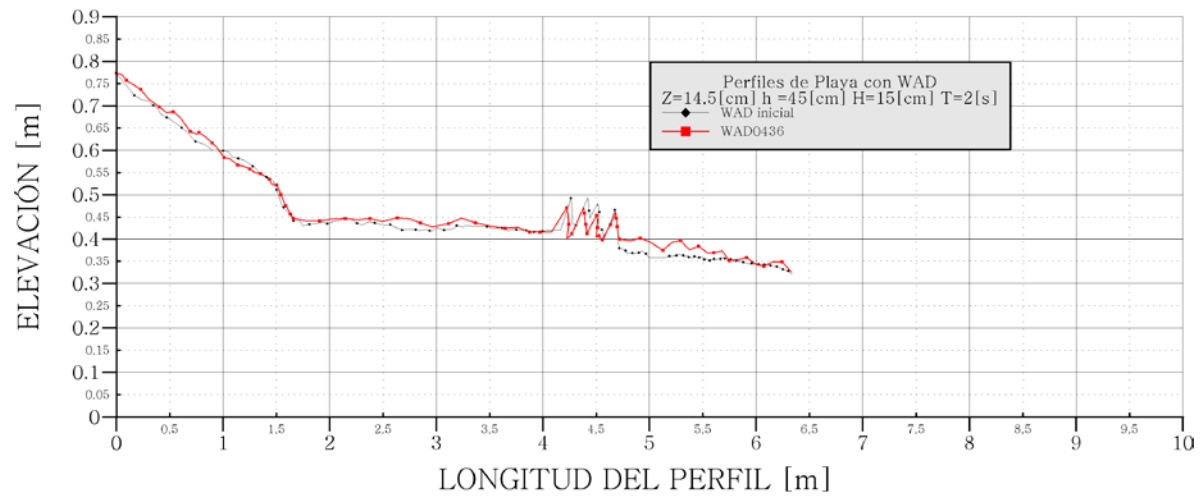


Figura C.39 Perfiles inicial y final de la prueba WAD0436

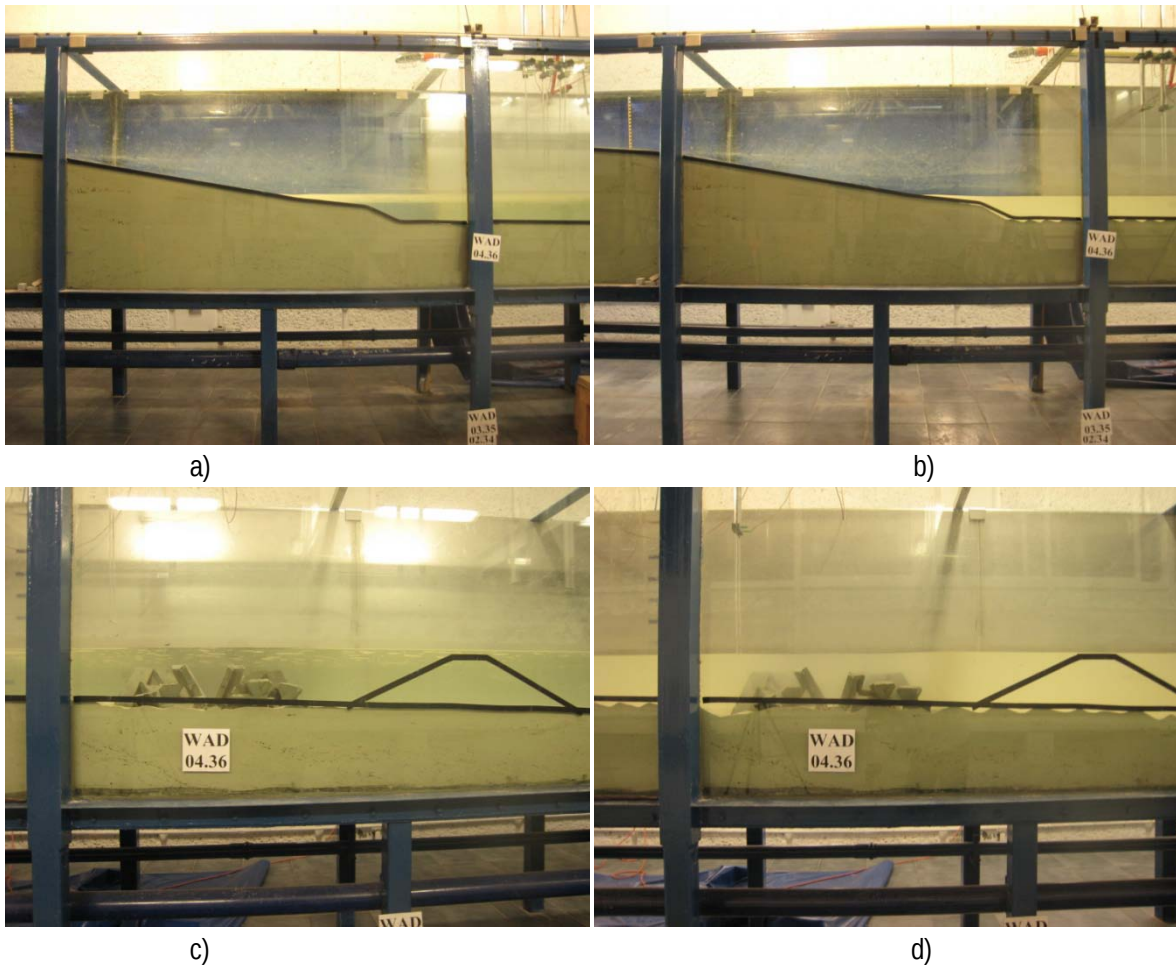


Figura C.40 Condiciones de la prueba WAD0436. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

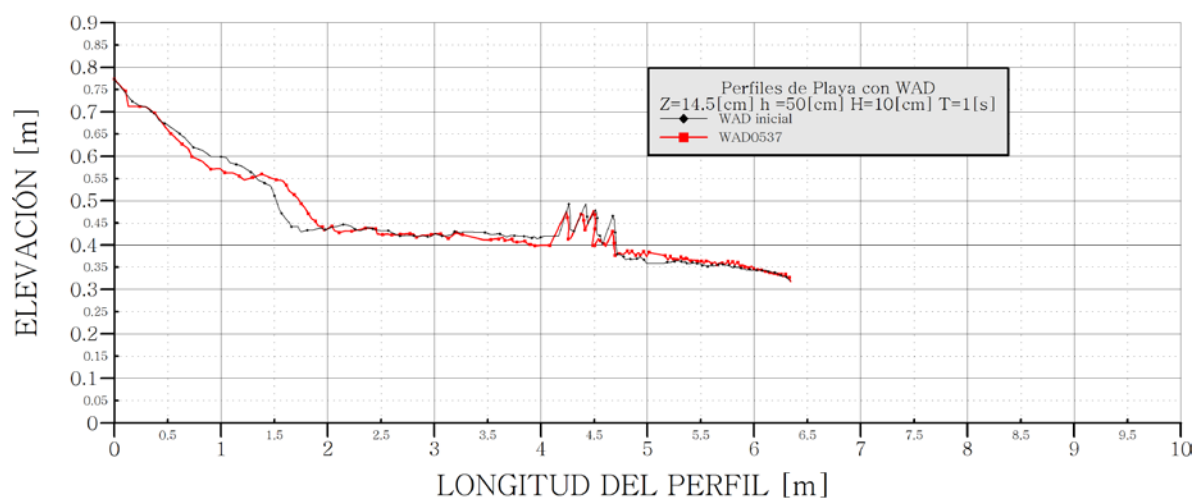


Figura C.41 Perfiles inicial y final de la prueba WAD0537

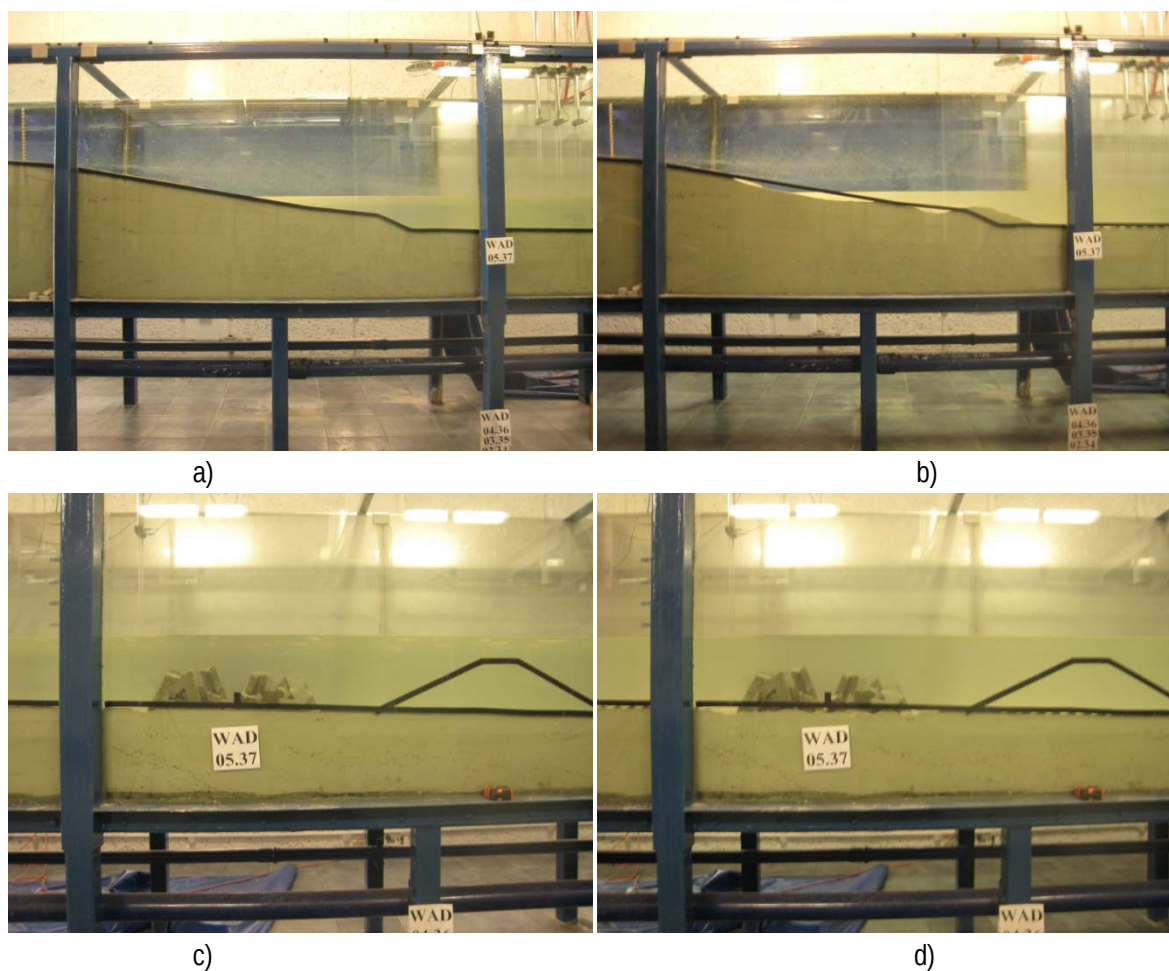


Figura C.42 Condiciones de la prueba WAD0537. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

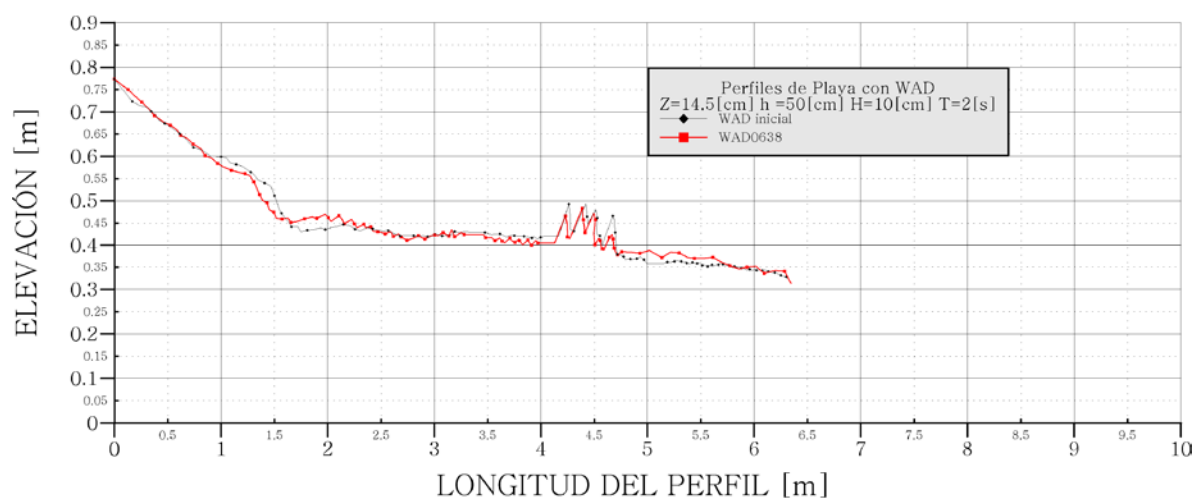


Figura C.43 Perfiles inicial y final de la prueba WAD0638

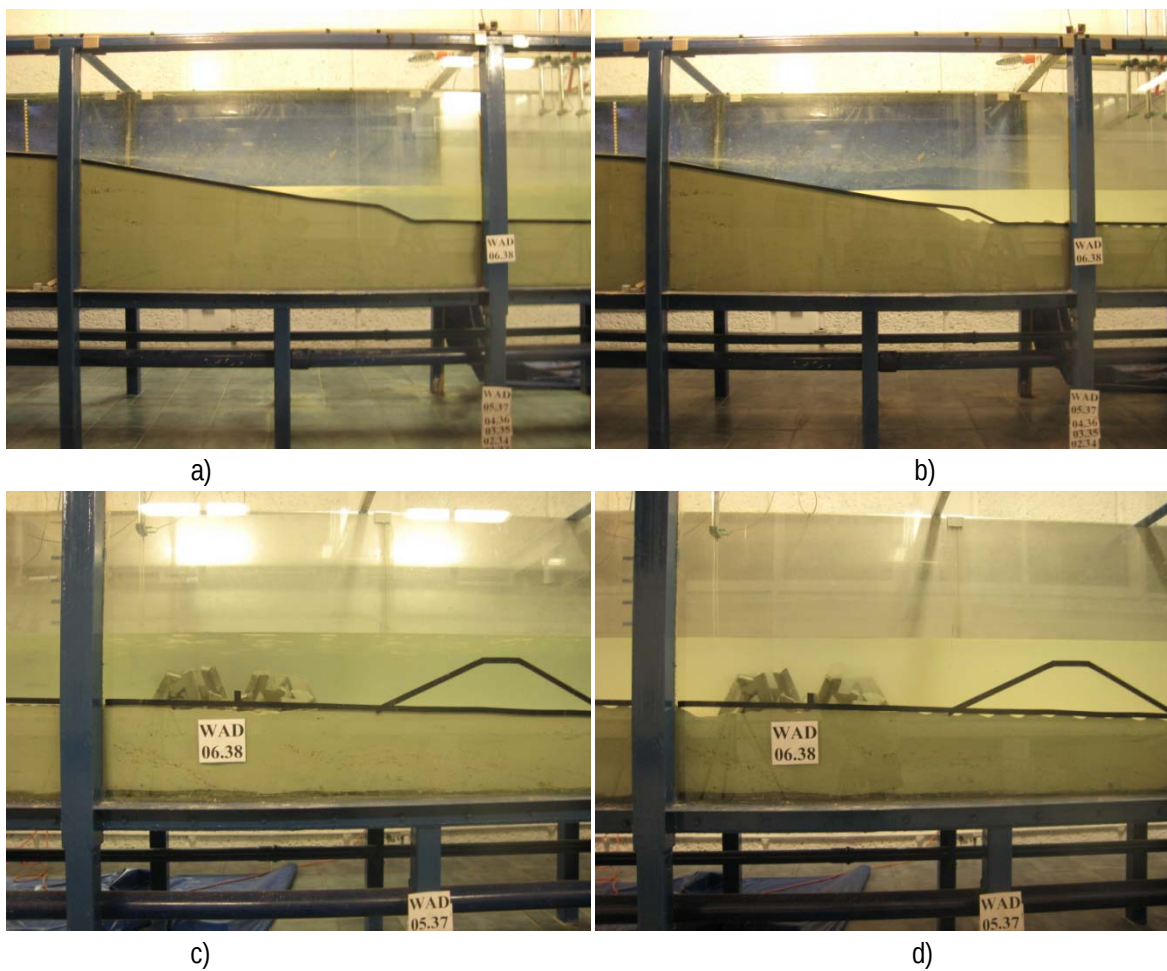


Figura C.44 Condiciones de la prueba WAD0638. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

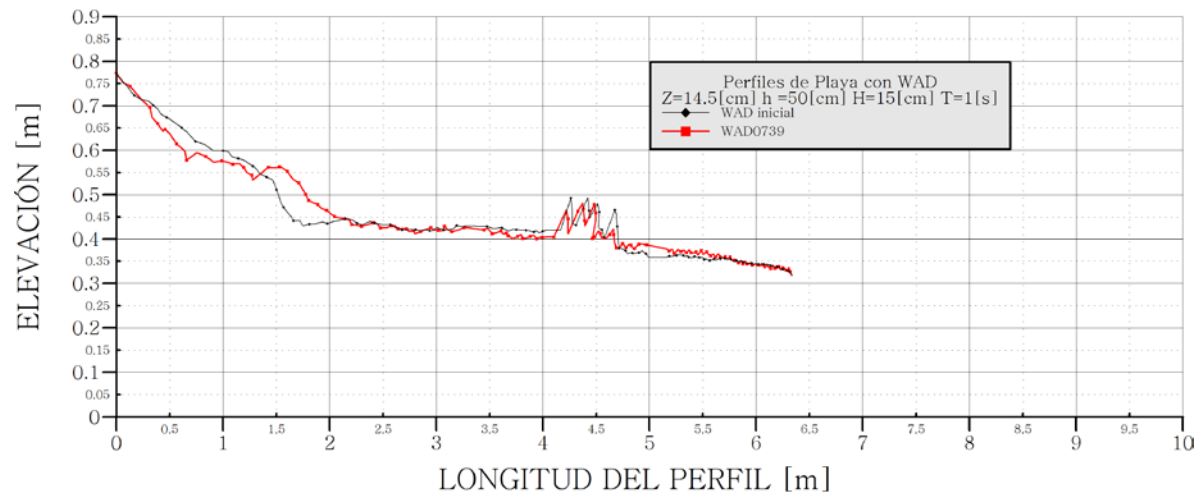


Figura C.45 Perfiles inicial y final de la prueba WAD0638

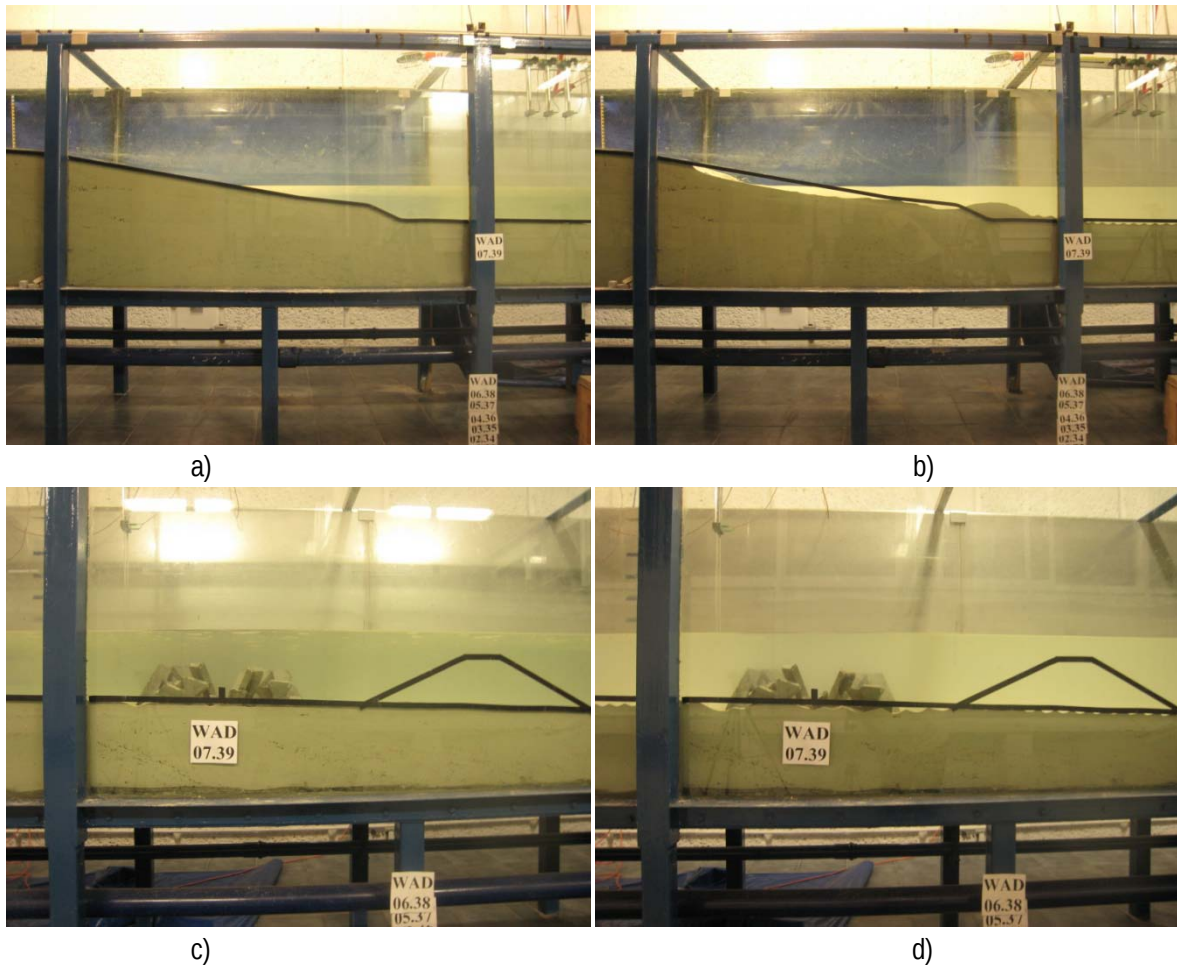


Figura C.46 Condiciones de la prueba WAD0739. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

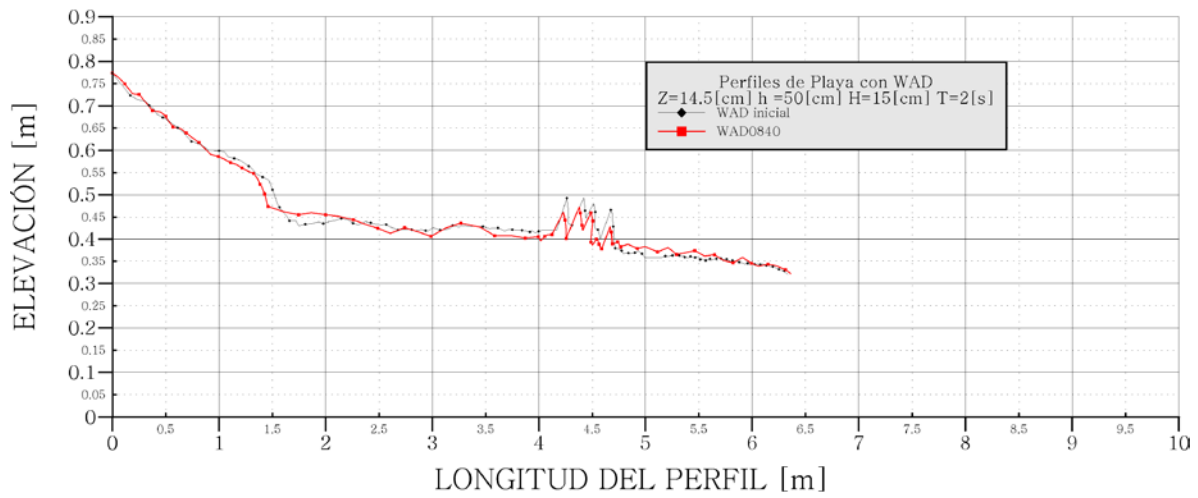


Figura C.47 Perfiles inicial y final de la prueba WAD0740

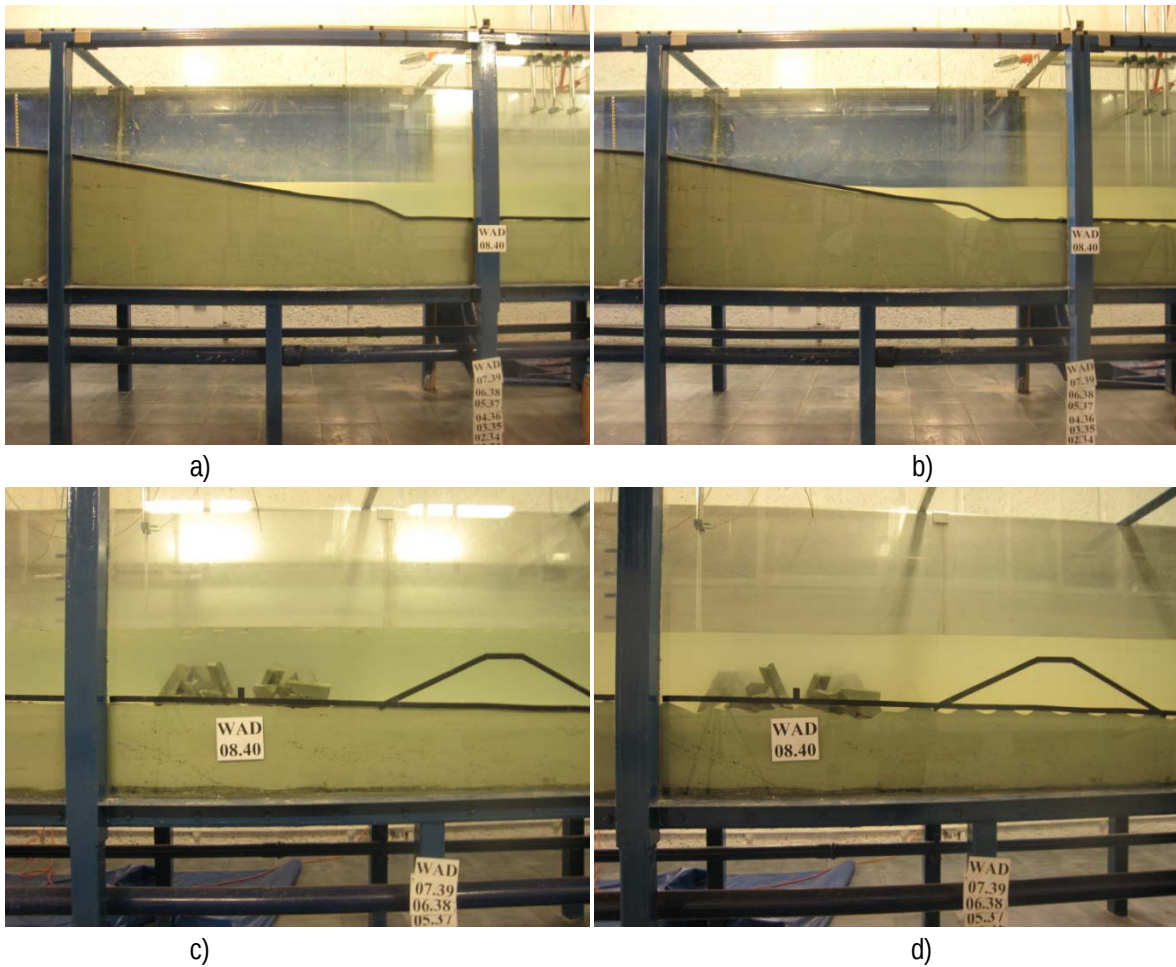


Figura C.48 Condiciones de la prueba WAD0840. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

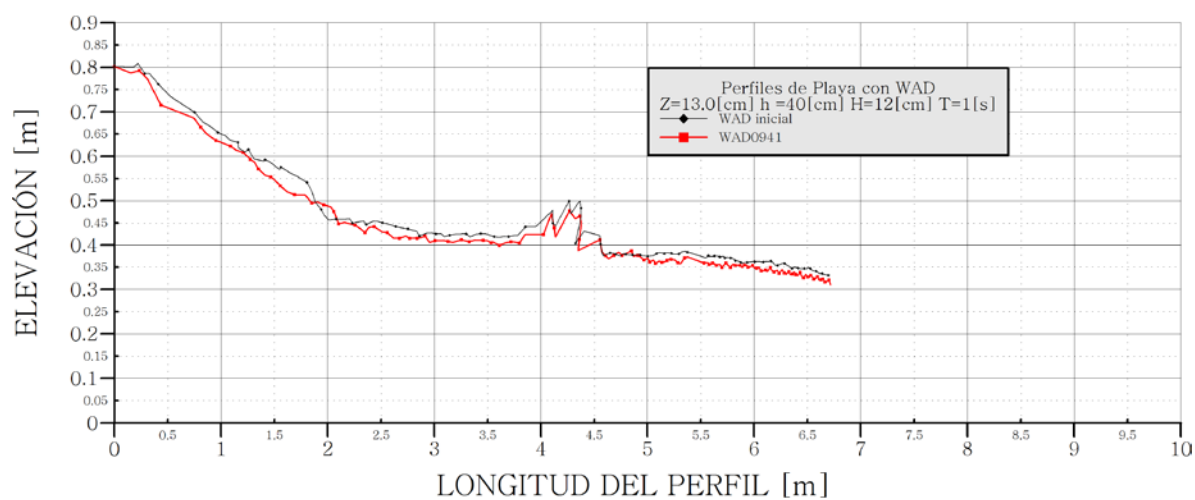


Figura C.49 Perfiles inicial y final de la prueba WAD0941

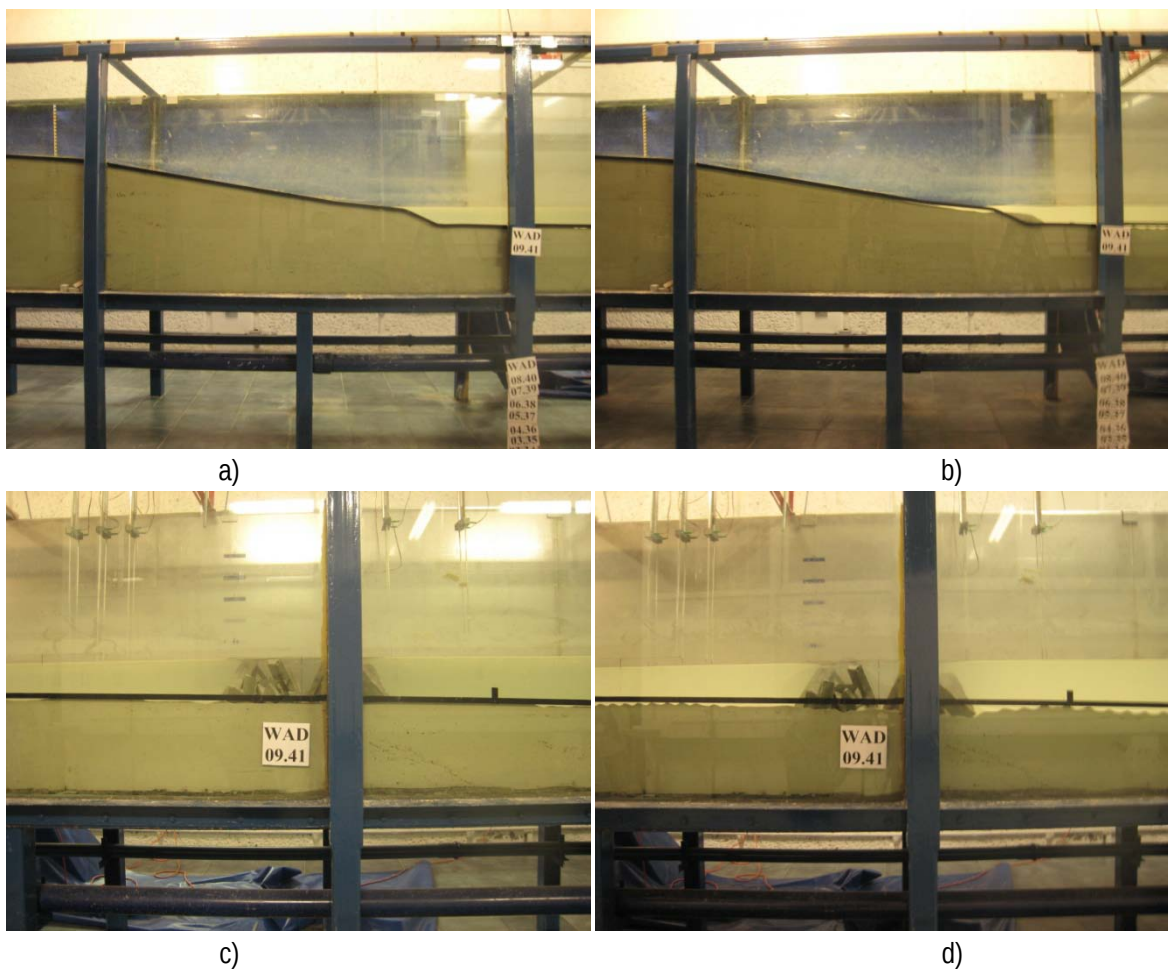


Figura C.50 Condiciones de la prueba WAD0941. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

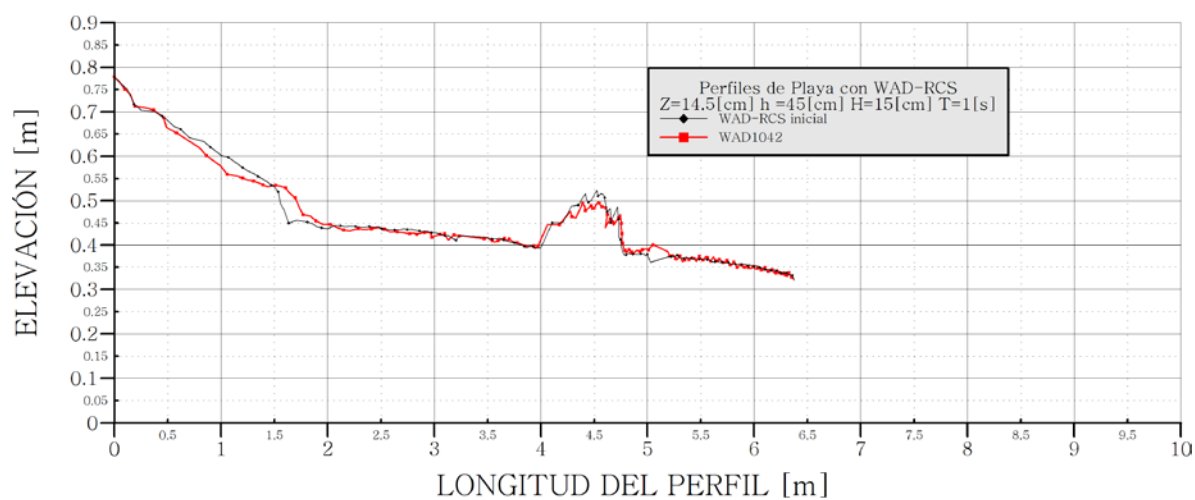


Figura C.51 Perfiles inicial y final de la prueba WAD1042

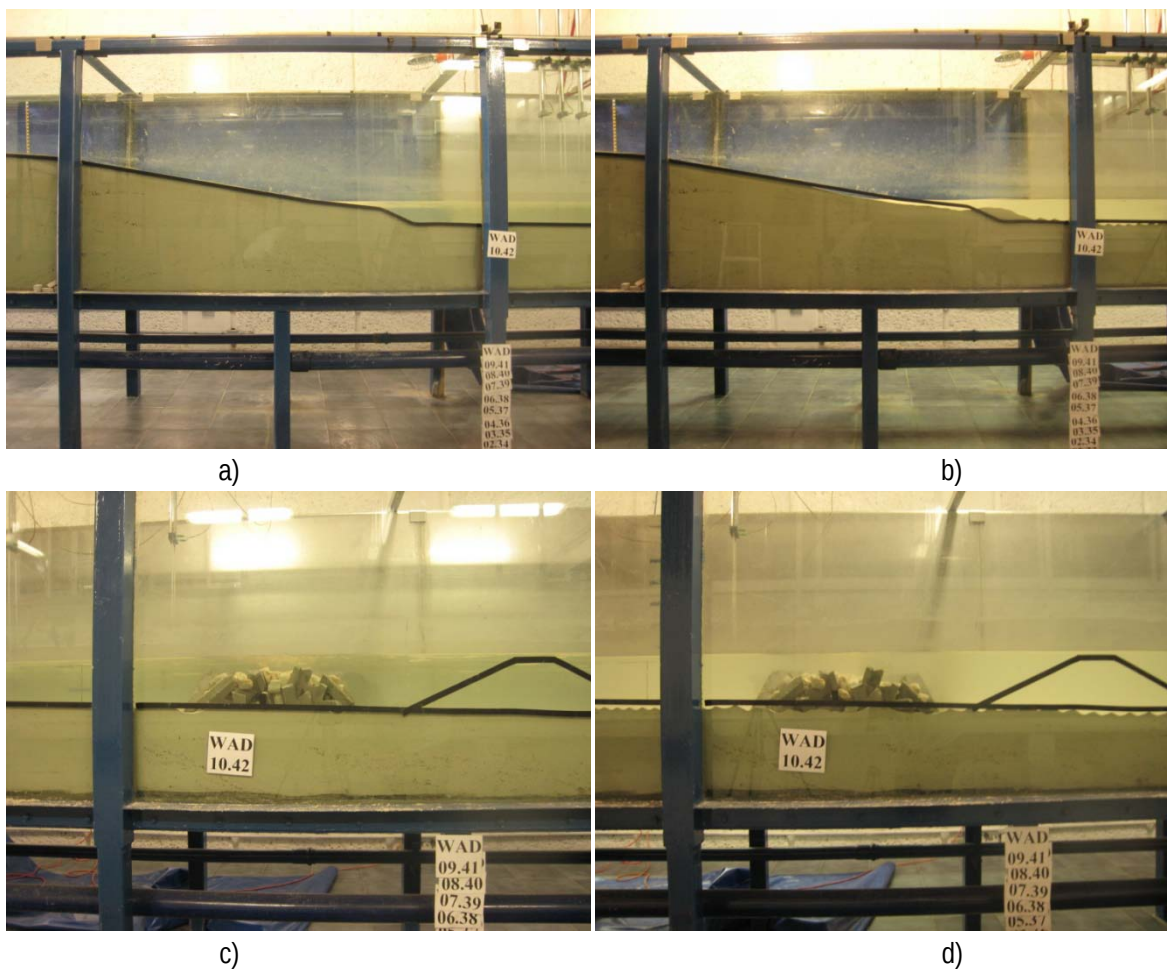


Figura C.52 Condiciones de la prueba WAD1042. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

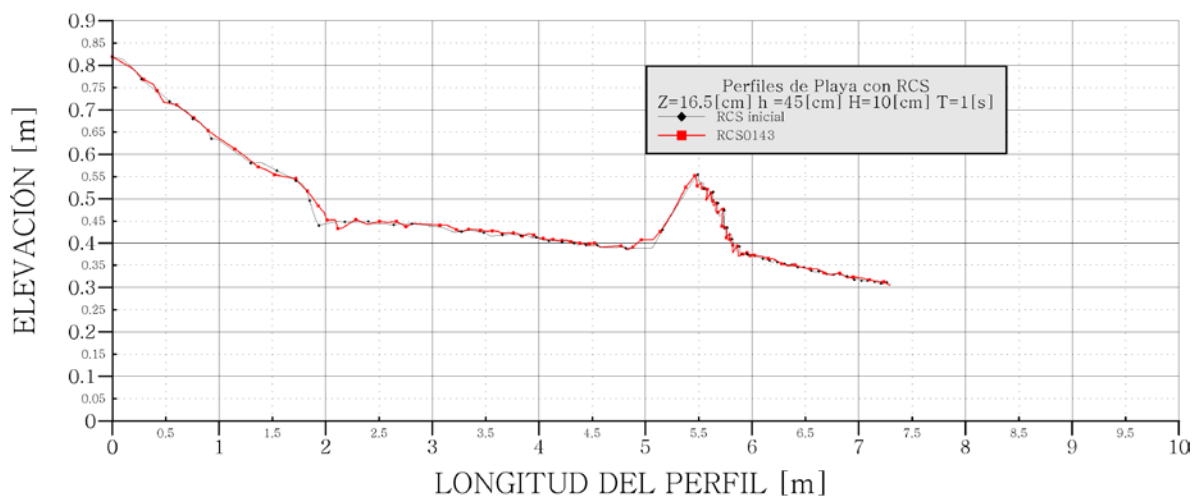


Figura C.53 Perfiles inicial y final de la prueba RCS0143

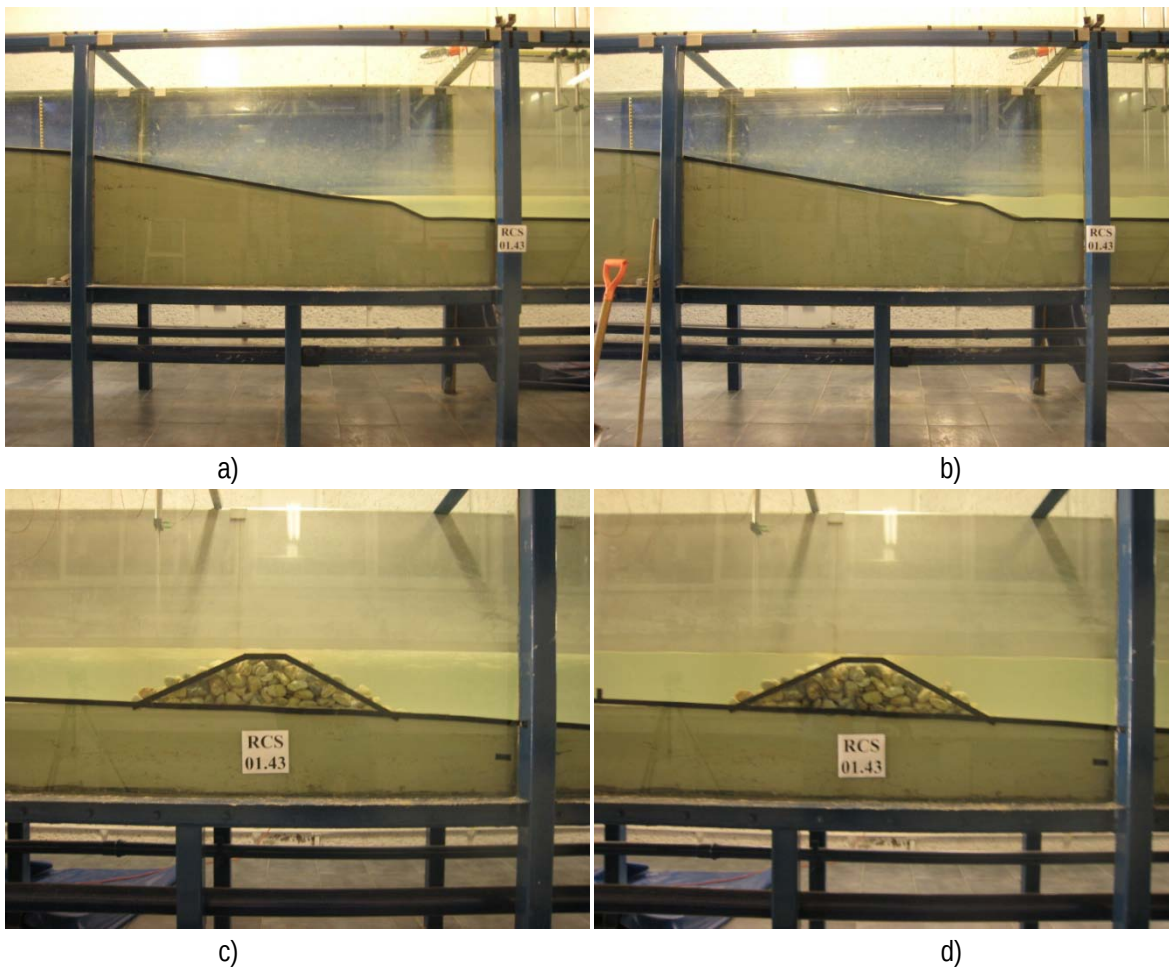


Figura C.54 Condiciones de la prueba RCS0143. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

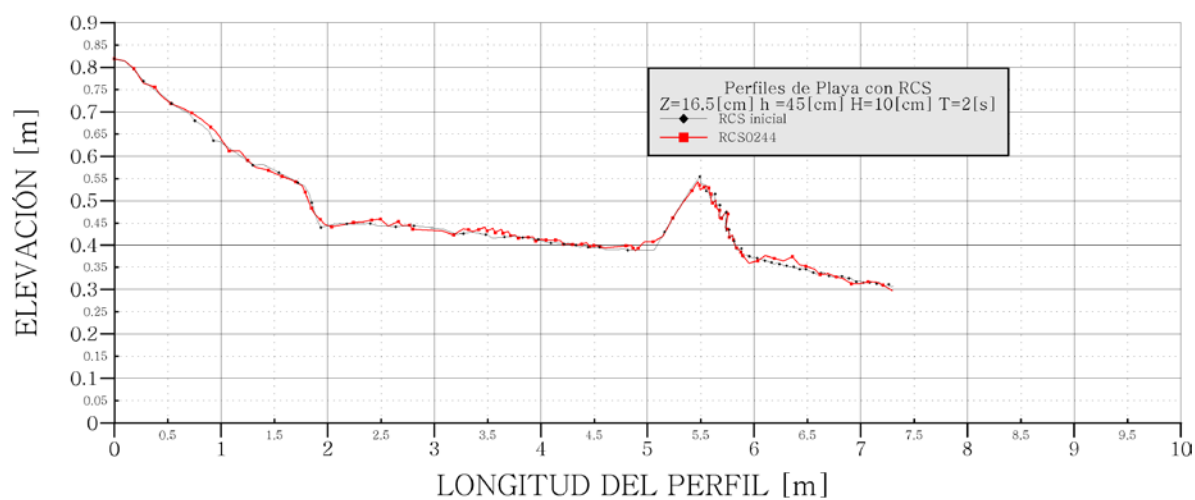


Figura C.55 Perfiles inicial y final de la prueba RCS0244

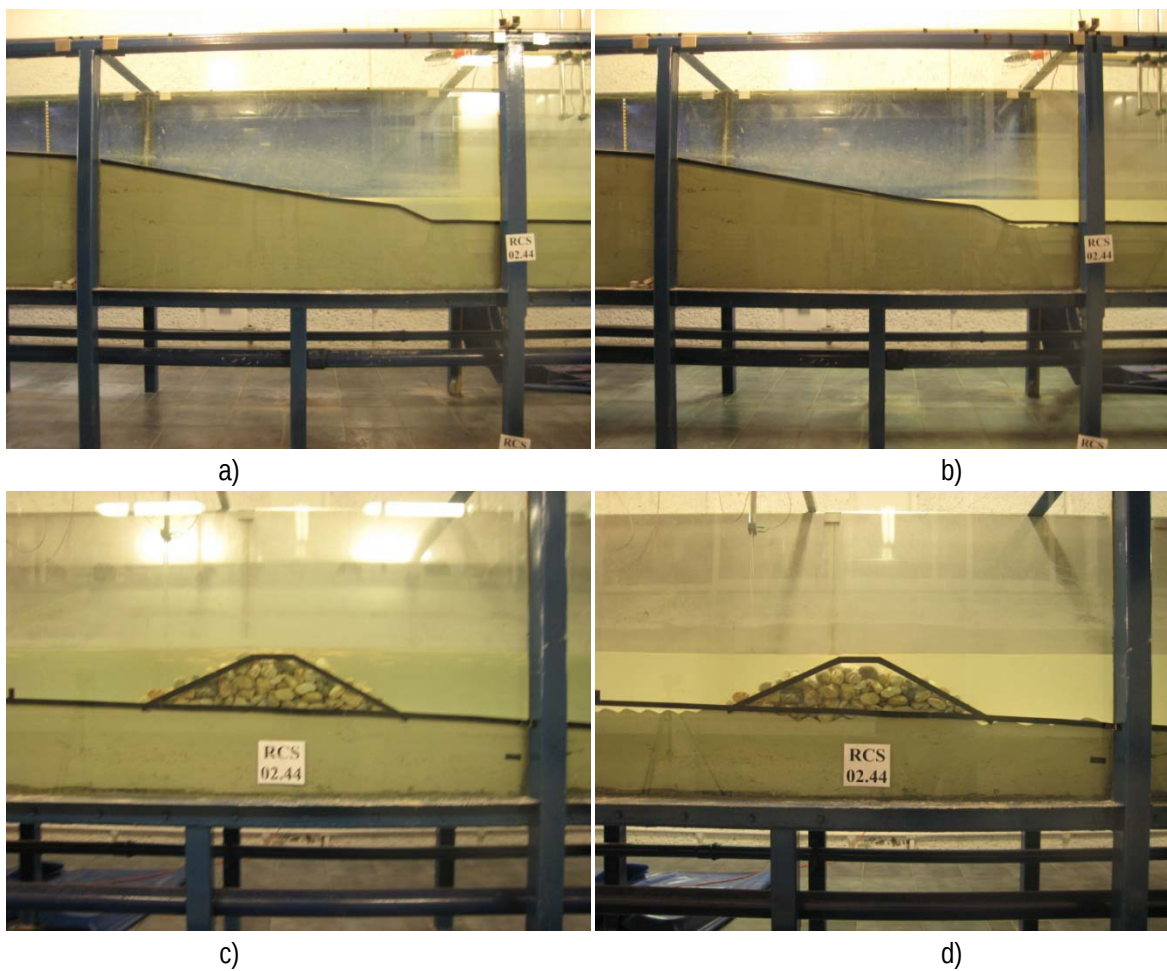


Figura C.56 Condiciones de la prueba RCS0244. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, b) Condición final de la estructura.

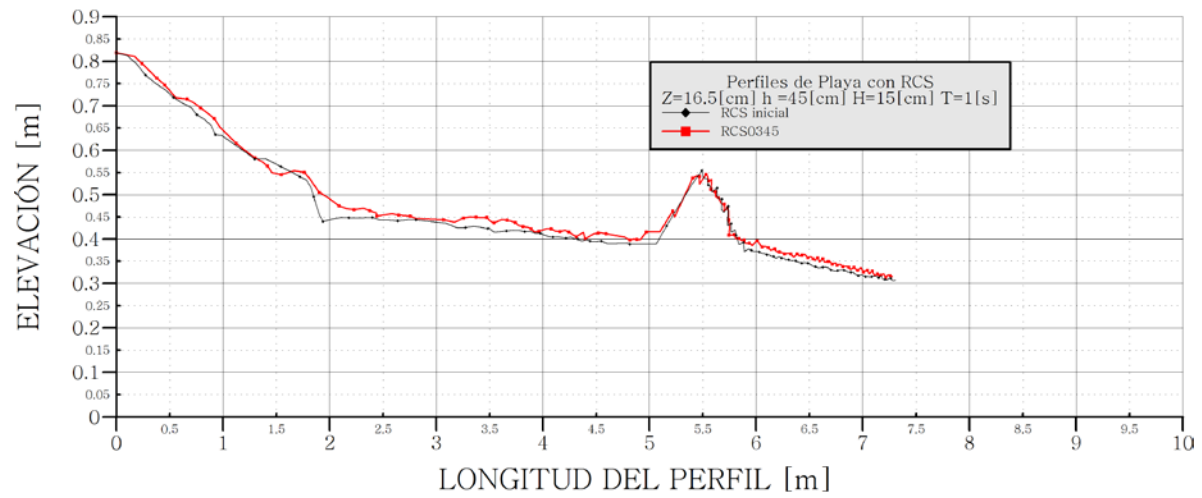


Figura C.57 Perfiles inicial y final de la prueba RCS0345

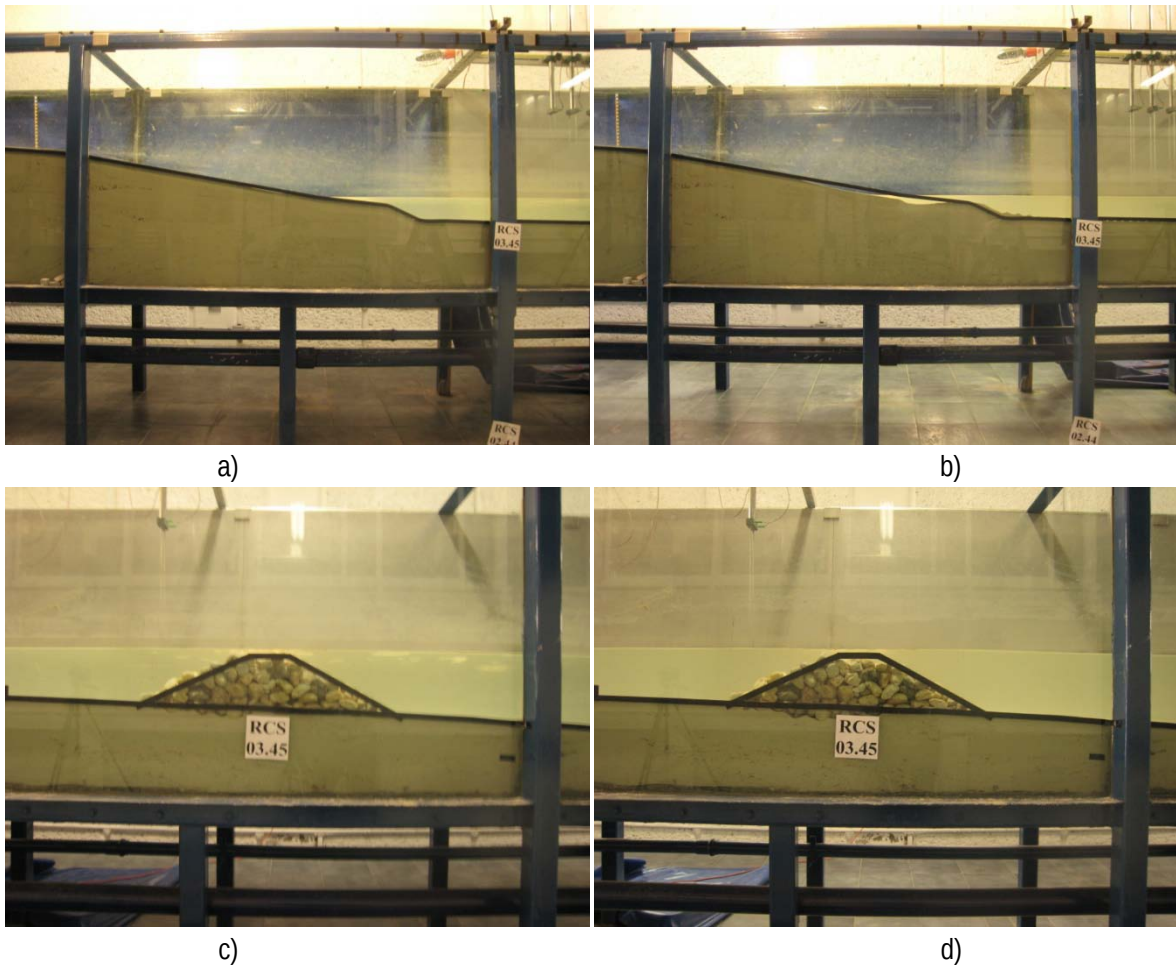


Figura C.58 Condiciones de la prueba RCS0345. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

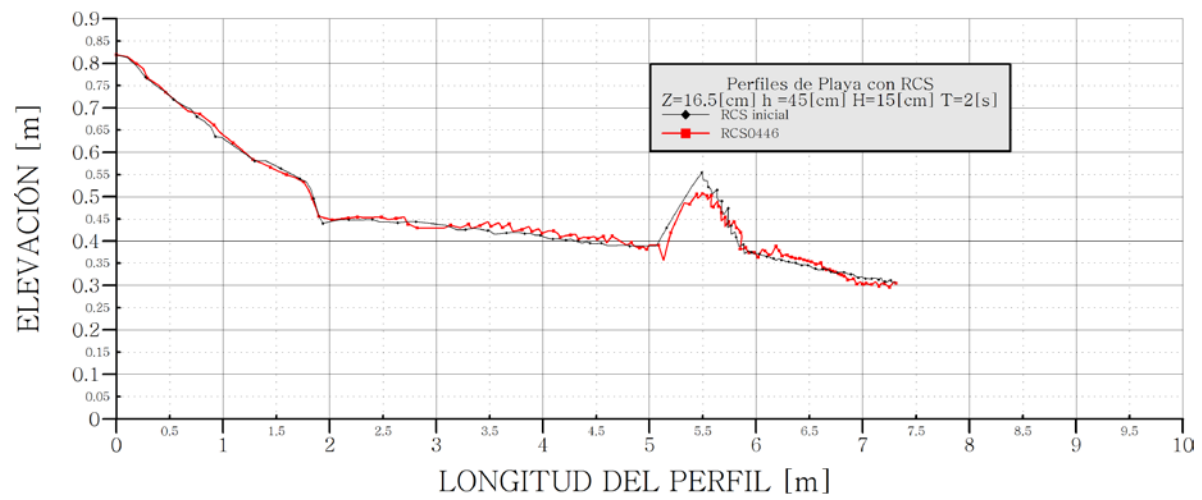


Figura C.59 Perfiles inicial y final de la prueba RCS0446

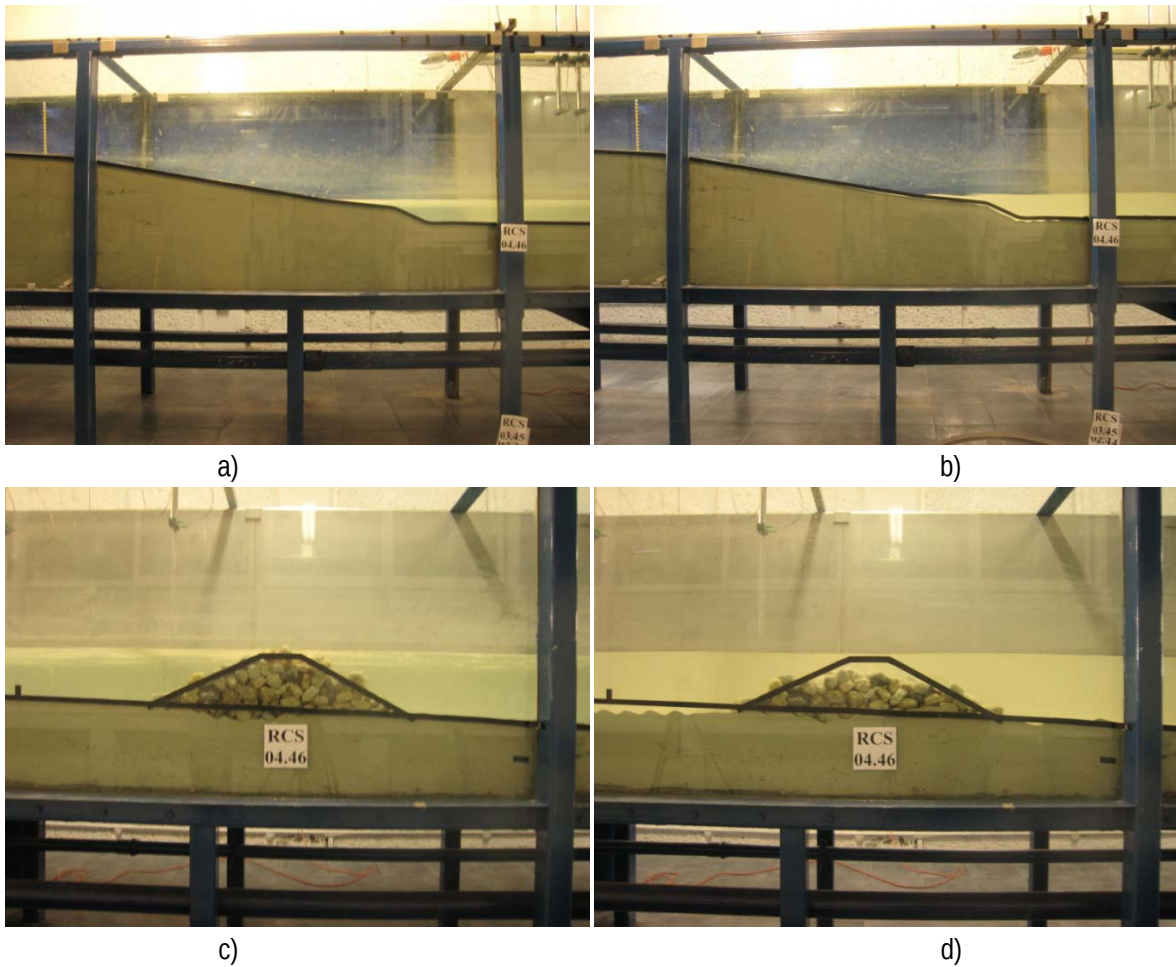


Figura C.60 Condiciones de la prueba RCS0446. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

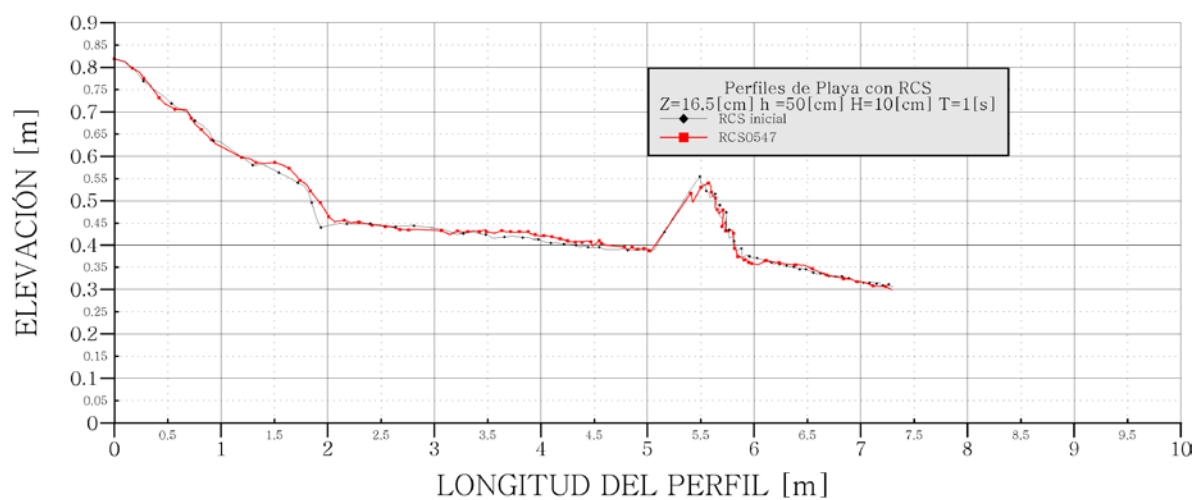


Figura C.61 Perfiles inicial y final de la prueba RCS0547

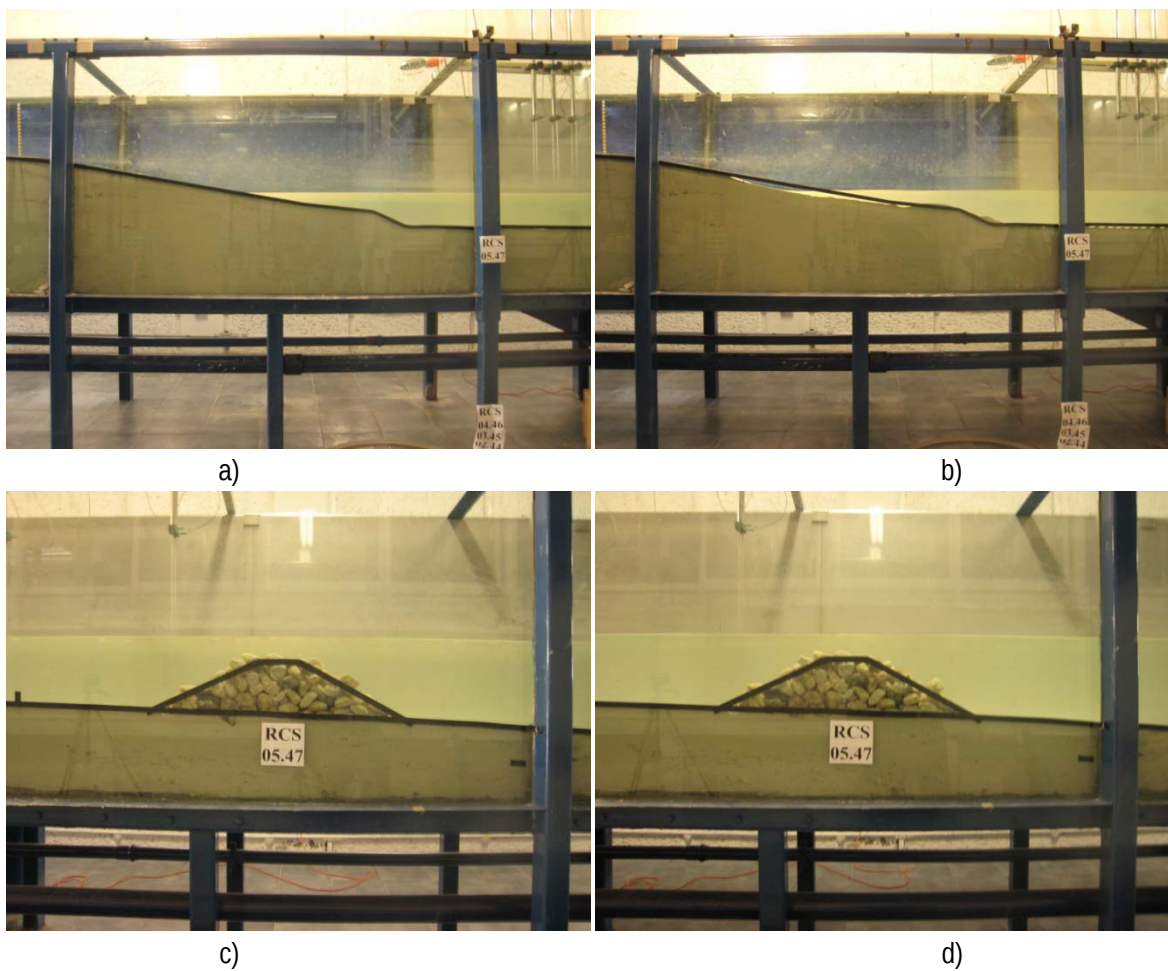


Figura C.62 Condiciones de la prueba RCS0547. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, b) Condición final de la estructura.

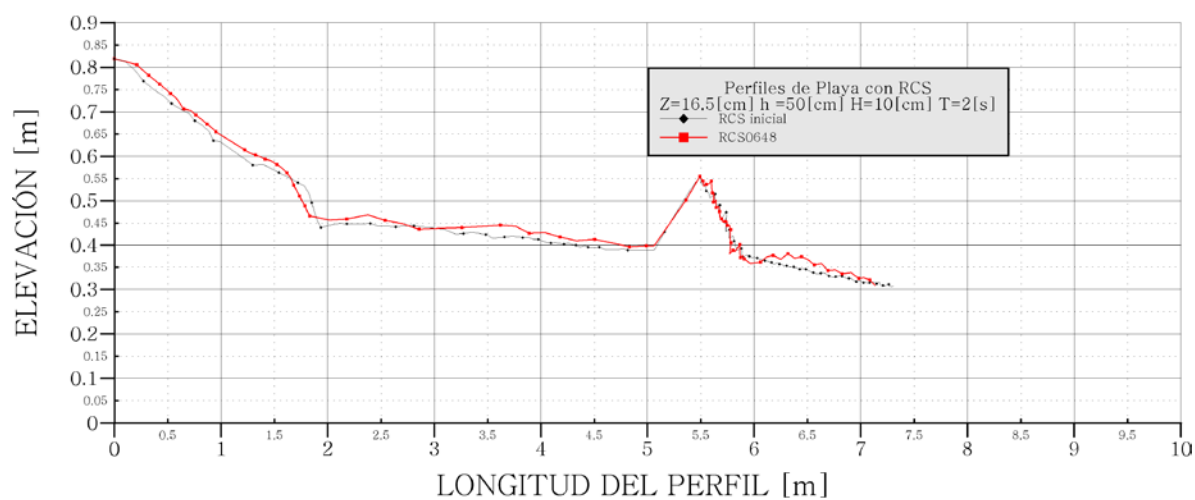


Figura C.63 Perfiles inicial y final de la prueba RCS0648

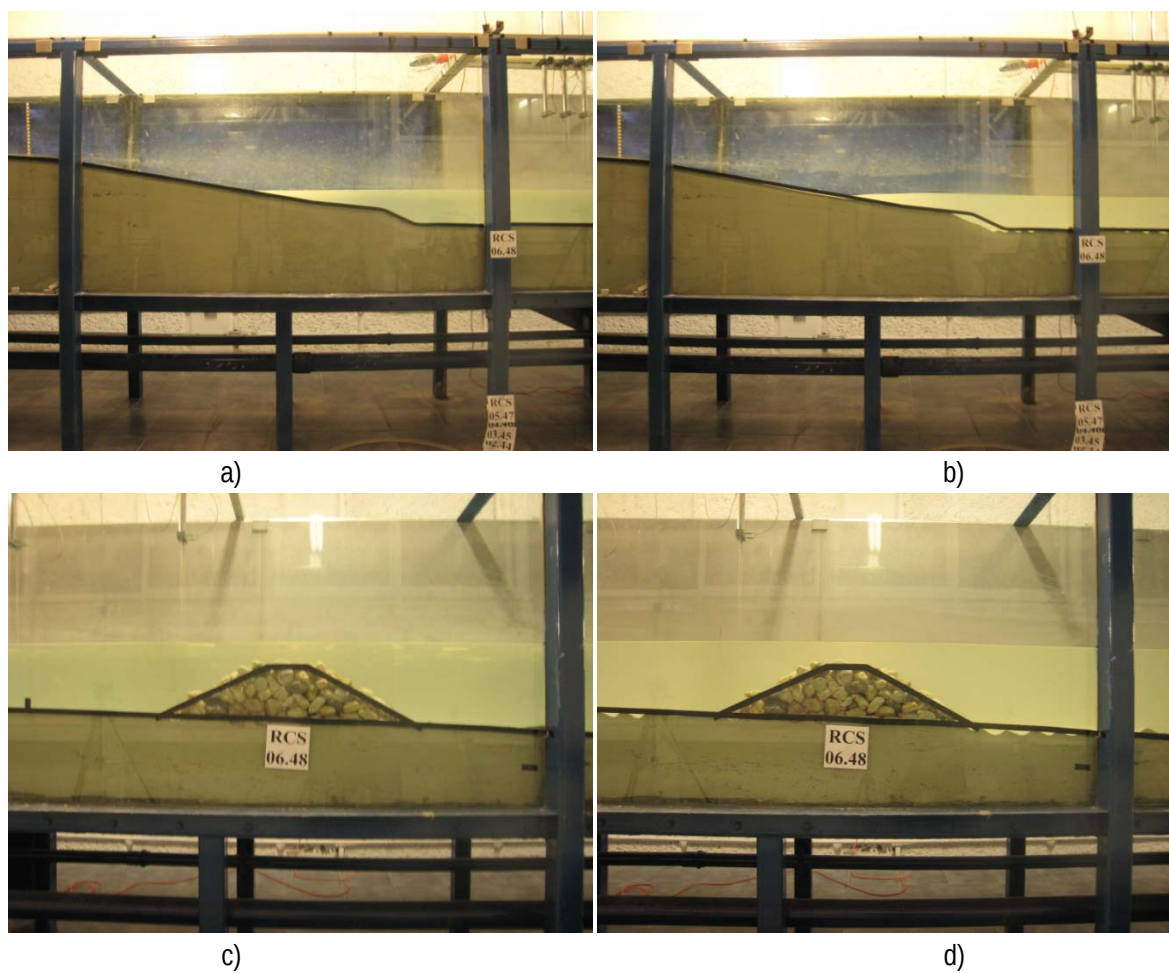


Figura C.64 Condiciones de la prueba RCS0648. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

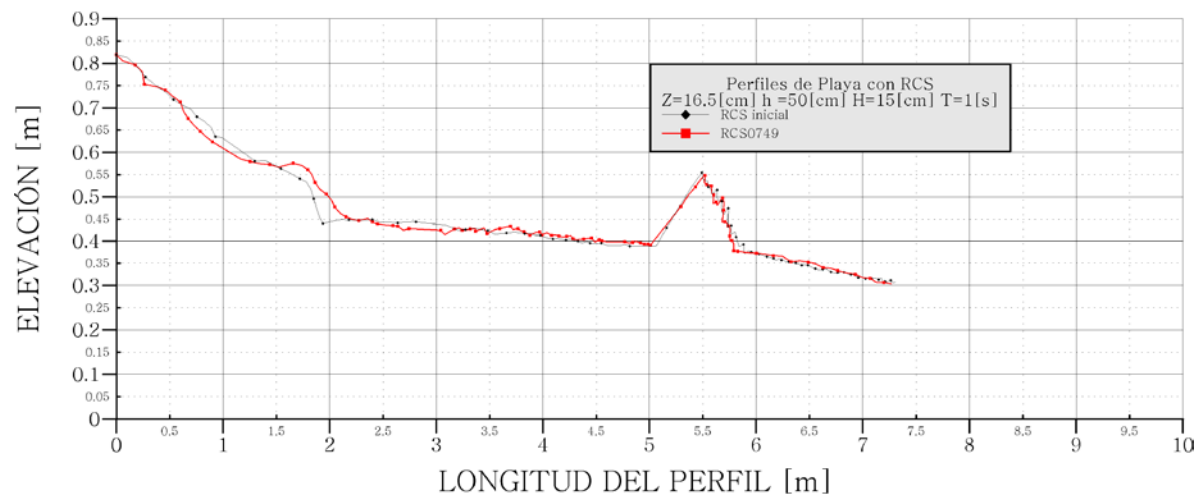


Figura C.65 Perfiles inicial y final de la prueba RCS0749

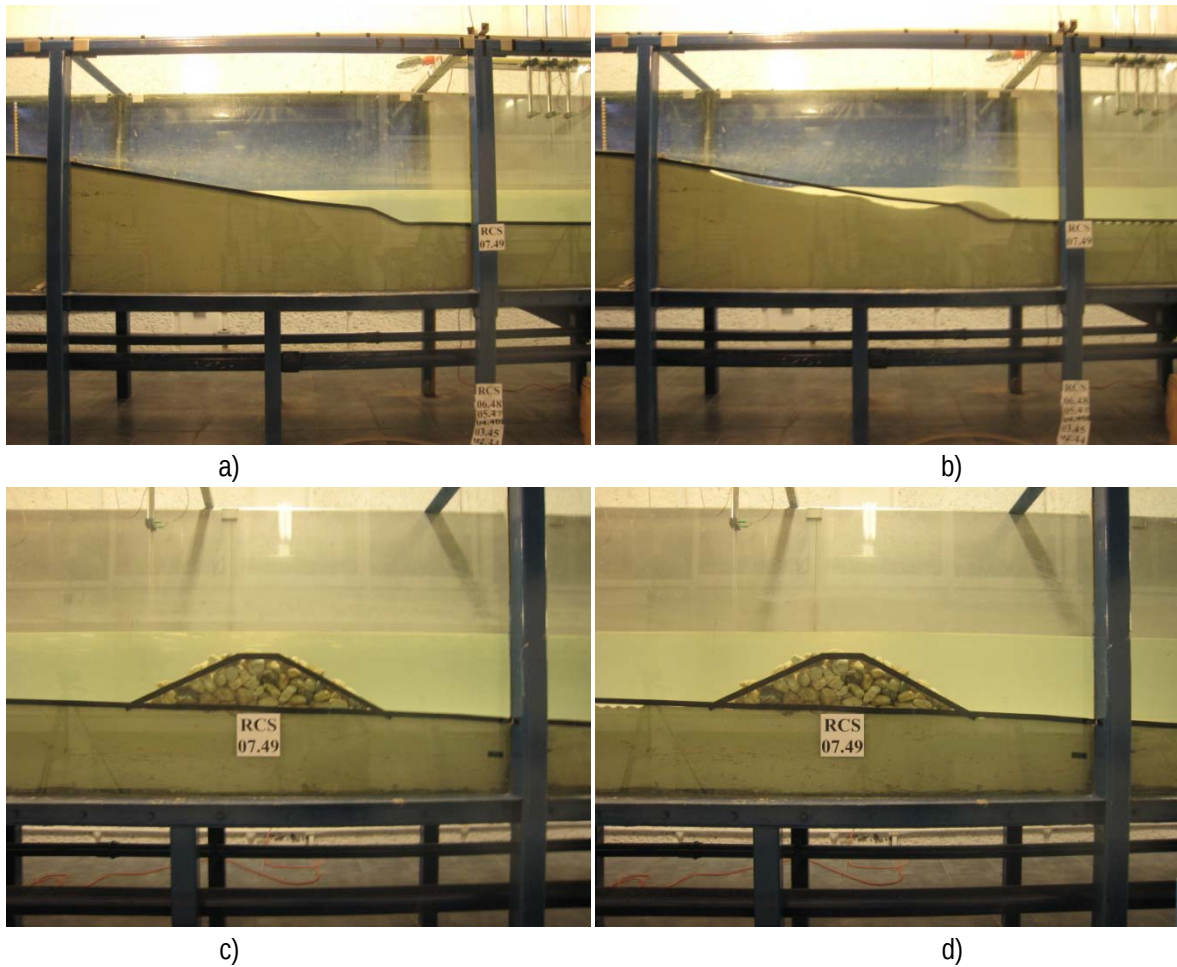


Figura C.66 Condiciones de la prueba RCS0749. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura.

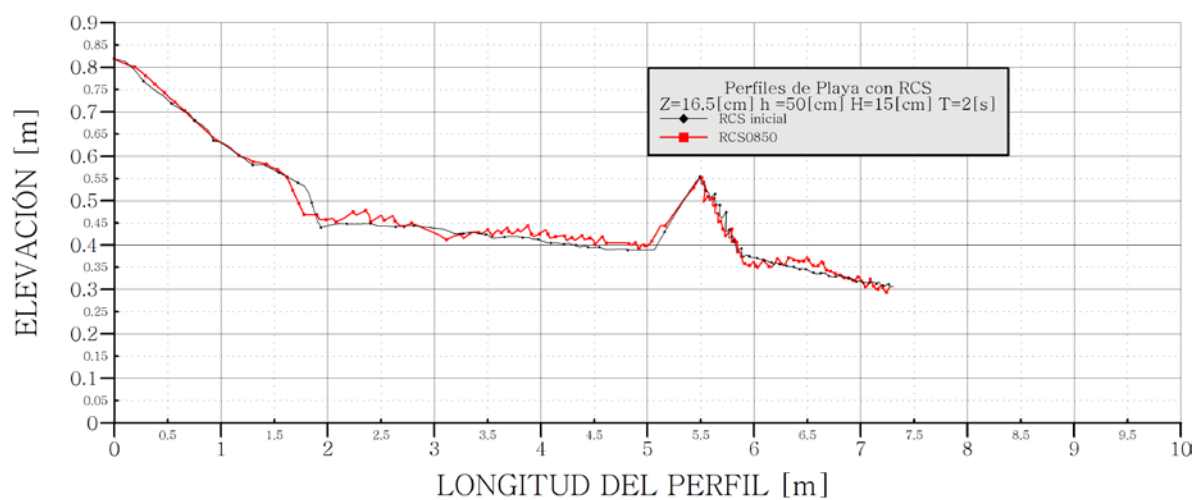


Figura C.67 Perfiles inicial y final de la prueba RCS0850

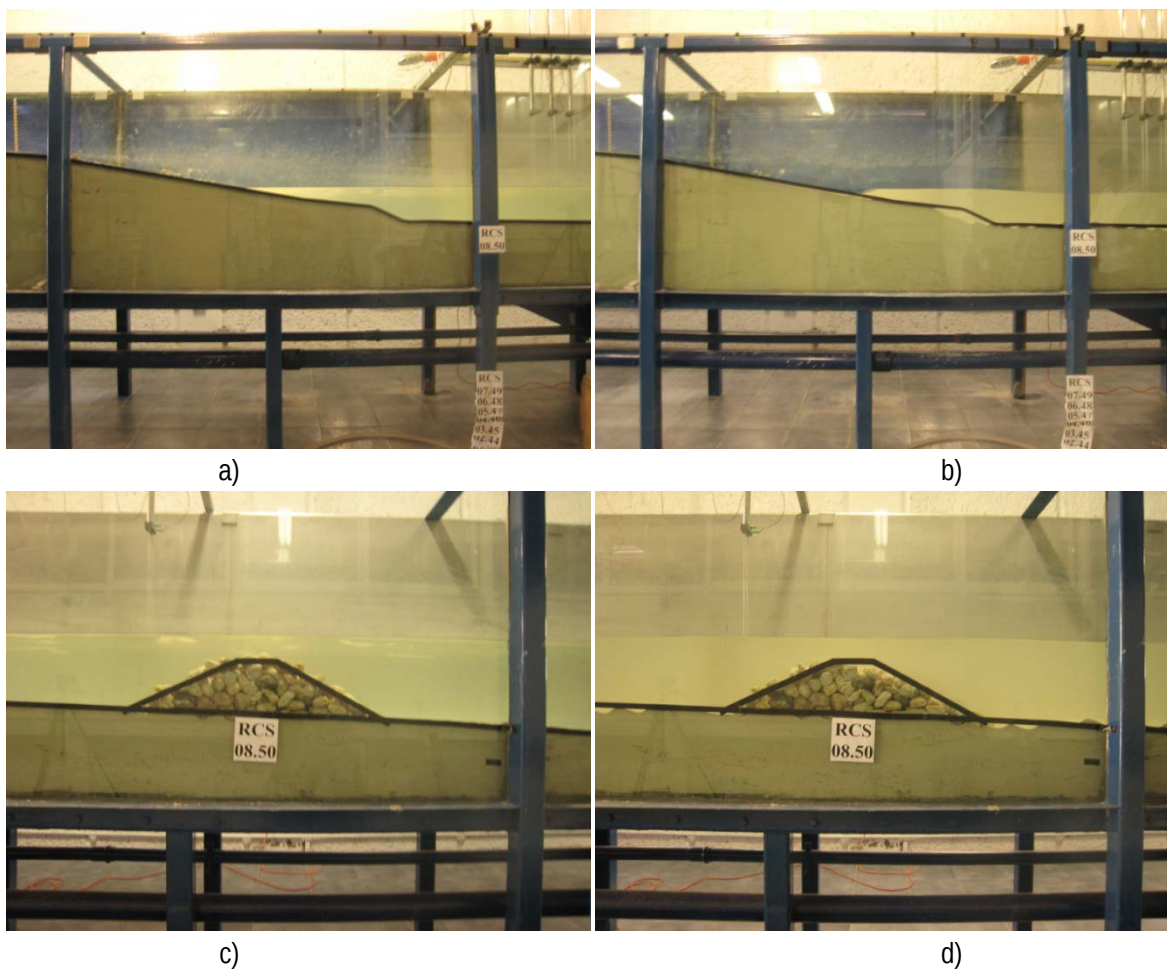


Figura C.68 Condiciones de la prueba RCS0850. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, b) Condición final de la estructura

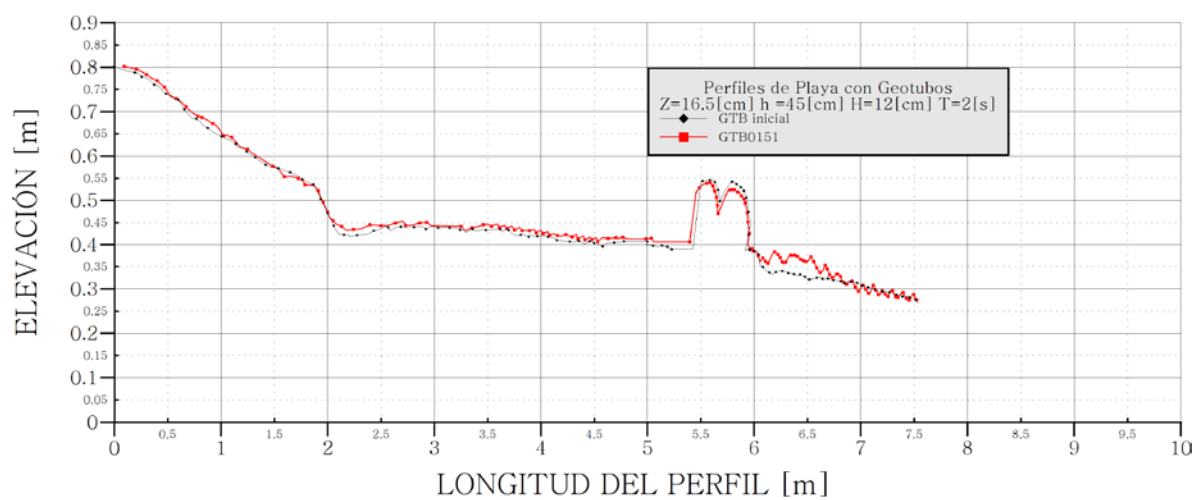


Figura C.69 Perfiles inicial y final de la prueba GTBS0151



Figura C.70 Condiciones de la prueba GTBS0151. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, b) Condición final de la estructura

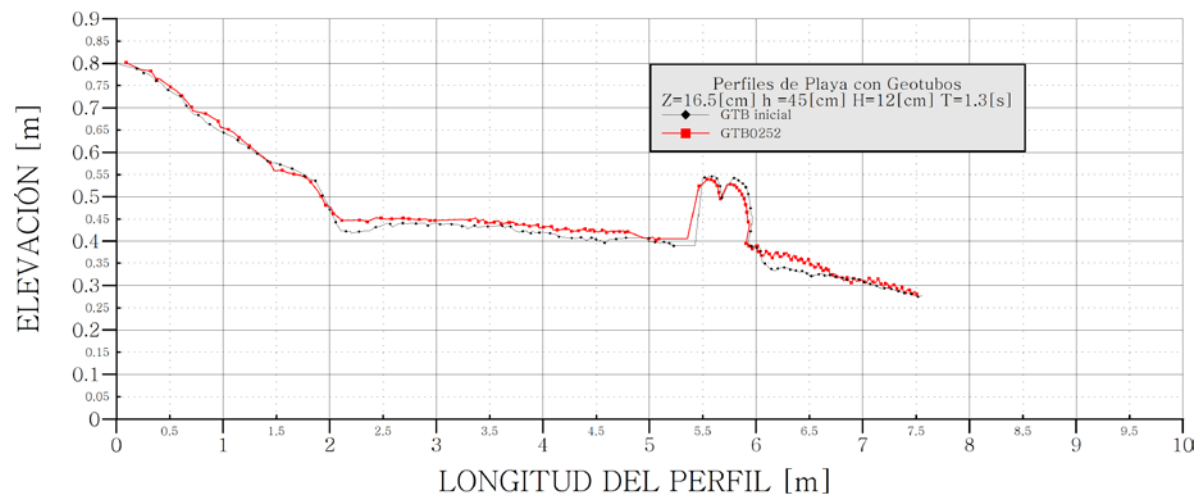


Figura C.71 Perfiles inicial y final de la prueba GTBS0252

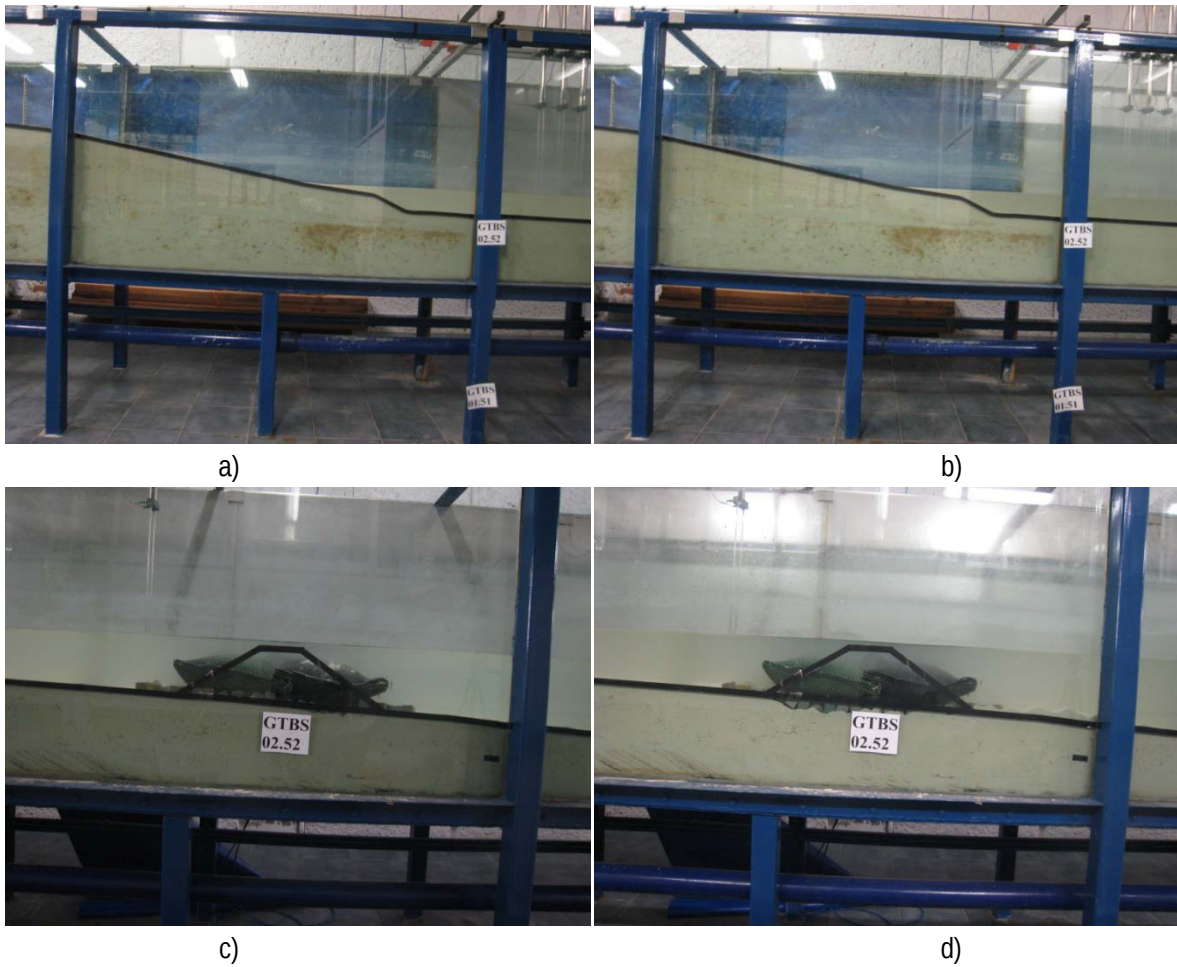


Figura C.72 Condiciones de la prueba GTBS0252. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura

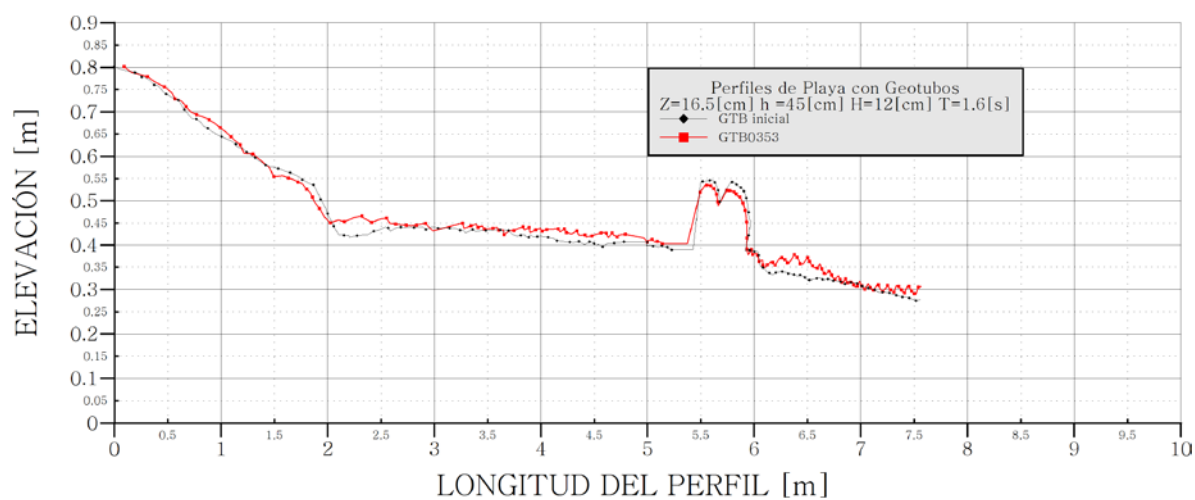


Figura C.73 Perfiles inicial y final de la prueba GTBS0353



Figura C.74 Condiciones de la prueba GTBS0353. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, d) Condición final de la estructura

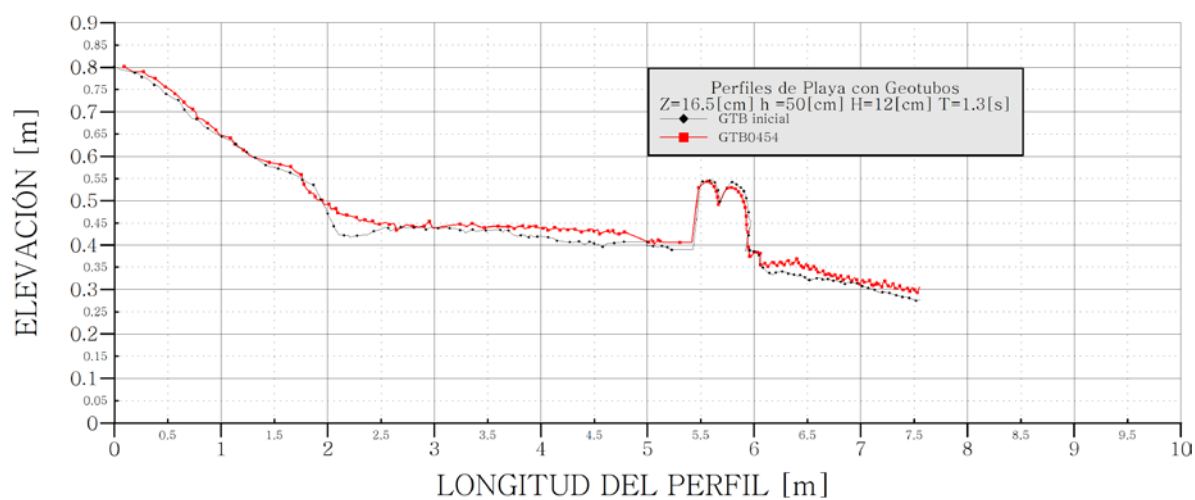


Figura C.75 Perfiles inicial y final de la prueba GTBS0454



Figura C.76 Condiciones de la prueba GTBS0454. a) Perfil inicial de la playa, b) Perfil final de la playa, c) Condición inicial de la estructura, b) Condición final de la estructura





Anexo D. Resultados experimentales

Dentro de este apartado se presentan, los coeficientes de reflexión y altura de ola significativa que incluye, reflejada, incidente y total, sobre la playa y estructura, para todas las pruebas realizadas así también se presentan las características de cada una de las pruebas.

En las tablas se utiliza la siguiente nomenclatura:

Prof; Profundidad de la estructura

H; Altura de ola para el ensayo

T; Periodo de la ola para el ensayo

Fb, Franco bordo

R; Número de registro de la prueba

Cref; Coeficiente de reflexión

Hsref; Altura de ola reflejada

Hsinc; Altura de ola incidente

Hstot, Altura de ola total

z; Profundidad del dique

SIN MATERIAL							Playa				Estructura			
Caso	Prueba	Prof [cm]	H[cm]	T[s]	Fb [cm]	R.	Cref[%]	Hs.ref[cm]	Hs.inc[cm]	Hs.tot[cm]	Cref[%]	Hs.ref[cm]	Hs.inc[cm]	Hs.tot[cm]
1	1	45	10	1	0	1	12.093	0.696	5.758	5.809	7.746	0.527	6.800	6.805
2	2	45	10	2	0		26.425	1.735	6.566	6.359	14.589	0.973	6.668	6.780
3	3	45	15	1	0		15.033	1.049	6.976	7.150	7.877	0.714	9.068	9.064
4	4	45	15	2	0		29.896	2.410	8.060	7.886	12.250	1.214	9.914	9.926
5	5	50	10	1	0		13.587	0.840	6.184	6.302	11.608	0.797	6.865	6.904
6	6	50	10	2	0		32.234	2.429	7.536	7.453	25.931	1.828	7.048	7.254
7	7	50	15	1	0		15.037	1.232	8.192	8.069	10.957	1.021	9.316	9.359
8	8	50	15	2	0		30.460	2.950	9.684	9.787	17.544	1.839	10.485	10.429
1	1	45	10	1	0	2	12.786	0.727	5.683	5.744	8.822	0.595	6.748	6.747
2	2	45	10	2	0		25.681	1.635	6.367	6.217	15.125	0.981	6.488	6.534
3	3	45	15	1	0		14.436	0.997	6.904	7.065	7.513	0.681	9.057	9.032
4	4	45	15	2	0		28.359	2.242	7.906	7.779	12.259	1.181	9.634	9.628
5	5	50	10	1	0		13.846	0.852	6.156	6.247	11.162	0.768	6.882	6.860
6	6	50	10	2	0		29.639	2.109	7.116	6.954	22.199	1.495	6.736	6.883
7	7	50	15	1	0		14.338	1.184	8.256	8.036	10.475	0.981	9.363	9.290
8	8	50	15	2	0		29.295	2.757	9.410	9.292	17.100	1.758	10.278	10.227
1	1	45	10	1	0	3	12.308	0.702	5.700	5.780	8.143	0.552	6.778	6.802
2	2	45	10	2	0		27.274	1.781	6.529	6.413	15.177	1.019	6.717	6.841
3	3	45	15	1	0		14.476	1.005	6.943	7.124	7.426	0.674	9.076	9.056
4	4	45	15	2	0		31.039	2.505	8.070	7.879	12.557	1.252	9.971	9.996
5	5	50	10	1	0		13.619	0.845	6.204	6.267	11.062	0.770	6.959	6.929
6	6	50	10	2	0		29.594	2.164	7.312	7.261	22.469	1.565	6.967	7.118
7	7	50	15	1	0		13.587	1.126	8.284	8.089	9.399	0.879	9.349	9.284
8	8	50	15	2	0		29.922	2.928	9.785	9.722	16.503	1.789	10.837	10.814
1	1	45	10	1	0	4	12.120	0.695	5.732	5.822	8.201	0.558	6.808	6.833
2	2	45	10	2	0		26.886	1.724	6.413	6.270	15.320	1.004	6.550	6.601
3	3	45	15	1	0		14.463	1.006	6.958	7.138	7.456	0.675	9.060	9.048
4	4	45	15	2	0		29.709	2.374	7.992	7.835	12.741	1.238	9.714	9.704
5	5	50	10	1	0		11.706	0.733	6.264	6.303	9.908	0.693	6.995	6.980
6	6	50	10	2	0		30.563	2.168	7.094	7.018	22.772	1.539	6.758	6.908
7	7	50	15	1	0		13.258	1.109	8.368	8.212	9.545	0.895	9.380	9.376
8	8	50	15	2	0		29.494	2.784	9.438	9.256	16.806	1.735	10.323	10.313

Tabla D.1 Valores obtenidos de coeficiente de reflexión y alturas de ola significativa reflejante, significativa incidente y significativa total, para el caso de playa sin protección.

CUBOS z=30 [cm]							Playa				Estructura			
Caso	Prueba	Prof [cm]	H[cm]	T[s]	Fb [cm]	R.	Cref[%]	Hs.ref[cm]	Hs.inc[cm]	Hs.tot[cm]	Cref[%]	Hs.ref[cm]	Hs.inc[cm]	Hs.tot[cm]
1	9	45	10	1	15	1	12.882	0.728	5.648	5.704	12.126	0.818	6.750	6.814
2	10	45	10	2	15		27.184	1.758	6.468	6.352	22.358	1.531	6.845	7.296
3	11	45	15	1	15		14.763	1.006	6.814	6.931	12.402	1.134	9.141	9.145
4	12	45	15	2	15		32.141	2.611	8.125	8.061	20.183	2.073	10.269	10.699
5	13	50	10	1	20		14.330	0.881	6.148	6.255	13.418	0.936	6.979	7.098
6	14	50	10	2	20		31.397	2.153	6.857	6.550	24.759	1.675	6.764	7.061
7	15	50	15	1	20		14.678	1.139	7.763	7.924	13.312	1.245	9.350	9.459
8	16	50	15	2	20		31.301	3.074	9.820	9.612	21.358	2.245	10.511	10.735
1	9	45	10	1	15	2	15.586	0.881	5.653	5.748	13.177	0.899	6.821	6.900
2	10	45	10	2	15		28.072	1.753	6.244	6.146	22.206	1.469	6.617	7.020
3	11	45	15	1	15		15.684	1.070	6.821	6.921	11.948	1.095	9.166	9.156
4	12	45	15	2	15		31.636	2.555	8.076	7.852	20.336	2.030	9.983	10.443
5	13	50	10	1	20		13.616	0.835	6.136	6.234	12.588	0.882	7.004	7.047
6	14	50	10	2	20		31.662	2.166	6.843	6.545	24.642	1.676	6.803	7.099
7	15	50	15	1	20		14.173	1.110	7.828	7.850	12.707	1.199	9.437	9.455
8	16	50	15	2	20		30.523	2.908	9.528	9.163	19.910	2.040	10.248	10.507
1	9	45	10	1	15	3	14.211	0.808	5.685	5.761	12.200	0.839	6.879	6.945
2	10	45	10	2	15		28.077	1.814	6.462	6.371	22.178	1.528	6.890	7.310
3	11	45	15	1	15		14.923	1.019	6.826	6.895	11.644	1.067	9.168	9.164
4	12	45	15	2	15		31.813	2.609	8.200	8.024	20.270	2.081	10.265	10.702
5	13	50	10	1	20		13.774	0.847	6.149	6.228	13.043	0.922	7.070	7.099
6	14	50	10	2	20		31.332	2.234	7.129	6.951	25.676	1.830	7.128	7.435
7	15	50	15	1	20		13.170	1.039	7.886	7.909	12.281	1.162	9.465	9.441
8	16	50	15	2	20		29.453	2.878	9.771	9.491	19.971	2.120	10.615	10.856
1	9	45	10	1	15	4	12.870	0.735	5.711	5.768	11.687	0.809	6.921	6.977
2	10	45	10	2	15		28.362	1.785	6.295	6.223	22.490	1.496	6.652	7.078
3	11	45	15	1	15		14.811	1.014	6.845	6.948	11.528	1.058	9.174	9.160
4	12	45	15	2	15		31.149	2.519	8.088	7.886	20.046	1.987	9.914	10.377
5	13	50	10	1	20		13.649	0.841	6.162	6.242	12.851	0.911	7.092	7.129
6	14	50	10	2	20		31.612	2.163	6.841	6.606	25.195	1.726	6.850	7.143
7	15	50	15	1	20		13.103	1.035	7.899	7.936	12.102	1.147	9.479	9.437
8	16	50	15	2	20		29.358	2.773	9.445	9.096	19.262	1.981	10.283	10.518

Tabla D.2 Valores obtenidos de coeficiente de reflexión y alturas de ola significativa reflejante, significativa incidente y significativa total para estructura y playa, con protección de cubos, a una profundidad de z=30[cm]

CUBOS z=16.5 [cm]							Playa				Estructura			
Caso	Prueba	Prof [cm]	H[cm]	T[s]	Fb [cm]	R.	Cref[%]	Hs.ref[cm]	Hs.inc[cm]	Hs.tot[cm]	Cref[%]	Hs.ref[cm]	Hs.inc[cm]	Hs.tot[cm]
9	17	45	10	1	1.5	1	16.741	0.652	3.893	3.637	10.337	0.704	6.809	6.869
10	18	45	10	2	1.5		39.475	1.836	4.652	4.677	27.066	1.888	6.977	7.162
11	19	45	15	1	1.5		20.217	0.920	4.553	4.279	11.602	1.081	9.321	9.360
12	20	45	15	2	1.5		37.961	2.219	5.846	5.451	20.900	2.166	10.365	10.579
13	21	50	10	1	6.5		14.700	0.785	5.340	5.261	13.991	0.969	6.925	7.016
14	22	50	10	2	6.5		35.773	2.266	6.334	6.155	31.401	2.252	7.173	7.423
15	23	50	15	1	6.5		18.345	1.248	6.802	6.409	15.090	1.436	9.516	9.674
16	24	50	15	2	6.5		37.269	3.023	8.112	7.884	25.002	2.686	10.741	10.984
9	17	45	10	1	1.5	2	19.182	0.746	3.891	3.630	10.645	0.739	6.943	6.998
10	18	45	10	2	1.5		38.908	1.768	4.544	4.455	26.502	1.809	6.827	6.923
11	19	45	15	1	1.5		22.558	1.027	4.554	4.317	11.918	1.121	9.408	9.416
12	20	45	15	2	1.5		37.908	2.233	5.891	5.534	19.544	1.968	10.070	10.144
13	21	50	10	1	6.5		15.842	0.844	5.330	5.203	13.683	0.949	6.938	7.013
14	22	50	10	2	6.5		37.661	2.250	5.974	5.792	32.129	2.213	6.887	7.057
15	23	50	15	1	6.5		17.769	1.214	6.831	6.363	14.372	1.373	9.553	9.659
16	24	50	15	2	6.5		37.129	3.007	8.100	7.833	25.108	2.713	10.804	11.053
9	17	45	10	1	1.5	3	17.015	0.651	3.828	3.594	10.600	0.720	6.791	6.869
10	18	45	10	2	1.5		39.686	1.829	4.607	4.635	26.346	1.847	7.010	7.154
11	19	45	15	1	1.5		21.160	0.977	4.617	4.385	11.499	1.087	9.452	9.476
12	20	45	15	2	1.5		36.869	2.164	5.870	5.561	19.785	2.012	10.168	10.302
13	21	50	10	1	6.5		13.818	0.742	5.370	5.244	13.146	0.926	7.040	7.112
14	22	50	10	2	6.5		37.711	2.357	6.250	6.208	31.872	2.284	7.165	7.347
15	23	50	15	1	6.5		18.770	1.280	6.818	6.326	14.775	1.403	9.493	9.522
16	24	50	15	2	6.5		36.407	2.946	8.092	7.831	25.411	2.745	10.803	11.034
9	17	45	10	1	1.5	4	17.144	0.673	3.924	3.669	10.352	0.729	7.041	7.094
10	18	45	10	2	1.5		38.539	1.749	4.537	4.472	26.660	1.822	6.835	6.950
11	19	45	15	1	1.5		19.515	0.910	4.665	4.427	11.449	1.090	9.521	9.564
12	20	45	15	2	1.5		37.285	2.229	5.977	5.643	19.471	2.067	10.615	10.793
13	21	50	10	1	6.5		13.579	0.730	5.375	5.251	13.005	0.919	7.070	7.135
14	22	50	10	2	6.5		38.093	2.283	5.992	5.876	32.285	2.233	6.915	7.098
15	23	50	15	1	6.5		17.438	1.184	6.788	6.313	14.711	1.405	9.553	9.643
16	24	50	15	2	6.5		35.950	2.852	7.933	7.596	26.000	2.706	10.406	10.483

Tabla D.3 Valores obtenidos de coeficiente de reflexión y alturas de ola significativa reflejante, significativa incidente y significativa total para estructura y playa, con protección de cubos, a una profundidad de z=16.5 [cm]

GEOTUBOS							Playa				Estructura			
Caso	Prueba	Prof [cm]	H[cm]	T[s]	Fb [cm]	R.	Cref[%]	Hs.ref[cm]	Hs.inc[cm]	Hs.tot[cm]	Cref[%]	Hs.ref[cm]	Hs.inc[cm]	Hs.tot[cm]
1	25	45	10	1	1.5	1	24.922	0.535	2.147	2.098	19.759	1.358	6.872	6.988
2	26	45	10	2	1.5		49.646	1.721	3.467	3.657	29.967	2.064	6.889	7.144
3	27	45	15	1	1.5		27.403	0.803	2.930	2.835	17.472	1.590	9.098	9.218
4	28	45	15	2	1.5		46.106	2.137	4.634	4.353	24.186	2.405	9.945	10.088
5	29	50	10	1	6.5		13.991	0.690	4.935	4.754	15.402	1.068	6.936	6.968
6	30	50	10	2	6.5		35.940	2.063	5.740	5.136	29.060	2.055	7.070	7.394
7	31	50	15	1	6.5		16.337	0.996	6.097	5.964	13.721	1.283	9.354	9.390
8	32	50	15	2	6.5		36.668	2.786	7.598	7.449	23.454	2.470	10.530	10.844
1	25	45	10	1	1.5	2	27.577	0.600	2.174	2.135	19.102	1.310	6.858	6.960
2	26	45	10	2	1.5		47.496	1.616	3.402	3.416	28.494	1.892	6.641	6.796
3	27	45	15	1	1.5		29.185	0.864	2.960	2.892	17.079	1.563	9.152	9.268
4	28	45	15	2	1.5		45.167	2.098	4.645	4.276	23.480	2.285	9.733	9.798
5	29	50	10	1	6.5		15.307	0.755	4.933	4.744	15.370	1.067	6.942	6.975
6	30	50	10	2	6.5		35.503	2.044	5.758	5.170	27.952	2.007	7.182	7.467
7	31	50	15	1	6.5		15.869	0.970	6.110	5.972	13.498	1.270	9.408	9.423
8	32	50	15	2	6.5		36.787	2.762	7.509	7.214	25.549	2.589	10.134	10.353
1	25	45	10	1	1.5	3	27.886	0.616	2.208	2.180	19.017	1.322	6.953	7.044
2	26	45	10	2	1.5		48.164	1.699	3.527	3.644	28.115	1.924	6.844	7.068
3	27	45	15	1	1.5		27.694	0.816	2.947	2.891	16.976	1.561	9.193	9.291
4	28	45	15	2	1.5		44.803	2.153	4.805	4.464	23.280	2.336	10.035	10.154
5	29	50	10	1	6.5		13.984	0.685	4.899	4.708	15.341	1.062	6.924	6.966
6	30	50	10	2	6.5		36.277	2.053	5.659	5.103	29.048	2.049	7.055	7.404
7	31	50	15	1	6.5		15.612	0.950	6.088	5.894	13.454	1.263	9.391	9.381
8	32	50	15	2	6.5		37.268	2.813	7.548	7.326	26.096	2.758	10.567	10.906
1	25	45	10	1	1.5	4	27.802	0.620	2.230	2.208	18.821	1.316	6.990	7.069
2	26	45	10	2	1.5		46.836	1.637	3.495	3.514	27.729	1.832	6.606	6.791
3	27	45	15	1	1.5		26.774	0.803	2.999	2.935	16.438	1.520	9.247	9.329
4	28	45	15	2	1.5		45.548	2.135	4.688	4.318	23.347	2.281	9.769	9.926
5	29	50	10	1	6.5		13.171	0.646	4.901	4.703	15.164	1.048	6.912	6.957
6	30	50	10	2	6.5		36.185	2.069	5.718	5.263	28.731	2.049	7.133	7.344
7	31	50	15	1	6.5		15.350	0.935	6.089	5.902	13.367	1.261	9.433	9.409
8	32	50	15	2	6.5		36.811	2.754	7.482	7.224	26.310	2.669	10.145	10.342

Tabla D.4 Valores obtenidos de coeficiente de reflexión y alturas de ola significativa reflejante, significativa incidente y significativa total para estructura y playa, con protección de geotubos, a una profundidad de $z=16.5$ [cm]

Wave Attenuation Dive WAD®						R.	Playa				Estructura			
Caso	Prueba	Prof [cm]	H[cm]	T[s]	Fb [cm]		Cref[%]	H _s ref[cm]	H _s inc[cm]	H _s tot[cm]	Cref[%]	H _s ref[cm]	H _s inc[cm]	H _s tot[cm]
1	33	45	10	1	1.5	1	14.772	0.657	4.445	4.343	10.168	0.694	6.828	6.862
2	34	45	10	2	1.5		34.908	1.773	5.078	5.103	17.723	1.212	6.840	7.015
3	35	45	15	1	1.5		17.960	0.950	5.289	5.300	9.691	0.881	9.093	9.095
4	36	45	15	2	1.5		35.922	2.188	6.092	6.085	14.892	1.481	9.946	10.095
5	37	50	10	1	6.5		16.981	0.937	5.516	5.648	12.379	0.856	6.913	6.980
6	38	50	10	2	6.5		31.607	1.981	6.268	6.304	21.721	1.511	6.954	7.141
7	39	50	15	1	6.5		16.387	1.135	6.928	7.103	10.839	1.005	9.269	9.369
8	40	50	15	2	6.5		33.592	2.854	8.495	8.514	18.873	1.973	10.452	10.623
9	41	40	12	1	1.5		30.642	1.739	5.676	5.801	9.101	0.684	7.514	7.468
10	42	45	15	1	1.5		21.063	0.903	4.285	4.052	10.689	0.953	8.916	8.889
1	33	45	10	1	1.5	2	16.047	0.713	4.443	4.371	10.120	0.691	6.831	6.875
2	34	45	10	2	1.5		35.706	1.763	4.937	5.085	17.632	1.162	6.592	6.727
3	35	45	15	1	1.5		19.879	1.049	5.274	5.317	9.897	0.905	9.144	9.119
4	36	45	15	2	1.5		35.533	2.152	6.057	6.081	14.511	1.405	9.679	9.708
5	37	50	10	1	6.5		14.567	0.802	5.504	5.629	10.332	0.724	7.004	7.002
6	38	50	10	2	6.5		33.711	2.009	5.960	6.126	21.571	1.448	6.713	6.904
7	39	50	15	1	6.5		14.323	0.986	6.887	6.936	10.097	0.942	9.331	9.317
8	40	50	15	2	6.5		34.129	2.816	8.251	8.430	18.154	1.835	10.109	10.360
9	41	40	12	1	1.5		29.562	1.669	5.645	5.798	9.127	0.684	7.490	7.434
10	42	45	15	1	1.5		22.270	0.987	4.431	4.227	11.067	0.994	8.982	8.904
1	33	45	10	1	1.5	3	14.537	0.645	4.437	4.359	9.123	0.624	6.837	6.879
2	34	45	10	2	1.5		35.794	1.825	5.098	5.129	17.860	1.226	6.867	7.016
3	35	45	15	1	1.5		17.751	0.933	5.256	5.228	9.049	0.826	9.128	9.106
4	36	45	15	2	1.5		35.895	2.191	6.104	6.050	14.295	1.429	9.994	10.114
5	37	50	10	1	6.5		13.261	0.733	5.526	5.626	9.853	0.695	7.051	7.067
6	38	50	10	2	6.5		34.407	2.142	6.227	6.332	22.420	1.569	6.997	7.214
7	39	50	15	1	6.5		15.188	1.049	6.907	6.961	10.164	0.949	9.336	9.314
8	40	50	15	2	6.5		34.045	2.874	8.442	8.601	17.935	1.885	10.510	10.702
9	41	40	12	1	1.5		29.729	1.685	5.666	5.818	8.743	0.660	7.545	7.501
10	42	45	15	1	1.5		21.004	0.933	4.443	4.232	10.693	0.961	8.991	8.904
1	33	45	10	1	1.5	4	13.639	0.607	4.447	4.366	8.854	0.607	6.853	6.898
2	34	45	10	2	1.5		36.495	1.833	5.022	5.107	18.016	1.200	6.661	6.816
3	35	45	15	1	1.5		17.690	0.929	5.252	5.218	9.246	0.843	9.112	9.094
4	36	45	15	2	1.5		36.651	2.206	6.019	5.934	14.421	1.410	9.780	9.902
5	37	50	10	1	6.5		13.116	0.725	5.524	5.611	9.733	0.687	7.061	7.069
6	38	50	10	2	6.5		35.707	2.253	6.309	6.389	22.848	1.621	7.094	7.226
7	39	50	15	1	6.5		14.905	1.023	6.866	6.940	9.888	0.914	9.247	9.215
8	40	50	15	2	6.5		34.289	2.839	8.279	8.532	17.569	1.782	10.141	10.346
9	41	40	12	1	1.5		30.153	1.704	5.650	5.823	9.249	0.694	7.500	7.465
10	42	45	15	1	1.5		20.006	0.895	4.475	4.242	10.465	0.940	8.985	8.922

Tabla D.5 Valores obtenidos de coeficiente de reflexión y alturas de ola significativa reflejante, significativa incidente y significativa total para estructura y playa, con protección de Wave Attenuation Devices, a una profundidad de $z=16.5[\text{cm}]$

ROCAS						R.	Playa				Estructura			
Caso	Prueba	Prof [cm]	H[cm]	T[s]	Fb [cm]		Cref[%]	Hs.ref[cm]	Hs.inc[cm]	Hs.tot[cm]	Cref[%]	Hs.ref[cm]	Hs.inc[cm]	Hs.tot[cm]
1	43	45	10	1	1.5	1	18.623	0.519	2.788	2.686	8.380	0.561	6.692	6.740
2	44	45	10	2	1.5		45.481	1.823	4.009	3.998	28.386	1.972	6.947	7.278
3	45	45	15	1	1.5		23.813	0.848	3.561	3.352	10.808	0.962	8.898	8.849
4	46	45	15	2	1.5		43.596	2.244	5.146	4.896	22.611	2.262	10.002	10.210
5	47	50	10	1	6.5		13.224	0.641	4.846	4.808	10.951	0.754	6.885	6.938
6	48	50	10	2	6.5		35.784	2.122	5.929	5.801	30.931	2.203	7.123	7.415
7	49	50	15	1	6.5		15.227	0.900	5.909	5.766	12.701	1.176	9.261	9.377
8	50	50	15	2	6.5		38.083	2.731	7.171	6.774	24.783	2.613	10.544	10.848
1	43	45	10	1	1.5	2	20.960	0.600	2.864	2.750	8.354	0.560	6.704	6.732
2	44	45	10	2	1.5		45.049	1.806	4.009	3.893	26.713	1.803	6.750	6.963
3	45	45	15	1	1.5		25.431	0.910	3.579	3.404	9.916	0.880	8.879	8.823
4	46	45	15	2	1.5		42.340	2.303	5.438	5.086	18.608	1.813	9.745	9.794
5	47	50	10	1	6.5		15.767	0.764	4.848	4.802	11.490	0.799	6.958	7.014
6	48	50	10	2	6.5		36.466	2.029	5.565	5.429	31.104	2.103	6.760	6.948
7	49	50	15	1	6.5		15.178	0.899	5.925	5.729	12.352	1.148	9.292	9.367
8	50	50	15	2	6.5		38.489	2.743	7.126	6.573	25.779	2.616	10.148	10.309
1	43	45	10	1	1.5	3	20.165	0.589	2.920	2.805	7.791	0.523	6.712	6.733
2	44	45	10	2	1.5		46.132	1.911	4.143	4.154	25.575	1.778	6.951	7.180
3	45	45	15	1	1.5		24.241	0.875	3.609	3.429	9.947	0.884	8.891	8.829
4	46	45	15	2	1.5		43.436	2.433	5.602	5.268	18.067	1.846	10.217	10.221
5	47	50	10	1	6.5		14.391	0.698	4.847	4.783	10.750	0.751	6.990	7.042
6	48	50	10	2	6.5		37.353	2.179	5.833	5.755	31.669	2.246	7.093	7.439
7	49	50	15	1	6.5		14.520	0.857	5.901	5.693	12.154	1.129	9.289	9.346
8	50	50	15	2	6.5		39.439	2.833	7.184	6.681	25.610	2.692	10.512	10.831
1	43	45	10	1	1.5	4	19.047	0.563	2.954	2.839	7.597	0.508	6.691	6.706
2	44	45	10	2	1.5		45.507	1.883	4.138	4.058	25.628	1.737	6.777	6.985
3	45	45	15	1	1.5		22.554	0.823	3.648	3.474	9.621	0.855	8.883	8.822
4	46	45	15	2	1.5		43.004	2.406	5.595	5.222	18.529	1.805	9.741	9.788
5	47	50	10	1	6.5		12.803	0.620	4.845	4.797	10.365	0.726	7.008	7.068
6	48	50	10	2	6.5		38.138	2.187	5.734	5.594	32.626	2.285	7.004	7.182
7	49	50	15	1	6.5		13.868	0.821	5.922	5.719	12.328	1.143	9.274	9.326
8	50	50	15	2	6.5		40.260	2.927	7.271	6.723	25.918	2.725	10.515	10.856

Tabla D.6 Valores obtenidos de coeficiente de reflexión y alturas de ola significativa reflejante, significativa incidente y significativa total para estructura y playa, con protección de rocas, a una profundidad de $z=16.5$ [cm]

GEOTUBOS®							Playa				Estructura			
Caso	Prueba	Prof [cm]	H[cm]	T[s]	Fb [cm]	R.	Cref[%]	H _s ref[cm]	H _s inc[cm]	H _s tot[cm]	Cref[%]	H _s ref[cm]	H _s inc[cm]	H _s tot[cm]
1	51	45	12	2	1.5	1	48.732	1.655	3.396	3.451	34.908	3.052	8.744	9.120
2	52	45	12	1.3	1.5		36.067	1.073	2.976	2.789	20.495	1.787	8.719	8.737
3	53	45	12	1.6	1.5		42.468	1.509	3.553	3.357	22.846	2.012	8.806	8.978
4	54	50	12	1.3	6.5		29.988	1.611	5.373	4.937	16.626	1.493	8.977	8.927
1	51	45	12	2	1.5	2	50.406	1.745	3.463	3.547	31.030	2.613	8.421	8.761
2	52	45	12	1.3	1.5		34.357	1.038	3.020	2.799	19.502	1.707	8.755	8.748
3	53	45	12	1.6	1.5		43.024	1.509	3.507	3.319	22.742	1.983	8.719	8.873
4	54	50	12	1.3	6.5		28.597	1.564	5.468	4.965	15.504	1.408	9.084	9.037
1	51	45	12	2	1.5	3	49.795	1.794	3.602	3.755	28.131	2.439	8.671	8.829
2	52	45	12	1.3	1.5		34.023	1.037	3.049	2.811	19.608	1.719	8.767	8.759
3	53	45	12	1.6	1.5		43.644	1.526	3.497	3.293	22.959	2.001	8.716	8.905
4	54	50	12	1.3	6.5		27.894	1.530	5.485	4.944	15.449	1.411	9.136	9.090
1	51	45	12	2	1.5	4	49.049	1.739	3.546	3.677	26.856	2.258	8.409	8.588
2	52	45	12	1.3	1.5		33.171	1.008	3.039	2.804	19.690	1.715	8.709	8.726
3	53	45	12	1.6	1.5		44.684	1.561	3.495	3.279	23.327	2.057	8.819	8.978
4	54	50	12	1.3	6.5		27.064	1.474	5.446	4.960	15.476	1.402	9.061	9.029

Tabla D.7 Valores obtenidos de coeficiente de reflexión y alturas de ola significativa reflejante, significativa incidente y significativa total para estructura y playa, con protección de geotubos, a una profundidad de $z=16.5$ [cm]

FUENTES DE INFORMACIÓN

1. Anexo 4; Descripción del funcionamiento de geotubos. Coripa S. A. oficina técnica noviembre 2004.
2. Apuntes del curso de obras marítimas, semestre 2009-2; UNAM; Facultad de Ingeniería.
3. **Baquerizo, A., A.** (1995) *Reflexión del oleaje en playas. Métodos de evaluación y predicción*, Tesis doctoral. Santander, Universidad de Cantabria, España.
4. **Baquerizo, A. A., Losada, R. M.A. and López, R. M.** (2004) Fundamentos del movimiento oscilatorio. Grupo de Costas y Puerto, Universidad de Granda, 10 de septiembre de 2004.
5. **Berkhoff, J.,** (1972). *Computation of combined refraction-diffraction*. In: Proceedings of the 13th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Vancouver, Canada, pp. 471–490.
6. **Bruun, P.** (1954). *Coast erosion and the development of beach profiles. Beach erosion board*. Núm. 44.
7. **Chamberlain, P., Porter, D.** (1995) *The modified mild-slope equation*. Journal Fluid Mechanics 29, 393–407. Porter, D., Staziker, D., 1995. Extensions of the mild-slope equation. Journal of Fluid Mechanics 300, 367–382.
8. **Dean, R.G.** (1977) *Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf coasts*. Delaware: University of Delaware. Ocean Engineering Report. Núm. 12.
9. **Dean, R., G.** (2002) *Beach Nourishment. Theory and Practice*. Advanced Series on Ocean Engineering- Volume 18 Ed. World Scientific.
10. **Dingemans, M. W.** (1997). *Water Wave Propagation Over Uneven Bottoms*. World Scientific, Singapore. Isaacson, M., Qu, S., 1990. Waves in a harbour with partially reflecting boundaries. Coastal Engineering 14, 193–214.
11. **Dingemans, M. W.** (1997). *Water wave propagation over uneven bottoms*. pp. 286-325.
12. **González, M, Medina, R, y Losada, M. A.** (1999). *Equilibrium beach profile model for perched beaches*. Coastal engineering. Vol36. pp 343-357
13. **Hasselmann, K, Barnett, T P, Bonws, E, Carlson, H, Cartwright, D C, Enke, K, Ewing, J, Gienapp, H, Hasselmann, D E, Kruseman, P, Meerburg, A, Muller, P, Olbers, D J, Richter, K, Sell, W, y Walden, H** (1973), *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (JONSWAP)*, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburgo, 95 pp.
14. **Iribarren, C.R. et C. Nogales** (1949). *Protection des Ports II*. Comm. 4, 17th Int. Navig. Congr. Lisboa.
15. **Krystian W. Pilarczyk Ryszard B. Zeidler Ed. A.A. Balkema, Rotterdam** (1996). *Offshore breakwaters and shore evolution control*.

16. **Losada, I., Silva, R., Losada, M.,** (1996a). *3-D non breaking regular wave interaction with submerged breakwaters*. Coastal Engineering 28, 229–248.
17. **Losada, I., Silva, R., Losada, M.,** (1996b). *Interaction of non-breaking directional random waves with submerged breakwaters*. Coastal Engineering 28, 249–266.
18. **Massel, S.** (1993). *Extended refraction–diffraction equation for surface waves*. Coastal Engineering 19, 97–129.
19. **McCowan, J.** (1891) *On the solitary wave*. Phil. Mag., J.Sci., vol. 32, no. 5, pp. 45-48.
20. Metodología de instalación de geotubos en obras de costa. Coripa S. A. oficina técnica noviembre 2004.
21. **Mei, C.C.** (1983) The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves. John Wiley and Sons.
22. **Meneses, A.L.** (2009). *Efectos del nivel freático en playas* Tesis de maestría en ingeniería. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México
23. **Rojanakamthorn, S., Isobe, M., Watanabe, A.** (1989). *A mathematical model of wave transformation over submerged breakwaters*. Coastal Engineering 32, 209–234.
24. **Rojanakamthorn, S., Isobe, M., Watanabe, A.** (1990). *Modelling of wave transformation on submerged breakwaters*. In: Proceedings of the 22nd ICCE, ASCE, New York, USA.
25. **Ruiz, G.** (2008). *Análisis Granulométrico* Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Grupo de Costas y Puertos.
26. Shoreline restored with geotextile tube as submerged breakwaters. Geosynthetics formley GFR, Back to the beach in Mexico by Enrique Alvarez, Ramiro Rubio and Herbert Ricalde Volume 24, Number 3.
27. **Sierra, J.P. and Lo Presti, A.** (1998). *Estudio comparativo de criterios de rotura del oleaje regular*. Ingeniería del Agua Vol. 5 Num. 1 marzo 1998, paginas 23-34
28. **Silva, R.** (2001) *Apunte del curso Hidráulica Marítima* Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
29. **Silva, R., Salles, P., Govaere, G.** (2002a). *Extended solution for waves travelling over a rapidly changing porous bottom*. Ocean Engineering 30, 437–452.
30. **Silva, R., Salles, P., Palacio, A.** (2002b). *Linear waves propagating over a rapidly varying finite porous bed*. Coastal Engineering 44, 239–260.
31. **Silva, R. and Mendoza, E.G.** (2004). *Modelos de perfil de playa en presencia de estructuras sumergidas de protección*, Universidad Nacional Autónoma de México, Ingeniería Hidráulica en México, vol. XIX núm. 1, pp. 5-16.

32. **Silva, R.** (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Instituto de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, serie de docencia. SD/49
33. **Silva, R., Mendoza, E., Losada, M.A.** (2005b). *Modelling linear wave transformation induced by dissipative structures. Regular Waves*. Ocean Engineering, submitted for publication, doi: 10.1016/j.oceaneng.2005.11.007.
34. **Silva, R.**(1995). *Trasnformación del oleaje debido a obras de defensa litoral*. Tesis doctoral. Santander: Universidad de Cantabria, 338 pp.
35. "The use of living shorelines to mitigate the effects of storm events on Dauphin Island, Alabama USA". Mississippi- Alabama Sea Grant Consortium. Departament of Fisheries and Allied Aquacultures, Aurbun University. American Fisheries Society Symposium, 2008
36. "Wave Measurements at the Pensacola Wave-Attenuation-Divece site" Submitted by Ping Wang, Ph. D. Department of Geology University of south Florida.
37. **Wright, L.D. and Short, A.D.**, (1984). *Morphodynamic. Variability of Surf Zones and Beaches: a Synthesis*. Mar. Geology, v. 56, pp. 93-118.
38. **Vidal, C., Losada, M. A., Medina, R. and Losada, I.**,(1995). *Modelos de Morfodinámica de playas*. Ingeniería del Agua. Vol. 2 Num. Extraordinario p. 74.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Características del oleaje	17
Figura 1.2	Refracción del oleaje.....	18
Figura 1.3	Reflexión provocada por un dique vertical	19
Figura 1.4	Difracción del oleaje	19
Figura 1.5	Tipos de rotura	20
Figura 1.6	Funcionamiento de una estructura sumergida	22
Figura 1.7	Ubicación de los diferentes sectores de un dique rebasable o sumergido.....	23
Figura 1.8	Curvas de variación del número de estabilidad con el franco bordo adimensional. Inicio de Avería, talud exterior. De Vidal et al. (1992)	23
Figura 1.9	Curvas de variación del número de estabilidad con el franco bordo adimensional. Inicio de avería, coronación. De Vidal et al. (1992).....	25
Figura 1.10	Curvas de variación del número de estabilidad con el francobordo adimensional. Inicio de avería, talud interior. De Vidal et al. (1992).....	26
Figura 1.11	Curvas de variación del número de estabilidad con el francobordo adimensional. Inicio de avería, talud interior del morro. Vidal et al. (1992)	27
Figura 1.12	Coeficiente de reflexión en diques rebasables de escollera, Vidal et. al (1992)	29
Figura 1.13	Esquema de un perfil colgado.....	31
Figura 1.14	Perfil de equilibrio.....	32
Figura 1.15	Coeficiente de reflexión R contra ancho relativo del dique, para diferentes diques sumergidos, donde B es el ancho de la estructura y L es la longitud de onda. González (1999).....	34
Figura 1.16	Relación de profundidades contra altura del dique para diferentes anchos. González 1999	34
Figura 2.1	Canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM.....	45
Figura 2.2	De izquierda a derecha; soporte del sistema de generación de oleaje y motor eléctrico.....	46
Figura 2.3	Placa de acero y sistema de absorción.....	46
Figura 2.4	Sensores de nivel.....	47
Figura 2.5	Estación total, modelo TCR407 power	47
Figura 2.6	Sensores de presión	48
Figura 2.7	Incremento en el nivel medio del mar para dos ubicaciones y diferentes estados de mar	51
Figura 2.8	Ubicación de la estructura de acuerdo a las diferentes profundidades: De izquierda a derecha, profundidad de 30 cm y profundidad de 16.5 cm	51
Figura 2.9	Geometría propuesta para el estudio.....	52
Figura 2.10	Isométrico de la geometría propuesta.....	52
Figura 2.11	Modelo fabricado con cubos	53
Figura 2.12	Modelo fabricado con geotubos®.....	54
Figura 2.13	Disipación de energía debido a los elementos prefabricados y su arreglo	55
Figura 2.14	Modelo fabricado con WAD®.....	55
Figura 2.15	Modelo fabricado con rocas	56
Figura 2.16	Ubicación de los sensores dentro del canal de oleaje y del perfil inicial, cotas en metros	57
Figura 2.17	Perfil Inicial completo de la playa.....	58
Figura 2.18	Diagrama de flujo de la metodología experimental	59
Figura 3.1	Esquema de playa colgada	64
Figura 3.2	Sección transversal del caso unidireccional.....	64

Figura 3.3	Espectro de oleaje	69
Figura 4.1	Oleaje incidente sobre la playa para SM-CBS $z=30[\text{cm}]$	75
Figura 4.2	Altura de ola significativa en $[\text{cm}]$ sobre la estructura.....	75
Figura 4.3	Perfiles finales para $h=45[\text{cm}]$; $H=10[\text{cm}]$; $T=1[\text{s}]$	76
Figura 4.4	Perfiles finales para $h=45[\text{cm}]$; $H=10[\text{cm}]$; $T=2[\text{s}]$	76
Figura 4.5	Perfiles finales para $h=45[\text{cm}]$; $H=15[\text{cm}]$; $T=1[\text{s}]$	77
Figura 4.6	Perfiles finales para $h=45[\text{cm}]$; $H=15[\text{cm}]$; $T=2[\text{s}]$	77
Figura 4.7	Perfiles finales para $h=50[\text{cm}]$; $H=10[\text{cm}]$; $T=1[\text{s}]$	77
Figura 4.8	Perfiles finales para $h=50[\text{cm}]$; $H=10[\text{cm}]$; $T=2[\text{s}]$	78
Figura 4.9	Perfiles finales para $h=50[\text{cm}]$; $H=15[\text{cm}]$; $T=1[\text{s}]$	78
Figura 4.10	Perfiles finales para $h=50[\text{cm}]$; $H=15[\text{cm}]$; $T=2[\text{s}]$	78
Figura 4.11	Coeficientes de reflexión sobre la estructura.	80
Figura 4.12	Altura de ola significativa en $[\text{cm}]$ sobre la estructura, para todos los materiales (H_{ref} ; Altura de ola significativa reflejada por la estructura, H_{inc} ; Altura de ola significativa incidente sobre la estructura, H_{tran} ; Altura de ola transmitida.).....	81
Figura 4.13	Valores de disipación del dique.....	81
Figura 4.14	Variables para determinar el parámetro Δy	84
Figura 4.15	Relación de condiciones de oleaje contra línea de costa para $F_b/h=0.033$ [1].	85
Figura 4.16	Relación de condiciones de oleaje contra línea de costa para $F_b/h=0.13$ [1].	85
Figura 4.17	Perfiles finales en la zona de protección para $h=45[\text{cm}]$; $H=10[\text{cm}]$; $T=1[\text{s}]$	87
Figura 4.18	Perfiles finales en la zona de protección para $h=45[\text{cm}]$; $H=10[\text{cm}]$; $T=2[\text{s}]$	87
Figura 4.19	Perfiles finales en la zona de protección para $h=45[\text{cm}]$; $H=15[\text{cm}]$; $T=1[\text{s}]$	87
Figura 4.20	Perfiles finales en la zona de protección para $h=45[\text{cm}]$; $H=15[\text{cm}]$; $T=2[\text{s}]$	88
Figura 4.21	Perfiles finales en la zona de protección para $h=50[\text{cm}]$; $H=10[\text{cm}]$; $T=1[\text{s}]$	88
Figura 4.22	Perfiles finales en la zona de protección para $h=50[\text{cm}]$; $H=10[\text{cm}]$; $T=2[\text{s}]$	88
Figura 4.23	Perfiles finales en la zona de protección para $h=50[\text{cm}]$; $H=15[\text{cm}]$; $T=1[\text{s}]$	89
Figura 4.24	Perfiles finales en la zona de protección para $h=50[\text{cm}]$; $H=15[\text{cm}]$; $T=2[\text{s}]$	89
Figura 4.25	Variación entre el perfil generado por WAD y WAD-RCS, para las mismas condiciones de oleaje.....	89
Figura 4.26	Secciones para determinar la pendiente en el perfil inicial	90
Figura 4.27	Variación de pendiente para el tramo 1	92
Figura 4.28	Variación de pendiente para el tramo 2	92
Figura 4.29	Variación de pendiente para el tramo 3	93
Figura 4.30	Valores de coeficientes de reflexión para la condición sin estructura [%].....	95
Figura 4.31	Valores de altura de ola para la condición sin estructura $[\text{cm}]$	95
Figura 4.32	Valores medidos contra calculados para altura de ola total en cm	96
Figura 4.33	Valores medidos contra calculados para altura de ola reflejada en cm	96
Figura 4.34	Valores medidos contra calculados para coeficientes de reflexión en [%].....	97
Figura 4.35	Perfiles de playa medidos, para estructura formada por cubos	98
Figura 4.36	Perfiles de playa calculados.....	98

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Rango de valores del número de Iribarren para los distintos tipos de roturas, Silva, 1997	21
Tabla 1.2	Parámetros de ajuste para la ecuación 3 para cada uno de los sectores de los diques rebasables y no rebasables y niveles de avería	24
Tabla 1.3	Valores de daño, S, para la formulación de van Der Meer (1988)	27
Tabla 1.4	Valores de porosidad P, para diferentes tipos de estructuras.....	28
Tabla 2.1	Caracterización del material, cubos	53
Tabla 2.2	Caracterización del material, geotubos®	54
Tabla 2.3	Caracterización del material, WAD®.....	55
Tabla 2.4	Caracterización del material, rocas	55
Tabla 2.5	Resumen de variables de estudio	56
Tabla 4.1	Nomenclatura utilizada y condiciones ensayadas en cada una de las pruebas.....	73
Tabla 4.2	Parámetro de Gourlay, F_{c0}	83
Tabla 4.3	Valores para determinar la relación de condiciones de oleaje contra línea de costa....	84
Tabla 4.4	Valores de las líneas de tendencia para cada condición.	86
Tabla 4.5	Rango de valores del número de Iribarren para los distintos tipos de roturas, Silva 1997.	91
Tabla 4.6	Valores característicos de cada tramo del perfil de playa.	91
Tabla 4.7	Valores de pendiente y número de Iribarren para cada tramo.	94
Tabla 4.8	Condiciones de estados de mar para cada ensayo.	94

--

--

LISTA DE SIMBOLOS

$H; H_B; H_0$	Altura de ola
L	Longitud de ola
T	Periodo de ola
C	Celeridad del oleaje
H, d	Profundidad
L_0, L_{op}	Longitud de la ola en aguas profundas
W_{nr}	Peso de piezas para un dique no rebasable
D_{nr}	Diámetro de piezas para un dique no rebasable
F_{dr}	Franco bordo adimensional talud exterior, diques rebasables
F	Franco bordo del dique rebasable o sumergido
N_{snr}	Número de estabilidad para francobordo de dique no rebasable
D_{te}	Diámetro de piezas, talud exterior, dique rebasable
N_{ste}	Número de estabilidad para francobordo de dique rebasable
F_{dte}	Franco bordo adimensional para coronación, diques rebasables
N_{sc}	Número de estabilidad para coronación de dique rebasable
D_c	Diámetro de piezas, coronación, dique rebasable
D_{ti}	Diámetro de piezas, talud interior, dique rebasable
N_{sti}	Número de estabilidad para talud interior de dique rebasable
F_{dmr}	Francobordo adimensional del morro
D_{mnr}	Diámetro de las piezas en el morro del dique no rebasable
D_{mr}	Diámetro de las piezas en el morro del dique rebasable
N_{smnr}	Número de estabilidad en el morro para diques no rebasables
N_{smr}	Número de estabilidad en diques en diques rebasables
I_r	Número de Iribarren
$I_{r_{crit}}$	Número de Iribarren critico
S_d	Coefficiente experimental, criterio de daño
N	Número de olas del estado de mar
K_T	Coefficiente de transmisión
B	ancho de la corona del dique sumergido
K_R	Coefficiente de reflexión den diques rebasables
D^*	Disipación de energía por unidad de volumen
x	Ubicación del punto de interés partiendo de la costa [m]
A	Parámetro de escala del sedimento; parámetro de forma
H_c	Profundidad de cierre
H_{s12}	Altura de ola significativa que es excedida doce horas al año y que es medida en la playa a una profundidad h
T_s	Periodo asociado a la ola H_{s12}
g	Aceleración de la gravedad
$\overline{H}$	Altura de ola significativa media anual
σ_H	Desviación estándar de la altura de ola
β	Pendiente de la playa
ω_f	Velocidad de caída del sedimento [m/s]
H_e	Altura de ola que llega el dique
d	Es la profundidad del agua sobre el arrecife
α	Factor de escala y esta asociado con la energía total de espectro
$\phi_{PM}(f / f_P)$	Función de forma de Pierson-Moskowitz

ϕ_J	Factor de forma del espectro Jonswap
γ	Factor de forma pico del espectro
σ	Ancho de la base del espectro antes (σ_A) y después (σ_B) de la frecuencia pico
x	Fetch; distancia desde la costa hacia mar adentro
U_{10}	Velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie
A_P y B_P	Coefficientes de Fourier
D_{50}	Diámetro medio del sedimento
CRT playa	Coefficiente de reflexión total en playa, en porciento
$H_{r\text{sig}}$ playa	Altura de ola reflejada significativa en playa, en [cm]
$H_{i\text{sig}}$ playa	Altura de ola incidente significativa en playa, en [cm]
$H_{t\text{sig}}$ playa	Altura de ola total significativa en playa, en [cm]
CRT estr	Coefficiente de reflexión total en estructura, en porciento
$H_{r\text{sig}}$ estr	Altura de ola reflejada significativa en estructura, en [cm]
$H_{i\text{sig}}$ estr	Altura de ola incidente significativa en estructura, en [cm]
$H_{t\text{sig}}$ estr	Altura de ola total significativa en estructura, en [cm]
K	Número de onda
ϕ	Potencial de velocidades plano
σ	Frecuencia angular
W	Término disipativo
$\hat{U}_e$	Amplitud efectiva
f_W	Régimen turbulento
r	Prámetro de rugosidad de Nikuradse
f_D	Factor de disipación por fondo
Δy	Avance de la playa; la variación del perfil de playa con respecto al eje de la estructura
B_0	Altura de la berma de la playa
h_i	Profundidad a pie de dique dentro de la zona protegida.
d	Profundidad sobre la corona
h_e	Profundidad a pie de dique en la zona expuesta
B	Ancho de la estructura
W_e	Distancia desde la línea de costa original hasta el pie de dique en la zona expuesta
R	Coefficiente de reflexión
$S_\eta(f_j)$	Espectro incidente
m_n	Momento de orden n
H_{rms}	Altura de ola cuadrática media
H_{m0}	Altura de ola para momento de orden cero o altura de ola significativa
A, a	Amplitud de ola
D	Disipación del dique
H_{inc}	Altura de ola significativa incidente sobre la estructura
H_{ref}	Altura de ola significativa reflejada por la estructura
H_{tra}	Altura de ola significativa transmitida, medida después de la estructura.
$Y_{B,}$	Longitud del eje de la estructura hasta el perfil de playa inicial
$Y_{A,}$	Longitud de variación del perfil de la costa
m	Pendiente de la playa
h_r	Profundidad de rompiente
l_r	Número de Iribarren
