



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

“EFECTOS DEL NIVEL FREÁTICO EN PLAYAS”

T E S I S

Que para optar por el grado de:

Maestra en Ingeniería

Civil – Hidráulica

Presenta

ANA LAURA MENESES FERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS

Dr. RODOLFO SILVA CASARÍN

MÉXICO, D.F.

MARZO 2009

A mis padres:

Luis Antonio e Idalia por todo lo que soy.

A mis hermanos:

Dirceu Jair, Luis Adolfo y Kevin Eduardo, por todo su amor.

*Este trabajo está dedicado a todos aquellos que
de una u otra forma han sido parte de mi vida y
han colaborado en mi formación en todos los sentidos.
¡Gracias!*

AGRADECIMIENTOS

Un ciclo más esta por culminar con la realización de este trabajo de investigación el cual no hubiera sido posible sin el apoyo de las siguientes instituciones:

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), del cual recibí la financiación para cursar mis estudios de maestría.

La Universidad Nacional Autónoma de México, por siempre mi alma mater, a la que amo y debo mucho de lo que soy ahora.

La Facultad de Ingeniería por seguir albergando mis sueños y permitirme continuar con una etapa más de formación académica.

El Instituto de Ingeniería, por la oportunidad de formar parte del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, por el apoyo económico que me ha brindado, por el respaldo y calidad humana de cada uno de sus integrantes, y porque gracias a sus instalaciones fue posible la realización de la etapa experimental necesarios para el desarrollo de éste trabajo.

Durante la etapa de maestría y más de un año de este trabajo de investigación han sido muchas las personas que me han brindado su apoyo y cariño. A todas ellas muchas gracias, en especial mi agradecimiento:

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín, director de esta tesis, mi mas sincera gratitud por su confianza, paciencia y disposición en todo momento.

A mis compañeros del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, Edgar gracias por facilitarme la vida en el laboratorio, por tu supervisión, apoyo y por todo lo que has aportado a mi formación, Miguel gracias por tu esfuerzo para sacar adelante la etapa experimental y por tu alegría que hizo todo esto mas ameno, Gabriel gracias por tu valioso apoyo, comentarios y sugerencias.

A Diego y Alejandro mis cómplices y compañeros en esta aventura, por su amistad y por todo el cariño.

A todos aquellos amigos que por cuestiones de espacio y tiempo no hemos coincidido como quisiéramos pero que siempre están cuando más se les necesita, Alfonso, Omar, Guillermo, Ricardo, Milton... ¡Gracias! Por todos los momentos juntos aunque últimamente solo sea por la web.

A mi familia por el cariño y la confianza que me brindan en todo momento, pero sobre todo por estar, cada uno a su manera, respaldándome para alcanzar mis objetivos. Ross y Viole gracias por su afecto y su enorme apoyo en los momentos difíciles.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE TABLAS	5
LISTA DE SÍMBOLOS	7
INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVOS	11
METODOLOGÍA	13
DESCRIPCIÓN Y ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO	15
1. ESTADO DEL ARTE	19
1.1 EL OLEAJE Y SUS PROCESOS	19
1.1.1 <i>Parámetros que caracterizan una ola</i>	19
1.1.2 <i>Procesos de transformación del Oleaje</i>	20
1.1.2.1 Refracción	20
1.1.2.2 Difracción.....	21
1.1.2.3 Reflexión.....	21
1.1.2.4 Rotura.....	23
1.1.2.5 Someramiento	23
1.2 PLAYAS DE GRANO GRUESO (GRAVA)	24
1.2.1 <i>Definición</i>	24
1.2.2 <i>Caracterización</i>	24
1.2.2.1 Permeabilidad.....	25
1.2.2.2 Porosidad.....	26
1.2.2.3 Densidad	26
1.2.2.4 Velocidad de caída	26
1.3 ASCENSO MÁXIMO DEL OLEAJE (RUN UP).....	26
1.3.1 <i>Formulación para el cálculo del Run Up con oleaje regular</i>	27
1.4 EVOLUCIÓN LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL DE PLAYAS.....	27
1.4.1 <i>Forma en planta (evolución longitudinal)</i>	28
1.4.2 <i>Forma en perfil (evolución transversal)</i>	30
1.5 PERFIL DE EQUILIBRIO	31
1.5.1 <i>Modelación del perfil de equilibrio de playas</i>	32
1.5.1.1 <i>Modelación en un solo tramo</i>	32
1.5.1.2 <i>Modelación en dos tramos</i>	36
1.5.2 <i>Modelo de perfil de equilibrio en dos tramos sin considerar la reflexión</i>	37
1.5.2.1 Perfil de rotura sin reflexión.....	37
1.5.2.2 Perfil de someramiento sin reflexión.....	38
1.5.3 <i>Modelo de perfil de equilibrio en dos tramos considerando reflexión</i>	41
1.5.3.1 Perfil de rotura con reflexión.....	42
2.6.3.2 Perfil de someramiento con reflexión.....	44
2. MODELADO DE PLAYAS DE GRAVA EN LABORATORIO	49
2.1 INTRODUCCIÓN	49
2.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	50
2.2.1 <i>Sobre el material empleado en los modelos de playas</i>	50
2.2.1.1 Cribado de gravas.....	50
2.2.1.2 Obtención de algunas propiedades físicas de las gravas.....	51
2.2.1.2.1 Cálculo de la densidad	51

2.2.1.2.2 Obtención del ángulo de reposo.....	52
2.2.1.2.3 Granulometría del material utilizado en el modelo final.....	53
2.2.1.2.4 Determinación de la velocidad de caída.....	54
2.2.1.2.5 Determinación de la porosidad.....	55
2.2.2 Geometría del modelo.....	56
2.2.3 Instrumentación.....	57
2.2.3.1 Sensores de nivel.....	58
2.2.3.2 Sensores de presión.....	59
2.2.3.3 Piezómetros.....	61
2.2.3.4 Velocímetros.....	61
2.2.3.5 Cámaras de video y fotográfica.....	62
2.2.4 Procedimiento de los ensayos y recolección de datos.....	63
3. RESULTADOS.....	69
3.1 FORMA DEL PERFIL TRANSVERSAL.....	69
3.2 EVOLUCIÓN DE LA REFLEXIÓN.....	78
3.3 ASCENSO MÁXIMO DEL OLEAJE.....	81
3.3.1 Comparación de los valores del ascenso máximo en el perfil estable.....	83
3.3.2 Comparación de los valores del ascenso máximo medidos con los calculados con la fórmula de Losada.....	86
4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	95
4.1 CONCLUSIONES.....	95
4.2 FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	96
ANEXO A.....	101
ANEXO B.....	107
ANEXO C.....	115
FUENTES CONSULTADAS.....	163

RESUMEN

Las playas de grava se localizan en regiones de medias y altas latitudes, como el Reino Unido, Irlanda, Canadá y los Estados Unidos de América. En México existen playas de este tipo en el estado de Quintana Roo y en casi todos los estados de la vertiente pacífica mexicana, principalmente en Sonora, Baja California Sur y Baja California, así como también en la Isla Clarión perteneciente al estado de Colima.

A pesar de la abundante presencia de playas de grano grueso, ya sea playas de grava o playas mixtas (de arena y grava), la investigación y análisis sobre su comportamiento sigue siendo limitada, debido a las dificultades para realizar programas de monitoreo provocadas por los elevados niveles de energía existentes en las zonas de someramiento y rompiente de este tipo de playas. Sin embargo, desde el punto de vista hidrodinámico las playas de gravas son de gran utilidad como defensa costera, ya que resultan ser muy eficientes para procesos de disipación de energía.

Con el aumento de la utilización de los sedimentos de grano grueso como defensa es importante comprender los procesos hidrodinámicos que ocurren al interactuar el oleaje con este tipo de playas y así poder determinar si este tipo de defensa es viable y va a mantener un nivel suficiente de protección a las zonas de infraestructura que se localice detrás de la costa. En el presente trabajo de investigación se muestran los resultados obtenidos y se hace un análisis del trabajo experimental realizado en el Laboratorio de Olas del Instituto de Ingeniería de la UNAM, enfocado a la observación del comportamiento hidrodinámico que presentan las playas de grava ante la acción del oleaje, determinando el perfil de equilibrio y/o estabilidad, la evolución del ascenso máximo del oleaje y la reflexión en dichas playas. En este trabajo también se incluye el estudio del efecto del nivel freático en la estabilidad de las playas de gravas y se presenta un análisis comparativo con los resultados obtenidos por otros autores.

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente las playas siempre han sido un lugar de gran interés para el hombre, tanto en lo que respecta al ámbito recreativo como el social y el económico. Prueba de ello es que alrededor de las dos terceras partes de la población a nivel mundial vive en las zonas costeras o al menos muy cerca de ellas. Las playas son zonas muy dinámicas, ya que es en estos lugares donde el oleaje transmite toda su energía ocasionando una rápida transformación, y es quizás, desde un punto de vista físico, la característica más importante es su sensibilidad y capacidad de respuesta morfológica que presenta a las condiciones hidrodinámicas.

El cambio de forma y de posición que experimenta una playa ocasionado por el constante movimiento debido a la hidrodinámica puede llevar días, semanas o meses, en función de las características del oleaje y del tipo de material existente en la playa.

Desde una perspectiva ingenieril, los fenómenos costeros en donde se involucra el transporte de sedimentos están relacionados con problemas prácticos tal como lo son la sedimentación de las dársenas en los puertos o la erosión de playas. Anteriormente la mayoría de los proyectos en el litoral se realizaban mediante procedimientos de prueba y error, esto debido a la falta de conocimientos e información de los mecanismos que rigen los procesos costeros.

En la actualidad, hay una tendencia creciente hacia el uso de modelos numéricos predictivos de los procesos hidrodinámicos, morfodinámicos y de evolución costera, como soporte de decisiones en las actuaciones de ingeniería y administración de recursos costeros. Sin embargo, la mayoría de las investigaciones existentes en la morfodinámica costera en los últimos 20 años se ha preocupado por las playas de arena, pocos estudios se han dedicado a las playas de grava y menos aún a las playas mixtas. Los resultados en este campo de investigación están en una etapa temprana de desarrollo, o incluso, para algunas cuestiones, de no desarrollo.

La necesidad de tener argumentos claros en diversas cuestiones, tales como la respuesta ante los efectos de tormentas o la estabilidad a largo plazo de las playas de grava y las playas mixtas requiere de nuevas observaciones y metodologías para predecir los comportamientos morfológicos. Las playas que contienen una mezcla de sedimentos de diversos tamaños (de arena a grava) son consideradas cada vez más importantes para

los Ingenieros de Costas de todo el mundo. Estos profesionales han expresado su preocupación acerca de la dificultad en el tratamiento de las playas ya que no se dispone de suficientes herramientas de predicción. Estas playas son a menudo barreras de protección de las playas o de infraestructura importante dentro de la zona costera.

Aunque existen enfoques aceptables para ampliar el tratamiento de las playas grava (Powell, 1990), se han utilizado desde hace más de 25 años la elaboración de modelos a pequeña escala de las playas con una mezcla de arena y grava, pero su tratamiento sigue siendo limitado debido a la incompatibilidad de tener ambos materiales dentro del mismo modelo. El principal problema de los modelos existentes, con respecto a la ampliación para las playas de gravas se encuentran establecidos en los trabajos de Mason y Coates (2001) y de López San Román-Blanco et al. (2000) y surgen de las hipótesis de una descripción simplista de los sedimentos de la playa, haciendo caso omiso de las corrientes que se presentan en esta zona. Por la tanto en los modelos que consideran procesos como el transporte de sedimentos (Damgaard et al., 1996) y modelos empíricos, Motyka y Brampton (1984) o Damgaard Y Soulsby (1996), proporcionan simplemente una razonable representación de la dinámica de este tipo de playas. Van Wellen et al. (2000) provee un análisis detallado de las diferentes fórmulas de transporte disponibles y su aplicabilidad a sedimentos de grano grueso, así como una comparación entre las diferentes formulaciones.

Otro aspecto poco estudiado en las playas es el concerniente al nivel de las aguas subterráneas y el efecto que tiene este sobre el transporte de sedimentos, particularmente cuando se produce una diferencia en el nivel freático con respecto al nivel medio del mar.

Con la finalidad de entender más claramente los fenómenos morfo e hidro-dinámicos que ocurren en las playas de gravas, específicamente el transporte de sedimentos, se realizó una serie de experimentos en el Laboratorio de Olas del Instituto de Ingeniería de la UNAM, los cuales se detallan en el presente trabajo de tesis, así como los resultados obtenidos y su correspondiente análisis y caracterización.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo de investigación es el de analizar la influencia del nivel freático en la evolución de los perfiles de playas en equilibrio de material de grano grueso (gravas), a través del desarrollo de un programa experimental encaminado a la revisión y medición de los fenómenos que ocurren al interactuar la playa y el oleaje, para el establecimiento de los parámetros que controlan su comportamiento.

En este sentido como metas necesarias para lograr el objetivo principal se pretende que con este modelo se obtenga la información necesaria para su posterior aplicación, lo cual incluye la obtención de datos sobre la variación de la superficie libre del agua, la caracterización de la reflexión, determinación del comportamiento del ascenso máximo del oleaje, la valoración de la estabilidad de la playa y del transporte de sedimentos y su dependencia con el campo de presiones y fuerzas dentro de la playa y del campo de velocidades y aceleraciones en las inmediaciones del fondo de grava.

En resumen, se pretende establecer las bases científicas y técnicas necesarias que permitan mejorar el conocimiento del comportamiento de las playas de grava para su aplicación en proyectos de ingeniería.

CAPÍTULO 1
ESTADO DEL ARTE

1. ESTADO DEL ARTE

Para el desarrollo del presente trabajo es necesario el conocimiento de los parámetros que intervienen en el comportamiento de playas de material de grano grueso (gravas), tanto de la parte hidrodinámica como de la morfodinámica, por lo que es conveniente describir algunos aspectos fundamentales que ocurren cuando el oleaje se transforma bajo la presencia de un fondo variable (playas) y que rigen a su vez el transporte de sedimentos.

1.1 El oleaje y sus procesos

El oleaje es el resultado de perturbaciones inducidas por la acción de fuerzas que se presentan en la naturaleza sobre la superficie del mar, durante un periodo de tiempo, y que dan como resultado una serie de ondas de forma compleja. La más obvia de estas fuerzas es la acción del viento.

El oleaje puede ser caracterizado como una onda, la cual es una perturbación periódica de una variable física, que evoluciona en el tiempo y en el espacio. En la realidad, se presentan formas complejas que no son más que la superposición de formas simples. Los métodos analíticos, generalmente se desarrollan para cada onda simple, considerando una celeridad y una repetición en el espacio, las cuales son características del movimiento ondulatorio.

1.1.1 Parámetros que caracterizan una ola

Para entender la generación y transformación del oleaje y consecuentemente el desarrollo de modelos, se deben definir los parámetros necesarios y suficientes para su caracterización. Estos se describen a continuación (ver Figura 1.1):

Altura de ola (H), se define como la distancia vertical entre la cresta y el valle, en donde la cresta es al parte mas alta de la ola y el valle es la parte mas baja.

Longitud de onda (L), es la distancia horizontal medida entre dos crestas o valles consecutivos.

Periodo (T), tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas o valles consecutivos por el mismo punto.

Celeridad (C), la velocidad de propagación, se calcula dividiendo la longitud de onda entre el periodo $C = \frac{L}{T}$.

Profundidad (h), es la distancia vertical medida a partir del nivel de aguas en reposo.

Perfil de la superficie de agua (η), es desplazamiento de la superficie del agua con relación al nivel de aguas en reposo.

Amplitud de la ola (A), es igual a la mitad de la altura de la ola.

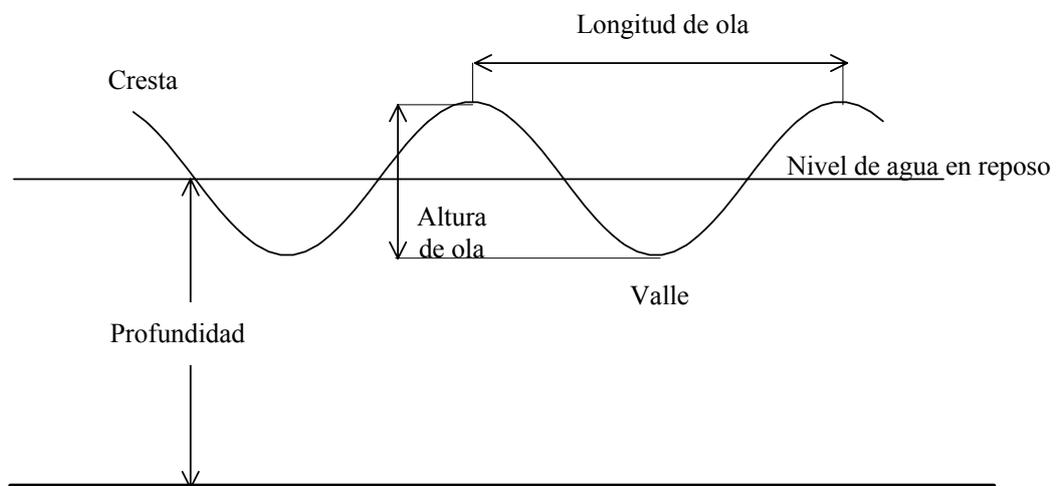


Figura 1.1 Parámetros que caracterizan una ola.

1.1.2 Procesos de transformación del Oleaje

El oleaje durante su propagación presenta transformaciones respecto a las condiciones iniciales que tenía. Estas afectaciones del oleaje se deben, al cambio en la batimetría del fondo y a la presencia de obstáculos, como escolleras, rompeolas, espaldones o instalaciones portuarias.

De estos procesos, los más importantes son la refracción, la difracción, la reflexión, la rotura, el someramiento o la combinación de estos, dichos cambios se traducen en una variación de la altura de la ola, la disminución de la longitud de onda y en ocasiones, cambios en la dirección de propagación.

1.1.2.1 Refracción

Es el proceso de modificación de la orientación de las crestas de las olas por influencia del fondo cuando la dirección de incidencia del oleaje es diferente a la orientación de las batimétricas (ver Figura 1.2). En la práctica esta transformación es importante porque:

- ⊕ Genera concentración o disipación de la energía del oleaje en ciertos tramos de la costa. En geomorfología litoral, explica el hecho de que para un mismo tipo de ola, la energía liberada en algunos sectores es mayor que en otros y esto tiene consecuencias en las formas resultantes.
- ⊕ Es el proceso de transformación del oleaje caracterizado, en virtud que el frente de ola tiende hacerse paralelo a la línea de costa, causado por la variación de la batimetría.



Figura 1.2 Refracción del oleaje.

1.1.2.2 Difracción

La difracción de las ondas es un fenómeno que ocurre cuando la propagación del oleaje es interrumpido por un obstáculo, por ejemplo, un rompeolas, instalaciones portuarias, escolleras o pequeñas islas, ver Figura 1.3.

El cálculo de los efectos de la difracción son importantes, ya que la distribución de la altura del oleaje, por ejemplo, en una bahía protegida o un puerto se ve afectada su operabilidad, así mismo el apropiado diseño y localización de la entrada a un puerto para evitar el rebase y la resonancia requiere el conocimiento de los efectos de la difracción.



Figura 1.3 Difracción del oleaje

1.1.2.3 Reflexión

El estudio de la reflexión es tan importante como los fenómenos antes descritos, cuando las olas encuentran un obstáculo (muro, espigón, etc), éstas son reflejadas, es decir, re-enviadas en la dirección exactamente opuesta de la dirección de incidencia. Si

las olas atacan oblicuamente el obstáculo, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Además, si la estructura contra la que choca la ola es impermeable, la reflexión es máxima pudiendo llegar a la resonancia, en cambio si el medio es permeable parte de la energía se disipa además de disminuir el efecto de la reflexión.



Figura 1.4 Reflexión del oleaje debido a la presencia de rompeolas

En el ámbito experimental, uno de los problemas representativos en la realización de ensayos para el estudio de la interacción del oleaje con estructuras marítimas o con playas reflejantes, es precisamente el fenómeno de reflexión. Así el oleaje reflejado interacciona con el oleaje incidente, dando lugar a uno nuevo, por lo que se debe tomar en cuenta la energía del oleaje que se refleja y re-refleja en la pala generadora y paredes del canal. Por las razones mencionadas es necesario contar con un sistema eficiente de disipación de energía en los canales de oleaje, y con ello poder simular lo más apegado posible a la realidad las condiciones de mar a las que estará sometida la estructura bajo estudio, siendo lo más común el uso de playas artificiales que minimizan el efecto de la reflexión. Dichas playas son construidas de diversos materiales permeables, por ejemplo, de arena, grava, roca o combinación de estos materiales. Otra de las formas de reducir el efecto de la reflexión es con la disposición de un sistema de absorción de reflexiones en la pala.

En el estudio de la reflexión se pueden encontrar dos extremos, cuando el oleaje se propaga sobre una pendiente tendida disipa su energía gradualmente, y este caso la reflexión es despreciable, sin embargo, si el oleaje encuentra una pared vertical, la reflexión es casi completa, sin procesos de disipación, rotura ni transmisión, se tiene una onda estacionaria. Entre estos dos extremos existen una gran variedad de situaciones intermedias.

Una de estas situaciones es un talud impermeable, parte del oleaje incidente se refleja y otra parte se disipa por efecto de la rotura; si el talud es permeable, se combinan los procesos de reflexión, que se produce tanto en el lado expuesto como en el protegido, disipación del oleaje al provocarse la rotura sobre el talud y al atravesar el medio poroso y rotura sobre el talud de la estructura. Otro caso es cuando se tiene una pared vertical permeable, donde parte del oleaje se refleja y el resto se transmite.

1.1.2.4 Rotura

Cuando disminuye la profundidad, a medida que la ola se acerca a la costa, el fondo hace que las olas se deformen aumentando su altura y disminuyendo la longitud de la onda. Esto ocurre cuando el valor de la profundidad es igual a la mitad de la longitud de onda; se genera la rompiente y la parte delantera de la ola se hace muy abrupta debido al exceso de deformación, ver Figura (1.5).

Para describir y estudiar teórica y experimentalmente, los procesos involucrados en la rotura del oleaje, Iversen (1952), Patrick y Wiegel (1954) y Galván (1958), propusieron cuatro tipos de rotura *Descrestamiento (Spilling)*, *Voluta (Plunging)*, *Colapso (Collapsing)* y *Oscilación (Surging)*. Los cuatro tipos de rotura (ver Figura 1.5) pueden ocurrir en aguas bajas, de acuerdo con la pendiente de la playa, pero solamente los tipos de rotura en descrestamiento y voluta se presentan también en aguas profundas.

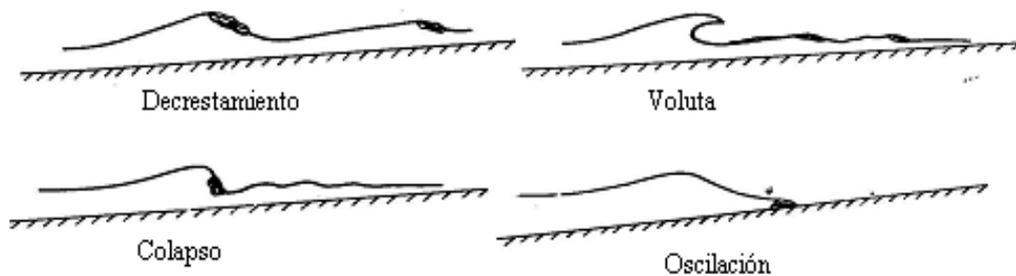


Figura 1.5 Tipos de rotura del oleaje.

Originalmente Iribarren y Nogales (1949), introducen el número de Iribarren, I_r , (1.18), como un indicador de cuando ocurre la reflexión o rotura en el talud, y propusieron que el régimen de reflexión tenía lugar cuando $I_r > 2.3$.

$$I_r = \tan \varphi / \sqrt{H / L_0}$$

donde

$\tan \varphi$	pendiente de la estructura
H	altura de la ola
L_0	longitud en aguas profundas

1.1.2.5 Someramiento

Al propagarse el oleaje hacia la costa el perfil de la onda cambia debido a las variaciones batimétricas, en los que se puede observar que inicialmente la onda mantiene una altura constante y una simetría tanto en la parte frontal como de atrás, posteriormente la altura de la ola se incrementa rápidamente originándose una asimetría en el perfil de la onda y finalmente rompe. Este efecto es lo que se denomina *someramiento* del oleaje.

1.2 Playas de Grano Grueso (Grava)

Las playas de grano grueso son creadas a través de glaciares y de la meteorización de las montañas y, como tal, se encuentran en regiones de medias y altas latitudes, como el Reino Unido, Irlanda, Canadá y los Estados Unidos de América. En México existen playas de este tipo en los estados de la vertiente pacífica (p.e. Sonora y Baja California). El material de grano grueso constituye una defensa natural mediante la creación de una barrera de protección de la playa.

A pesar de la abundante presencia de playas de grano grueso, ya sea playas de grava o playas mixtas (de arena y grava), la investigación sobre su comportamiento sigue siendo limitada. Esto es principalmente debido a las dificultades relacionadas con la realización de programas de monitoreo en playas de grano grueso provocada por los elevados niveles de energía existentes en la zona de resaca (someramiento) y la zona de surf (rompiente).

Actualmente, en los países del primer mundo existe un cambio reciente en la filosofía y el enfoque que se ha adoptado para el análisis de los procesos hidrodinámicos que ocurren en este tipo de costas. En el pasado, la protección de la costa se ha logrado a través de defensas duras, tales como muros de concreto, estructuras prefabricadas y/o rocas, que ha dado pie a costas de orientación "antinatural" con requerimientos de mantenimiento muy elevados. Ahora la protección costera se enfoca hacia técnicas de defensa "blandas", incluido los rellenos de playa, lo que permitiría una forma más natural de defensa que utilice hidráulicamente de forma aproximada y eficiente las características del material de grano grueso.

Con el aumento de la utilización de los sedimentos de grano grueso como defensa se está haciendo importante comprender cómo se movilizan los sedimentos transportados.

1.2.1 Definición

Una playa es un accidente geográfico consistente en la acumulación de sedimentos no consolidados por efecto de la dinámica local del oleaje. Las playas de grano grueso de acuerdo a Coates y Damgaard (1999), son aquellas que se componen por sedimentos que van desde los 2 mm a los 64 mm de diámetro hasta los pequeños cantos rodados (>256mm).

1.2.2 Caracterización

Aunque las playas de material grueso están presentes en muchas partes del mundo, tanto de forma natural como artificial, la caracterización de su morfología y los procesos es escasa. A continuación se presenta un resumen de los estudios realizados sobre al caracterización de las playas grano grueso.

Moutzouris (1991) presenta una visión general de las playas típicas de grava y arena mezclada que se encuentran en Grecia, llegando a la conclusión de que la falta de uniformidad de las distribuciones del tamaño del grano en toda la costa es un factor importante que no debe pasarse por alto en los modelos con procesos cerca de la costa. En una clasificación simple de los sedimentos debido a la diferencia de carga hidrodinámica se encontró que los granos estaban menos ordenados en las zonas de mayor energía del oleaje que en las zonas con más bajos niveles de energía. En Nueva Zelanda, Hemmingsen (2001) resume la labor de Kirk y colaboradores en la caracterización de las playas barrera de arena y grava. Estas playas son moderadamente empinadas y con mareas bajas en la zona de rompientes, contienen una amplia gama de tamaños de sedimentos. En la parte baja tiene una composición bimodal con tamaños de 3 a 5 mm y otra de 18 mm. El perfil en la zona de resaca está condicionado por los procesos de retrolavado e indica dos tipos de transporte de sedimentos, uno debido a las corrientes y el otro en la zona de resaca impulsado por la rompiente de la ola. En el Reino Unido se encuentran mezcladas dos tipos de playas según Mason (1997), playas de mezclas homogéneas de guijarros y arena, tanto en forma transversal como longitudinal a la costa, en donde la región de arena está expuesta solo durante las mareas de primavera y las playas de guijarros con una gran cresta conformada en mareas altas.

Como se observa los estudios realizados solo incluyen aquellas playas compuestas por mezclas de grava y arena lo cual implica cierta complejidad al involucrar dos diferentes tipos de material y a la falta de homogeneidad existente entre los sedimentos, tanto en el tiempo como en el espacio. En cuanto a los cambios temporales, Pontee (1995) encontró que una de las características más notables de las playas estudiadas fue la gran variabilidad en el tiempo aparentemente bajo condiciones similares. Las razones propuestas para esta variación son la rápida respuesta de este tipo de playas a las condiciones cambiantes, la posible existencia de efectos de retroalimentación de las condiciones precedentes en la playa y cerca de la misma y la variabilidad de la disposición de la arena y grava.

1.2.2.1 Permeabilidad

Una característica que diferencia las playas de material grueso con las playas de arena es que, en las primeras la permeabilidad es mayor. La permeabilidad $K(m/s)$ es una medida de la facilidad con la que un fluido pasa a través de un material sin alterar su estructura interna. Como puede entonces verse la permeabilidad aumenta con el tamaño de las partículas. El British Standards da valores de permeabilidad para gravas de 0.04 a 0.16 m/s, Barnes (1995) da valores típicos de la grava de 0.01 a 10 m/s.

La importancia de la permeabilidad de las playas de grano grueso depende de muchos factores entre ellos el tamaño del sedimento, el tipo de mezcla o clasificación entre diferentes tamaños y el porcentaje de dichos sedimentos.

1.2.2.2 Porosidad

La porosidad (n), se define como la capacidad de un material de absorber líquidos o gases o bien como la proporción de huecos contenidos en un volumen total de material. Domenico y Schwartz (1997) dan valores típicos de porosidad de la grava de 0.24 a 0.38, entre los factores que afectan la porosidad se pueden mencionar los siguientes: tamaño del grano y el acomodo o disposición del mismo.

1.2.2.3 Densidad

La densidad (ρ), es una magnitud referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen, y puede utilizarse en términos absolutos o relativos. En el capítulo 2 se detalla la obtención de este parámetro para el sedimento utilizado en la modelación.

1.2.2.4 Velocidad de caída

Cuando una partícula cae a través de un fluido se acelera hasta que alcanza su velocidad de sedimentación; la cual es la velocidad máxima que la partícula alcanza cuando la fuerza de arrastre que actúa sobre ésta es igual a la fuerza ejercida por la aceleración de la gravedad.

La velocidad de caída es función, entre otros factores, de la densidad, forma y tamaño de la partícula, lo mismo que de la densidad y viscosidad del fluido en el que se mueve.

Para cada tamaño de sedimento se calcula su velocidad de caída mediante la siguiente expresión:

$$W_f = \left[\frac{4}{3} \frac{g}{C_D} \frac{D}{\rho} (\rho_s - 1) \right]^{1/2}$$

donde

W_f	velocidad de caída, (m/s)
C_D	coeficiente de arrastre, (adimensional)
D	diámetro del grano de interés, (m)
ρ_s	densidad del sedimento, (kg/m ³)
ρ	densidad del agua de la zona bajo estudio, (kg/m ³)
g	aceleración debida a la fuerza de gravedad, (m/s ²)

1.3 Ascenso máximo del oleaje (Run Up)

El ascenso máximo del oleaje (run-up) es la cota que alcanza el oleaje al incidir sobre una playa respecto el nivel medio del mar (ver Figura 1.6). Este fenómeno se produce después de que la ola rompe sobre la playa, produciéndose el movimiento hacia delante de la masa de agua hasta que la energía de la ola que no había sido disipada en el

proceso de rotura se invierte en subir por el talud. El run-up depende principalmente del talud, rugosidad y porosidad de la playa así como de la existencia de una berma y de su geometría, y de las características del oleaje incidente.

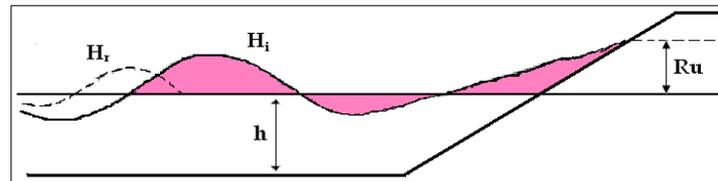


Figura 1.6.- Run-Up

1.3.1 Formulación para el cálculo del Run Up con oleaje regular

Losada y Giménez-Curto (1980) propusieron un modelo experimental para oleaje regular dado por la expresión

$$\frac{Ru}{H} = Au(1 - e^{-BuH})$$

En la que Au y Bu son coeficientes de ajuste que dependen del tipo de piezas del manto principal y por ende de la porosidad (n). Debido a que la tendencia que presentan los valores de los coeficientes de ajuste es aproximadamente lineal, Silva et al. (1988), determinaron las siguientes expresiones para estimarlos:

Diques homogéneos

$$Au = -4.706n + 3.293$$

$$Bu = -1.569n + 0.038$$

Diques impermeables

$$Au = -3.825n + 3.344$$

$$Bu = -1.179n + 0.081$$

1.4 Evolución Longitudinal y Transversal de Playas

El estudio de la evolución de playas puede hacerse desde un punto de vista global, es decir, teniendo en cuenta la totalidad de los procesos que tienen lugar o, separando la evolución por componentes. Esta última aproximación suele hacerse descomponiendo la evolución de una playa en dos direcciones principales, una longitudinal en la que se estudian los cambios en planta y, otra transversal en la que se estudian los cambios en perfil (ver Figura 1.7). A continuación se hace una explicación de la evolución costera

mencionando los cambios en planta y perfil, además de presentar algunas herramientas disponibles para estimar de forma más o menos precisa tales cambios.

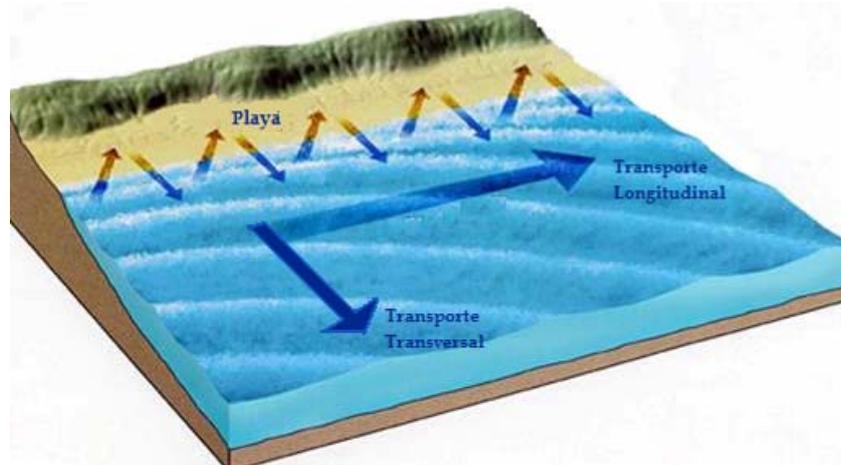


Figura 1.7 Evolución de playa en sus dos direcciones principales.

1.4.1 Forma en planta (evolución longitudinal).

La forma en planta que adoptan las playas, ya sean naturales como artificiales, es producto de la interacción de los agentes dinámicos que actúan sobre ellas y de las propias características, particularmente físicas, de la costa. De entre todos los agentes que actúan sobre la costa, el oleaje es el que suministra más energía al sistema, por ello, será el agente principal a la hora de determinar la forma en planta de una playa.

Se sabe que los cambios en planta que sufre una costa, considerados a medio-largo plazo, son debidos a la existencia de un gradiente a lo largo de la misma del transporte longitudinal de sedimento (Komar, 1976). Este gradiente determinará la forma de equilibrio de la playa desde un punto de vista dinámico. Es decir, a medida que cambien las condiciones del oleaje incidente y, por tanto, cambie el esquema de transporte longitudinal de la playa, cambiará su forma en planta. En el caso de que exista un oleaje claramente dominante en la zona de estudio, éste determinará la planta de la playa a medio-largo plazo, mientras que los oleajes secundarios determinarán variaciones estacionales o de corto plazo de la misma sobre su posición de equilibrio (Komar, 1976). Este proceso, dependiente de las condiciones de oleaje incidente y esquema de transporte asociado, puede ser conocido de forma determinista si se es capaz de reproducir o cuantificar cada uno de los elementos que participan en el sistema y la forma en que interaccionan (Vriend et al., 1994). Intentar resolver de forma detallada el sistema es una tarea complicada desde el punto de vista práctico, al menos para las disponibilidades de información (datos de oleaje, perfiles, etc.) que suele haber cuando se realiza un proyecto, ya que la mayor parte de las herramientas necesarias, aunque disponibles, se encuentran generalmente en centros de investigación y muchas de ellas en fase de desarrollo. Asimismo, aunque potencialmente pueda resolverse el sistema de forma determinista, existen dos problemas adicionales: la escala de tiempo y la incertidumbre asociada a los factores impulsores y respuesta de la costa. La

resolución en forma detallada del problema supone, generalmente, trabajar con escalas de tiempo cortas en relación con las escalas usuales en ingeniería de costas (Vriend et al., 1994). Para resolver este problema, existen una serie de herramientas que, si bien suponen una simplificación del proceso, si son utilizadas correctamente, es decir, conociendo las restricciones y el campo de validez de cada una, permiten obtener resultados válidos desde el punto de vista de la ingeniería.

Ahora bien, si se requiere evaluar el comportamiento del relleno para cualquier forma de playa y, considerando la situación real de la costa, es decir, la existencia de una erosión previa, la herramienta disponible más precisa, son los modelos numéricos de evolución de playas. De la gran variedad existente (Horikawa, 1988) el más simple y que mejor se adecua a los requerimientos actuales de la ingeniería de costas (en cuanto a escalas de tiempo y espacio), es un modelo de una línea de costa (one line model) que permite, en principio, estimar la evolución en planta de una playa para cualquier forma inicial, con cualquier tipo de estructuras y, bajo la acción de cualquier oleaje incidente, considerando única y exclusivamente el transporte longitudinal de sedimento (Kraus, 1988). La fiabilidad del resultado dependerá lógicamente, de la precisión asociada a los parámetros libres del modelo (tales como, coeficientes de transporte, etc.). La ecuación que rige estos modelos es del tipo (1.1):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{d_c + B} \left(\frac{\partial Sl}{\partial y} - q \right) \quad (1.1)$$

donde

q representa la existencia de fuentes o sumideros de sedimento y,
 Sl es la tasa de transporte longitudinal.

Al resolver esta ecuación de forma numérica, se puede estimar la evolución en planta de una playa prácticamente sin restricción alguna, siempre y cuando los cambios a considerar sean debidos exclusivamente al transporte longitudinal y la evolución del perfil sea conocida. Existen numerosos modelos descritos en la literatura que utilizan esta ecuación (Kraus, 1988) y cuya efectividad se mide por la capacidad de representar las estructuras costeras. En los últimos modelos presentados se hace uso, generalmente, de la expresión dada por Ozasa y Brampton (1980) para el transporte longitudinal (1.2).

$$Sl = Sl_{CERC} + \frac{K_2}{8(s-1)(1-p) \tan \beta} H_b^2 C_{s,b} \frac{\partial H_b}{\partial y} \cos \alpha_b \quad (1.2)$$

donde

K_2 constante de calibración
 s densidad relativa
 p porosidad del sedimento
 H_b altura de ola rompiente
 α_b ángulo de incidencia del oleaje
 β pendiente de la playa

$C_{g,b}$ celeridad de grupo en al rotura

en la que el primer término es el equivalente a la fórmula del CERC y el segundo, es un término que tiene en cuenta la existencia de un gradiente en la altura de ola a lo largo de la costa, útil sobre todo cuando existen estructuras costeras difractantes a lo largo del borde litoral.

1.4.2 Forma en perfil (evolución transversal)

Al igual que ocurre con la forma en planta, la forma en perfil de una playa es producto de la interacción de los agentes dinámicos que actúan sobre ella y de las propias características físicas de la costa, siendo el oleaje el agente energético más importante para su transformación

El perfil de la playa va asociado, principalmente, a la acción del transporte transversal de sedimento que, a su vez, depende del oleaje, viento y nivel relativo del mar (marea). Básicamente, los cambios en el perfil de playa suelen asociarse a dos tipos de estados:

- 1) Perfil de erosión o disipativo y,
- 2) Perfil de acumulación o reflexivo (ver Figura 1.8).

El primero de ellos se produce bajo la acción de tormentas, en las que el oleaje que actúa en la playa es de gran contenido energético. En estas condiciones se produce una erosión de la parte interna del perfil retrocediendo la línea de orilla y, transportándose el material mar adentro, siendo depositado la mayor parte de las veces en forma de barras sumergidas. El resultado final es una disminución de la pendiente del perfil. El perfil de acumulación se produce bajo la acción de oleaje de bajo contenido energético (oleaje reconstructor) y, generalmente asociado a la acción del *swell*. En estas condiciones el material almacenado en las barras es transportado hacia la costa, reconstruyendo la berma y haciendo avanzar la línea de orilla. El resultado final es un aumento en la pendiente del perfil (ver Figura 1.8).

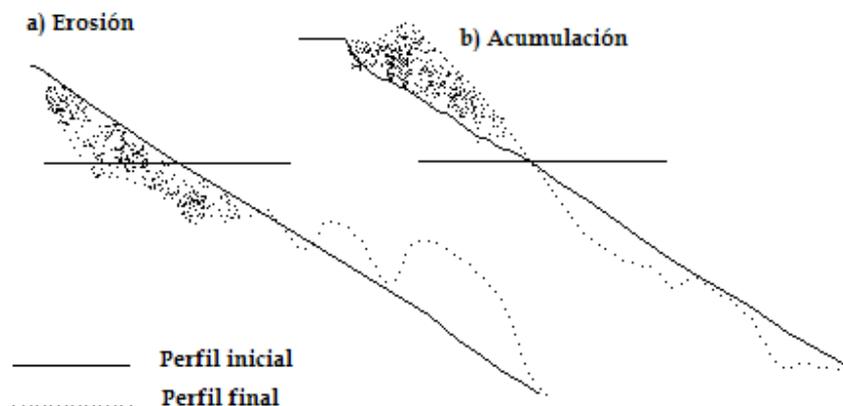


Figura 1.8 Perfiles de erosión y acumulación.

La escala temporal a la que se producen estos cambios es del orden de horas para el caso del perfil de erosión (la duración de la tormenta) y, mucho más lento para el de acumulación, llegando a veces al orden de meses. En algunos casos, la acción del "oleaje reconstructor" puede ser insuficiente para eliminar de forma efectiva las barras longitudinales formadas.

Estos dos perfiles descritos no son sino los límites de un rango de estados del perfil de playa relacionados con la capacidad energética del oleaje, características físicas de la costa y otras variables como marea, viento, etc (Short, 1993). La predicción de este tipo de cambios se puede hacer en primera instancia utilizando parámetros de predicción del perfil de playa. Estos parámetros, empíricos en su mayor parte, predicen el estado final del perfil en función de características del oleaje, del sedimento que compone la playa y, en algunos casos de la pendiente del perfil inicial (Larson, 1988) y (Negro, 1991) entre otros. Dentro de los mejores parámetros predictores del comportamiento del perfil se encuentran:

- 1) El parámetro de Dean (1973) dado por (1.3):

$$D_b = \frac{H_b}{wT} \quad (1.3)$$

donde

H_b altura de ola en rotura,
 w velocidad de caída y
 T período de ola,

El valor que limita la aparición de erosión en condiciones de campo es $D_b = 4$.

- 2) el parámetro de Dalrymple (1992) dado por (1.4):

$$P = \frac{gH_0^2}{w^3T} \quad (1.4)$$

donde H_0 es la altura de ola en aguas profundas y, donde el valor umbral para delimitar los cambios en condiciones de campo es 9,500.

1.5 Perfil de Equilibrio

El concepto de perfil de equilibrio ha sido definido por diferentes autores. La primera mención se debe a Fenneman (1902) el cual cita "*Existe un perfil de equilibrio, al cual el agua dará lugar en último término, si se le permite completar su trabajo*". Posteriormente, Larson (1991) describió el perfil de equilibrio como "*Una playa con*

un tamaño de grano determinado, expuesta a unas condiciones constantes de oleaje, desarrollará una forma del perfil que no presentará ningún cambio neto con el tiempo". Por lo tanto, cuando un perfil alcanza el equilibrio, existirá un balance de fuerzas en cada punto del perfil, tal que el transporte neto sea nulo.

Por lo tanto de acuerdo a estas definiciones, la existencia de un perfil de equilibrio en la naturaleza es prácticamente imposible, debido a las variaciones constantes de los distintos agentes dinámicos que ocurren en las costas. En sentido estricto, el perfil de equilibrio es un concepto teórico que únicamente será posible alcanzar en el laboratorio, donde la mayoría de las condiciones pueden ser controladas.

Las aplicaciones del perfil de equilibrio son múltiples destacando su utilización en las obras de regeneración y restauración de playas y en múltiples modelos numéricos y conceptuales que suponen una configuración previa de la morfología del perfil de playa, como son modelos de transporte, corrientes medias en playa, etc. También se utiliza en la cuantificación del volumen de sedimentos necesario en una regeneración de playa o en el dimensionamiento de las longitudes y cotas de obras de protección del litoral tales como espigones de contención de arenas o diques exentos. Por lo cual su modelación es de suma importancia ya que tiene repercusiones económicas, estéticas y sociales, y de ello depende el éxito de gran número de actuaciones en la costa.

1.5.1 Modelación del perfil de equilibrio de playas

Tener un conocimiento cuantitativo de las características de los perfiles de equilibrio en una playa es fundamental ya sea solo para seguimiento, o bien para cuestiones de gestión y regeneración de playas, así como en la interpretación de los procesos costeros. Dean (1991), menciona que algunas de las características del perfil de equilibrio son bien conocidas, y se enumeran a continuación:

- 1) Los perfiles de equilibrio son cóncavos hacia arriba.
- 2) Tamaños de granos pequeños y grandes están asociados a pendientes suaves y pronunciadas, respectivamente.
- 3) El frente de playa es plano.
- 4) Ondas peraltadas dan lugar a pendientes más suaves y presentan tendencia a la formación de barras.

1.5.1.1 Modelación en un solo tramo

Una de las formulaciones más aplicada en el campo de la Ingeniería de Costas es la propuesta por Brunn (1954). A partir del análisis de perfiles de playa de la costa norte danesa y de Mission Bay (California), encontró que estos seguían la siguiente relación:

$$h(x) = Ax^{2/3} \quad (1.5)$$

donde

$h(x)$ profundidad a una distancia x de la línea de costa (ver Figura 1.9) y,
 A parámetro de escala que depende de las características sedimentarias

La aplicación inicial de esta expresión estaba limitada a la zona del perfil aguas-adentro del punto de rotura.

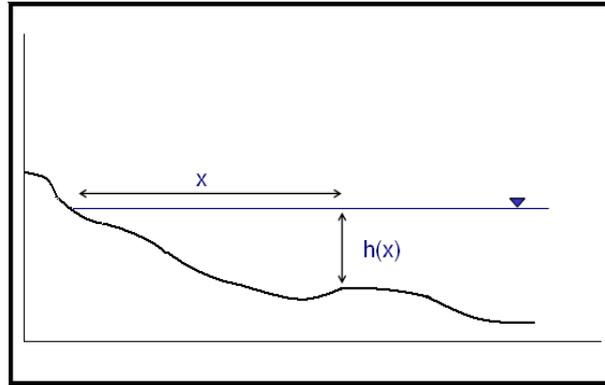


Figura 1.9 Esquema de un perfil de playa.

Dean (1977) extendió la aplicación de esta expresión a la zona de rompientes, ajustándola a 504 perfiles de la costa atlántica y del golfo de Estados Unidos medidos por Hayden *et al.* (1975). Utilizando el método de mínimos cuadrados, ajustó los datos a una expresión similar a la propuesta por Brunn (1954):

$$h(x) = Ax^n \quad (1.6)$$

donde

n parámetro de forma variable

Determinó, simultáneamente, los valores de A y n para cada perfil. Los rangos obtenidos para cada uno de ellos eran:

$$0.1 < n < 1.4$$

$$0.0025 < A < 6.31$$

A pesar de que, inicialmente, esta formulación se obtuvo de forma empírica, Dean (1977) dio una base teórica a su modelo basándose en la asunción de que la disipación de energía por unidad de volumen, D^* , en la zona de rotura es constante. Basándose en la teoría lineal de ondas y asumiendo que $H = \gamma h$ dentro de la zona de rompientes, donde γ es el índice de rotura, determinó el valor del exponente de su formulación $n=2/3$. Fijando el valor de n en la expresión del perfil, el parámetro A quedaba como única variable libre. Esto definió un rango mucho menor del parámetro A : $0 < A < 0.3$.

A partir de la revisión de los datos analizados por Dean (1977), Moore (1982) propuso una relación empírica entre el coeficiente de proporcionalidad A y el tamaño de grano del sedimento. En la Figura 1.10, se puede observar como aumenta el valor del parámetro A al incrementarse el tamaño de grano. Como consecuencia, valores grandes

de dicho parámetro definirán pendientes pronunciadas del perfil de playa. Posteriormente, Dean (1987) relacionó el parámetro A con la velocidad de caída de grano, transformando los datos de Moore, y obteniendo la expresión (1.7):

$$A = 0.51w^{0.44} \quad (1.7)$$

donde

w velocidad de caída de grano, expresada en m/s

Vellinga (1983) desarrolló una expresión para el perfil en erosión donde se incluía el efecto de la altura de ola significativa en profundidades indefinidas, H_{os} , y de la velocidad de caída de grano, w :

$$\left(\frac{7.6}{H_{os}}\right)h = 0.47 \left[\left(\frac{7.6}{H_{os}}\right)^{1.28} \left(\frac{w}{0.0268}\right)^{0.56} x + 18 \right]^{0.5} \quad 2.0 \quad (1.8)$$

Vellinga (1983) fijó el exponente $n = 0.5$ de forma empírica. Posteriormente, en un nuevo análisis de los resultados de sus ensayos, concluyó que el perfil de erosión podía ser definido por una curva potencial, similar a la propuesta por Brunn (1954) y Dean (1977), donde el exponente de mejor ajuste para sus ensayos era $n = 0.78$:

$$h(x) = Ax^{0.78} \quad (1.9)$$

Contrastando los resultados obtenidos utilizando $n = 2/3$ y $n = 0.78$, los perfiles representados eran prácticamente coincidentes. Bodge (1992) comprobó que una expresión exponencial aproximaba mejor la forma del perfil en equilibrio de una playa. Así, desarrolló un modelo de perfil exponencial dado por la expresión (1.10):

$$h = B(1 - e^{-kx}) \quad (1.10)$$

donde

B y k coeficientes empíricos

Considerando los mismos perfiles utilizados por Dean (1977), Bodge (1992) demostró que este perfil exponencial ajustaba mejor que la formulación potencial de Brunn/Dean, ecuación (2.5), incluso cuando se dejaba como variable libre el exponente n . En el modelo, el coeficiente k determina la concavidad del perfil, mientras que el coeficiente de proporcionalidad B define la profundidad aguas adentro a la que se aproxima el perfil de forma asintótica. Sin embargo, el propio Bodge hace notar que no se hace un intento de relacionar los coeficientes B y k con las condiciones de la playa.

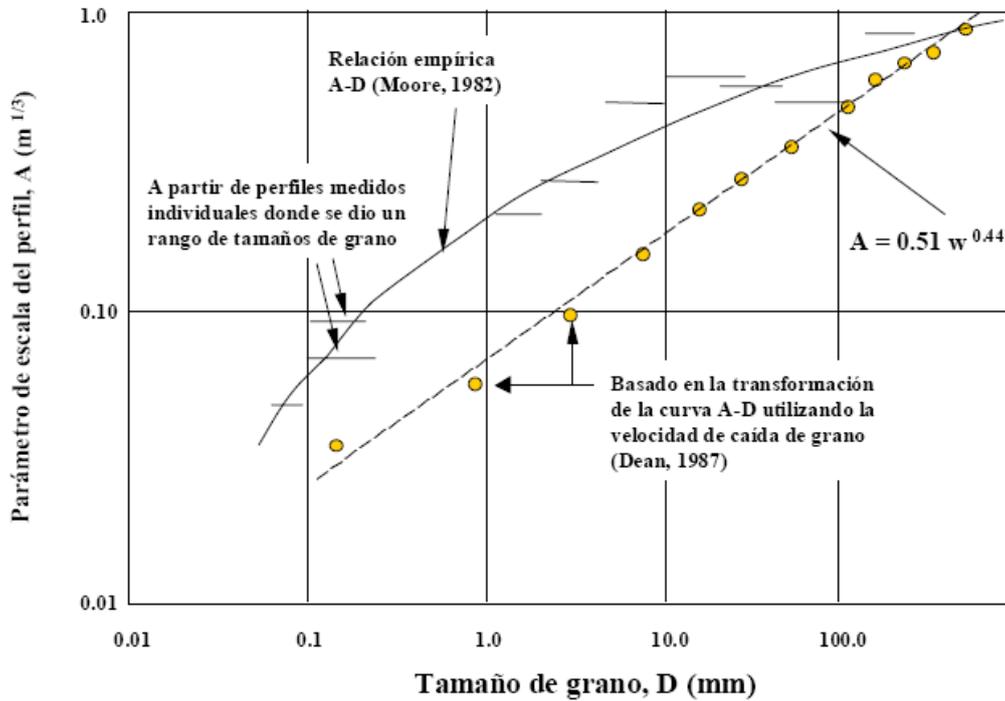


Figura 1.10 Relación entre el parámetro A y el tamaño de grano propuesta por Moore (1982) y modificada por Dean (1987).

Siguiendo los trabajos de Bodge (1992), Komar y McDougal (1994) utilizaron una expresión exponencial en el análisis de perfiles medidos a lo largo de la costa del Delta del Nilo. Esta expresión es ligeramente diferente a la propuesta por Bodge (1992), dependiendo directamente de la pendiente de la playa, S_0 , y con un único coeficiente por ajustar, k , que determina el grado de concavidad del perfil:

$$h = \frac{S_0}{k} (1 - e^{-kx}) \quad (1.11)$$

El parámetro S_0 está controlado por el tamaño de grano y por las condiciones del oleaje que alcanza la playa. De este modo, aparece el efecto del oleaje en la morfología dentro de la formulación de perfil de equilibrio. El modelo de Dean (1977) consideraba únicamente la influencia del tamaño de grano a través del parámetro A. Komar y McDougal (1994) proponen incorporar este modelo de perfil de equilibrio exponencial en el modelo morfodinámico desarrollado por Wright y Short (1984), ya que la combinación de los parámetros frente de playa, S_0 , y concavidad del perfil, k , permite clasificar las playas de disipativas a reflejantes.

Sin embargo, estas formulaciones no permiten representar algunas características de los perfiles reales como son la influencia del oleaje en la forma del perfil, la influencia de la marea o la interacción entre el perfil sumergido y el perfil de rotura, puesto que la obtención de las mismas se basa, exclusivamente, en ajustes a datos.

1.5.1.2 Modelación en dos tramos

La idea de utilizar un perfil compuesto por dos tramos separados en el punto de rotura fue inicialmente propuesta, de forma heurística, por Iribarren (1954). Posteriormente, y con base en datos de campo, Inman *et al.* (1993) propusieron una forma compuesta del perfil, ajustando un perfil de Brunn/Dean a cada uno de los tramos. El tramo superior del perfil lo denominaron perfil de rotura (*bar-berm*), mientras que al tramo inferior perfil de asomeramiento (*shorerise*).

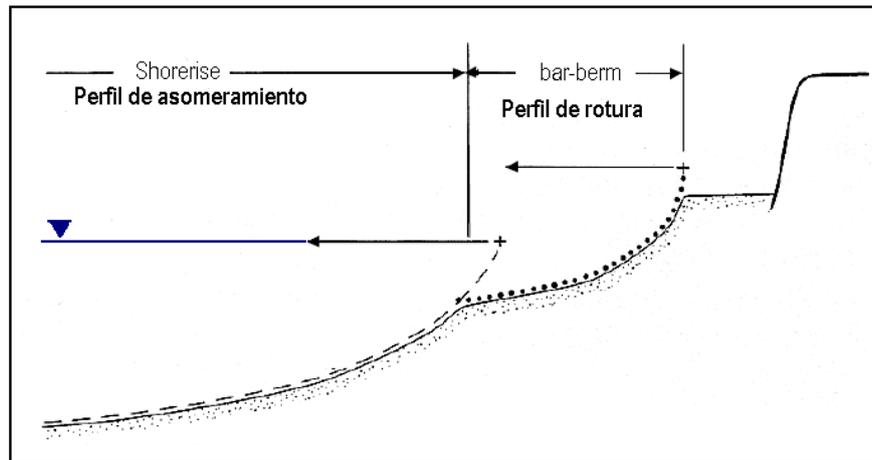


Figura 1.11 Modelo de perfil de equilibrio propuesto por Inman *et al.* (1993).

Larson *et al.* (1999) presentaron un modelo teórico para calcular el perfil de equilibrio condiciones de rompiente y tres modelos para calcular el perfil de equilibrio bajo de no rompiente. El modelo teórico se derivó a partir de la descripción de los procesos de oleaje y transporte de sedimento. La aproximación para oleaje con rompiente daba como resultado el conocido perfil de Dean. La primera de las formulaciones del perfil de equilibrio, para oleaje sin romper, se basaba en asumir el comportamiento global del perfil exterior, considerando la disipación de energía. Las otras dos formulaciones consideraban los mecanismos de transporte principales que controlan la forma del perfil de equilibrio.

Recientemente, Medina *et al.* (2000) han desarrollado una formulación de perfil de equilibrio cuya deducción teórica está basada en la importancia relativa de los diferentes procesos que intervienen en el balance energético de la propagación del oleaje en el perfil de playa. El modelo desarrollado parte de la ecuación de conservación de flujo de energía:

$$\frac{dF_t}{dx} = \varepsilon_b + \varepsilon_f \quad (1.12)$$

donde

F_t flujo total de energía (incidente y reflejado)

ε_b disipación debida a las olas rotas

ε_f disipación por fondo

Utilizando como modelo de disipación el propuesto por Thornton y Guza (1983) y analizando la importancia relativa de los términos con base en datos medidos en ensayos, estos autores han obtenido expresiones de perfil de equilibrio validas para las diferentes zonas del perfil de playa y en las que, en función de las dinámicas incluidas en Ft , se puede tener en cuenta la variación del oleaje, la influencia de la marea o la importancia de la reflexión en el perfil de playa.

El perfil de playa obtenido es, en cualquier caso, un perfil compuesto por dos tramos: un perfil de rotura y un perfil de someramiento (ver Figura 1.12). La intersección entre ambos tramos coincide con el punto de rotura, ya que dicho punto marca la separación entre la acción del someramiento y la rotura sobre el perfil. La localización del punto de inflexión en el perfil viene definida por los parámetros x_r , distancia horizontal entre el inicio del perfil de rotura y el punto de separación, y h_r , profundidad a la que se localiza dicho punto (ver Figura 1.12). El parámetro x_o , marca la distancia horizontal entre el inicio del perfil de rotura y el inicio virtual del perfil de someramiento sobre el nivel medio del mar. La profundidad h_a determina el límite exterior del perfil de equilibrio que estos autores fijaron, de acuerdo a consideraciones de inicio de transporte de sedimentos, en $H_a \cong 3H_s$, siendo H_s la altura de ola significativa media mensual incidente en el perfil.

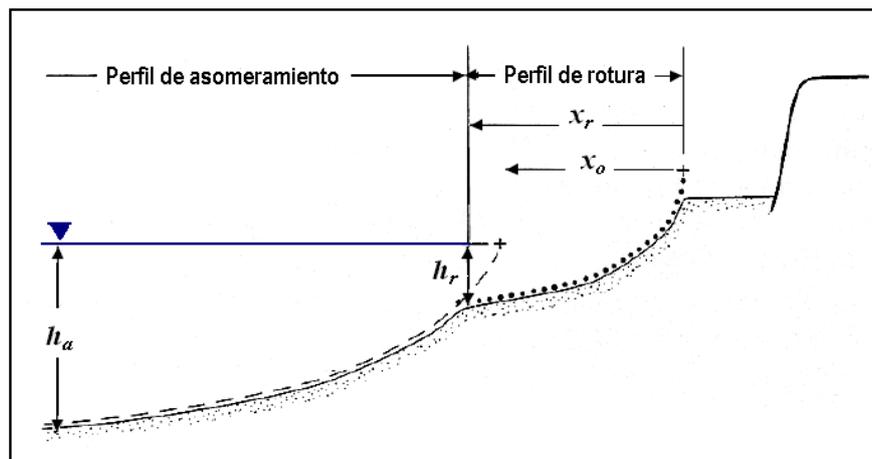


Figura 1.12 Esquema del modelo de perfil de equilibrio en dos tramos.

1.5.2 Modelo de perfil de equilibrio en dos tramos sin considerar la reflexión

1.5.2.1 Perfil de rotura sin reflexión

Según el modelo de disipación energética considerado dentro de la zona de rompientes, se cumple que la disipación por unidad de volumen se mantiene constante. Esta disipación da lugar al un perfil de Dean:

$$h = Ax^{2/3} \quad 0 < x < x_r \quad (1.13)$$

donde

$$A^{3/2} = \frac{3D^*}{5\alpha} \quad y \quad \alpha = \frac{1}{8} \rho g \gamma^2 \sqrt{g} \quad (1.14)$$

$$D^* = \left(\frac{5}{16} \sqrt{g} \gamma^2 \rho g \right) h^{1/2} \frac{dh}{dx}$$

entonces

$$A = \left[\frac{24D^*}{5\rho g \gamma^2 \sqrt{g}} \right]^{2/3} \quad (1.15)$$

El parámetro A, obtenido para el tramo de perfil de rotura, coincide con el del perfil de Dean. Este coeficiente es un factor de forma dimensional ($m^{1/3}$) del perfil y aparece como función del proceso de disipación de energía. Dean (1987) estableció la dependencia de este parámetro con el tamaño de grano por lo que, de algún modo, refleja la pendiente media del perfil.

1.5.2.2 Perfil de someramiento sin reflexión

Fuera de la zona de rompientes, el modelo de disipación (sin reflexión) indica que, en condiciones de equilibrio, la disipación debida a la fricción con el fondo, por unidad de área, se mantiene constante en cada sección del perfil. Por lo que, el balance de energía en este tramo se definirá como:

$$\frac{dF_l}{dx} = \varepsilon_f = D_2^* = cte. \quad (1.16)$$

Para evaluar el flujo de energía incidente, se asume teoría lineal de ondas en profundidades reducidas, se considera la expresión que relaciona altura de ola con profundidad en la zona de someramiento del perfil, $H = \left(H_{s_a} / \sqrt{h_a} \right) \sqrt{h}$:

$$F_l = EC_g = \frac{1}{8} \rho g H^2 \sqrt{gh} = \frac{1}{8} \rho g \left(\frac{H_{s_a}^2}{h_a} \right) h \sqrt{gh} \quad (1.17)$$

Si $\beta = \frac{1}{8} \rho g \left(\frac{H_{s_a}^2}{h_a} \right) \sqrt{g}$, entonces (1.17) queda como:

$$F_l = \beta h^{3/2} \quad (1.18)$$

Sustituyendo (1.18) en (1.16), la disipación quedará expresada, únicamente, en función de la profundidad en cada punto:

$$\frac{3}{2} \beta h^{1/2} dh = D_2^* dx \quad (1.19)$$

Integrando (1.19) entre dos puntos del perfil, el punto de intersección entre perfil de rotura y perfil de someramiento (x_r, h_r) y un punto cualquiera (x, h), tal que $x > x_r$, se obtiene:

$$\frac{\beta}{D_2^*} (h^{3/2} - h_r^{3/2}) = x - x_r \quad (1.20)$$

Se debe tener cuidado ya que el perfil de someramiento se encuentra referido a un sistema coordinado situado en la línea de costa, con el eje x dirigido mar adentro y el eje z , vertical, positivo hacia arriba. La expresión final del perfil de equilibrio fuera de la zona de rompientes es:

$$x - x_r = \frac{h^{3/2} - h_r^{3/2}}{C^{3/2}} \quad (1.21)$$

Si el punto (x_r, h_r) forma parte tanto del perfil de rotura, como del perfil de someramiento y se sustituye, en (1.21), el parámetro h_r definido por (1.13), entonces (1.21) queda:

$$x - x_r = \frac{h^{3/2} - A^{3/2} x_r}{C^{3/2}} \quad (1.22)$$

$$x = \left(\frac{h}{C} \right)^{3/2} + x_r \left(1 - \frac{A^{3/2}}{C^{3/2}} \right) \quad (1.23)$$

Donde el primero termino de la ecuación (1.23) es similar a la expresión obtenida para el perfil de rotura. El coeficiente C es un parámetro dimensional ($m^{1/3}$) asociado al proceso de disipación que tiene lugar en cada tramo del perfil. El segundo término es un valor constante a lo largo de todo el perfil e indica el desplazamiento que sufre el perfil de someramiento respecto al sistema de referencia situado en la línea de costa. Otra forma de describir el perfil de someramiento es con la ecuación (1.24).

$$X = x - x_0 = \left(\frac{h}{C} \right)^{3/2} \quad x_r < x < x_a \quad (1.24)$$

donde

$$C^{3/2} = \frac{D_2^*}{\beta} = \frac{24D_2^*}{\rho g \sqrt{gH_{s_a}}} \quad (1.25)$$

$$x_0 = x_r \left(1 - \frac{A^{3/2}}{C^{3/2}} \right) \quad (1.26)$$

La expresión para el perfil de someramiento, considerando sólo disipación, coincide con el conocido perfil de Dean, desplazado una distancia x_0 del sistema de referencia situado sobre la línea de costa (inicio del perfil de rotura). El parámetro C es un coeficiente de forma del perfil que depende, en este caso, de la disipación de energía y del valor de altura de ola que se tiene en el límite exterior del perfil de someramiento H_{s_a} . Por tanto, la morfología del perfil de equilibrio, en el tramo afectado por someramiento, dependerá no sólo del tamaño del grano en la playa, como apunta Dean (1987), sino también de las condiciones de oleaje que afectan al perfil.

A partir de la ecuación (1.26), se pueden encontrar tres situaciones posibles (ver Figura 1.13):

1. $A = C$ En esta situación, el parámetro x_0 es nulo, lo cual indica que el perfil de rotura y el de someramiento coinciden. Por tanto, el perfil de equilibrio se define con una única curva.
2. $A > C$ El parámetro x_0 se hace negativo, es decir, el inicio del perfil de someramiento se localiza antes del inicio del perfil de rotura.
3. $A < C$ El parámetro x_0 toma valores positivos. El inicio del perfil de someramiento se sitúa entre el punto de inicio del perfil de rotura y el punto de inflexión del perfil.

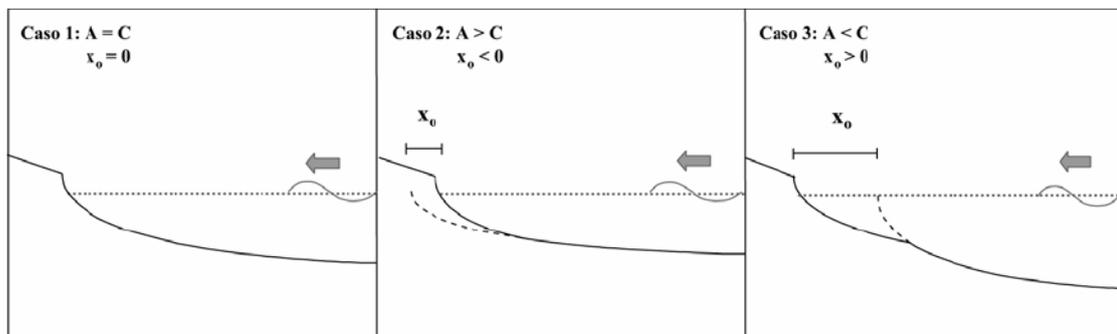


Figura 1.13 Morfologías posibles del perfil en dos tramos considerando sólo disipación.

El modelo de perfil de equilibrio sin reflexión, considera dos tramos diferenciados en función de las distintas fuerzas que actúan sobre cada tramo del perfil. Así, se distingue entre perfil de rotura y perfil de someramiento. La combinación de ambos tramos define el perfil de equilibrio completo, coincidiendo ambos en el punto (x_r, h_r) . Por tanto, este punto deberá cumplir la condición de igualdad de flujo incidente dada por (1.27):

$$F_{I_{rot}} = F_{I_{asom}} \quad (1.27)$$

donde,

$F_{I_{rot}}$ flujo incidente definido para el perfil de rotura y,

$F_{I_{asom}}$ flujo incidente en ese mismo punto, definido para el perfil de someramiento.

Si se sustituyen las expresiones correspondientes (1.27) puede reescribirse como:

$$\alpha h_r^{5/2} = \beta h_r^{3/2} \quad (1.28)$$

ó

$$\frac{h_r^{5/2}}{h_r^{3/2}} = \frac{\beta}{\alpha} \quad (1.29)$$

Operando, se llega a la siguiente expresión, (1.30) que define la profundidad en el punto de inflexión del perfil:

$$h_r = \left(\frac{H_{s_a}}{\gamma} \right)^2 \frac{1}{h_a} = \frac{H_{s_a}}{3\gamma^2} \quad (1.30)$$

donde

H_{s_a} altura de ola significativa en el límite exterior del perfil de someramiento

h_a profundidad en ese mismo punto

γ índice de rotura

Para oleaje irregular, los valores estimados de γ varían entre 0.45-0.55, dando un valor final de h_r del orden de la altura de ola, H_{s_a} . Puesto que, este punto pertenece tanto al perfil de rotura, como al perfil de someramiento, se sustituye (1.30) en la formulación del perfil de rotura:

$$x_r = \frac{1}{A^{3/2}} \frac{H_{s_a}^3}{\gamma^3 h_a^{3/2}} \quad (1.31)$$

Con las ecuaciones (1.30) y (1.31), se obtienen las coordenadas del punto de intersección entre perfil de rotura y perfil de someramiento (x_r , h_r) las cuales dependen, principalmente, de las condiciones del oleaje que alcanza el perfil de playa. De tal forma que la posición del punto de intersección entre los dos tramos se desplazará constantemente, en respuesta a las variaciones de las características del oleaje.

1.5.3 Modelo de perfil de equilibrio en dos tramos considerando reflexión

La influencia que el proceso de reflexión ejerce sobre la morfología del perfil de una playa ha sido poco estudiada. La mayoría de modelos de perfil de equilibrio asume que la reflexión de ondas, producida por playas naturales, es despreciable. González (1995) sentó las bases de un modelo analítico de perfil de equilibrio con reflexión, pero no llegó a proponer una expresión para el flujo de energía reflejado. Bernabeu (1999), introduce una formulación capaz de definir dicho flujo en función de las características geométricas del perfil, presentando un nuevo modelo de perfil de equilibrio en dos tramos, teniendo en cuenta los efectos de disipación y reflexión de la energía del oleaje sobre la morfología del perfil.

El flujo total en una sección del perfil hace referencia al flujo disponible, en el balance energético debemos considerar la pérdida de energía debida a la reflexión producida por la propia playa. Entonces se define el flujo total de energía que atraviesa una sección cualquiera del perfil como la suma del flujo incidente y del flujo reflejado (ver Figura 1.14):

$$F_T = F_I - F_R \quad (1.32)$$

Para este caso el balance de energía a lo largo de l perfil queda como:

$$\frac{dF_T}{dx} = \frac{dF_I}{dx} - \frac{dF_R}{dx} = \varepsilon \quad (1.33)$$

donde

- F_T flujo de energía total
- F_I flujo de energía incidente
- F_R flujo de energía reflejada
- ε disipación por unidad de área

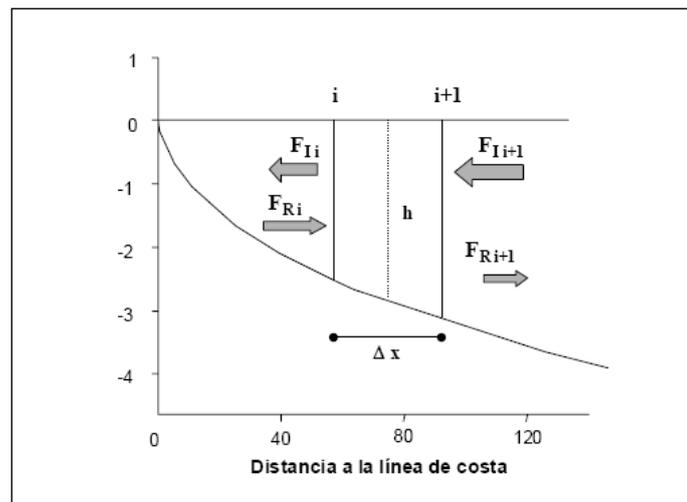


Figura 1.14 Balance energético entre dos secciones de playa.

1.5.3.1 Perfil de rotura con reflexión

Para este tramo, se considera que la disipación por unidad de volumen es constante. Al incluir la reflexión en el equilibrio de fuerzas que actúan sobre el perfil, se amplía esta hipótesis al flujo total que alcanza la playa (incidente + reflejado), por lo que la expresión que describe el balance energético a lo largo del perfil, quedará:

$$\frac{1}{h} \left[\frac{dF_I}{dx} - \frac{dF_R}{dx} \right] = \frac{\varepsilon_b}{h} = D^* = cte. \quad (1.34)$$

Para evaluar F_R , se introduce una nueva función $V(x)$ que, en cada punto del perfil, se define como:

$$V(x) = -\frac{1}{h} \frac{1}{F_I} \frac{dF_R}{dx} \quad (1.35)$$

Esta función (1.35) representa la variación local del flujo reflejado por unidad de volumen del perfil de playa y por unidad de flujo incidente.

Sustituyendo $\frac{dF_R}{dx}$ de (2.35) en la ecuación (2.34), se obtiene:

$$\frac{1}{h} \left[\frac{dF_I}{dx} + V(x)hF_I \right] = D^* \quad (1.36)$$

Considerando los trabajos de Guza e Inman (1975), Bernabeu (1999) propuso una expresión de $V(x)$ para un perfil y un período de onda dados, tal que:

$$V(x) = k \frac{1}{\sqrt{h}} \frac{dh}{dx} \quad (1.37)$$

donde el coeficiente k será función del período de la onda que alcance la playa y que deberá evaluarse en cada caso.

Sustituyendo (1.37) en la ecuación (1.36), queda la disipación como función del flujo incidente:

$$\frac{1}{h} \left[\frac{dF_I}{dx} + k \frac{h}{\sqrt{h}} \frac{dh}{dx} F_I \right] = D^* \quad (1.38)$$

La expresión que define el flujo incidente, F_I , para el perfil de rotura es definida como:

$$F_I = \frac{1}{8} \rho g \gamma^2 \sqrt{g} h^{5/2} = \alpha h^{5/2} \quad (1.39)$$

Sustituyendo F_I en la ecuación (1.38), la disipación queda expresada, únicamente, en función de la profundidad en cada punto:

$$\frac{5}{2} \frac{\alpha}{D^*} h^{1/2} dh + k \frac{\alpha}{D^*} h^2 dh = dx \quad (1.40)$$

Integrando (1.40) entre la línea de costa, (0,0), y un punto aguas afuera, (x, h) , se obtiene:

$$\frac{5}{2} \frac{\alpha}{D^*} h^{3/2} + k \frac{\alpha}{3D^*} h^3 = x \quad (1.41)$$

La expresión final que define el perfil de equilibrio, dentro de la zona de rompientes donde la reflexión ha considerada, será:

$$x = \left(\frac{h}{A_R} \right)^{3/2} + \frac{B}{A_R^{3/2}} h^3 \quad 0 < x < x_r \quad (1.42)$$

donde:

$$A_R^{3/2} = \frac{3D^*}{5\alpha} \quad A_R = \left[\frac{24D^*}{5\rho g \gamma^2 \sqrt{g}} \right]^{2/3} \quad (1.43)$$

$$B = \frac{k}{5} \quad (1.44)$$

El primer termino de la ecuación (1.42), coincide con el perfil de Dean y el segundo término está asociado al fenómeno de reflexión. Cuando no exista reflexión, el parámetro B será nulo. El coeficiente A_R determina la pendiente del perfil en el tramo cercano al frente de playa; mientras que el coeficiente asociado a la reflexión, B , marca la pendiente del tramo más profundo. Esto determinará la concavidad del perfil, aumentando para perfiles reflejantes y disminuyendo en perfiles más disipativos.

2.6.3.2 Perfil de someramiento con reflexión

Fuera de la zona de rompientes, se asume que existe disipación debida a la fricción con el fondo es constante. Para el caso de perfiles con reflexión, la ecuación de equilibrio energético queda como:

$$\left[\frac{dF_I}{dx} - \frac{dF_R}{dx} \right] = \varepsilon_f = D_2^* = cte. \quad (1.45)$$

Definiendo nuevamente $V(x)$:

$$V(x) = -\frac{1}{h} \frac{1}{F_I} \frac{dF_R}{dx} = k' \frac{1}{\sqrt{h}} \frac{dh}{dx} \quad (1.46)$$

donde k' es el coeficiente de proporcionalidad que dependerá del período de la onda. Sustituyendo (1.46) en (1.45) se tiene que:

$$\left[\frac{dF_I}{dx} + k' \frac{h}{\sqrt{h}} \frac{dh}{dx} F_I \right] = D_2^* \quad (1.47)$$

Retomando la ecuación que define el flujo incidente en el perfil de someramiento (1.18) y sustituyendo en la ecuación (1.47), la disipación queda expresada, únicamente, en función de la profundidad en cada punto:

$$\frac{3}{2}\beta h^{1/2} dh + k' \beta h^2 dh = D_2^* dx \quad (1.48)$$

Integrando (1.48) entre el punto de inflexión del perfil (x_r , h_r) y otro punto cualquiera (x , h):

$$\frac{\beta}{D_2^*} (h^{3/2} - h_r^{3/2}) + \frac{k' \beta}{3D_2^*} (h^3 - h_r^3) = (x - x_r) \quad (1.49)$$

La expresión final del perfil de equilibrio, fuera de la zona de rompientes, de una playa sometida a los fenómenos de disipación y reflexión de la energía, será:

$$\frac{(h^{3/2} - h_r^{3/2})}{C^{3/2}} + \frac{D}{C^{3/2}} (h^3 - h_r^3) = (x - x_r) \quad (1.50)$$

$$x = \left(\frac{h}{C}\right)^{3/2} + \frac{D}{C^{3/2}} h^3 - \left(\frac{h_r}{C}\right)^{3/2} - \frac{D}{C^{3/2}} h_r^3 + x_r \quad (1.51)$$

La ecuación de equilibrio del perfil de someramiento con reflexión queda como:

$$X = x - x_0 = \left(\frac{h}{C}\right)^{3/2} + \frac{D}{C^{3/2}} h^3 \quad (1.52)$$

$$x_r < x < x_a$$

donde,

$$C^{3/2} = \frac{D_2^*}{\beta} = \frac{24D_2^*}{\rho g \sqrt{g} H_a} \quad (1.53)$$

$$D = \frac{k'}{3} \quad (1.54)$$

$$x_0 = x_r - \left(\frac{h_r}{C}\right)^{3/2} - \frac{D}{C^{3/2}} h_r^3 \quad (1.55)$$

El coeficiente C asociado al fenómeno de disipación coincide con el que se obtuvo en el modelo de perfil en dos tramos sin considerar reflexión, ecuación (1.25). Al introducir el fenómeno de reflexión, en el perfil de someramiento aparece un nuevo parámetro asociado a dicho fenómeno, D ($m^{-3/2}$), y que se define como función del parámetro k' relacionado con la función $V(x)$, ecuación (1.37).

CAPÍTULO 2
MODELADO EN LABORATORIO

2. MODELADO DE PLAYAS DE GRAVA EN LABORATORIO

2.1 Introducción

La experimentación física de playas puede llevarse a cabo en dos vertientes: en primer lugar es posible y deseable desarrollar investigación y medición en campo; lo cual tiene la ventaja de ofrecer resultados fieles y totalmente representativos de las condiciones de los procesos y parámetros de interés. El segundo enfoque es llevar a cabo experimentos en escala reducida, lo que si bien, permite contar con condiciones controladas de oleaje y del tamaño y forma del material granular y de facilitar la instrumentación y recolección de datos, lleva implícito el problema de los efectos de escala en el material que conforma la playa. Sin embargo, dado el bajo costo del trabajo, la capacidad de llevar a cabo un gran número de experimentos en un periodo relativamente corto y sobre todo la facilidad de repetir un experimento las veces que sea necesario, hacen de la modelación en laboratorio una herramienta invaluable en el entendimiento de los fenómenos asociados a la interacción de las playas con el oleaje.

Como se mencionó anteriormente, existen diferentes procesos que influyen en el movimiento de sedimentos en la zona de resaca, cada uno de los cuales contribuye en diferente medida al transporte del material a lo largo del perfil de la playa. Adicionalmente, la forma del perfil de la playa impacta en el tipo de rotura y la forma en que el oleaje disipa su energía, lo que a su vez, determina la nueva forma que adquirirá la playa como consecuencia de las características de este nuevo oleaje. Es decir, el proceso de deformación de una playa de material granular es una combinación de efectos en el que la playa y el oleaje determinan las características uno del otro, hasta que se alcanza una condición en la que el oleaje ya no es capaz de deformar un perfil de playa que se ha ajustado a la forma en que disipa la mayor cantidad de energía del oleaje. A esta condición se le llama, en este trabajo, “equilibrio” en el entendido que alcanzar el equilibrio no significa que el material de la playa se encuentra estático, sino que la forma que ha adquirido el perfil no será modificada en forma importante siempre que las condiciones del oleaje generado en el laboratorio permanezcan constantes. En este sentido, el equilibrio se debería verificar no solo en la forma del perfil, también se debe entender como un equilibrio entre la energía del oleaje que intenta deformar la playa y la capacidad de resistencia a la deformación de esta última.

Los resultados que se presentan a continuación son derivados del trabajo experimental realizado en el Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM (ver *ANEXO B*). El enfoque principal del programa experimental desarrollado tiene como base poder comparar dos escenarios: la interacción entre el oleaje y una playa que, sin atender a la génesis de la condición, presenta, en su parte no expuesta al oleaje,

un nivel freático superior al nivel de agua en reposo. El segundo escenario, que a la vez sirve como testigo es la misma playa pero con el nivel de agua, en su parte no expuesta al oleaje, similar al del nivel de agua en reposo. Para tal efecto se dispuso la metodología experimental que se describe a continuación.

2.2 Metodología Experimental

Para este trabajo de investigación, la experimentación inició a principios de mayo de 2007. El programa completo, como se concibió entonces, contemplaba realizar ensayos para seis diferentes tamaños de grano (D_{50}), a saber, 1, 4, 8, 16, 31.5 y 63 milímetros. Debido a que la consecución de tamaños tan específicos y de un solo tipo y calidad de material no fue posible, se replanteó el programa de modo que solo se mantuvieron diámetros de 2.5, 1.5, 0.5 y 0.25 pulgadas que se consiguieron a partir de grava redondeada (aluvial).

Una vez con el material seleccionado y disponible, se realizaron las primeras pruebas y la revisión de algunos experimentos, seleccionando para estos ensayos la grava de mayor tamaño (2.5”) de diámetro y formando un perfil inicial de playa con pendiente de playa de 1:8 del lado mar. El objetivo fundamental de estas pruebas preliminares fue conocer el comportamiento hidrodinámico del material y los rangos operativos de la grava en función de las capacidades de las instalaciones del laboratorio. Con este primer perfil no se logró movimiento alguno del material puesto que el sistema no fue capaz de generar olas con la energía suficiente, lo mismo ocurrió para un talud 1:5. La falta de movimiento obligó a una revisión detallada del material y se detectó que aún cuando el pedido se hizo de tamaños homogéneos, el material estaba mezclado con varios tamaños por lo que se llevó a cabo una nueva segregación del material que a la vez sirvió para llevar a cabo los análisis del material que se describen a continuación.

2.2.1 Sobre el material empleado en los modelos de playas

2.2.1.1 Cribado de gravas



Figura 2.1 Cribado de grava.

Dado el tamaño, peso y volumen del material a cribar, se construyó un instrumento específico para tal actividad (ver Figuras 2.1 y 2.2). La finalidad de este proceso fue obtener un D_{50} homogéneo y con ello un mejor control de las condiciones de

modelación en función de las capacidades del generador de olas. Cabe mencionar que para la construcción de cada playa se utilizó un volumen aproximado de dos metros cúbicos de material.



Figura 2.2 Rejilla utilizada para el cribado de gravas.

El material ya separado se almacenó en costales que permitieron su protección y pesaje, así como evitar que se mezclaran los tamaños. El primer tamaño que se eligió para iniciar los experimentos fue el correspondiente a media pulgada, que es también al que se refieren los resultados que se presentan en esta tesis.

2.2.1.2 Obtención de algunas propiedades físicas de las gravas

Con el fin de adquirir un conocimiento más completo del material con que se cuenta, se llevaron a cabo algunas pruebas para determinar valores de propiedades físicas de la grava. A continuación se describen los procesos que se siguieron y se presentan los resultados obtenidos de los valores de densidad, ángulo de reposo, granulometría, velocidad de caída y porosidad.

2.2.1.2.1 Cálculo de la densidad

Para el cálculo de la densidad se seleccionaron aleatoriamente muestras de grava de diferentes costales, dos por cada diámetro medio, es decir, ocho muestras en total. El procedimiento para determinar la densidad de cada prueba se detalla a continuación (ver Figura 2.3):

1. Saturar la muestra en agua por 24 horas.
2. Retirar el agua y se secar superficialmente con una franela. Pesar la muestra para tener el valor del peso saturado y superficialmente seco de la grava (W_{ss}).

- Determinar el volumen de agua desalojado de la muestra (V_{des}). Para ello se empleó el principio de Arquímedes, pesando la muestra sumergida en agua (W_{sum}) y calculando el volumen desalojado como

$$V_{des} = \frac{W_{sss} - W_{sum}}{\gamma_w}; \text{ donde: } \gamma_w = \text{Peso específico del agua} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

- Vaciar la muestra a una charola para secarla totalmente en el horno, y pesar para obtener el peso seco (W_s).
- Calcular la absorción de la siguiente manera:

$$\text{Absorción} = \frac{W_{sss} - W_s}{W_s} \times 100$$

- Por ultimo, determinar la densidad o peso específico relativo de los sólidos (S_s) con la expresión:

$$S_s = \frac{W_s}{(V_{real})\gamma_w} = \frac{W_s}{(V_{des} - V_{abs})\gamma_w}$$

$$V_{abs} = \frac{W_{sss} - W_s}{\gamma_w}$$



Figura 2.3 Proceso de obtención de la densidad de las gravas.

El valor promedio de la densidad para las muestras analizadas fue de 2591.6 kg/m^3 .

2.2.1.2.2 Obtención del ángulo de reposo

El ángulo de reposo se obtuvo vertiendo muestras de material sobre una superficie plana y registrando la pendiente que se forma naturalmente. El tamaño de la muestra fue igual al material contenido en un costal completo. Para obtener el ángulo se midió directamente el ángulo del talud formado por cada muestra y para cada tamaño de grava (ver Figura 2.4).

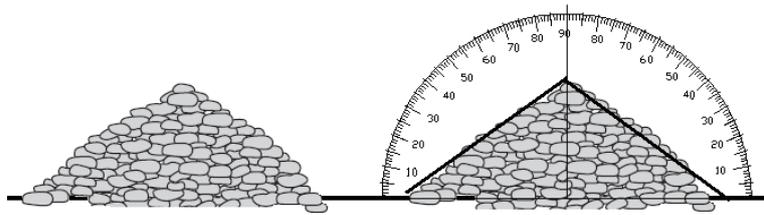


Figura 2.4 Obtención del ángulo de reposo de las gravas.

El valor del ángulo de reposo promedio estimado para el material empleado en la modelación de la playa fue de 25° .

2.2.1.2.3 Granulometría del material utilizado en el modelo final.

Aunque ya se tenía una primera clasificación del material, se realizó una prueba granulométrica para tener mejor caracterizado el material. En la Tabla 1 y en la Figura 2.5 se muestra la distribución del tamaño de sedimentos utilizados en el modelo.

Tabla 1. Granulometría de la grava utilizada en el modelo.

Malla	W Retenido [gr]	% Retenido	% Acumulado	% que pasa
11,2	7,5	0,37	0,37	99,63
8	399,9	19,99	20,37	79,63
6,35	455,8	22,79	43,16	56,84
4,76	856,2	42,81	85,97	14,03
Fondo	280,7	14,03	100	0
Total	2000,1	100		

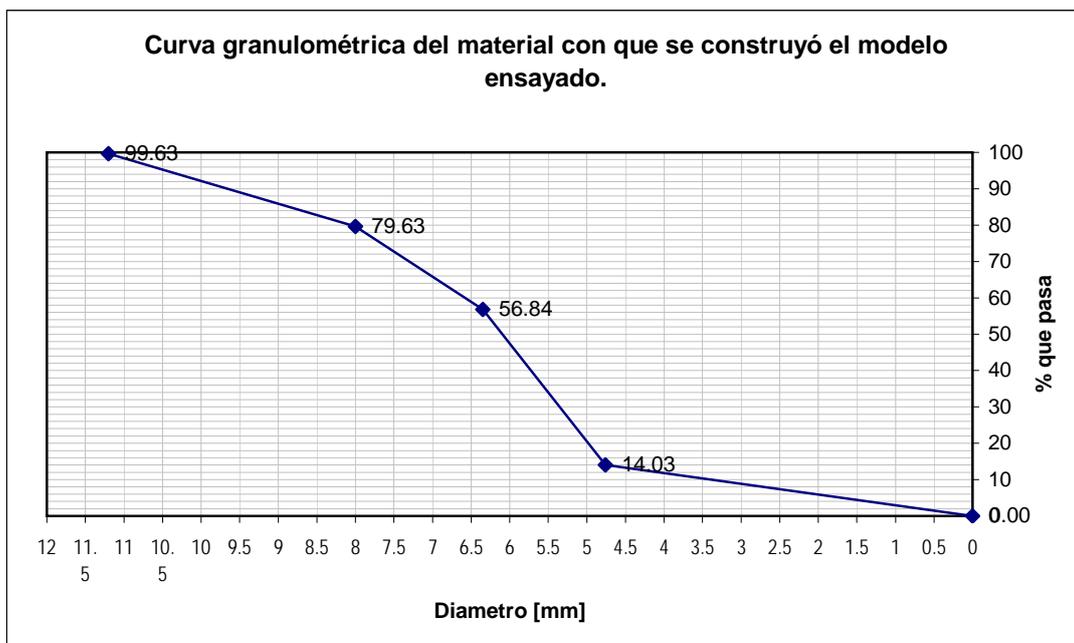


Figura 2.5 Curva granulométrica del material con que se construyó el modelo ensayado.

2.2.1.2.4 Determinación de la velocidad de caída

Para obtener la velocidad de caída del material, en una probeta se dimensionó una longitud de 80 cm con marcas que pudiesen ser claramente visibles. La probeta se llenó con agua y se dejaron caer granos de tal forma que la caída iniciara con la partícula en reposo y dentro del medio líquido. La caída del material se registró en una grabación de un video de la que posteriormente se obtuvieron los tiempos de recorrido (ver Figura 2.6). Un total de 50 videos fueron analizados cuadro por cuadro para obtener la mejor precisión posible.

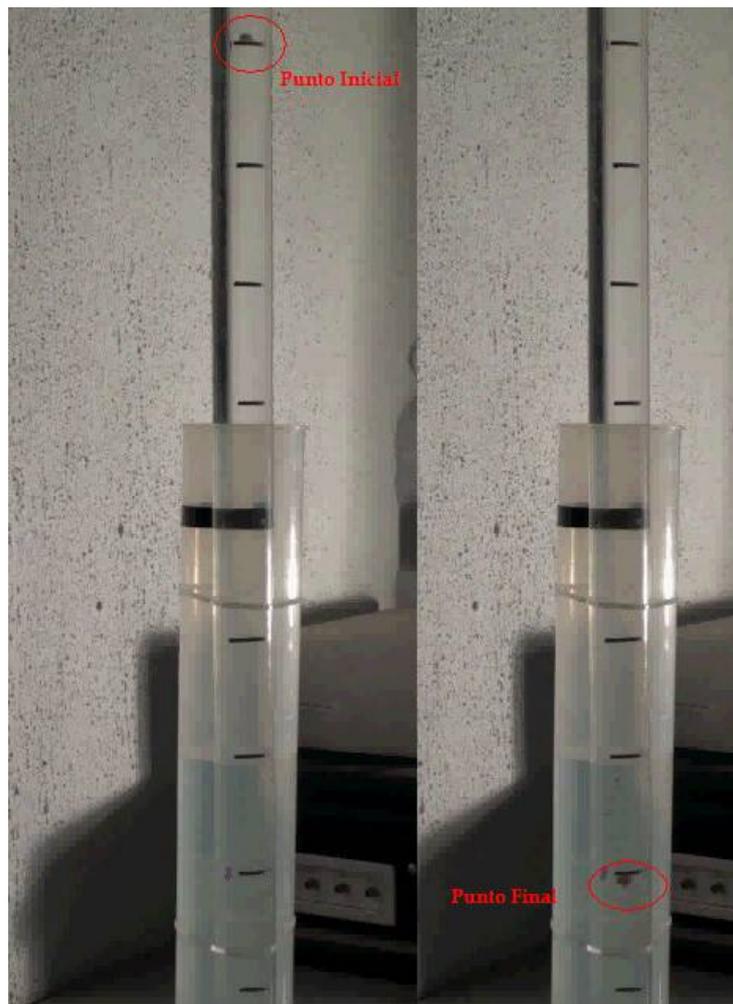


Figura 2.6 Determinación de la velocidad de caída del material.

En la Figura 2.6 se muestran los cuadros correspondientes al inicio y final del recorrido de las partículas y en la Tabla 2 se presenta un resumen de algunos de los valores temporales medidos.

El valor promedio de la velocidad de caída para las partículas de grava de diámetro medio de 0.25 pulgadas fue de 0.34 m/s.

Tabla 2. Tiempos de recorrido de las partículas en una longitud de 80cm.

Prueba	t inicial	t final	t f - t i	Velocidad	Prueba	t inicial	t final	t f - t i	Velocidad
1	22,622	24,924	2,302	0,35	26	14,187	16,923	2,736	0,29
2	31,998	34,167	2,169	0,37	27	20,326	22,595	2,269	0,35
3	42,275	44,878	2,603	0,31	28	27,567	29,702	2,135	0,37
4	58,024	60,06	2,036	0,39	29	34,307	36,509	2,202	0,36
5	65,899	68,468	2,569	0,31	30	42,181	44,55	2,369	0,34
6	71,838	73,807	1,969	0,41	31	49,322	51,958	2,636	0,30
7	80,914	83,65	2,736	0,29	32	55,061	57,864	2,803	0,29
8	90,994	93,693	2,699	0,30	33	0,667	2,869	2,202	0,36
9	101,835	104,337	2,502	0,32	34	6,706	9,008	2,302	0,35
10	111,778	113,847	2,069	0,39	35	17,483	19,852	2,369	0,34
11	121,654	123,823	2,169	0,37	36	23,723	26,192	2,469	0,32
12	129,462	131,631	2,169	0,37	37	30,763	32,932	2,169	0,37
13	139,105	141,441	2,336	0,34	38	42,709	44,911	2,202	0,36
14	145,812	148,148	2,336	0,34	39	51,017	53,319	2,302	0,35
15	32,018	34,554	2,536	0,32	40	58,791	61,227	2,436	0,33
16	43,863	46,065	2,202	0,36	41	4,13	6,466	2,336	0,34
17	50,904	53,373	2,469	0,32	42	10,203	12,438	2,235	0,36
18	57,51	60,013	2,503	0,32	43	17,41	19,245	1,835	0,44
19	4,651	6,753	2,102	0,38	44	25,017	27,286	2,269	0,35
20	12,992	16,029	3,037	0,26	45	39,499	41,701	2,202	0,36
21	23,77	26,105	2,335	0,34	46	49,108	51,644	2,536	0,32
22	31,01	33,58	2,57	0,31	47	56,048	58,418	2,37	0,34
23	39,752	41,888	2,136	0,37	48	11,731	14,133	2,402	0,33
24	50,063	52,966	2,903	0,28	49	31,751	34,32	2,569	0,31
25	7,814	10,45	2,636	0,30	50	40,326	42,495	2,169	0,37

2.2.1.2.5 Determinación de la porosidad

El valor de la porosidad de la grava con D_{50} de un cuarto de pulgada utilizada en la construcción del modelo ensayado se determinó en el laboratorio. Para ello se tomaron 7 muestras que se colocaron en un vaso de precipitados. El volumen de cada una de las muestras se fijó en 1000 ml (ver Figura 2.7). A las muestras se les agregó agua hasta que el fluido cubrió de forma total el volumen de la muestra, tal como se puede apreciar en panel 2 de la Figura 2.7 y se tomaron las lecturas de la cantidad de volumen del líquido necesario para cubrir el material contenido en el vaso de precipitados, los valores obtenidos para cada una de las muestras se presentan en la Tabla 3.

El valor de la porosidad para las gravas utilizadas es de $n = 0.4028$, pues es el valor medio que resulto de las pruebas para su determinación en laboratorio.



Figura 2.7 Determinación de la porosidad en el laboratorio.

Tabla 3. Valores de la porosidad

Muestra	Vol. Material [ml]	Vol. Agua [ml]	n
1	1000	380	0,38
2	1000	400	0,4
3	1000	400	0,4
4	1000	400	0,4
5	1000	420	0,42
6	1000	420	0,42
7	1000	400	0,4

2.2.2 Geometría del modelo

Con la nueva clasificación de las gravas y gracias a la experiencia de las pruebas preliminares se iniciaron los experimentos con la construcción de un modelo de playa con el material de grano más fino, lo cual significó llegar a un perfil de equilibrio en un tiempo más corto que con el material de mayor tamaño. Esto permitió la evaluación de la metodología experimental a fin de revisar los resultados y probar diferentes estrategias para ajustar los procedimientos en caso de ser necesario.

Así pues, en el caso de esta tesis, el tamaño de grano se mantuvo constante y las características del oleaje son las que se modifican en cada ensayo. Una vez que se finalizaron los experimentos para un tamaño de grano, el material fue retirado del canal y se construyó una prueba con el siguiente tamaño, sin embargo, esa etapa ha quedado fuera del alcance de este trabajo.

La geometría propuesta para los experimentos es la que se muestra en la Figura 2.8. En su estado inicial la playa tiene una altura de 57 centímetros, una pendiente constante de 1:5 en la zona expuesta y de 1:1 en la parte no expuesta al oleaje. Al pie de la playa se construyó, con el mismo material, una cama de 1.8 metros de largo y 8 centímetros de altura, en dirección de la pala. La finalidad de esta cama es crear una zona de transición que evite perturbaciones del oleaje por el cambio brusco de medio; a la vez que favorece el peraltamiento de las olas antes de llegar a la playa, con lo que la rotura del oleaje es un tanto más violenta y descarga mayor cantidad de energía sobre el talud facilitando el desplazamiento del material granular y por ende la deformación del perfil de playa. Otra de las funciones de la cama de grava al pie de la playa es generar fricción para evitar que por la irregularidad en la deformación del talud se generen

ondas en sentido transversal al de generación de las olas que contaminarían el experimento.

La geometría inicial del modelo de playa se muestra en la Figura 2.8.

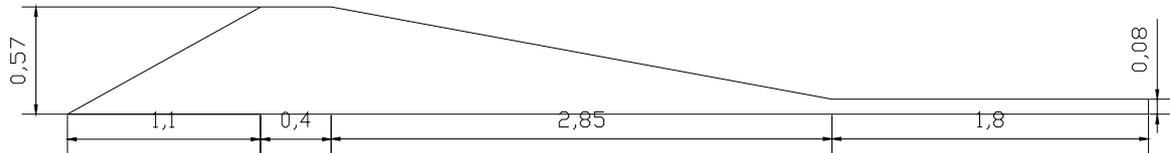


Figura 2.8 Características geométricas de la playa de $\frac{1}{2}$ " de D_{50} (acotaciones en metros).

2.2.3 Instrumentación.

Para determinar la posición del equipo de medición que se utilizó en los ensayos, se realizaron pruebas previas en las que se utilizaron las características del oleaje que se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de oleaje propuestos para las pruebas preliminares.

h (m)	H (m)	T (s)	h (m)	H (m)	T (s)
0.4	0.1	1	0.4	0.1	3
0.4	0.12	1	0.4	0.12	3
0.4	0.14	1	0.4	0.14	3
0.4	0.16	1	0.4	0.16	3
0.4	0.18	1	0.4	0.18	3
0.4	0.1	2	0.4	0.1	4
0.4	0.12	2	0.4	0.12	4
0.4	0.14	2	0.4	0.14	4
0.4	0.16	2	0.4	0.16	4
0.4	0.18	2	0.4	0.18	4

donde

h (m) profundidad
 H (m) altura de la ola
 T (s) periodo de la ola

Durante estas pruebas se midieron las deformaciones (ver Figura 2.9) del perfil de playa con el paso del tiempo y la variación del tren de olas al que fue sometido, obteniéndose los resultados de la Tabla 5. El objeto de estas primeras mediciones fue el de encontrar las zonas donde el perfil perdería material a fin de no colocar equipo de medición que pudiera estorbar el libre desplazamiento de las partículas.

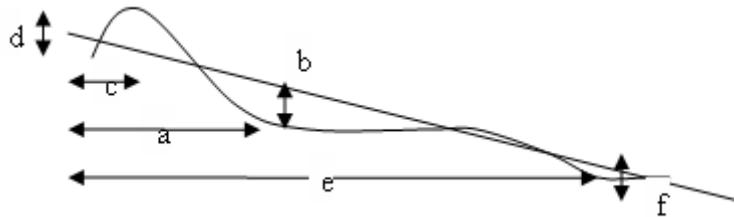


Figura 2.9 Magnitud de las deformaciones del perfil de playa de $D_{50}=1/2''$.

Tabla 5. Deformaciones medidas en la playa.

h (m)	H (m)	T (s)	a (m)	b(m)	c (m)	d(m)	e (m)	f(m)
0.4	0.1	1	1	0.025	0.76	0.03		
0.4	0.12	1	1.07	0.03	0.73	0.04		
0.4	0.14	1	1.05	0.03	0.7	0.035		
0.4	0.16	1	1.075	0.03	0.67	0.035		
0.4	0.18	1	1.08	0.03	0.65	0.035		
0.4	0.1	2	1	0.035	0.74	0.06		
0.4	0.12	2			0.54	0.11	1.56	0.06
0.4	0.14	2			0.44	0.11	1.77	0.065
0.4	0.16	2	1.18	0.025	0.44	0.11	1.91	0.06
0.4	0.18	2	1.19	0.03	0.38	0.1	1.9	0.06
0.4	0.1	3	1.14	0.02	0.74	0.05		
0.4	0.12	3	1.09	0.035	0.45	0.12	1.31	0.08
0.4	0.14	3	1.1	0.03	0.62	0.09	1.5	0.07
0.4	0.16	3						
0.4	0.18	3	1.16	0.04	0.67	0.13	1.55	0.085
0.4	0.1	4	1.13	0.05	0.48	0.09	1.84	0.03
0.4	0.12	4	1.07	0.04	0.41	0.1	1.845	0.03
0.4	0.14	4	1.03	0.04	0.31	0.125	1.85	0.03
0.4	0.16	4	1	0.04	0.22	0.13	1.78	0.07
0.4	0.18	4	0.98	0.05	0.15	0.14	1.75	0.08

Es importante hacer notar que para los resultados sombreados y con negritas, de la Tabla 5, el oleaje rompe antes de llegar a la playa por lo que dichos casos se eliminaron del programa de ensayos definitivo.

2.2.3.1 Sensores de nivel

Con la finalidad de obtener los registros temporales de la superficie libre del agua se colocaron dispositivos de medición por resistividad eléctrica. Estos instrumentos son cinco sensores de nivel ubicados de forma tal que se permita la aplicación del Método

de de Mansard y Funke modificado por Baquerizo (1995) (*ANEXO A*), para la separación de la onda incidente y reflejada.

Separación entre sensores, el método utilizado para la separación de la onda incidente y reflejada, recomienda una distancia máxima y mínima entre sensores para la obtención de lecturas confiables, dicha separación debe encontrarse dentro del intervalo $\frac{\pi}{10} \leq k\Delta x \leq \frac{9\pi}{10}$, por lo que la distancias correspondientes son las siguientes:

$$\Delta x_{\min} = \frac{\pi}{10k} \quad (2.1)$$

$$\Delta x_{\max} = \frac{9\pi}{10k} \quad (2.2)$$

donde,

Δx_{\min} separación mínima entre sensores

Δx_{\max} separación máxima entre sensores

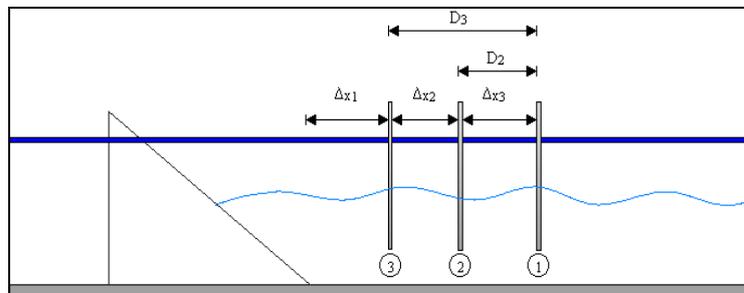


Figura 2.10 Posición relativa de los sensores de nivel.

Tomando en cuenta que los periodos de ola a usar para los ensayos varían entre 1 y 4 segundos la separación entre sensores de nivel queda como se muestra en la Figura 2.11

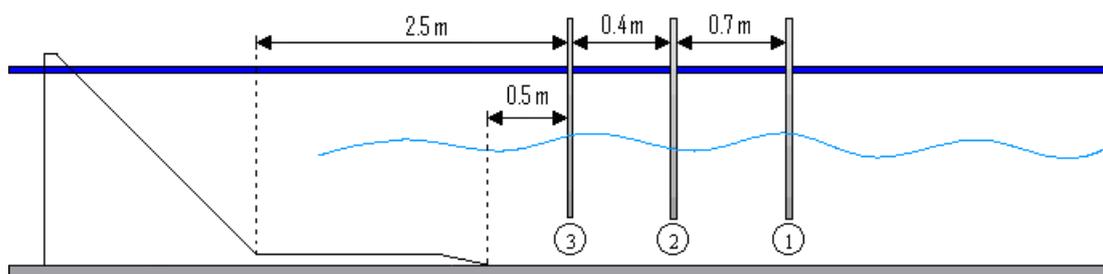


Figura 2.11 Distanciamiento entre los sensores de nivel.

2.2.2.2 Sensores de presión

Con los datos de las deformaciones de la playa obtenidos en las pruebas previas se decidió colocar los sensores de presión a las distancias que se indican en la Tabla 6 y de la forma que se muestra en la Figura 2.12 y en la Figura 2.13. La información obtenida

con estos dispositivos es importante para evaluar los fenómenos de infiltración y exfiltración que ocurren dentro de la playa al interactuar con el oleaje, lo cual tiene influencia decisiva en el fenómeno del transporte de sedimentos y deformación del perfil. Sin embargo, este análisis no se incluye dentro del alcance del presente trabajo.



Figura 2.12 Posición de los sensores de presión, vista en perfil.

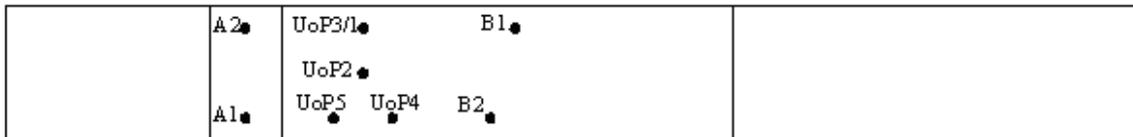


Figura 2.13 Posición de los sensores de presión, vista en planta.

Tabla 6. Posición de los sensores de presión respecto de la pala.

Sensores de Presión	Distancia desde la Pala (m)
B1	26.4
B2	26
UoP1	27.1
UoP2	27.1
UoP3	27.1
UoP4	26.95
UoP5	27.25
A1	28.1
A2	28.1

Con el fin de evitar movimientos indeseados, cada sensor fue colocado y amarrado sobre a una malla de 25 cm por 25 cm (ver Figura 2.14). Los sensores B1, B2 y A2, se colocaron en el fondo del canal, el sensor A1 se colocó 10 cm por arriba del fondo, los sensores UoP5, UoP3 y UoP4 se colocaron, 10 cm debajo de la cara de la playa, con la misma pendiente (1:5), los sensores UoP2 y UoP1, están separados 10 cm de cada uno.



Figura 2.14 Sensor de presión colocado en la playa sobre una malla.

2.2.2.3 Piezómetros

Con el objeto de monitorear los cambios que ocurren en el nivel freático durante la experimentación, se colocaron cuatro piezómetros dentro de la playa (ver Figura 2.15), entre los sensores “A” y los “UoP”. Las distancias a las que se colocaron se muestran en la Tabla 7).

Tabla 7. Posición de los piezómetros respecto de la pala.

Piezómetro	Distancia medida desde la pala (m)
1	27.5
2	27.8
3	28.1
4	28.4



Figura 2.15 Ubicación de los piezómetros dentro de la playa.

El análisis de los registros obtenidos de los piezómetros quedó fuera del alcance de esta tesis, dado que el procesamiento de los videos y su posterior revisión por imagen resulta muy amplio en cuestión de tiempo.

2.2.2.4 Velocímetros

Durante los ensayos se concluyó sobre la conveniencia de contar con una medida de la velocidad del flujo del oleaje dentro del canal, ya que su medición proporciona información que puede ser asociada al transporte de sedimentos por suspensión y además ofrece información de lo que está ocurriendo en la zona de resaca. Para ello se utilizaron dos tipos de velocímetros (ver Figura 2.16), y se describen a continuación.

Velocímetro Acústico Doppler (ADV, por sus siglas en inglés) básicamente el funcionamiento de este dispositivo consiste en un emisor de sonido y tres receptores de señal acondicionados en un módulo electrónico. El emisor del instrumento genera una señal acústica que se refleja de vuelta por la dispersión de sonido de las partículas presentes en el agua, dicha señal es detectada por los receptores y el instrumento a través de un software realiza el cálculo del cambio de fase en la señal y con ella la velocidad del flujo

Particle Image Velocimetry (PIV) este instrumento proporciona información sobre la velocidad y trayectoria de las partículas en dos direcciones, esto es posible dado el funcionamiento del dispositivo el cual genera pulsos de luz de un láser y al mismo instante realiza la captura de una ráfaga de imágenes, posteriormente el software incorporado realiza una comparación entre imágenes consecutivas e identifica así el desplazamiento de las partículas.

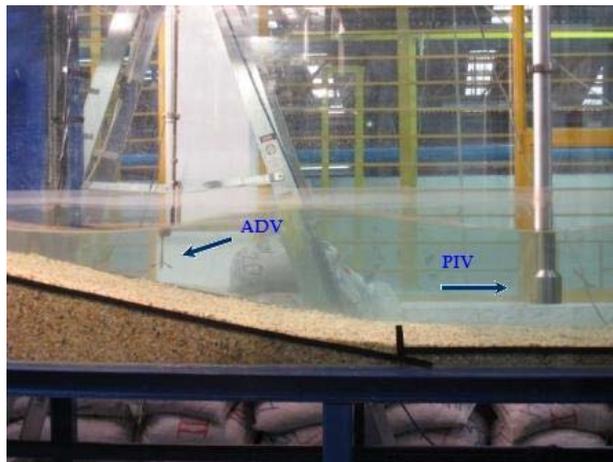


Figura 2.16 ADV y PIV dentro del canal de oleaje.

2.2.2.4 Cámaras de video y fotográfica

Para tener un registro de la evolución de la playa durante los experimentos, se instalaron tres cámaras de video fuera del canal, una para registrar el cambio en el nivel freático dentro de la playa, otra para observar el transporte de sedimentos en la zona de rompiente (ver Figura 2.17) y la tercera se colocó arriba de la instalación a fin de obtener información vista en planta de la playa, lo cual permite el análisis del run-up y run-down.

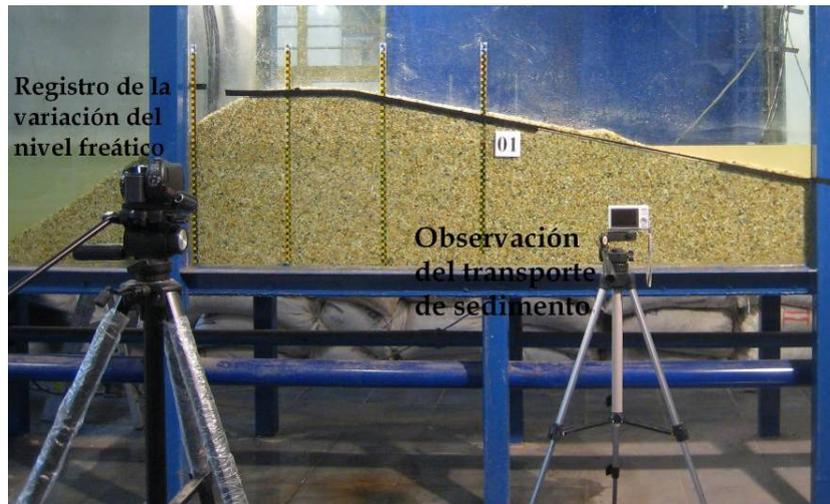


Figura 2.17 Ubicación de las cámaras de video.

Adicionalmente se colocó una cámara fotográfica a una distancia tal que la imagen grabada registrara el perfil completo y con ello dar seguimiento a la deformación de todo el sistema al inicio y al final de cada experimento.

2.2.4 Procedimiento de los ensayos y recolección de datos

Como se dijo antes, el programa experimental se dividió en dos casos (ver Tabla 8), uno cuando el nivel del agua en reposo (zona expuesta) y el nivel del agua en la parte no expuesta del modelo son el mismo y otro cuando existe una diferencia entre dichos niveles siendo más bajo el nivel del agua en reposo. La metodología de experimentación para cada caso es similar y se detalla a continuación. Los resultados se compararon en gabinete y se presentan en el siguiente capítulo.

Tabla 8. Información sobre el programa experimental realizado.

CASO 1					CASO 2				
H (m)	T (s)	h zona protegida(m)	h zona expuesta(m)	Diferencia de Niveles (m)	H (m)	T (s)	H zona protegida(m)	h zona expuesta(m)	Diferencia de Niveles (m)
0.1	1	0.4	0.4	0	0.1	1	0.414	0.37	0.044
0.12	1	0.4	0.4	0	0.12	1	0.416	0.372	0.044
0.14	1	0.4	0.4	0	0.14	1	0.41	0.365	0.045
0.16	1	0.4	0.4	0	0.16	1	0.41	0.365	0.045
0.18	1	0.4	0.4	0	0.18	1	0.411	0.362	0.049
0.1	2	0.4	0.4	0	0.1	2	0.415	0.367	0.048
0.12	2	0.4	0.4	0	0.12	2	0.412	0.37	0.042
0.14	2	0.4	0.4	0	0.14	2	0.415	0.37	0.045
0.16	2	0.4	0.4	0	0.16	2	0.41	0.362	0.048
0.18	2	0.4	0.4	0	0.18	2	0.414	0.37	0.044

0.1	3	0.4	0.4	0	0.1	3	0.418	0.374	0.044
0.12	3	0.4	0.4	0	0.12	3	0.41	0.36	0.05
0.14	3	0.4	0.4	0	0.14	3	0.412	0.366	0.046
0.16	3	0.4	0.4	0	0.16	3	0.41	0.36	0.05
0.1	4	0.4	0.4	0	0.1	4	0.41	0.36	0.05
0.12	4	0.4	0.4	0	0.12	4	0.41	0.36	0.05
0.14	4	0.4	0.4	0	0.14	4	0.41	0.36	0.05

Para los ensayos del caso 1 la profundidad de agua en reposo fue de 40 cm, se realizó la calibración de los sensores de nivel y se fijaron en la computadora las características del oleaje a generar. Se tomó la fotografía del perfil inicial de la playa y se prepararon las cámaras de video y las aplicaciones de cómputo para la recolección de datos de los instrumentos instalados. Se inició la generación del tren de olas y cuando la primera ola llegó al pie de la playa se inició el registro de datos en forma sincronizada de todo el equipo.

Cada ensayo constó de varias pruebas de distinta duración (Tabla 9) y al final de cada prueba se realizó el levantamiento del perfil de la playa para contar con registros de la historia de la deformación.

Es importante señalar que al finalizar la prueba 5 de cada ensayo, se compararon los últimos dos perfiles para verificar si se alcanzó el equilibrio y en caso negativo realizar más pruebas con duración de 10 minutos hasta alcanzarlo.

Tabla 9 Duración de las pruebas para cada ensayo realizado.

Prueba	Duración [min]
1	1
2	2
3	4
4	7
5	10

Cuando se ha alcanzó el equilibrio se reconstruyó la playa y se inició un nuevo ensayo de acuerdo con las características que se presentaron en la Tabla 4.

Para la realización del caso 2 se realizó el llenado del canal hasta 40 cm, pero esta vez se generó una pequeña corriente en sentido contrario a la dirección de propagación de las olas con ayuda del sistema de bombas y válvulas con que está equipado el canal. Esta corriente se designó de magnitud tal, que la diferencia de niveles entre la parte protegida oleaje y la expuesta al oleaje (ver Figura 2.18) fuera de 4-5cm constante. Una vez que el sistema playa-corriente quedaba estable, se ejecutaron las pruebas siguiendo la misma metodología que en el caso 1.



Figura 2.18 Localización de zonas en el modelo ensayado.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados y análisis correspondientes a los ensayos de playa con grano de 0.25” de diámetro medio. El énfasis principal está dirigido a la comparación del funcionamiento hidráulico de la playa cuando en el interior de ella se presenta un flujo en sentido contrario al de la propagación del oleaje, mismo que es resultado de un nivel freático más alto en la zona de la playa no expuesta al oleaje. En este sentido, el alcance de esta tesis cubre tres aspectos principales derivados de la modelación en el laboratorio, a saber, la forma del perfil transversal, las variaciones de la eficiencia disipativa de la playa (inferidas vía la reflexión) y los efectos que tiene el flujo intersticial en el ascenso máximo.

3.1 Forma del perfil transversal

En general, las playas de materiales granulares están gobernadas por la energía del oleaje, de modo que en la medida que éste actúa, ocurren deformaciones morfológicas diversas cuyas características responden principalmente a la cantidad de material con que cuenta el sistema. Así, los perfiles de playa con material en exceso adquirirán formas distintas de aquellos con déficit de material. El tema que genera interés científico es saber si una misma playa, puede ser de tipo erosivo o creciente, en función de las condiciones de oleaje que la soliciten, o si el oleaje sólo determina la forma fina del perfil de playa sin intervenir en su comportamiento general.

Para comparar los perfiles de playa bajo diferentes condiciones de oleaje y, a la vez, determinar la afectación que se presenta cuando existen variaciones de elevación del nivel freático, se emplearán los datos que de evolución del perfil transversal de la playa de material granular cuyo proceso experimental se describió en el capítulo anterior.

La Figura 3.1 presenta un ejemplo de los perfiles medidos en diferentes instancias del proceso de ensayo y corresponde a la evolución durante el proceso de estabilización. En el caso específico se muestran los perfiles tomados luego de que el modelo estuviera sujeto a trenes de 1, 2, 4, 7 y 10 minutos con oleaje regular de 10 cm de altura y 2 s de periodo. La estabilidad del perfil se verificó con las mediciones 34 y 35 en las que las variaciones registradas fueron despreciables. Es decir, el perfil estable se alcanzó luego de un aproximado de 420 olas y se verificó luego hasta las 720 olas, de esta forma, se consideró que si un aproximado de 300 olas no modificaron significativamente el perfil, se logró la estabilidad.

Como puede observarse en la Figura 3.1, a medida que el oleaje actúa sobre el modelo éste va sufriendo deformaciones cada vez más notorias, el material es desplazado hacia la parte alta del perfil y se acumula en una berma de forma casi triangular. Esta berma hace que el perfil adquiera la forma de un perfil reflejante.

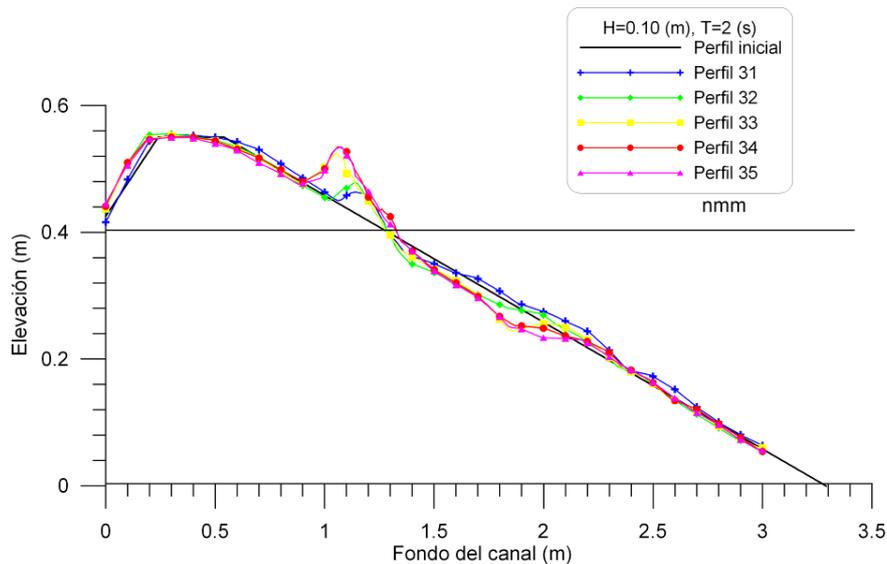


Figura 3.1 Evolución del perfil transversal de la playa a través del tiempo para $H=10\text{cm}$ y $T=2\text{s}$.

Un poco por debajo del nivel de agua en reposo (Figura 3.1) se genera una zona de erosión que va avanzando hacia la parte baja del perfil y no se detectó la aparición de rizos u otro tipo de formaciones de fondo, lo cual también coincide con la descripción de un perfil tipo reflejante. Por otro lado, es de notar que la deformación del perfil es muy rápida, es decir, las primeras 100 olas cambian la morfología a un perfil muy parecido al que se alcanzará una vez que se logra la estabilidad, lo cual es una tercera característica propia de un perfil reflejante. Hasta ahora, todo indica que para las condiciones de oleaje probadas y partiendo un talud recto con pendiente 1:5 el perfil estable que se alcanza es de tipo reflejante, hipótesis que ha de ser verificada con el análisis de la reflexión que se presentará más adelante.

En la Figura 3.2 se muestra un ejemplo de la variación del perfil de la playa con periodo constante de tres segundos y la altura de ola incrementando gradualmente. Es claro que para mayores alturas de la ola, el volumen de material en la berma aumenta, el desplazamiento de la misma hacia la parte seca de la playa también es mucho mayor y la zona de erosión en la parte baja del perfil se extiende hacia el fondo del canal. El perfil en este caso (al igual que en todos los ensayos, como se puede constatar en el ANEXO C) es también de tipo reflejante. Una característica interesante que se observa en la Figura 3.2 es que la berma de material desplazado ha superado, en altura, a la coronación original del modelo por lo que la influencia del talud recto original ha desaparecido por completo y el nuevo perfil, adquirido naturalmente, es resultado exclusivamente de la energía del oleaje.

Otro aspecto relevante de la evolución del perfil es que la cota más alta de la berma no describe una trayectoria lineal, sino de tipo parabólico. Este comportamiento hace que el frente o “cara” de la playa tenga una variación tal que inicialmente avanza hacia el agua hasta alcanzar un máximo y después se retrae hacia la parte seca hasta donde alcanza la estabilidad.

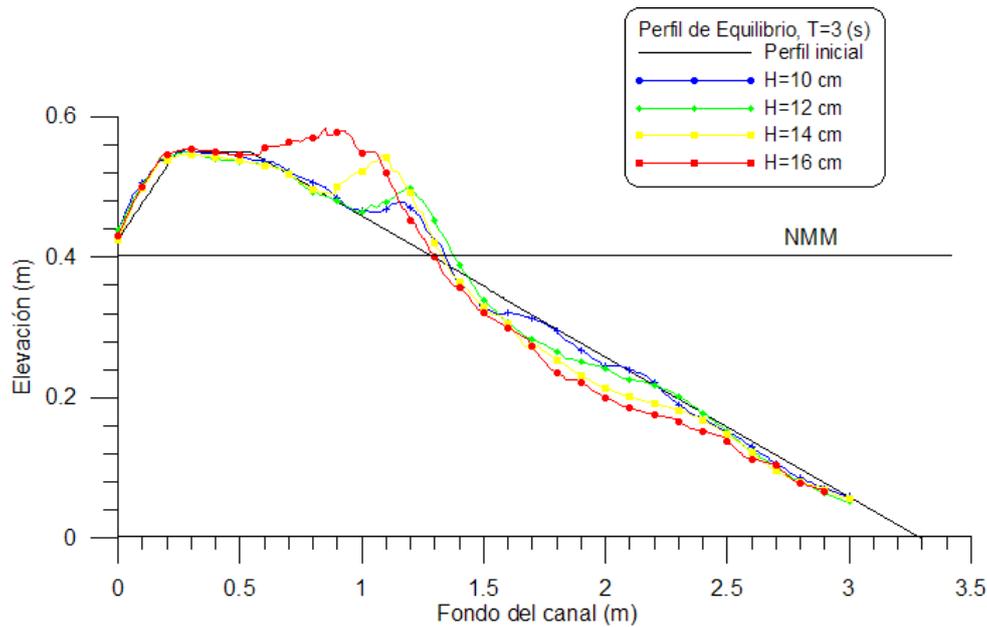


Figura 3.2 Formas del perfil de estable para $T=3$ s y varias alturas de ola, caso 1.

Los ejemplos que hasta ahora se han presentado corresponden al caso 1. A continuación (Figura 3.3) se presenta la información correspondiente a las mismas condiciones de oleaje ($T=3$ s) pero con una diferencia de 5 cm entre los niveles de las zonas expuesta y no expuesta de la playa.

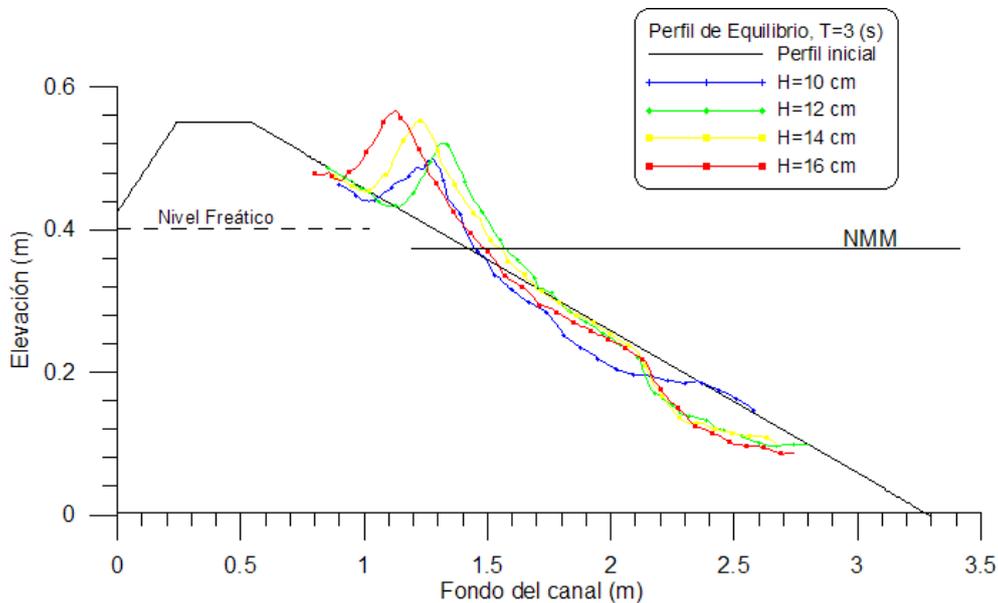


Figura 3.3 Formas del perfil de equilibrio, $T=3$ s y varias alturas de ola, caso 2.

En la Figura 3.3 se presenta la variación del perfil de la playa, con la existencia de un flujo en sentido contrario al de la propagación del oleaje, ocasionado por el desnivel de agua entre la zona expuesta y la zona protegida.

Al igual que en los resultados presentados en la Figura 3.2 , en la Figura 3.3 se observa que a medida que se incrementa la altura de la ola el volumen de material en la berma generada por encima del nivel del agua en reposo aumenta y el desplazamiento de la misma hacia la coronación de la playa también es mucho mayor, sin embargo, la forma de los perfiles es muy distinta entre un caso y otro. Los ensayos del caso 1 muestran un perfil relativamente distribuido en la vertical, es decir, se observa conexión entre las partes del perfil, mientras que el caso 2 pareciera que la berma en la parte alta y la zona de erosión en la parte baja funcionarían de manera independiente, de hecho, es claro que tienden a la alejarse dejando una zona con pendiente muy cercana a la del modelo original. Otra diferencia muy marcada es la forma de la berma, que en la caso 2 parece más acusada. Por lo que toca a la altura de la berma es interesante notar que crece más rápidamente en el caso 2 aunque la berma final es de mayor volumen y altura en caso 1. La evolución de la “cara” de la playa también es distinta, ya que la curva que describe el punto más alto en el caso 2 es mucho más cerrada que en el caso 1, lo que supone una deformación más rápida. Por lo que respecta a la forma del frente de la playa, en el caso 2 es más parabólico mientras que en el caso 1 es más cercano al recto. El tiempo y la cantidad de energía con que se alcanzó la estabilidad difieren también de manera notoria. Mientras que en el caso 1 se requirió de cinco pruebas (420 olas) con las mismas condiciones de oleaje para alcanzar el equilibrio de la playa, los ensayos del caso 2 necesitaron entre 7 y 9 (1320 a 1920 olas).

Para tener una idea más clara de los perfiles estables alcanzados, se presentan en la Tabla 10 las imágenes fijas de los mismos para los ensayos realizados con periodo de 1 segundo.

Tabla 10. Perfiles estables alcanzados en los ensayos con periodo $T=1$ s

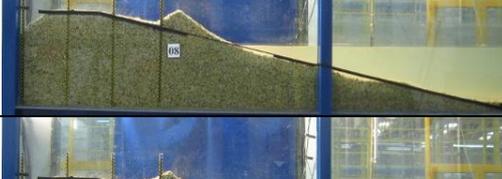
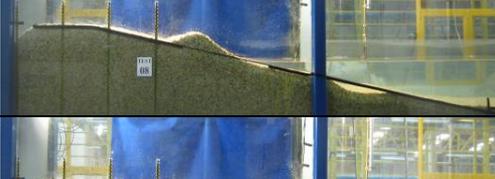
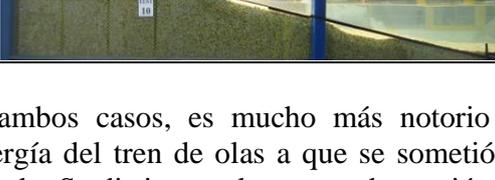
H (cm)	CASO 1	CASO 2
10		
12		
14		
16		



En las imágenes de la Tabla 10 pareciera que no existen diferencias importantes en la forma de los perfiles estables, sin embargo, sí es notorio que los ensayos del caso 2 presentan una zona de erosión justo debajo del nivel de agua en reposo más marcada que los perfiles del caso 1. Por otra parte, una observación a detalle permite destacar que el volumen de la berma de material desplazado es de mayor volumen en los perfiles del caso 1.

La Tabla 11 muestra la comparación de los perfiles estables para los ensayos con periodo de 2 segundos.

Tabla 11. Perfiles estables alcanzados en los ensayos con periodo $T=2$ s.

H (cm)	CASO 1	CASO 2
10		
12		
14		
16		
18		

En la serie fotográfica de la Tabla 11, para ambos casos, es mucho más notorio el desplazamiento del material debido a que la energía del tren de olas a que se sometió el modelo es mayor a causa del incremento del periodo. Se distinguen las zonas de erosión en la playa y el crecimiento en mayor proporción de la berma en el perfil. Los ensayos del caso 1 tienen mayor volumen de material en la berma y, con referencia a la posición de los

piezómetros, es fácil detectar que la berna del caso 1 está desplazada más hacia la parte seca que la del caso 2. Es también interesante notar que con este periodo, los perfiles son compuestos, es decir, se tiene un forma que gobierna la zona de rompientes y otra en la zona de someramiento, esta morfología coincide con la reportada por Inman *et al.* (1993) y que se describió en el capítulo 1.

En la Taba 12 se presenta la serie de imágenes correspondiente al periodo de 3 segundos.

Tabla 12. Perfiles estables alcanzados en los ensayos con periodo $T=3$ s.

H (cm)	CASO 1	CASO 2
10		
12		
14		
16		

Tabla 13. Serie fotográfica de los perfiles de equilibrio alcanzados en los ensayos con periodo $T=4$ segundos y para cada uno de los casos.

H (cm)	CASO 1	CASO 2
10		
12		
14		

En las imágenes de la Tabla 12 se observa que la berma del caso 2 es más grande para las alturas de ola pequeñas, esto es, el oleaje es capaz de mover más material debido a que la fricción entre las piezas es menor. Sin embargo, dicha tendencia cambia para las alturas de ola mayores. Esto se debe a que el flujo que se opone a la propagación del oleaje le resta energía y aún cuando el material es removido con mayor facilidad, el punto y la forma de la rotura contribuyen también a que la formación de la berma no se alcance como en el caso 1. De lo anterior se desprende que la forma del perfil estable es un compromiso entre la energía del oleaje, el flujo intersticial, el tipo y punto de rotura y la reflexión. Como observación adicional se tiene que los perfiles del caso 1 para este periodo, presentan una forma más lisa en la parte baja, lo que los hace más reflejantes, de modo si la ola incidente y la reflejada entran en fase, la altura de ola total es mayor y por ello se podría explicar la mayor capacidad de transporte en el caso 1, lo cual podría también explicar por qué para menores alturas de ola hay más transporte en el caso 2 y en las alturas de ola mayores es a la inversa.

En la Tabla 13 se muestran los perfiles estables con periodo de 4 segundos. En este ensayo se descartaron las pruebas en las que el oleaje rompe antes de llegar al modelo. Con este periodo, el flujo a través del modelo influye de manera decisiva al oleaje, lo cual se verifica al observar que en todas las alturas de ola, el caso 1 genera una berma más grande. Parte de la razón es que la reflexión en este periodo es muy alta desde el inicio y ello, sumado a la acción del flujo, hace que el oleaje del caso 2 sea menos energético.

En resumen, el perfil estable de todos los ensayos es de carácter acumulativo, lo cual significa que el modelo original presenta material en exceso. La berma se forma con material tomado de la zona de resaca y su volumen es función del oleaje incidente, el reflejado y la interacción de ambos con el flujo. En el caso 1, se logra un perfil totalmente independiente del talud original, mientras que en el caso 2 la pendiente de dicho talud sí aparece en el perfil estable. De acuerdo a lo observado, la forma que adquieren los perfiles estables corresponde a perfiles en un solo tramo con excepción de los ensayos con periodo de dos segundos (caso 1 y caso 2) y tres segundos (caso 2) donde los perfiles estables tienen la forma de perfiles en dos tramos.

Hasta ahora solo se comentó de manera cualitativa la evolución del perfil transversal de las playas modeladas. Para complementar dicha información con datos cuantitativos, se realizó la medición geométrica de la posición de la berma así como de su elevación máxima. Los valores recabados de la geometría de los perfiles estables se presentan en la Tabla 14 y en la Tabla 15. En la Figura 3.4, por otro lado, se presenta un esquema para identificar los parámetros reportados.

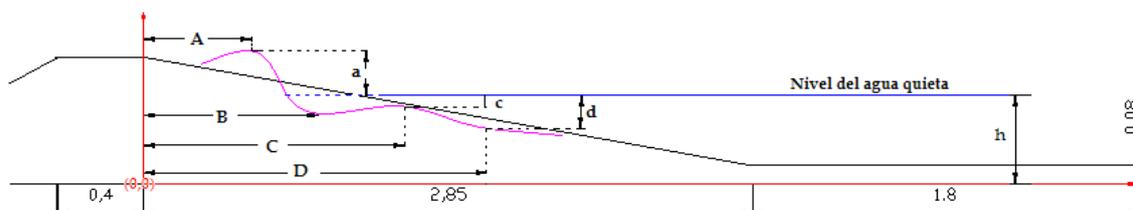


Figura 3.4 Parámetros registrados de los perfiles estables

Caso 1.

Tabla 14. Valores de las deformaciones ocurridas en la playa para el primer caso experimental.

Ensayo	T (s)	H (m)	h (m)	A	a	B	b	C	c	D	d
1	1	0,1	0,4	0,86	0,04	1,1	-0,042	*	*	*	*
2	1	0,12	0,4	0,845	0,04	1,05	-0,046	*	*	*	*
3	1	0,14	0,4	0,84	0,05	1,05	-0,04	*	*	*	*
4	1	0,16	0,4	0,8	0,04	1,05	-0,05	*	*	*	*
5	1	0,18	0,4	0,78	0,05	1,05	-0,05	*	*	*	*
6	2	0,1	0,4	0,7	0,158	1,7	-0,18	*	*	*	*
7	2	0,12	0,4	0,68	0,136	1,45	-0,15	*	*	*	*
8	2	0,14	0,4	0,59	0,168	1,45	-0,142	1,6	-0,158	1,9	-0,24
9	2	0,16	0,4	0,53	0,19	1,2	-0,082	1,65	-0,15	2,06	-0,29
10	2	0,18	0,4	0,45	0,218	1,2	-0,082	1,74	-0,16	2,18	-0,34
11	3	0,1	0,4	0,755	0,08	1,15	-0,08	1,35	-0,09	1,6	-0,152
12	3	0,12	0,4	0,8	0,1	1,3	-0,12	1,85	-0,19	2,35	-0,31
13	3	0,14	0,4	0,7	0,14	1,5	-0,17	1,9	-0,22	2,4	-0,32
14	3	0,16	0,4	0,54	0,18	1,6	-0,2	2,1	-0,26	2,4	-0,32
15	4	0,1	0,4	0,55	0,17	1,3	-0,13	1,75	-0,17	1,9	-0,22
16	4	0,12	0,4	0,4	0,21	1,6	-0,17	1,9	-0,17	*	*
17	4	0,14	0,4	0,34	0,238	1,6	-0,17	1,8	-0,162	2,05	-0,252

* No existe deformación alguna en esa zona para las condiciones de oleaje ensayadas.
Los valores en la vertical de *a, b, c* y *d* están referidos al nivel del agua quieta.

Como ya se había observado en la Tabla 10, los ensayos con periodo de un segundo presentan una berma de tamaño muy similar tanto en dimensiones como en posición, para las distintas alturas de ola. Para los perfiles de los primeros siete ensayos no se registra información de la existencia de un perfil en dos tramos. Se puede comprobar además que a medida que aumenta el valor el periodo la berma se posiciona mas cerca de la corona de la playa y a medida que aumenta la altura de ola incrementa la elevación del punto mas alto de la berma y para los ensayos 9, 10, 16 y 17 esta elevación es mayor que el de la coronación en el perfil inicial de la playa.

Caso 2.

Tabla 15. Valores de las deformaciones ocurridas en la playa para el segundo caso experimental.

Ensayo	T (s)	H (m)	h (m)	A	a	B	b	C	c	D	d
1	1	0,1	0,37	0,95	0,04	1,12	-0,034	*	*	*	*
2	1	0,12	0,372	0,92	0,046	1,13	-0,032	*	*	*	*
3	1	0,14	0,365	0,92	0,053	1,13	-0,025	*	*	*	*
4	1	0,16	0,365	0,88	0,06	1,1	-0,023	*	*	*	*
5	1	0,18	0,362	0,85	0,062	1,1	-0,02	*	*	*	*
6	2	0,1	0,367	0,92	0,101	1,4	-0,087	*	*	*	*
7	2	0,12	0,37	0,83	0,13	1,3	-0,07	1,65	-0,132	1,78	-0,175
8	2	0,14	0,37	0,85	0,138	1,3	-0,07	1,66	-0,13	1,95	-0,23
9	2	0,16	0,362	0,7	0,176	1,38	-0,082	1,66	-0,122	1,9	-0,227
10	2	0,18	0,37	0,56	0,188	1,05	-0,038	1,45	-0,11	1,8	-0,11

11	3	0,1	0,374	0,88	0,126	1,6	-0,164	*	*	*	*
12	3	0,12	0,36	0,92	0,16	1,45	-0,08	1,74	-0,14	2	-0,126
13	3	0,14	0,366	0,84	0,188	1,45	-0,086	1,74	-0,146	1,95	-0,138
14	3	0,16	0,36	0,72	0,204	1,32	-0,07	1,65	-0,14	1,95	-0,138
15	4	0,1	0,36	1,04	0,07	1,25	-0,07	*	*	*	*
16	4	0,12	0,36	0,82	0,118	1,3	-0,1	*	*	*	*
17	4	0,14	0,36	0,75	0,16	1,35	-0,09	*	*	*	*

* No existe deformación alguna en esa zona para las condiciones de oleaje ensayadas.
Los valores en la vertical de *a, b, c* y *d* están referidos al nivel del agua quieta.

Comparando la información de la Tabla 14 y la Tabla 15 se observa que los valores de A son menores para los ensayos del caso 1; mientras que los valores del parámetro a, son similares para los dos casos lo cual implica que la variación del nivel freático (y del flujo) influye en la posición horizontal de la berma pero no en su elevación. Los valores de B y b varían en forma similar a los valores de A y a puesto que el material que originalmente se localizaba en dicha zona es ahora el que forma en mayor parte la composición de la berma.

La información de las tablas y fotografías hasta ahora mostradas se complementan con los diagramas comparativos del perfil de equilibrio realizados a partir de la batimetría medida con la estación total. La información y comparación de dichos diagramas se muestran en el ANEXO C de este trabajo y en este apartado solo se presenta uno a manera de ejemplo.

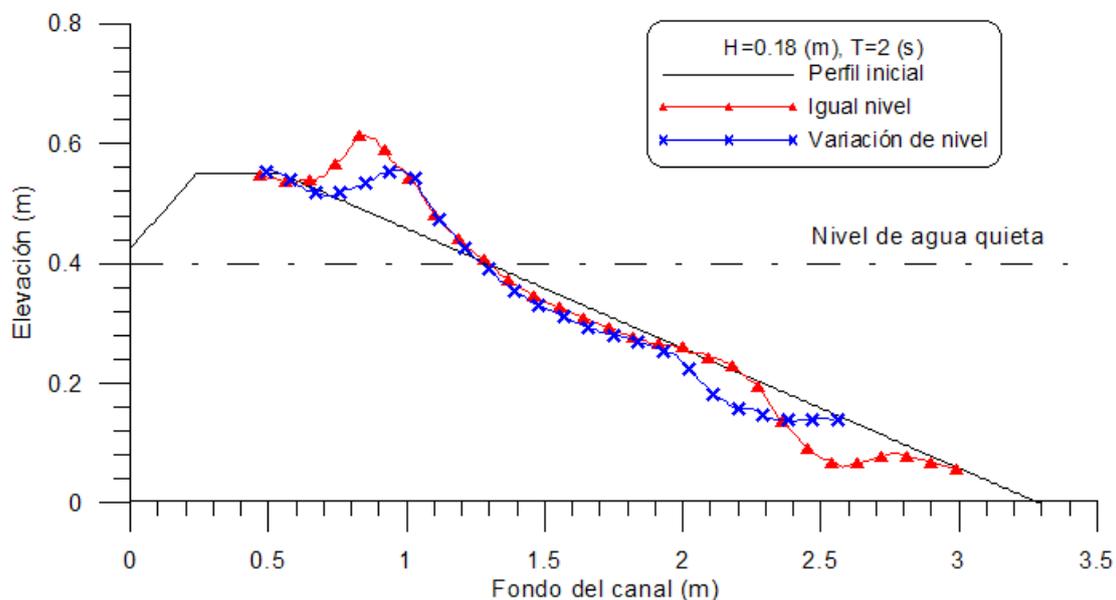


Figura 3.5 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=2s$ y $H=18cm$.

En la Figura 3.5 se muestra una comparación de lo que ocurre con los perfiles de equilibrio alcanzados para los ensayos con periodo de dos segundos y altura de ola de dieciocho centímetros, dependiendo de las condiciones de flujo ocasionadas por la presencia del nivel freático. En la grafica se observa que existe una zona en donde los perfiles coinciden, sin embargo, la zona donde se genera el transporte de material es de longitud mayor en el

ensayo del caso 1 abarcando casi en su totalidad toda la cara del talud. La berma que se forma es de mayor volumen en el caso 1 lo mismo que la erosión ocurrida casi al pie del talud de la playa. Y como ya se había mencionado para estos ensayos la forma del perfil corresponde a un modelo en dos tramos.

En general, cuando los perfiles alcanzan la estabilidad, en la zona de rotura presentan una pendiente pronunciada y una pendiente más suave en la zona de someramiento. De acuerdo a estas características, los perfiles estables que se obtuvieron son reflejantes según la clasificación propuesta por Bernabeu (1999) y que se presenta en la Tabla 16, lo cual también ya se había esbozado de manera visual.

Tabla 16. Características de los tramos del perfil de equilibrio.

Perfil Disipativo	Perfil de Rotura	Pendiente inicial tendida
		Pendiente aguas-adentro pronunciada
	Perfil de Someramiento	Pendiente inicial pronunciada
		Pendiente aguas-adentro pronunciada
Perfil Reflejante	Perfil de Rotura	Pendiente inicial pronunciada
		Pendiente aguas-adentro tendida
	Perfil de Someramiento	Pendiente inicial tendida
		Pendiente aguas-adentro tendida

Para corroborar esta información se realizó un análisis de la reflexión en los experimentos realizados, la cual se presenta a continuación.

3.2 Evolución de la reflexión

La acción del oleaje sobre las playas genera cambios morfológicos tanto en el perfil como en la forma en planta de la playa, resultado de esas alteraciones ocurren otros fenómenos que a su vez, perturban la propagación de oleaje. Uno de los procesos mayormente involucrados en esta dinámica es la reflexión. Cuando el oleaje se propaga sobre un fondo con pendiente suave como es el caso de las playas, la disipación de energía es más importante dados los fenómenos de fricción y rotura, por lo que la reflexión es mínima. En el caso específico de las playas modeladas en el laboratorio para este trabajo de tesis, se tiene como característica adicional que el modelo es permeable, por lo que el oleaje está sujeto a una combinación de procesos de reflexión del oleaje al interior del medio poroso. Por simplicidad, la reflexión que se analizará en este apartado es la reflexión total del modelo, que se puede entender como la suma de la reflexión debida al talud y la debida al flujo dentro del medio poroso.

El comportamiento y evolución del fenómeno de reflexión se puede caracterizar por medio del coeficiente de reflexión total (CRT), que para este trabajo fue evaluado utilizando el método de Mansard y Funke para la separación de la ola incidente y reflejada (ver *ANEXO A*) y modificado por Baquerizo (2005). Los resultados se agruparon para los experimentos con un mismo periodo y se revisó la evolución de la reflexión. De este trabajo se obtuvo, como

ejemplo, la Figura 3.6 en la que se puede observar el patrón histórico de la reflexión a medida que el modelo se acercó a la estabilidad para cada condición de oleaje.

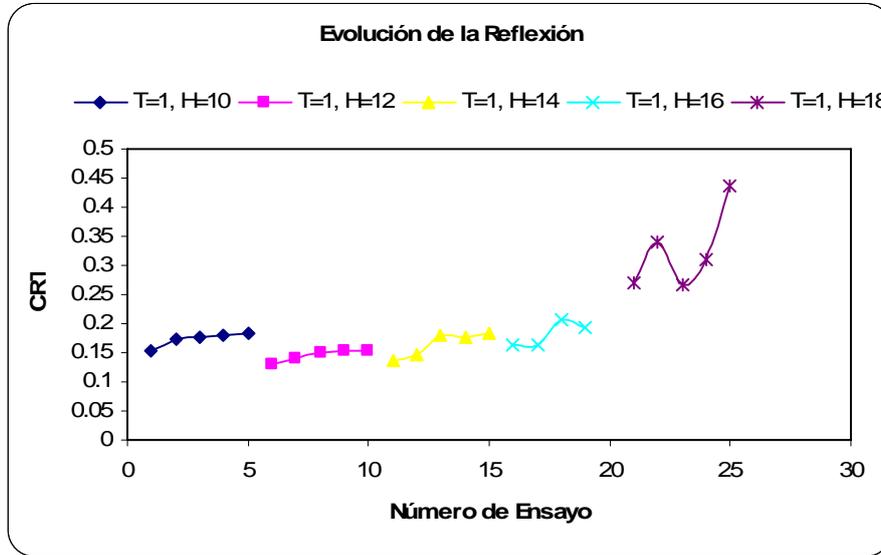


Figura 3.6 Evolución de la reflexión para los ensayos del caso 1 y periodo de ola T=1s.

La característica que salta a la vista de la Figura 3.6 es que en todos los casos, el coeficiente de reflexión tiende a aumentar, lo que confirma que los perfiles estables son de tipo reflejante. Es notoria también una variación más suave en los perfiles de menor altura de ola y mayor variabilidad en los de mayor altura, de donde se deduce que la deformación del perfil fue más agresiva.

Respecto del caso 2 se presenta la Figura 3.7, que corresponde a ensayos con periodo de 1 segundo.

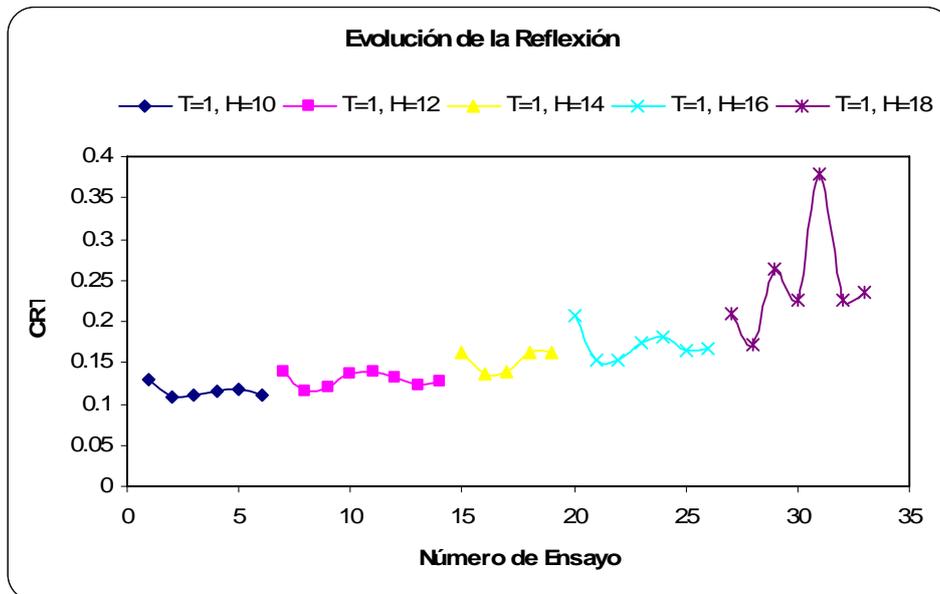


Figura 3.7 Evolución de la reflexión para los ensayos del caso 2 y periodo de ola T=1s.

En la Figura 3.7 se observa que el perfil inicial con flujo intersticial es más reflejante que los perfiles una vez que ha iniciado la deformación. En los casos de menor altura de ola, el coeficiente de reflexión del perfil estable es menor que el del inicial ya que la rotura del oleaje y la fricción con la parte baja del perfil, aunados al flujo en sentido opuesto al de propagación, son agentes que restan energía al oleaje y por conservación de la energía, la reflexión debe ser menor.

Para observar de una forma más completa como es la afectación que se tiene en el modelo por la sobreelevación del nivel freático, a continuación se presenta la evolución de la reflexión en los experimentos, haciendo una comparación de los valores del coeficiente de reflexión obtenidos al inicio de las pruebas y una vez alcanzada la estabilidad para los dos casos de experimentación.

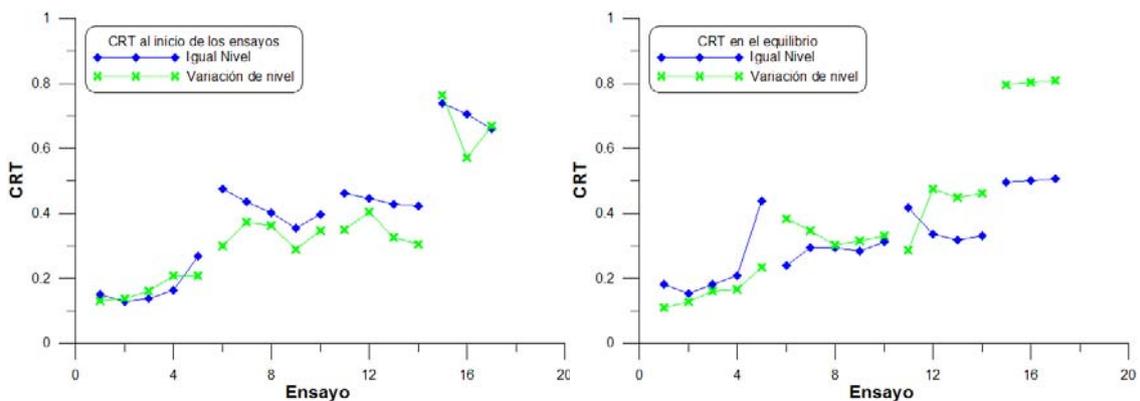


Figura 3.8 (izq.) CRT con el perfil inicial y (der.) CRT cuando se alcanza el perfil de equilibrio.

En la Figura 3.8 se observa que para los ensayos con periodo de ola igual a un segundo (primer grupo de puntos de izquierda a derecha) el coeficiente de reflexión al inicio de los ensayos es pequeño y muy similar para los dos casos de experimentación. En la medida que la energía aumenta sucede que el perfil inicial del caso 1 es más reflejante que el del caso 2, pero el perfil estable es a la inversa. Finalmente con el periodo más largo, la reflexión de ambos perfiles iniciales es muy similar pero el perfil estable del caso 2 es mucho más reflejante que el del caso 1. De lo observado en esta evolución se desprende que la existencia de un nivel freático más alto en la parte no expuesta de la playa hace que el perfil sea, en lo general, más reflejante, por lo que la playa está expuesta a la acción de un clima más energético; si por otro lado, se agrega lo visto en el apartado anterior, respecto de la facilidad en el movimiento de las piezas y la generación de zonas de erosión, se deduce que con oleajes más energéticos, la estabilidad de una playa bien puede ser vulnerable.

Para complementar la información de la Figura 3.8 se presenta la Tabla 17, en la que se resumen los valores del coeficiente de reflexión total que se calcularon al inicio y al final de los ensayo. En ella se puede apreciar, además de los coeficientes de reflexión, los niveles de agua en reposo para cada uno de los casos que se modelaron. Se debe considerar que para lograr la diferencia de niveles se acumuló agua en la parte no expuesta del modelo y se dejó fluir hasta que el sistema se estabilizó. Esto provocó dos situaciones, la corriente intersticial de que se ha venido hablando y que la profundidad de agua en reposo del lado expuesto no siempre fuera la misma que dependió del punto en que el sistema halló su equilibrio.

Tabla 17. Coeficientes de reflexión que se presentan en la playa al inicio y al final de cada ensayo.

Ensayo	Oleaje		Caso 1			Caso 2		
	H	T	h	CRT i	CRT	h	CRT i	CRT
1	0.1	1	0.4	0.15215	0.181	0.37	0.13025	0.110
2	0.12	1	0.4	0.12866	0.154	0.372	0.13866	0.122
3	0.14	1	0.4	0.13718	0.174	0.365	0.16242	0.163
4	0.16	1	0.4	0.16358	0.201	0.365	0.2077	0.168
5	0.18	1	0.4	0.26962	0.380	0.362	0.20996	0.235
6	0.1	2	0.4	0.4762	0.257	0.367	0.30014	0.383
7	0.12	2	0.4	0.43655	0.310	0.37	0.37319	0.347
8	0.14	2	0.4	0.40214	0.313	0.37	0.36378	0.302
9	0.16	2	0.4	0.35559	0.293	0.362	0.28839	0.315
10	0.18	2	0.4	0.39744	0.319	0.37	0.34804	0.331
11	0.1	3	0.4	0.46069	0.411	0.374	0.34984	0.288
12	0.12	3	0.4	0.44551	0.319	0.36	0.40364	0.475
13	0.14	3	0.4	0.42859	0.320	0.366	0.32759	0.450
14	0.16	3	0.4	0.42204	0.315	0.36	0.30611	0.463
15	0.1	4	0.4	0.73768	0.517	0.36	0.76399	0.796
16	0.12	4	0.4	0.70518	0.523	0.36	0.57287	0.803
17	0.14	4	0.4	0.65918	0.522	0.36	0.66884	0.796

H altura de ola, en metros.
T periodo de la ola, en segundos.
h nivel de agua quieta, en metros
CRT i coeficiente de reflexión total al inicio de los experimentos, adimensional.
CRT coeficiente de reflexión total al final del ensayo, adimensional.

Otro factor que afecta directamente la reflexión es la permeabilidad de la playa, las playas permeables dejan que la energía del oleaje se transmita a través de la playa y una parte se disipa en el proceso y otra puede alcanzar el otro lado de la playa, por lo tanto entre más impermeable más reflejante es su comportamiento, así entonces en los experimentos a medida que el oleaje incide sobre el modelo los granos de grava que lo componen se van acomodando y la playa se va volviendo mas impermeable, entonces debido a este proceso y a la variación del perfil transversal es que se incrementa el valor del coeficiente de reflexión, y para los ensayos del caso 2 además la existencia de la corriente en dirección opuesta a la que actúa oleaje.

3.3 Ascenso Máximo del Oleaje

Un parámetro que puede ser afectado por el flujo y sus fenómenos asociados el ascenso máximo del oleaje. Este parámetro no se midió directamente, sino que para obtener los valores experimentales se utilizó un procedimiento digital a partir de la videograbación que se hizo durante los ensayos. El primer paso para estimar el valor del ascenso máximo (run up) fue obtener una serie fotográfica, a partir de los videos, en los cuales es posible identificar el momento justo en el que ocurre el ascenso máximo para cada una de las olas de cada uno de los trenes del programa experimental. Posteriormente, a estas imágenes se les aplicó un procedimiento de escalado y se obtuvo la longitud horizontal máxima que alcanza cada ola a partir de un punto de referencia colocado en el canal de oleaje antes de la

grabación (ver Figura 3.9). A ese valor obtenido y con la información del perfil transversal medido se aplicaron relaciones algebraicas y trigonométricas para obtener la proyección vertical y así obtener el valor del ascenso máximo experimental para cada ola.

En la Figura 3.9 se muestra una de las imágenes obtenidas de los videos como ejemplo del procedimiento realizado para obtener el valor del run up experimental.



Figura 3.9 Estimación del run up experimental.

Como resultado del procedimiento digital, se obtuvo el valor del ascenso máximo que se reporta en la Figura 3.10 para el caso 1. En ella se han dibujado específicamente los resultados para las pruebas con periodo de 3 segundos.

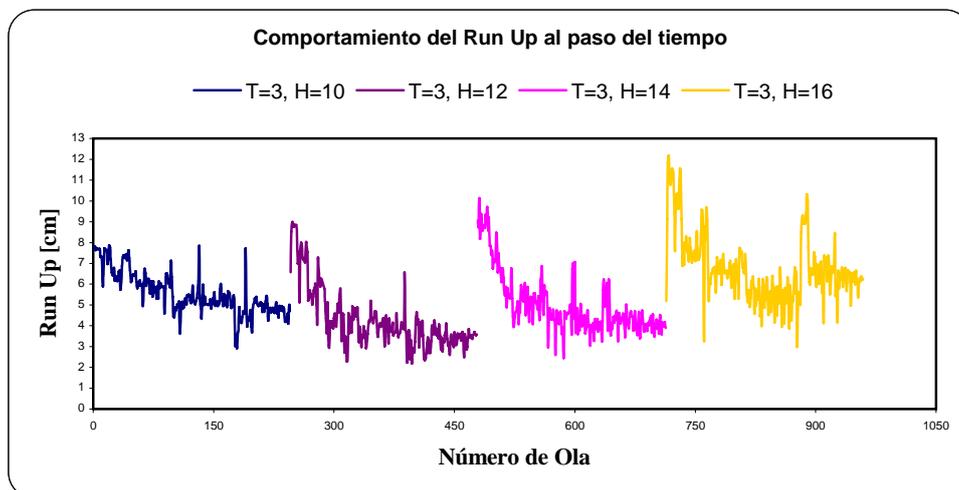


Figura 3.10 Valores del ascenso máximo del oleaje para un periodo de ola $T=3s$ cuando los niveles del lado expuesto y el lado protegido de la playa son iguales a 40 cm.

Los valores del run up, de manera general, disminuyen a medida que el perfil se acerca a la estabilidad. Es de notar que el talud recto presenta mayores valores en todas las pruebas y solo para las mayores alturas de ola (donde la deformación es más agresiva y la reflexión

también varía de manera importante) se detectan picos en el valor del ascenso máximo. Aún así, todas las pruebas muestran una tendencia a disminuir.

En la Figura 3.11 se muestran los valores del ascenso máximo para cada ola del caso 2 con periodo de tres segundos. Al igual que en la Figura 3.10 el valor máximo de run up ocurre al inicio de los ensayos y va disminuyendo a medida que se modifica el perfil de la playa, con la diferencia de que en este caso no se presentan fluctuaciones tan marcadas. En general, el ascenso máximo para el caso 2 es mayor que para el caso 1 en principio debido a que la forma de la berma es más suave y permite a la lámina de agua pueda subir más fácilmente. El valor del ascenso máximo es también función de la reflexión y de la relación de fases entre las ondas incidente y reflejada.

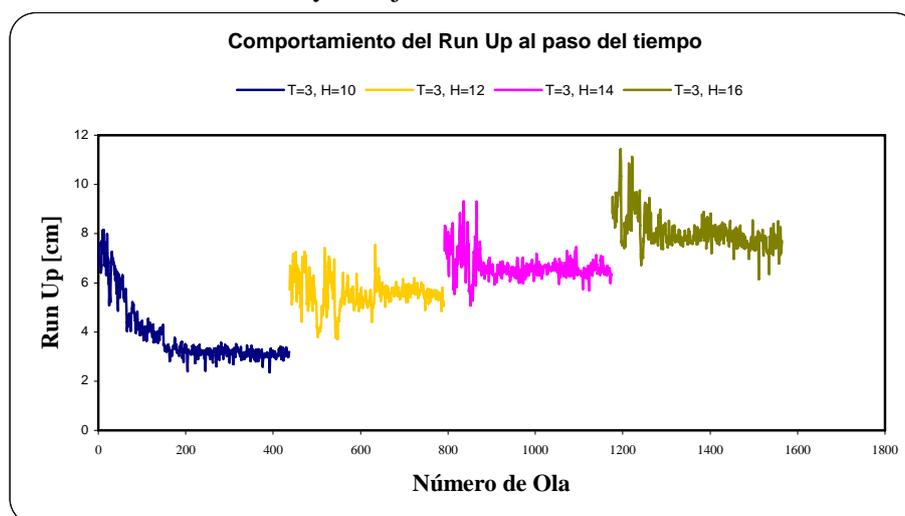


Figura 3.11 Valores del ascenso máximo del oleaje para un periodo de ola $T=3s$ cuando se presenta una diferencia de 4 a 5 cm entre los niveles del lado expuesto y el lado protegido de la playa.

Comparando las Figura 3.11 y la Figura 3.10 se observa que el ascenso máximo del oleaje presenta un comportamiento del tipo exponencial decreciente mejor definido en el caso 1 y un tanto más asintótica en el caso 2.

La información de los valores de run up calculados es muy fluctuante y no permite un análisis adecuado, por ello se decidió trabajar solo con los valores del ascenso máximo del perfil estable. Para ello se realizó un promedio de los cinco últimos valores de ascenso máximo que se presentan en cada una de las pruebas y el valor obtenido de dicho promedio es el dato de run up que se considera ocurre en la prueba respectiva.

3.3.1 Comparación de los valores del ascenso máximo en el perfil estable

Los valores medidos del ascenso máximo del oleaje una vez que ya se ha estabilizado el perfil de la playa se relacionaron con el valor de la altura de ola incidente y se representó gráficamente contra el número de Iribarren calculado a partir de la ecuación siguiente $I_r = \tan \varphi / \sqrt{H / L_0}$, en donde: φ , es el ángulo en el talud de la playa; H es la altura de ola y L_0 es la longitud de la ola para aguas profundas. Por otra parte se calculó el valor

esperado del ascenso máximo del oleaje a partir de la formulación propuesta por Losada y Giménez Curto (1980) y descrita en el capítulo 1 de este trabajo.

Dado que para realizar tanto la estimación del número de Iribarren como del ascenso máximo del oleaje con el modelo de Losada es necesario contar con valores coherentes de la altura de ola, H , se realizó un análisis temporal y otro espectral de las señales de superficie libre medidas en el laboratorio para hallar los valores más adecuados a la que se utilizó teóricamente. De acuerdo con la Figura 3.12 la altura de ola que arroja mejores resultados es la que se obtiene del análisis temporal y por lo tanto fueron los valores que se utilizaron para el trabajo con ascenso máximo.

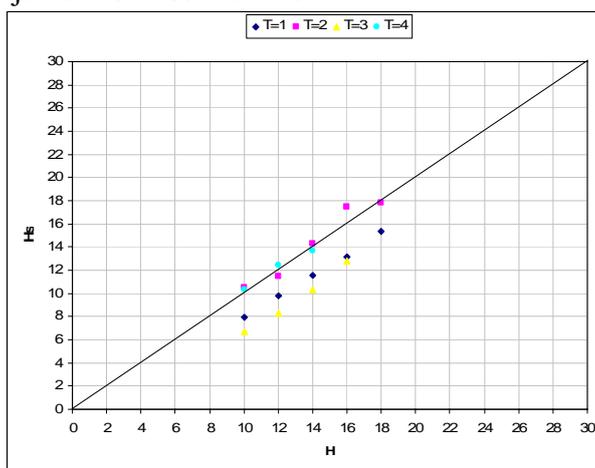


Figura 3.12 Comparación de la altura de ola de la maquina y la obtenida en el análisis temporal.

Los valores experimentales del ascenso máximo para los perfiles estables de los casos 1 y 2 se presentan en la Tabla 18 y la Tabla 19, respectivamente.

Tabla 18. Datos de la relación del ascenso máximo del oleaje y la altura de ola para los ensayos del caso 1.

Ensayos del caso 1				
H	T	h	RU (medido)	RU/Hs
0.08	1	0.4	0.024	0.307
0.098	1	0.4	0.026	0.267
0.116	1	0.4	0.03	0.256
0.131	1	0.4	0.033	0.253
0.154	1	0.4	0.038	0.244
0.105	2	0.4	0.055	0.53
0.115	2	0.4	0.062	0.537
0.143	2	0.4	0.06	0.417
0.174	2.1	0.4	0.077	0.44
0.178	2	0.4	0.093	0.523
0.067	3	0.4	0.048	0.724
0.083	2.9	0.4	0.034	0.417
0.103	3	0.4	0.042	0.407
0.128	3.1	0.4	0.063	0.492

0.103	4.1	0.4	0.084	0.811
0.124	4.1	0.4	0.103	0.831
0.136	3.9	0.4	0.109	0.801
H, h, RU están en metros, T en segundos.				

Tabla 19. Datos de la relación del ascenso máximo del oleaje y la altura de ola para los ensayos del caso 2.

Ensayos del caso 1				
H	T	h	RU (medido)	RU/Hs
0.08	1	0.37	0.026	0.331
0.1	1	0.372	0.03	0.295
0.106	1	0.365	0.032	0.298
0.114	1	0.365	0.045	0.396
0.139	1	0.362	0.047	0.34
0.069	2	0.367	0.062	0.908
0.089	2.1	0.37	0.077	0.864
0.098	2	0.37	0.089	0.905
0.111	2	0.362	0.066	0.596
0.118	2	0.37	0.072	0.609
0.087	3	0.374	0.031	0.35
0.101	1.3	0.36	0.056	0.553
0.12	1.4	0.366	0.065	0.542
0.15	1.3	0.36	0.076	0.504
0.037	3.3	0.36	0.031	0.854
0.065	4.1	0.36	0.049	0.743
0.046	2.9	0.36	0.062	1.345
H, h, RU están en metros, T en segundos.				

En la Figura 3.13 se muestra una comparación entre los valores obtenidos de ascenso máximo para los casos 1 y 2.

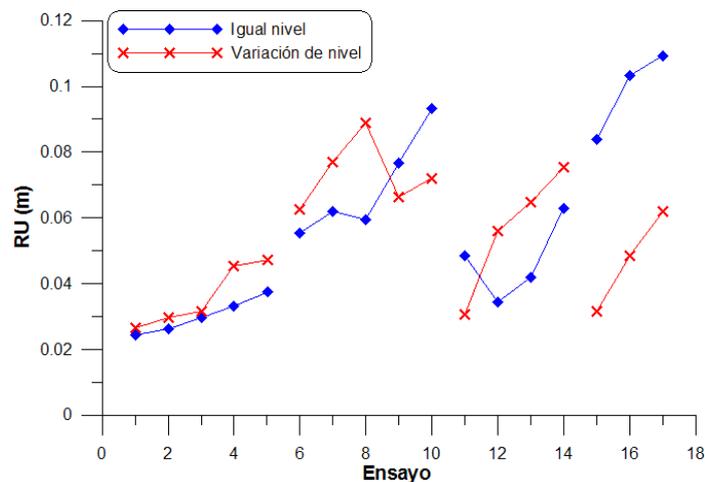


Figura 3.13 Comparación del ascenso máximo del oleaje cuando se alcanza el equilibrio en la playa.

Como ya se había adelantado, el ascenso máximo, en general, es mayor para el caso 2. Vale la pena mencionar que hay una fuerte diferencia en el comportamiento del ascenso, en el caso 1 cuando aumenta la energía del oleaje, se puede ver un máximo y un valle. En el caso 2 es distinto, también hay un máximo pero luego la tendencia es decreciente y no existe el valle. Estos comportamientos están íntimamente ligados a la conservación de la energía, ya que los oleajes más energéticos, como se dijo antes, rompen de manera más violenta en comparación con los del caso sin flujo (caso 1), lo cual se traduce en un mayor ascenso de la lámina de agua y en el caso con flujo (caso 2) en un menor ascenso. Luego entonces, aún cuando una playa pudiera comprometer su estabilidad al contar con un nivel freático más alto en la parte no expuesta, al parecer, este mismo flujo es una defensa contra el ascenso y por tanto un medio de control de inundación.

3.3.2 Comparación de los valores del ascenso máximo medidos con los calculados con la formula de Losada

Como medio de validación de los valores experimentales se procedió a realizar una comparación de los resultados medidos con los calculados con la formulación propuesta por Losada y Giménez Curto (1980). Para representar gráficamente la función de RU/H contra Ir con la formula de Losada se calcularon primeramente los valores de los coeficientes Au y Bu a partir de las expresiones determinadas por Silva et al. (1988) para diques homogéneos y utilizando el valor de la porosidad obtenido en el laboratorio. Una vez que se tenía el valor de estos coeficientes (ver Tabla 20) se propusieron valores del número de Iribarren y se calcularon los valores de Ru/H teóricos.

Tabla 20. Valores de los coeficientes utilizados en la formula de Losada.

n=	0.403
Au=	1.397
Bu=	-0.594

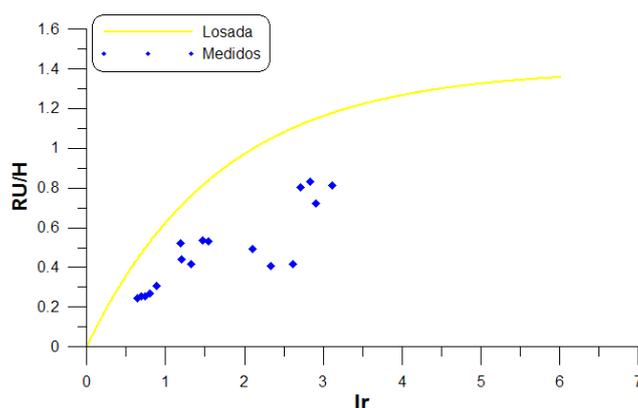


Figura 3.14 Comparación entre Ru/H medido y calculado para el caso 1.

Para graficar los Ru/H s medidos es necesario contar con los valores del número de Iribarren correspondientes a los valores del ascenso máximo medido, aquí existe un primer hito puesto que es necesario establecer cuál es el ángulo que será considerado para hacer el

cálculo del I_r . De acuerdo a la formulación utilizada, este ángulo corresponde a la pendiente de la playa en la zona expuesta considerando un talud recto, asumiendo esto, se utilizó la pendiente inicial del modelo, es decir, el talud de 1:5 para calcular el número de Iribarren, el resultado se presenta en la Figura 3.14 y la Figura 3.15 para el caso 1 y 2, respectivamente.

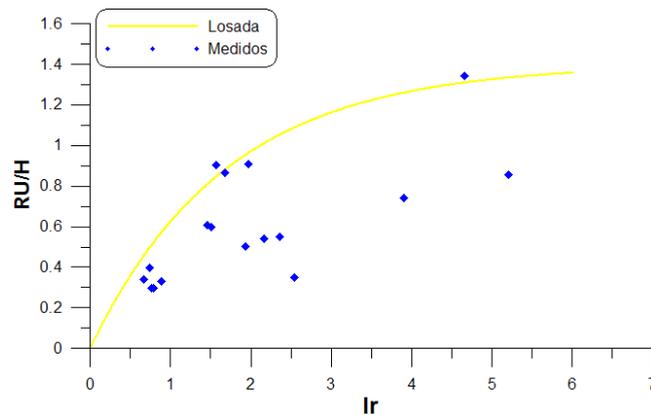


Figura 3.15 Comparación entre Ru/H medido y calculado para el caso 2.

En las Figura 3.14 y Figura 3.15 se puede observar que los valores de run up si tienen una tendencia exponencial como la indicada en la formulación de Losada, sin embargo, el ajuste no es nada bueno sobre todo para los ensayos del caso 1, lo cual en primera instancia puede deberse al ángulo utilizado para el cálculo del número de Iribarren.

Para corregir dicho ángulo, se emplearon las fotografías de los perfiles estables para obtener información sobre las pendientes que se forman en el perfil transversal de la playa y ubicar cuál es el ángulo que gobierna el ascenso máximo. Se detectaron dos posibles pendientes (ver Figura 3.16): una en la zona de rompiente y la de la berma. Los ángulos de estas pendientes se presentan en la Tabla 21.



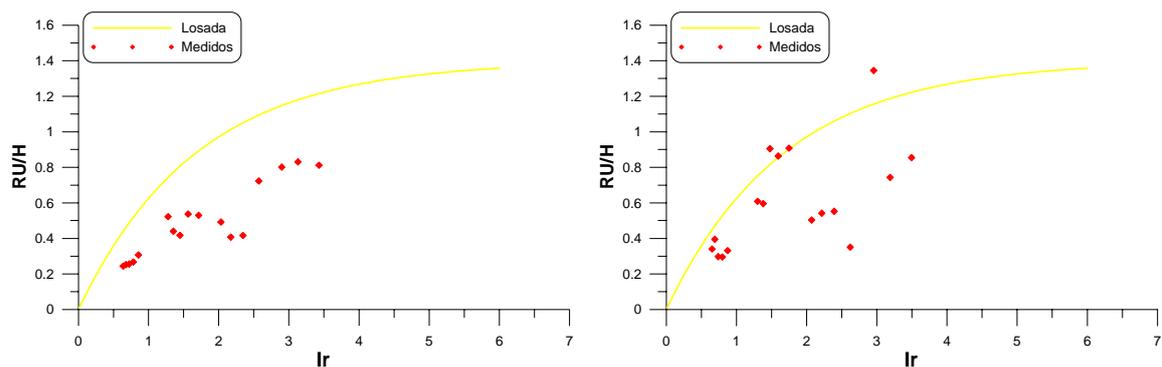
Figura 3.16 Pendientes posibles a utilizar para el cálculo el número de Iribarren.

Tabla 21. Ángulos de las pendientes que se presentan en el perfil de equilibrio para cada ensayo.

Ensayo	Caso 1		Caso 2	
	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 1$	$\alpha 2$
1	30	10	30	11
2	27	12	28	10
3	31	11	34	8
4	33	14	33	11
5	33	12	30	10
6	35	14	32	13
7	39	13	36	12
8	30	13	34	14
9	32	14	39	13
10	30	14	38	11
11	27	7	36	13
12	34	10	35	15
13	36	11	47	12
14	36	15	39	18
15	35	16	25	16
16	34	12	38	11
17	35	10	33	14
Promedio	32.76	12.24	34.53	12.47

Ángulos aproximados en grados.

Con el valor promedio de los ángulos registrados en la Tabla 21 se procedió a calcular el número de Iribarren para construir una nueva comparación con la expresión de Losada, dado que con el valor promedio de $\alpha 1$ se obtuvieron resultados muy altos únicamente se presentan los resultados obtenidos para cuando se utiliza el valor promedio de $\alpha 2$ (Figura 3.17).

**Figura 3.17** Comparación entre Ru/H medido y calculado, utilizando los datos de la pendiente promedio del perfil de equilibrio, (der.) caso 2, (izq.) caso 1.

En la Figura 3.17 es posible apreciar que el comportamiento del ascenso máximo del oleaje en los modelos ensayados continúa sin ajustarse de buena forma con lo establecido en la teoría, sobre todo para los ensayos del caso 1, aunque usando los ángulos promedios de la Tabla 21 parece haber un mayor orden en los run up medidos. Sin embargo, es importante

notar que para los ensayos del caso 2 algunos de los datos medidos caen justo sobre la curva, siendo éstos en los que el periodo de ola es de uno y dos segundos.

Para tener una idea de la dispersión entre los datos medidos y los calculados con el promedio de α 2, se compararon los resultados, mismos que se presenta en la Figura 3.18.

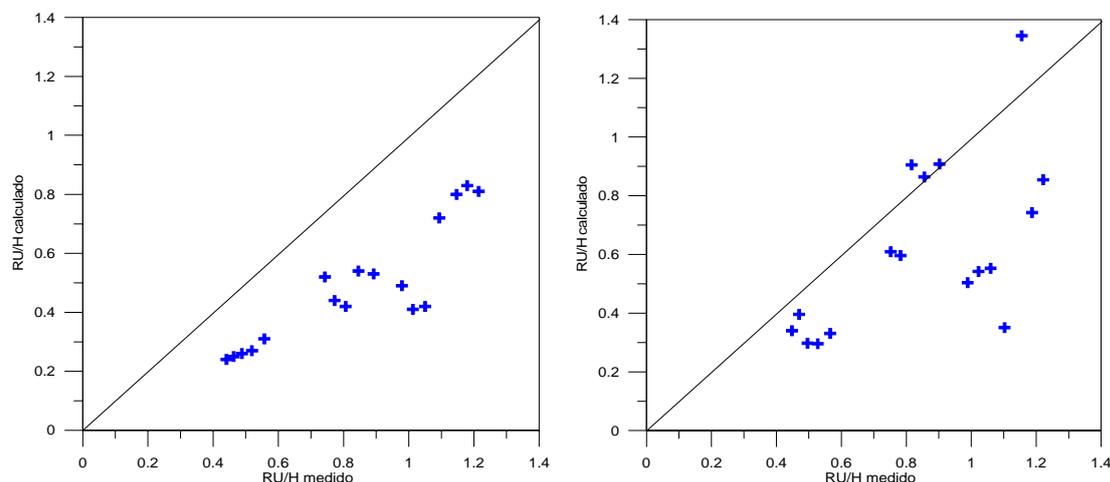


Figura 3.18. Comparación de los valores de ascenso máximo del oleaje medidos y calculados utilizando el ángulo promedio obtenido de los perfiles estables, (der.) caso 2, (izq.) caso 1.

Es claro que los valores calculados están aún fuera de un rango aceptable. De manera que con el afán de encontrar una pendiente que mejore los datos calculados se procedió a obtener el valor del ángulo a partir de los valores conocidos y despejando el número de Iribarren, I_r , de la fórmula de Losada. $\frac{Ru}{H} = Au(1 - e^{-BuI_r})$, se tiene que

$$\left(\frac{1}{Bu}\right) \frac{LN\left(-\frac{Ru}{H} \frac{1}{Au} + 1\right)}{LN e} = I_r$$
, además se sabe que $I_r = \tan \varphi / \sqrt{H/L_0}$ con lo que es posible obtener el valor de la pendiente plana equivalente que generaría los valores de ascenso máximo medidos en laboratorio, los valores obtenidos se presentan en la Tabla 22 y Tabla 23, para el caso 1 y 2, respectivamente.

Tabla 22. Obtención del talud equivalente que generaría los run up que se presentan en los modelos ensayados para el caso 1.

H	T	h	Ru	RU/Hs	n	Au	Bu	α	Ru/H α	Ru/H $\alpha 2$
0.08	1	0.4	0.024	0.31	0.403	1.397	-0.594	5.388	0.2731602	0.557
0.098	1	0.4	0.026	0.27	0.403	1.397	-0.594	5.112	0.2516522	0.519
0.116	1	0.4	0.03	0.26	0.403	1.397	-0.594	5.295	0.2346522	0.488
0.131	1	0.4	0.033	0.25	0.403	1.397	-0.594	5.569	0.2207655	0.463
0.154	1	0.4	0.038	0.24	0.403	1.397	-0.594	5.795	0.2091374	0.441
0.105	2	0.4	0.055	0.53	0.403	1.397	-0.594	5.926	0.4929085	0.892
0.115	2	0.4	0.062	0.54	0.403	1.397	-0.594	6.326	0.4579723	0.845
0.143	2	0.4	0.06	0.42	0.403	1.397	-0.594	5.158	0.4298902	0.806
0.174	2.1	0.4	0.077	0.44	0.403	1.397	-0.594	6.074	0.4066438	0.772
0.178	2	0.4	0.093	0.52	0.403	1.397	-0.594	7.588	0.3869659	0.743

0.067	3	0.4	0.048	0.72	0.403	1.397	-0.594	4.844	0.6696886	1.094
0.083	2.9	0.4	0.034	0.42	0.403	1.397	-0.594	2.617	0.6271265	1.050
0.103	3	0.4	0.042	0.41	0.403	1.397	-0.594	2.846	0.5923344	1.013
0.128	3.1	0.4	0.063	0.49	0.403	1.397	-0.594	3.988	0.5631481	0.979
0.103	4.1	0.4	0.084	0.81	0.403	1.397	-0.594	5.373	0.8119023	1.215
0.124	4.1	0.4	0.103	0.83	0.403	1.397	-0.594	6.12	0.7658096	1.179
0.136	3.9	0.4	0.109	0.8	0.403	1.397	-0.594	6.053	0.727493	1.147

H, h, RU están en metros, T en segundos.

α es el ángulo equivalente determinado, en grados.

Ru/H α Es el valor del run up entre la altura de ola calculado con la formula de Losada utilizando el ángulo promedio equivalente.

Ru/H α_2 Es el valor del run up entre la altura de ola calculado con la formula de Losada utilizando el ángulo promedio obtenido de las imágenes de Autocad.

Tabla 23. Obtención del talud equivalente que generaría los run up que se presentan en los modelos ensayados para el caso 1.

H	T	h	Ru	RU/Hs	n	Au	Bu	α	Ru/H α	Ru/H α_2
0.08	1	0.37	0.026	0.3307	0.403	1.397	-0.594	5.873	0.3485137	0.566
0.1	1	0.37	0.03	0.2954	0.403	1.397	-0.594	5.78	0.3219665	0.527
0.106	1	0.37	0.032	0.2976	0.403	1.397	-0.594	6.011	0.3008708	0.496
0.114	1	0.37	0.045	0.3956	0.403	1.397	-0.594	8.621	0.283565	0.470
0.139	1	0.36	0.047	0.3401	0.403	1.397	-0.594	7.967	0.2690237	0.448
0.069	2	0.37	0.062	0.9078	0.403	1.397	-0.594	10.498	0.6100826	0.902
0.089	2.1	0.37	0.077	0.8641	0.403	1.397	-0.594	10.956	0.5697294	0.855
0.098	2	0.37	0.089	0.905	0.403	1.397	-0.594	12.422	0.5369432	0.816
0.111	2	0.36	0.066	0.596	0.403	1.397	-0.594	7.124	0.5095716	0.782
0.118	2	0.37	0.072	0.609	0.403	1.397	-0.594	7.554	0.4862408	0.752
0.087	3	0.37	0.031	0.3505	0.403	1.397	-0.594	2.194	0.8063972	1.103
0.101	1.3	0.36	0.056	0.5528	0.403	1.397	-0.594	4.114	0.7603904	1.060
0.12	1.4	0.37	0.065	0.5418	0.403	1.397	-0.594	4.356	0.722173	1.022
0.15	1.3	0.36	0.076	0.5036	0.403	1.397	-0.594	4.445	0.689703	0.989
0.037	3.3	0.36	0.031	0.8542	0.403	1.397	-0.594	3.494	0.9537366	1.222
0.065	4.1	0.36	0.049	0.7426	0.403	1.397	-0.594	3.739	0.9071098	1.187
0.046	2.9	0.36	0.062	1.3451	0.403	1.397	-0.594	13.363	0.8675099	1.155

H, h, RU están en metros, T en segundos.

α es el ángulo equivalente determinado, en grados.

Ru/H α Es el valor del run up entre la altura de ola calculado con la formula de Losada utilizando el ángulo promedio equivalente.

Ru/H α_2 Es el valor del run up entre la altura de ola calculado con la formula de Losada utilizando el ángulo promedio obtenido de las imágenes de Autocad.

Como puede verse en las tablas anteriores el ángulo, α , de la pendiente equivalente que generaría valores de run up muy parecidos a los medidos en el laboratorio es de casi la mitad del ángulo que se obtuvo a partir de las fotografías del perfil de equilibrio de las playas.

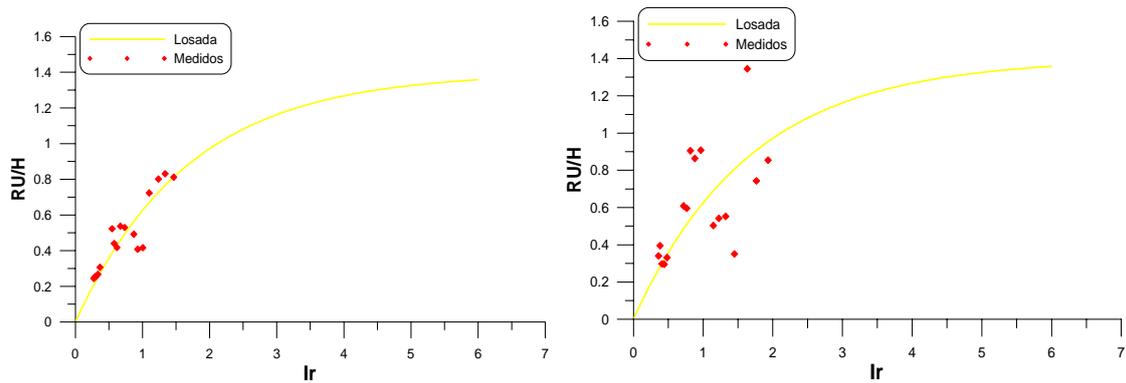


Figura 3.19 Comparación entre Ru/H medido y el calculado utilizando los datos de la pendiente promedio del ángulo equivalente, (der.) caso 2, (izq.) caso 1.

En la Figura 3.19 se observa que si se utiliza el ángulo promedio equivalente obtenido en las tablas anteriores los valores de run up medidos tienen un mejor ajuste a la función teórica, muy buen para el caso 1 y aceptable para caso 2.

Para observar de manera grafica cómo es el ajuste si se utilizan los ángulos promedios equivalentes calculados, que resultaron de de 5.29 y 6.97 grados para el caso 1 y caso 2 respectivamente, se determinaron los valores del ascenso máximo del oleaje mediante la formulación propuesta por Losada y se compararon contra los datos medidos. Los resultados se muestran en la Figura 3.20.

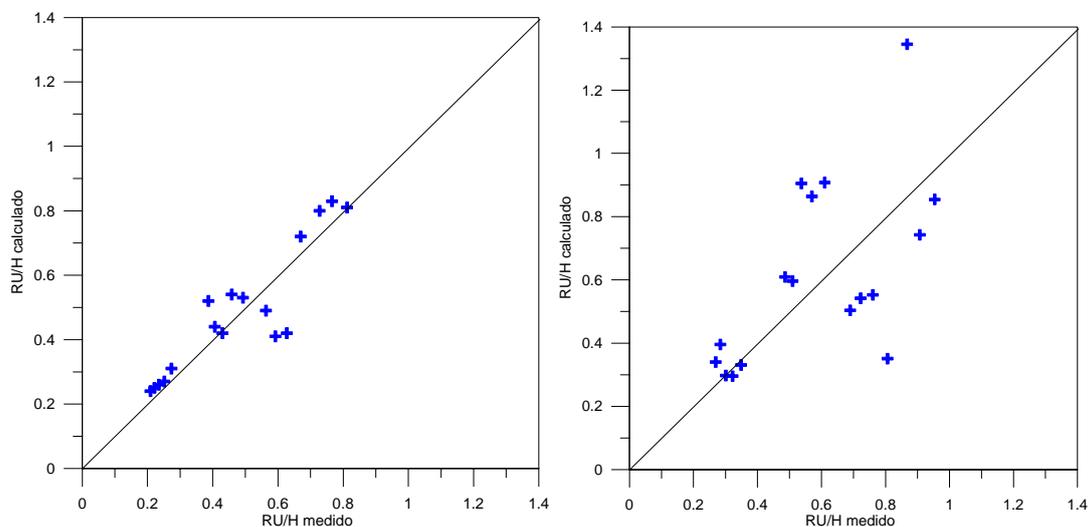


Figura 3.20 Comparación de los valores de ascensos máximos medidos y calculados utilizando el ángulo promedio equivalente, (der.) caso 2, (izq.) caso 1.

Como se observa en las graficas de la Figura 3.20 si se utilizan los ángulos de 5.29 y 6.97 grados para calcular los valores de run up que se presentan en una playa con las características de nuestro modelo, los resultados son muy parecidos a los medidos.

Finalmente, para validar el uso de las pendientes equivalentes estimadas, se calculó el ascenso máximo para todos los ensayos de ambos casos y se comparó con los datos medidos obteniéndose los resultados que se muestran en la Figura 3.21.

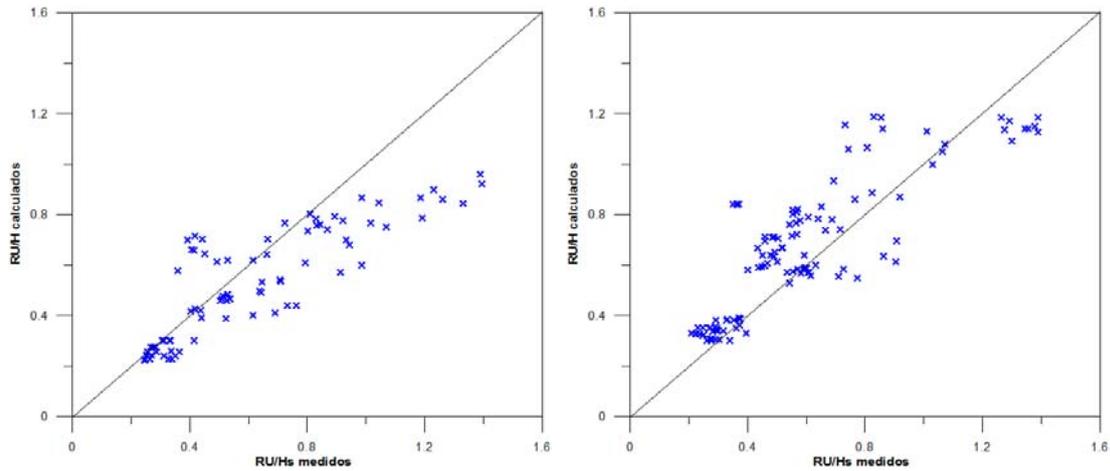


Figura 3.21 Comparación de los valores de ascensos máximos medidos y calculados utilizando el ángulo promedio equivalente en todos los trenes de olas ensayados, (der.) caso 2, (izq.) caso 1.

El ajuste entre los datos experimentales y calculados con la pendiente equivalente es bueno aunque se puede mejorar. Por otra parte, es importante hacer notar que dicha pendiente equivalente no existe físicamente en el perfil, de manera que será objeto de un nuevo estudio investigar por qué aparentemente ese ascenso máximo está gobernado por un parámetro con estas características. Por otro lado, queda también pendiente una revisión minuciosa de la determinación de los parámetros A_u y B_u de Losada por si se puede mejorar el ajuste con el uso de valores distintos a los que se emplearon en este trabajo.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

4.1 Conclusiones

El comportamiento hidrodinámico y morfológico que presentan las playas de grava depende principalmente de la forma y tamaño del material granular que la compone, de la pendiente del talud de la misma y de las condiciones de oleaje a las que esta sometida.

El modelo construido con material granular y pendiente 1:5, se caracteriza por poseer un perfil transversal con material en exceso en la zona de resaca y con tendencia acumulativa en la playa seca para todos los casos de estados de mar experimentados, inclusive para los casos donde existe la influencia del nivel freático, aunque es de destacar que para los ensayos del caso 2 la ganancia en volumen de playa seca es mucho menor que para los ensayos del caso 1.

Los cambios que ocurren en la morfología de las playas modeladas son muy rápidos, y son más notorios los cambios ocasionados por el incremento en el periodo del oleaje que los cambios que se presentan si únicamente se varía la altura de la ola.

El desplazamiento de la berma en el sentido horizontal se ve afectado por la diferencia de niveles existente entre la zona expuesta de la playa y la zona protegida y por el periodo, mientras que la elevación que alcanza la berma es más bien función de la altura de la ola. Además la acumulación del material siempre se efectúa sobre el nivel medio del mar.

Cuando existe flujo en sentido contrario al de propagación del oleaje provocado por la diferencia de niveles a un o y otro lado de la playa, ésta se vuelve débil y se requiere de mayor energía del oleaje para alcanzar un perfil estable. Este comportamiento ocasiona que bajo las mismas condiciones de oleaje, la pendiente final la playa sea más acusada y que el crecimiento, en altura, de la berma sea más rápido. Sin embargo, el volumen de material contenido en la berma es mucho mayor cuando no hay flujo.

En general, las zonas de erosión presentan diferencias entre un caso y otro, para los ensayos en donde existe una sobre-elevación del nivel de agua del lado protegido respecto del lado expuesto de la playa la zona erosionada puede distinguirse mas marcada puesto que es de longitud menor y de mayor profundidad que en aquellos ensayos donde se tiene la influencia del nivel freático.

La forma de la berma y de la zona de erosión es función del oleaje que incide en el modelo, del oleaje que se refleja, de la presencia del flujo en sentido contrario al que actúa el oleaje y de la interacción que ocurre entre estos.

De acuerdo a las características físicas de los perfiles en el equilibrio se estableció que son de tipo reflejante para todos los casos modelados y esta hipótesis se comprobó al realizar el análisis de reflexión del oleaje. Para las playas en donde existe influencia del nivel freático la reflexión del oleaje que se presenta es mayor lo cual se debe a que el oleaje que podría ser transmitido y disipado a través de la playa hacia el lado de la zona protegida no se produce tan fácilmente como en los ensayos del caso 1, y también porque al tener una pendiente mas pronunciada en al berma el oleaje reflejado es mayor que si se tiene una pendiente mas tendida, además de que este desnivel genera corrientes en el sentido opuesto al que inciden las olas.

Por lo que respecta al ascenso máximo del oleaje se observa que éste es totalmente influenciado por la evolución tanto del perfil como de la reflexión del oleaje, alcanzando sus niveles máximos generalmente en el punto más alto de la berma generada como repuesta de la playa al interactuar con el oleaje. En general el valor del ascenso máximo del oleaje es mayor cuando se presenta la influencia del nivel freático en los modelos a excepción de los ensayos con periodo de ola $T=4$ segundos. De los resultados de run up se puede concluir que es necesario generar una formulación para el cálculo en donde se incluya además de la porosidad del material, la variación del perfil transversal de la playa incluyendo la geometría de la berma generada.

Del análisis de resultados de este trabajo y las comparaciones realizadas con las teorías existentes se desprende que cuando una playa de material granular tiene una porosidad tal que existe flujo a su través, la expresiones comúnmente empleadas para la estimación del ascenso máximo no son aplicables puesto que la distribución de la energía es muy diferente.

4.2 Futuras Líneas de Trabajo

Primeramente será necesario completar el análisis de toda la información obtenida con la instrumentación instalada en los ensayos, esto es procesar la información de los sensores de presión, de los piezómetros y de los velocímetros a fin reobtener información a detalle del proceso de transporte de sedimentos. Lo cual permitirá al mismo tiempo tener una mejor idea de la influencia del nivel freático en la playa.

A partir de lo anterior se puede investigar que parámetros son los que gobiernan el ascenso máximo, lo que implica un replanteo de la determinación de los parámetros A_u y B_u de Losada para mejorar el ajuste con el uso de valores distintos a los que se emplearon en este trabajo.

Para continuar en la investigación sobre el comportamiento de las playas de material granular se plantea que dentro de las futuras líneas de trabajo se realicen ensayos similares a los que se efectuaron para el presente trabajo, primero con la misma geometría y material utilizado para la construcción de la playa, experimentar para otras diferencias de niveles entre el nivel freático y el nivel de agua quieta, y bajo las mismas condiciones de oleaje

establecidas en este proyecto. Posteriormente realizar las mismas modelaciones pero ahora cambiando el tamaño de material, con lo que se determinaría la influencia que tiene el tamaño del grano en el comportamiento de este tipo de playas, la evolución de la reflexión y el Ascenso máximo del oleaje.

Otra investigación a futuro, es someter el perfil de playa ya deformado a condiciones de oleaje de menor energía para observar el posible transporte de sedimentos y en qué dirección ocurre, esto nos ayudaría a establecer si bajo esas condiciones se presenta un perfil de erosión o acreción.

Una idea joven dentro de la línea de investigación pero que resultaría eficaz sería el colocar un dispositivo acústico para medición del transporte de sedimentos, lo cual permitiría cuantificar por medio de señales la cantidad de material que es movida por los efectos del tren incidente de olas.

ANEXO A

**MÉTODO DE MANSARD Y FUNKE
PARA LA SEPARACIÓN DE LA OLA INCIDENTE Y REFLEJADA**

MÉTODO DE MANSARD Y FUNKE

ANEXO A PARA LA SEPARACIÓN DE LA OLA INCIDENTE Y REFLEJADA

El método presentado y desarrollado por Mansard & Funke en 1980, basados en los trabajos realizados por Marcou (1969) y como una extensión natural del método de Goda & Suzuki (1976),

Admitiendo que la superficie de agua en un campo de ondas en dos dimensiones y que puede ser representada como la superposición de N ondas con diferentes características, tal como se describe en el capítulo 2 de “Análisis y descripción estadística del oleaje” de Silva (2005, entonces el perfil de la superficie libre del agua puede expresarse para en la forma siguiente:

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_n) \quad (\text{A.1})$$

Cuando se presenta el efecto de reflexión el perfil se ve afectado. De esta forma el perfil original estará formado por la superposición del perfil original (onda incidente) y el perfil debido a la reflexión, por lo tanto reescribiendo la ecuación (A.1) se tiene:

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^N a_{I,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_{In}) + \sum_{n=1}^N a_{R,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_{Rn}) \quad (\text{A.2})$$

En ocasiones la distancia existente entre la estructura y los sensores son difíciles de medir con exactitud, por ejemplo cuando se tiene una pendiente, por ello una fase θ_s , es introducida para compensar este error de medición, además de introducir una función de error que toma en cuenta otros tipos de errores no considerados, por lo tanto reescribiendo la ecuación (A.2), se tiene:

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^N a_{I,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_{In}) + \sum_{n=1}^N a_{R,n} \cos(k_n x - \sigma_n t + \Phi_n + \theta_s) + \Omega(t) \quad (\text{A.3})$$

Si,

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

P, se refiere al número de sensor.

Entonces:

$$\eta_p = \sum_{n=1}^N a_I \cos(k(x_1 + \Delta x) - \sigma t + \Phi) + a_R \cos(k(x_1 + 2x_{R,1} - \Delta x) + \sigma t + \Phi + \theta_s) + \Omega_p(t) \quad (\text{A.4})$$

El objetivo es minimizar la función de error (la fase), $\Omega(t)$, para ello es necesario aplicar la transformada de Fourier a la ecuación (A.4), con el propósito de obtener una solución algebraica, que es la base para minimizar la función de error, en otras palabras la fase.

Al aplicar dicha transformación se obtiene:

$$A_p + iB_p = a_I e^{(ik(x_1 + \Delta x) + i\Phi)} + a_R e^{(ik(x_1 + 2x_{R,1} - \Delta x) + i(\Phi + \theta_s))} + Y_p e^{(i\rho_p)} \quad (\text{A.5})$$

A_p y B_p son los coeficientes de Fourier.

Si,

$$\begin{aligned} Z_I &= a_I e^{(ik(x_1 + \Delta x) + i\Phi)} \\ Z_R &= a_R e^{(ik(x_1 + 2x_{R,1} - \Delta x) + i(\Phi + \theta_s))} \\ Z_{N,p} &= Y_p e^{(i\rho_p)} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Por lo que la ecuación (A.5) en términos de la expresión (A.6), queda como:

$$A_p + iB_p = Z_I e^{(ikx_{1,p})} + Z_R e^{(-ikx_{1,p})} + Z_{N,p} \quad (\text{A.7})$$

Desarrollando la expresión (A.7) 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 de error, la cual se quiere minimizar, y se tiene para cada sensor:

$$\varepsilon_1 = Z_I + Z_R - (A_1 + iB_1) \quad (\text{A.8})$$

$$\varepsilon_2 = Z_I e^{(ik \Delta x_{1,2})} + Z_R e^{(-ik \Delta x_{1,2})} - (A_2 + iB_2) \quad (\text{A.9})$$

$$\varepsilon_3 = Z_I e^{(ik \Delta x_{1,3})} + Z_R e^{(-ik \Delta x_{1,3})} - (A_3 + iB_3) \quad (\text{A.10})$$

donde

$$\varepsilon_p = -Z_{N,p} + f_e(Z_I, Z_R) \quad (\text{A.11})$$

Como se menciona anteriormente, el objetivo del método es minimizar la función de error, $\Omega(t)$, que toma valores no negativos, tiene sentido matemático y físico buscar un punto Z_I y Z_R , tal que la dicha función sea lo más pequeña posible, en otras palabras que la minimicen.

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

$$\sum_{p=1}^3 (\varepsilon_p)^2 = \sum_{p=1}^3 \left(Z_I e^{(ik x_{1,p})} + Z_R e^{(-ik x_{1,p})} - (A_p + iB_p) \right)^2 \quad (\text{A.12})$$

Esté mínimo debe verificar:

$$\frac{\partial \sum_{p=1}^3 \varepsilon_p^2}{\partial Z_I} = \frac{\partial \sum_{p=1}^3 \varepsilon_p^2}{\partial Z_R} \quad (\text{A.13})$$

Desarrollando ésta ecuación se obtiene:

$$2 \sum_{p=1}^3 \left(Z_I e^{(ik x_{1,p})} + Z_R e^{(-ik x_{1,p})} - (A_p + iB_p) \right) e^{(ik x_{1,p})} = 0 \quad (\text{A.14})$$

$$2 \sum_{p=1}^3 \left(Z_I e^{(ik x_{1,p})} + Z_R e^{(-ik x_{1,p})} - (A_p + iB_p) \right) e^{(-ik x_{1,p})} = 0 \quad (\text{A.15})$$

Desarrollando e incluyendo el subíndice n en las ecuaciones (A.12) y (A.13) se obtiene:

$$\begin{aligned} Z_{i,n} \left(1 + \exp(i2k_n x_{1,2}) + \exp(i2k_n x_{1,3}) \right) + 3Z_{R,n} = \\ (A_{i,n} + iB_{i,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n}) \exp(ik_n x_{1,2}) + (A_{3,n} + iB_{3,n}) \exp(ik_n x_{1,3}) \end{aligned}$$

$$Z_{R,n} \left(1 + \exp(-i2k_n x_{1,2}) + \exp(-i2k_n x_{1,3}) \right) + 3Z_{I,n} = \\ (A_{i,n} + iB_{i,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n}) \exp(-ik_n x_{1,2}) + (A_{3,n} + iB_{3,n}) \exp(-ik_n x_{1,3}) \quad (\text{A.16})$$

La solución esta determinada por Mansard & Funke como:

$$Z_{I,n} = \frac{1}{D_n} [(A_{1,n} + iB_{1,n})(R_{1,n} + iQ_{1,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n})(R_{2,n} + iQ_{2,n}) + \\ (A_{3,n} + iB_{3,n})(R_{3,n} + iQ_{3,n})] \\ Z_{R,n} = \frac{1}{D_n} [(A_{1,n} + iB_{1,n})(R_{1,n} - iQ_{1,n}) + (A_{2,n} + iB_{2,n})(R_{2,n} - iQ_{2,n}) + \\ (A_{3,n} + iB_{3,n})(R_{3,n} - iQ_{3,n})] \quad (\text{A.17})$$

donde:

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

ANEXO B

**DESCRIPCIÓN DEL CANAL DE OLEAJE DEL LABORATORIO
DE INGENIERÍA MARÍTIMA DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**

DESCRIPCIÓN DEL CANAL DE OLAJE

ANEXO B DEL LABORATORIO DE OLAS DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

Características del canal de oleaje

El canal del Laboratorio de Olas del Instituto de Ingeniería de la UNAM tiene como características geométricas una longitud de 37 metros de largo por 80 centímetros de ancho y 120 centímetros de alto. De acuerdo a estas características se puede generar oleaje con una profundidad de entre 70 y 80 centímetros y olas alrededor de 40 centímetros de altura como máximo, debido a límite de tirante.

El material de construcción de uno de los costados y del fondo del canal es de lámina de acero inoxidable y el otro lado esta conformado por 30 metros de vidrio y de acero inoxidable en los extremos. El canal es soportado por una estructura de tubular (acero PTR) a una altura de 80 centímetros sobre el nivel del piso.

El canal tiene una capacidad máxima (considerando que el llenado es a una profundidad de 80 centímetros) de aproximadamente 24,000 litros de agua, pero para condiciones normales de operación requiere de 15,000 litros aproximadamente. Esta cantidad de líquido es posible almacenarla en una cisterna y es recirculada para evitar su desperdicio.

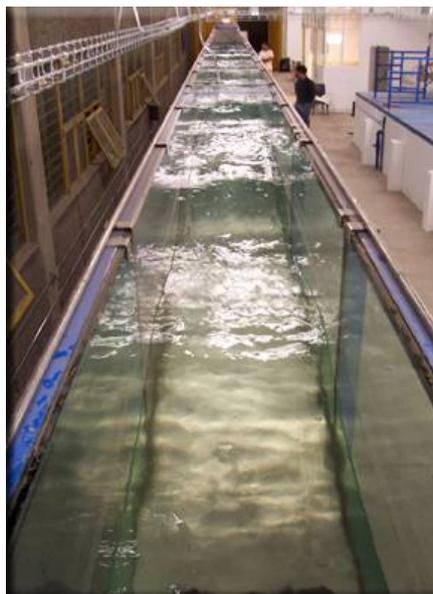


Figura B. 1 Canal de oleaje (Instituto de Ingeniería, UNAM)

Generador de oleaje

El equipo de generación fue adquirido a la empresa HR Wallingford del Reino Unido y puede generar tanto oleaje controlado (regular) en el que siempre se tendrá la misma altura de ola, como oleaje aleatorio (irregular) que es el que resulta más cercano a la realidad.

El generador es de tipo pistón y consiste en una placa de acero sostenida por un riel horizontal (ver Figura B1), que se mueve hacia delante y hacia atrás. Dicho riel, a su vez, ésta suspendido de una estructura fija posicionada a los costados de las paredes del canal. Lo que permite que los elementos de precisión estén a una altura suficiente y no correr el riesgo de mojarse.



Figura B. 2 Generador de oleaje (Instituto de Ingeniería, UNAM)

La pala puede alcanzar un desplazamiento total de 85 centímetros, a una velocidad máxima de 0.81 m/s y con una fuerza máxima de 3.5 KN. El riel se mueve debido a un actuador de motor eléctrico (Figura B.2) que opera a través de engranes y se controla desde una computadora. El motor es de inercia baja, necesaria para que se pueda operar en frecuencias altas, y los engranes están diseñados para trabajar a velocidades altas.

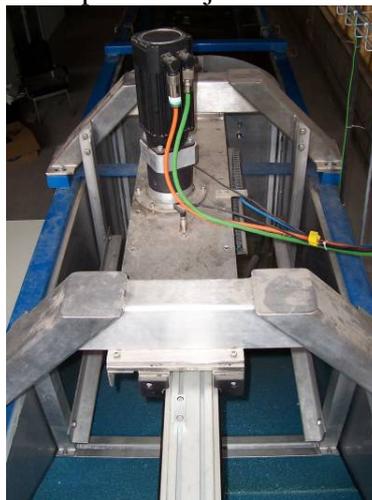


Figura B. 3 Actuador a base de un motor eléctrico, Laboratorio de Olas, II-UNAM.

Una de las limitaciones de las instalaciones es que el oleaje generado no se pierde sino que tiende a reflejar en las paredes de los extremos del canal. Este problema aumenta cuando dentro del canal es colocada una estructura altamente reflejante; ya que las ondas viajan en ambos sentidos provocando un caos que no permitirá la realización de estudios confiables.

Para solucionar los problemas de las ondas reflejadas, el canal cuenta con un sistema de absorción de oleaje diseñado por HR Wallingford para minimizar el efecto de re-reflexión.

Absorción de reflexiones en la pala

Este sistema de absorción de reflexiones de la pala dispone de un par de sensores de nivel adosados a la pala (ver Figura. B.4) que toman medidas a lo largo del ensayo. La medida de estos sensores se corresponde con la superposición del ensayo que se desea ensayar y el oleaje reflejado que se propaga hacia la pala.

De la comparación entre el perfil del oleaje medido y el que se desea generar, se obtiene el desplazamiento horizontal de la pala necesario para absorber la diferencia de niveles. Al mismo tiempo que se registra este nivel, el controlador de posición registra la posición de la pala. Con esta medida y el desplazamiento calculado, se obtiene la nueva posición de la pala.



Figura B. 4 Sensores en la parte frontal de la pala, utilizados por el sistema de absorción, Laboratorio de Olas, II-UNAM.

Medidores de oleaje

Se cuenta con doce medidores de nivel de tipo probeta de 600mm de largo. Este tipo de sensores registran el nivel de la superficie del agua en un instante dado, aprovechando la capacidad conductiva del agua y la aislante del aire, es decir, entre las dos barras metálicas se hace pasar corriente y el circuito se cerrará solo en la parte sumergida. Finalmente, a partir de una relación entre el voltaje y la longitud sumergida del sensor se puede conocer la profundidad en cada instante y de ahí la altura de las olas.

El rango de operación es su longitud misma y su precisión alcanza la décima de milímetro.



Figura B. 5 Medidores de Nivel.

Sensores de presión

Se tienen ocho sensores de presión, cuatro de ellos con rango de 0-2mca y cuatro con 0-5mca. Las celdas de presión que se adquirieron para el laboratorio consisten en un diafragma capaz de registrar variaciones muy pequeñas en el medio que lo rodea, y al ser conectado a un circuito con corriente, las traduce a voltajes los que, a su vez, son transformados a su equivalente en metros de columna de agua.

Este equipo a pesar de ser relativamente frágil, resulta muy confiable, y en virtud de su capacidad de responder a cambios muy rápidos, puede ser utilizado para la medición de impactos sobre estructuras marítimas o portuarias causadas por el oleaje.



Figura B. 6 Sensores de presión.

Velocímetro acústico doppler

Es un aparato de muy alta definición que permite conocer las tres componentes de la velocidad en un punto dado. El principio de operación parte de la emisión de una señal acústica que luego de rebotar en las partículas del agua de un volumen de control situado 5cm por arriba de la fuente sonora, es captada 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 captarán los transductores.

La frecuencia máxima de muestreo es de 0.1 a 50Hz sin embargo es conveniente sincronizarlo con el resto del equipo para obtener resultados homogéneos. Este equipo tiene resolución de 0.01cm/s y se puede programar para que su rango sea de ± 3 , ± 10 , ± 30 , ± 100 y ± 250 cm/s.



Figura B. 7 ADV Velocímetro Acústico

Velocímetro por trazado de partículas

El PIV (Particle Image Velocimeter) se compone de un emisor de un haz láser que ilumina las partículas en el fluido y una cámara fotográfica que registra el movimiento de éstas. El software asociado hace una malla en la imagen y estima las velocidades al centro de cada celda. La resolución de la malla puede ser del orden del píxel, sin embargo, cada experimento requiere su propio ajuste puesto que celdas muy grandes pierden información del flujo y celdas muy pequeñas incrementan demasiado el tiempo de cálculo (el cual por cierto lo realiza vía correlación adaptativa entre dos imágenes sucesivas).

La frecuencia de muestreo dependerá de la velocidad en cada caso, esto es, como correlaciona los datos de dos fotos, si éstas se toman con muy poco tiempo de retraso, no habrá movimiento aparente e partículas y por el otro lado si se toman con demasiado tiempo (un partícula recorre demasiadas celdas) el programa no encontrará información para correlacionar. Esto es un poco a prueba y error.

La única desventaja de este equipo es que puede llegar a generar una cantidad inmanejable de información (4-5Gb de imágenes por ensayo) por lo que la planeación previa es muy importante.

ANEXO C

**GRAFICAS DE LOS RESULTADOS
OBTENIDOS EN LA MODELACIÓN**

ANEXO C GRÁFICAS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA MODELACIÓN

C.1 Evolución temporal del perfil transversal de todas las pruebas

En este anexo se presentan las gráficas de la evolución del perfil transversal de los modelos ensayados a lo largo de cada una de las pruebas realizadas, con la finalidad de observar como fue el proceso al paso del tiempo.

C.1.1 Ensayos sin variación del nivel freático (Caso 1)

C.1.1.1 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 1$ s

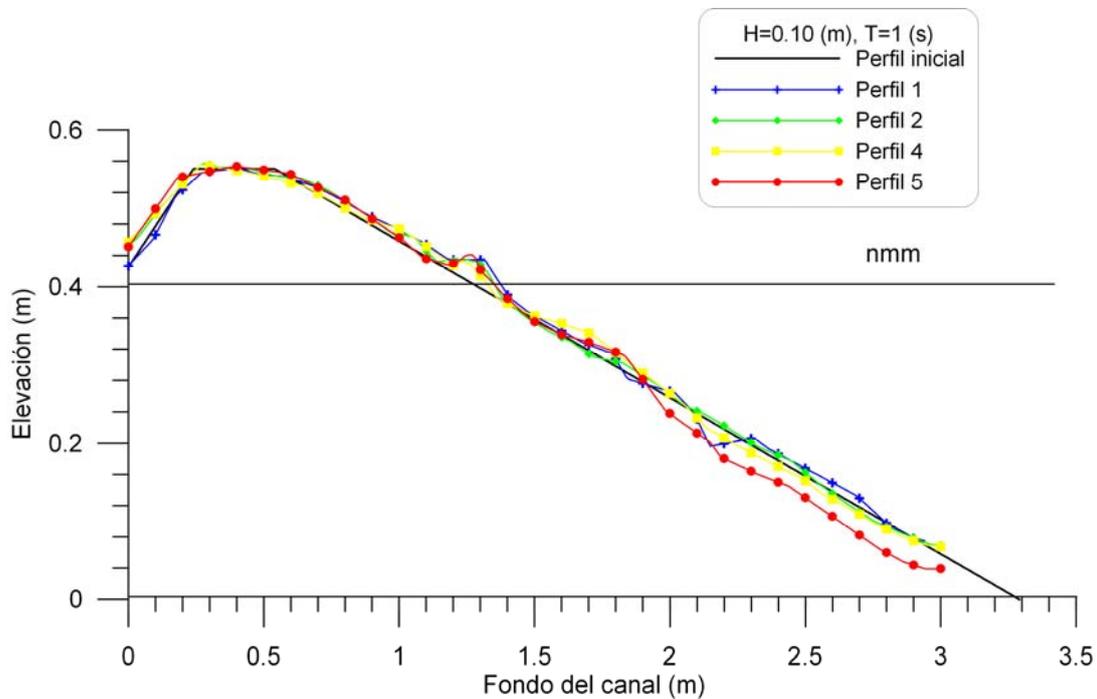


Figura C. 1 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 1$ s y altura $H = 10$ cm.

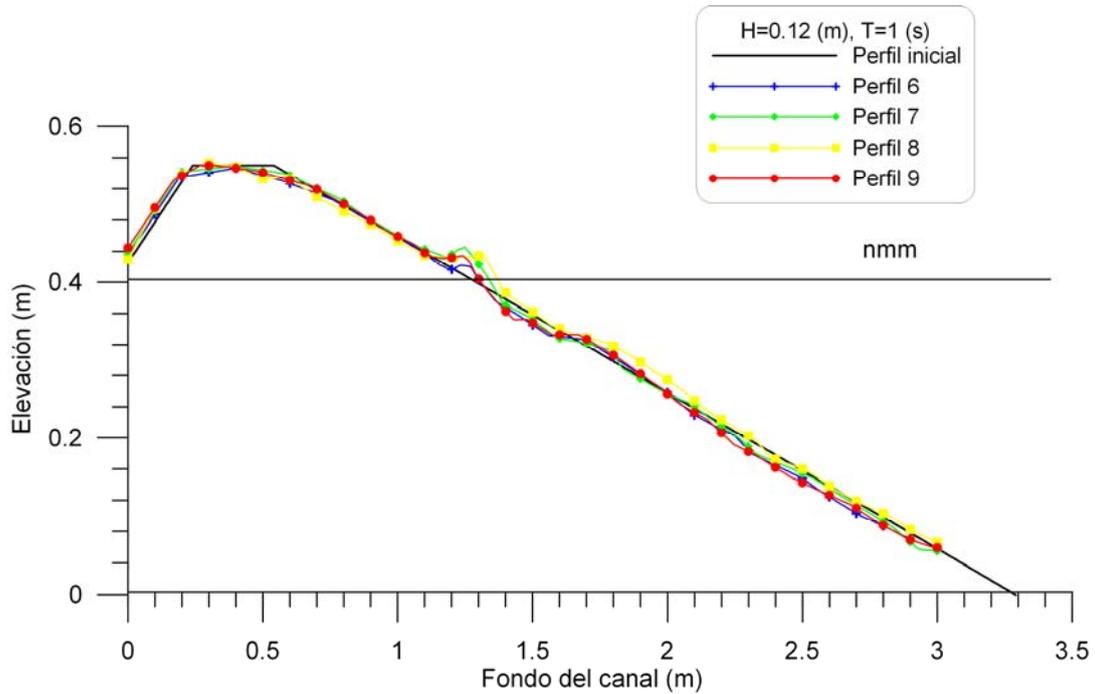


Figura C. 2 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 1s$ y altura $H=12cm$.

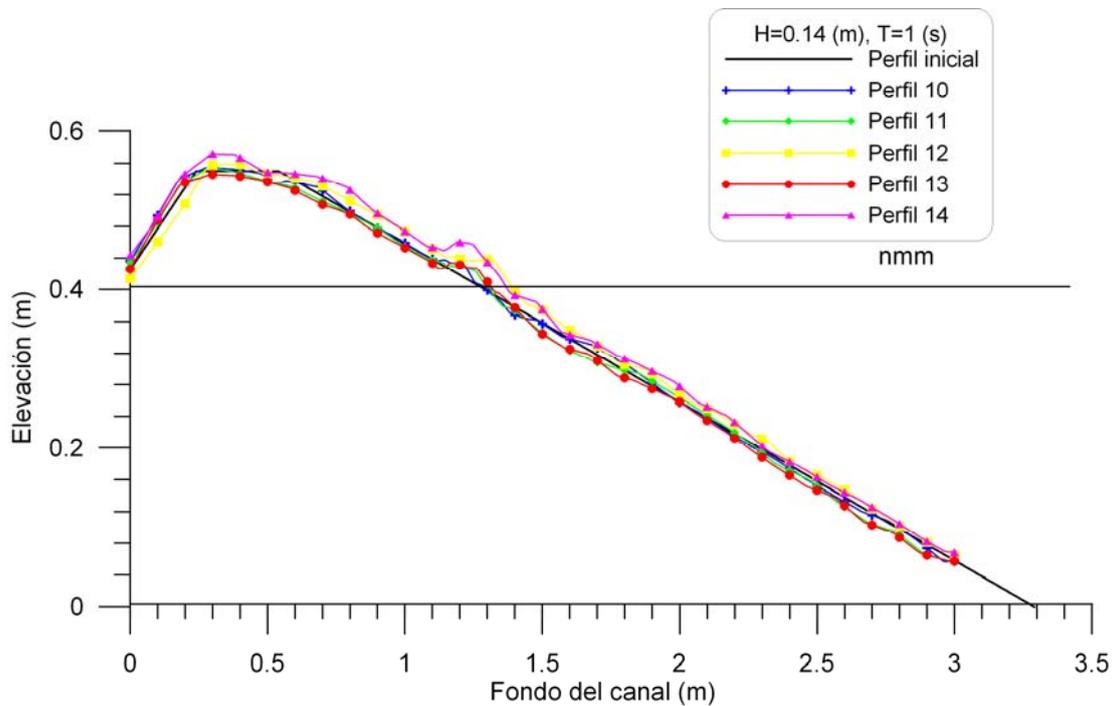


Figura C. 3 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 1s$ y altura $H=14cm$.

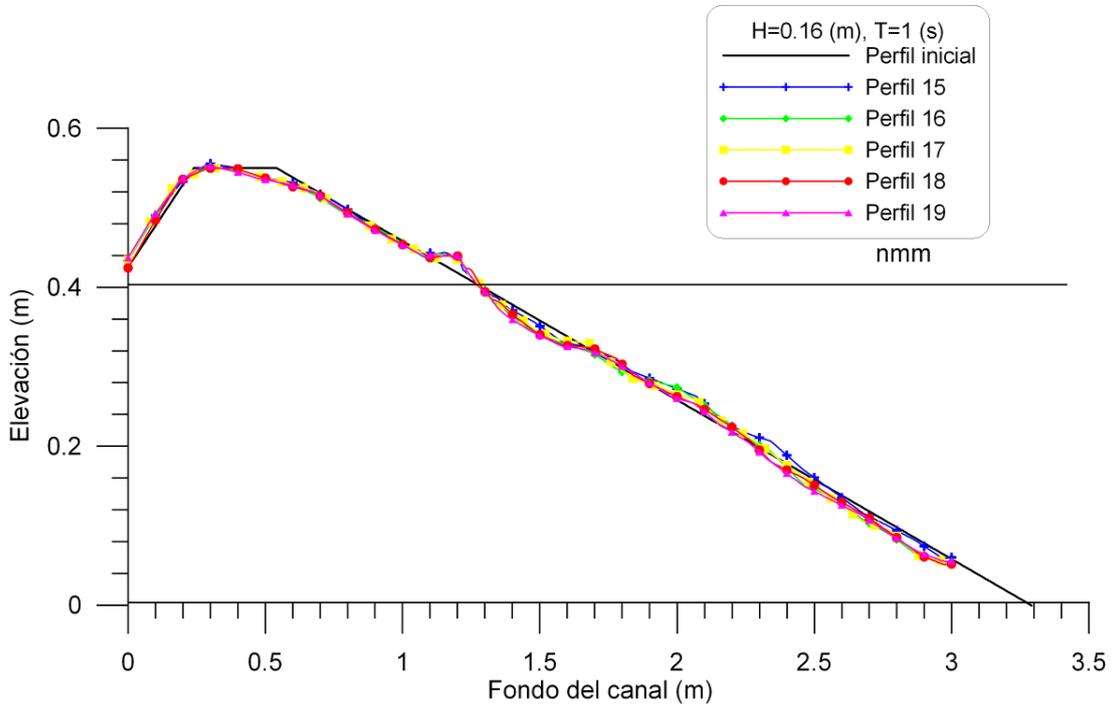


Figura C. 4 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 1s$ y altura $H=16cm$.

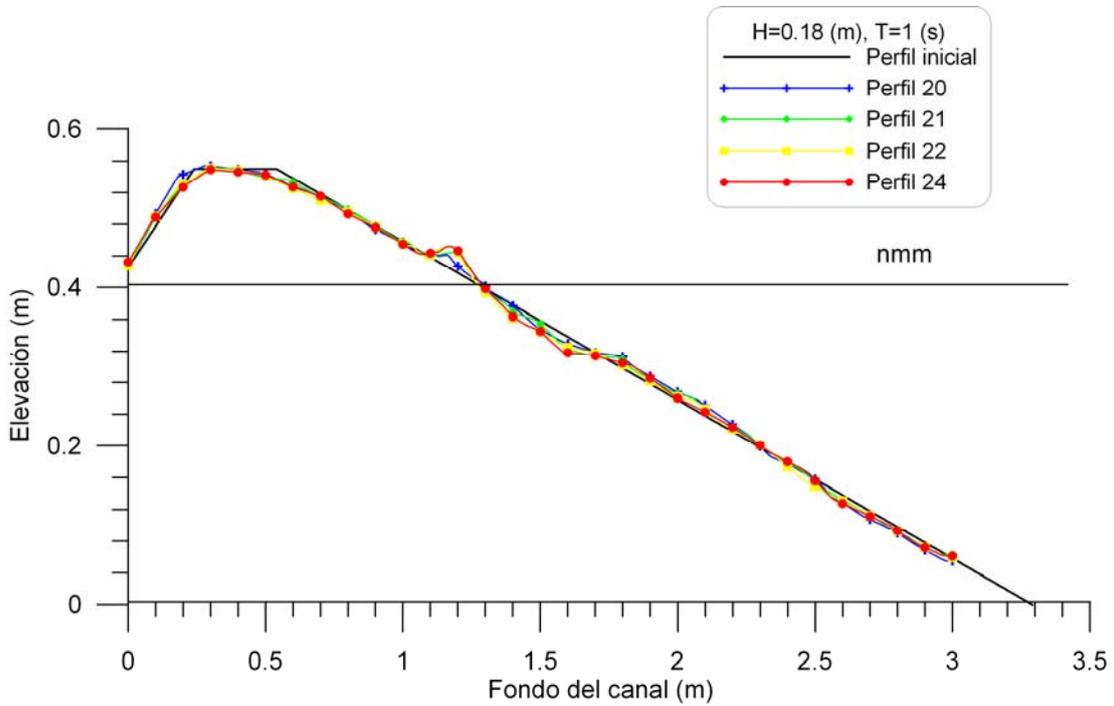


Figura C. 5 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 1s$ y altura $H=18cm$.

C.1.1.2 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 2$ s

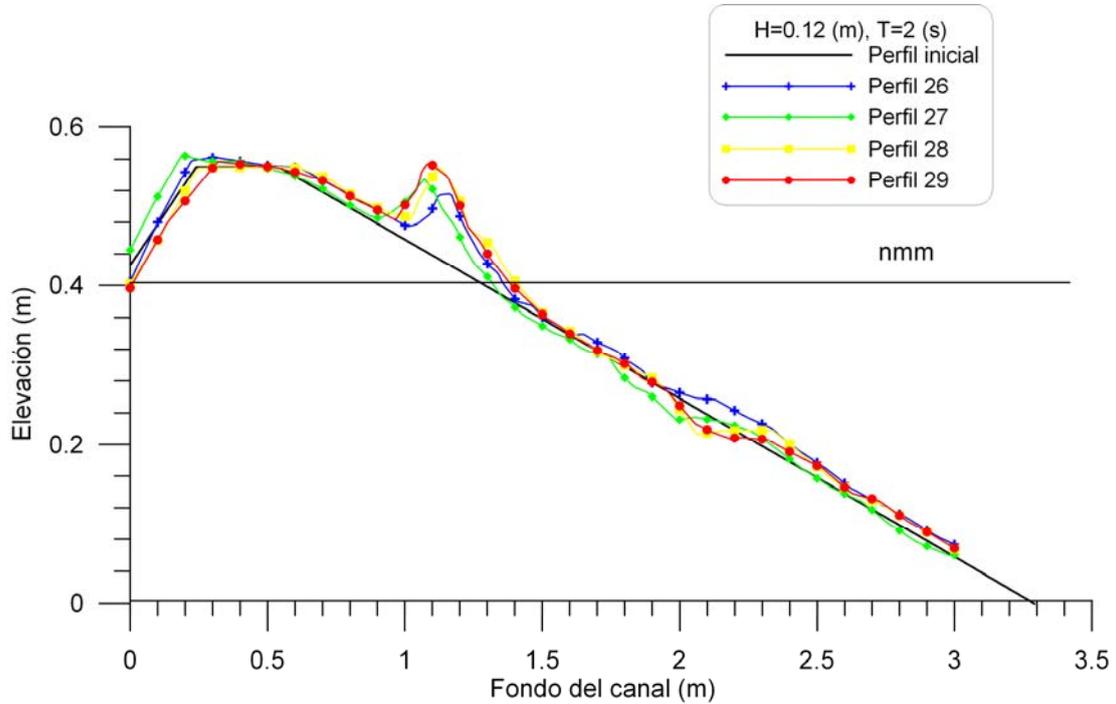


Figura C. 6 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 2$ s y altura $H=10$ cm.

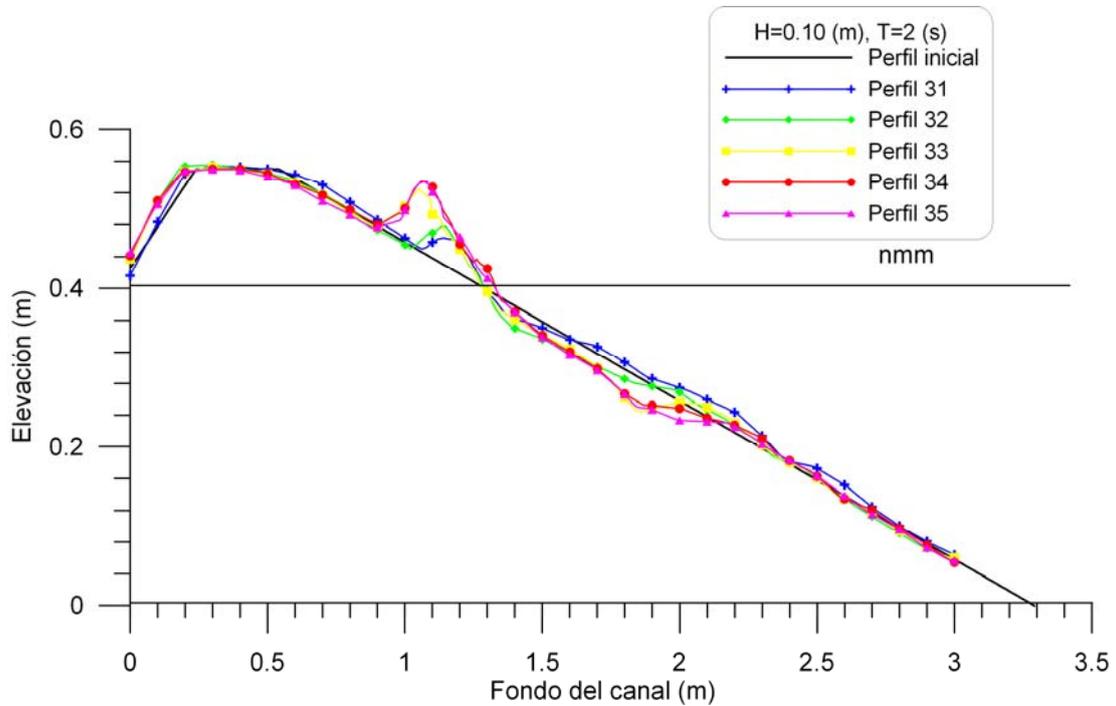


Figura C. 7 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 2$ s y altura $H=12$ cm.

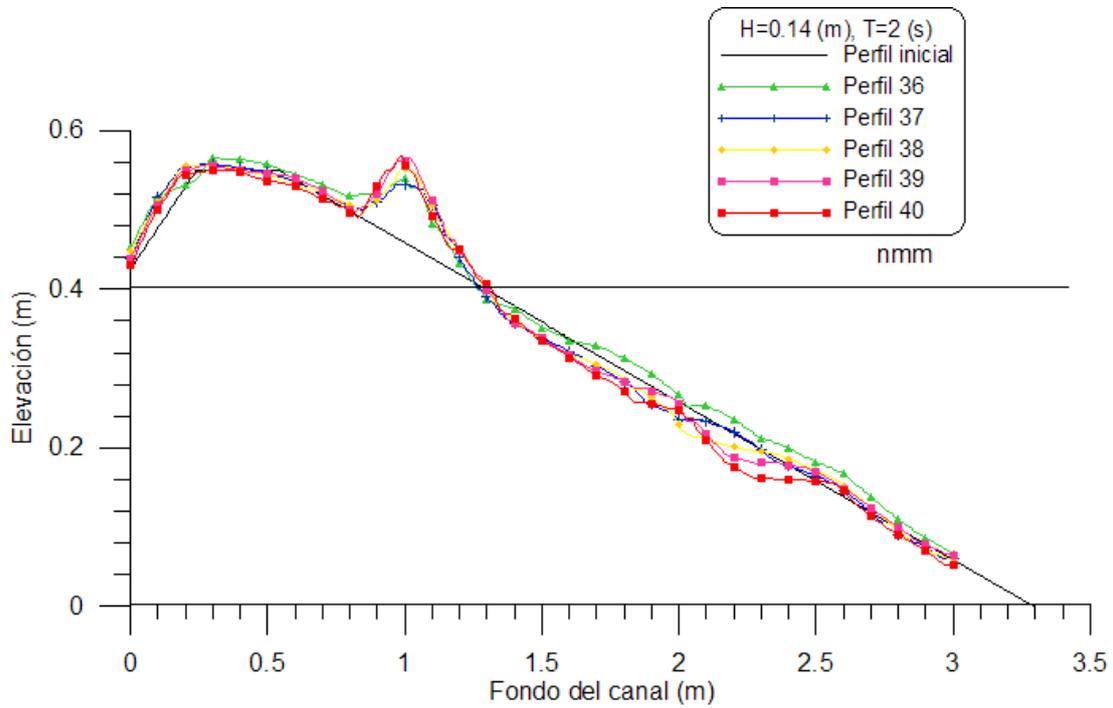


Figura C. 8 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 2$ s y altura $H = 14$ cm.

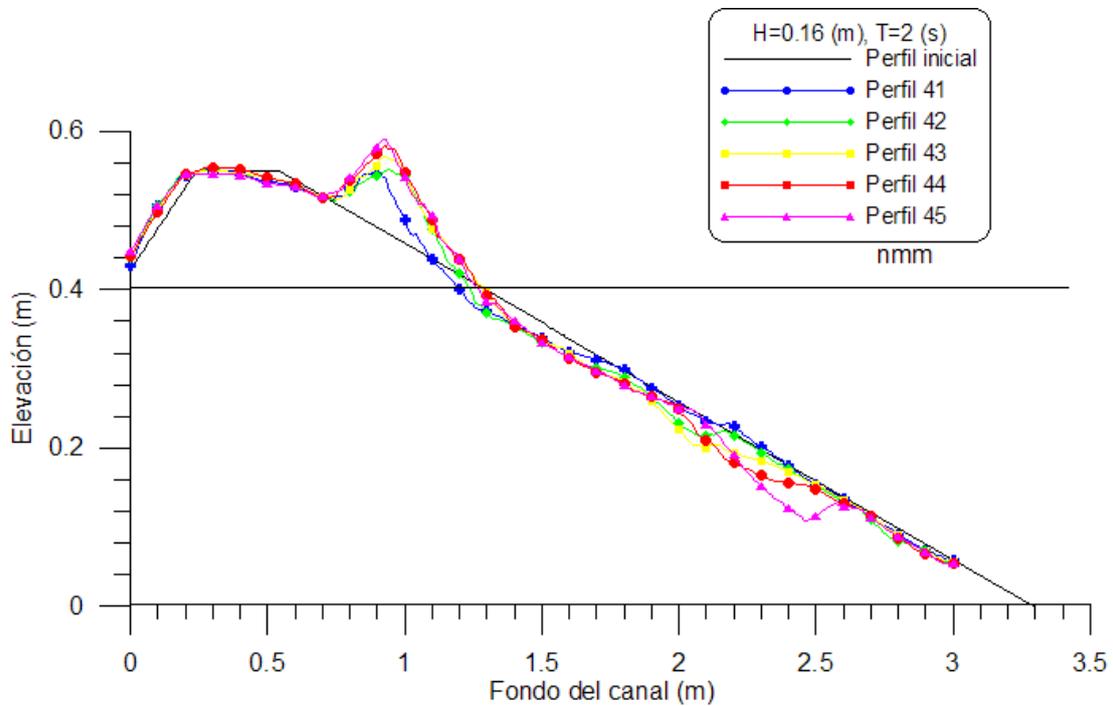


Figura C. 9 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 2$ s y altura $H = 16$ cm.

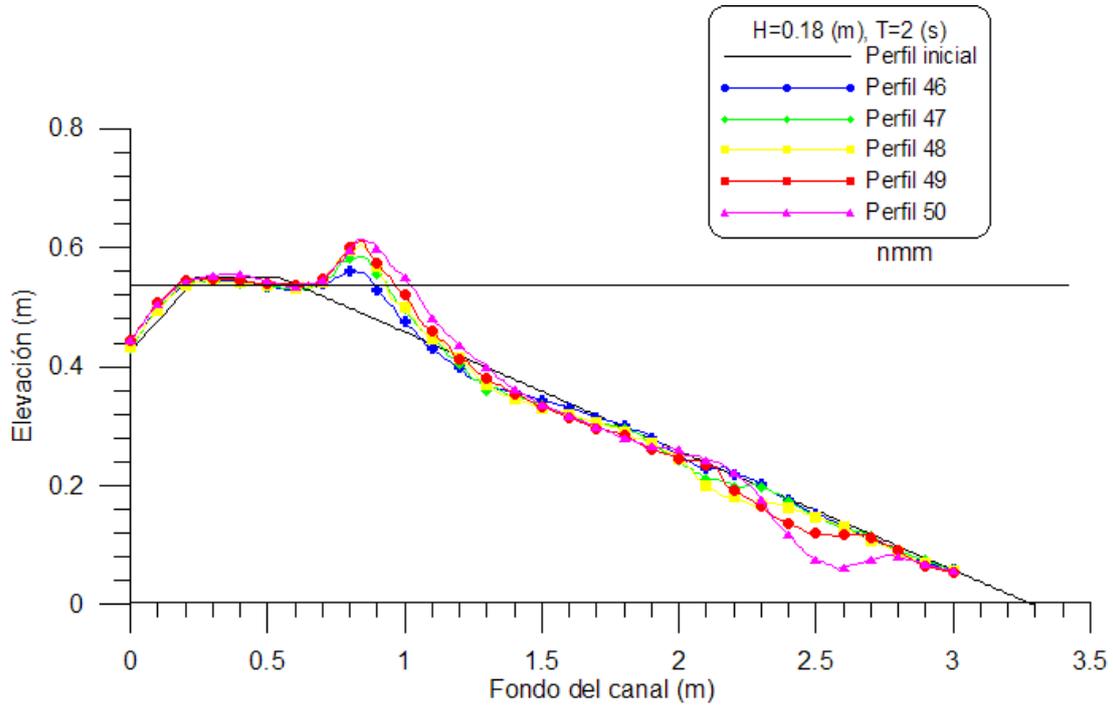


Figura C. 10 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 2s$ y altura $H=18cm$.

C.1.1.3 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 3s$

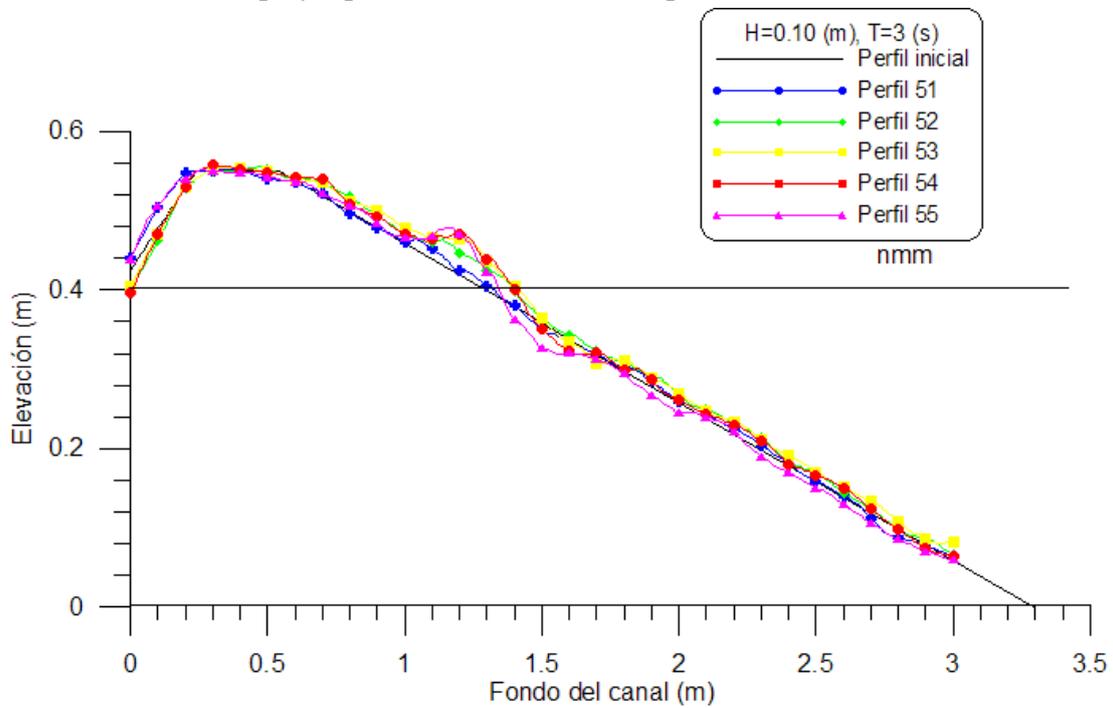


Figura C. 11 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 3s$ y altura $H=10cm$.

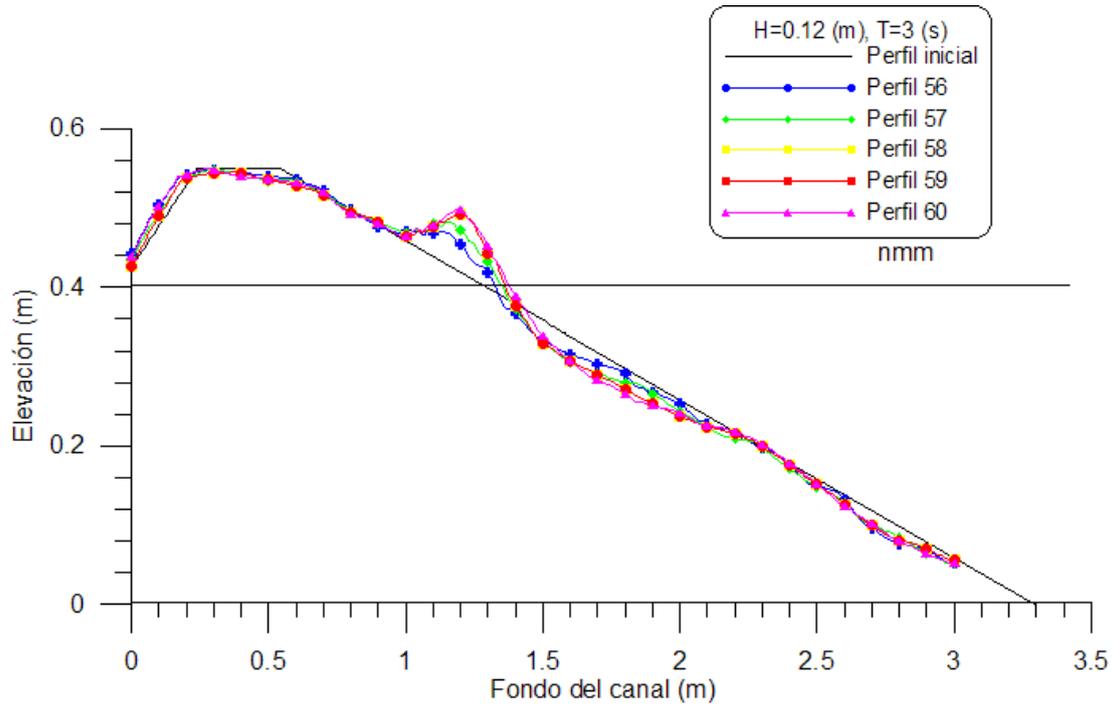


Figura C. 12 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 3$ s y altura $H=12$ cm.

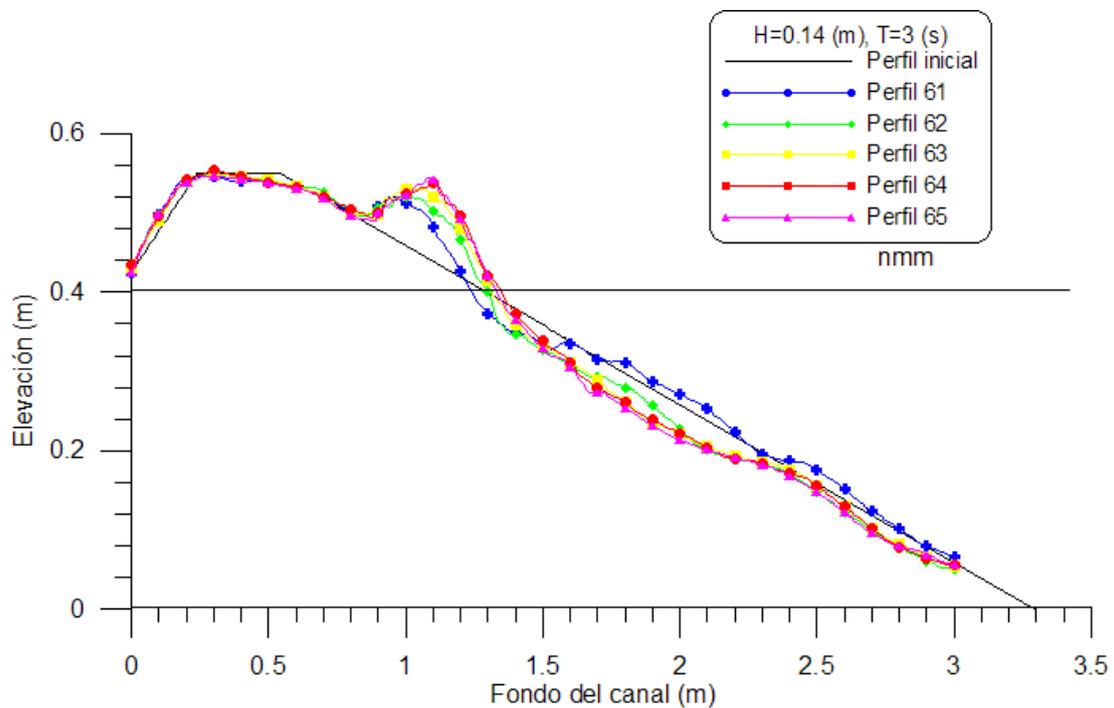


Figura C. 13 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 3$ s y altura $H=14$ cm.

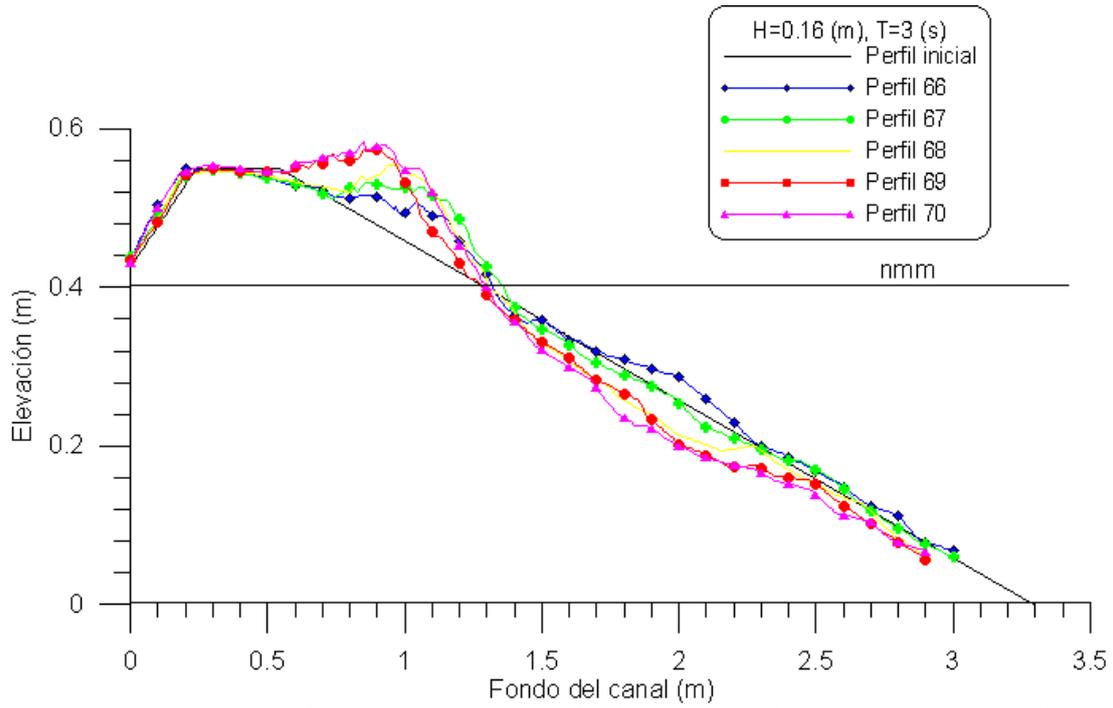


Figura C. 14 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 3s$ y altura $H=16cm$.

C.1.1.4 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 4 s$

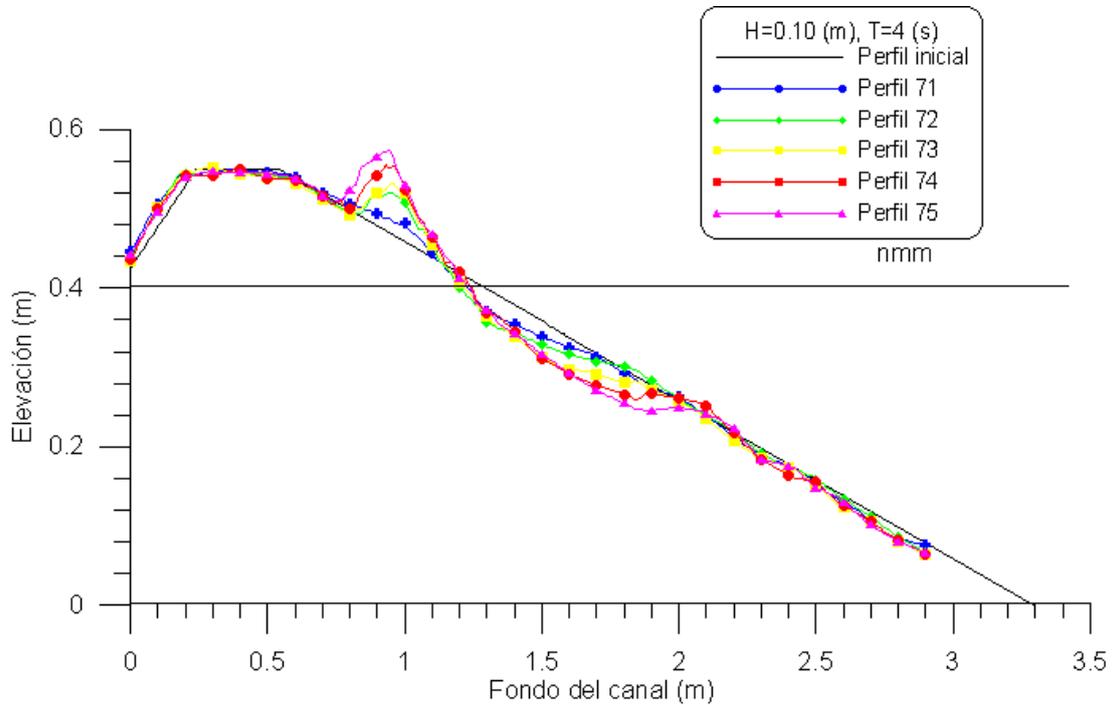


Figura C. 15 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 4s$ y altura $H=10cm$.

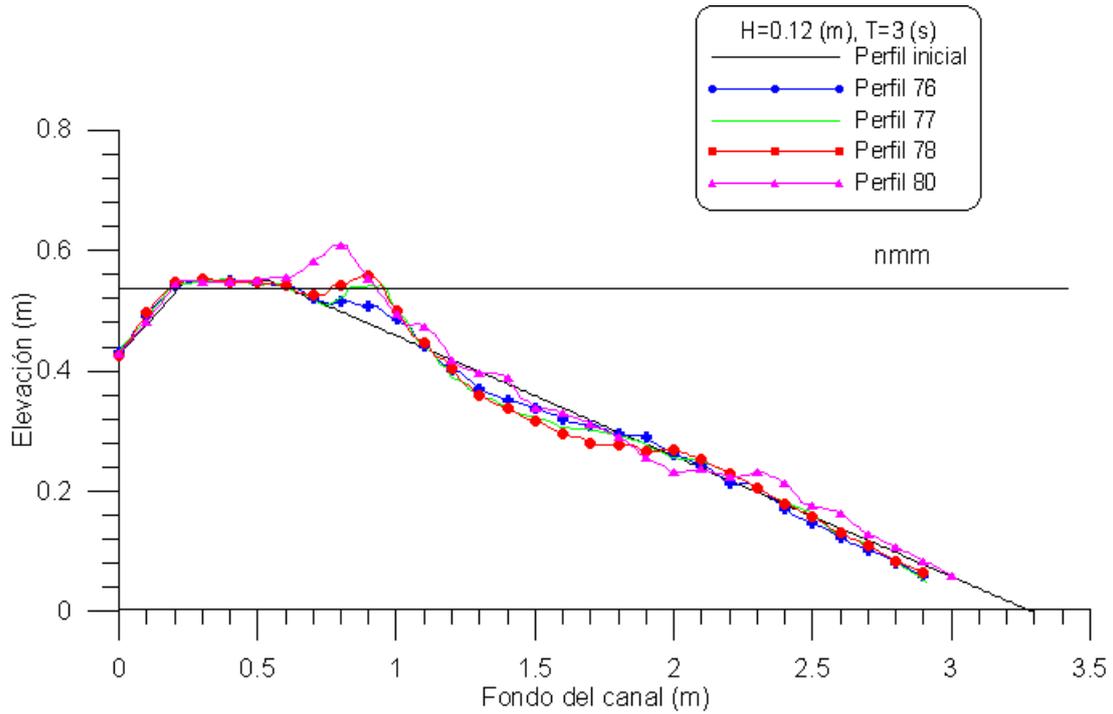


Figura C. 16 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 3 \text{ s}$ y altura $H=12 \text{ cm}$.

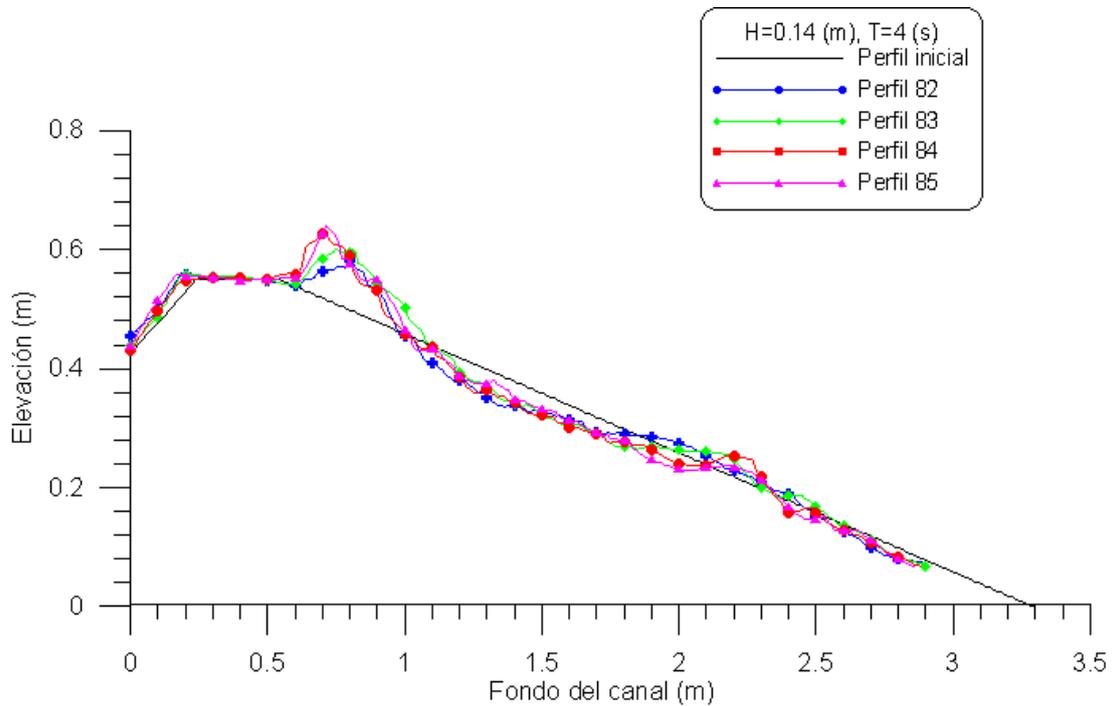


Figura C. 17 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 4 \text{ s}$ y altura $H=14 \text{ cm}$.

C.1.2 Ensayos con variación del nivel freático (Caso 2).

C.1.2.1 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 1$ s

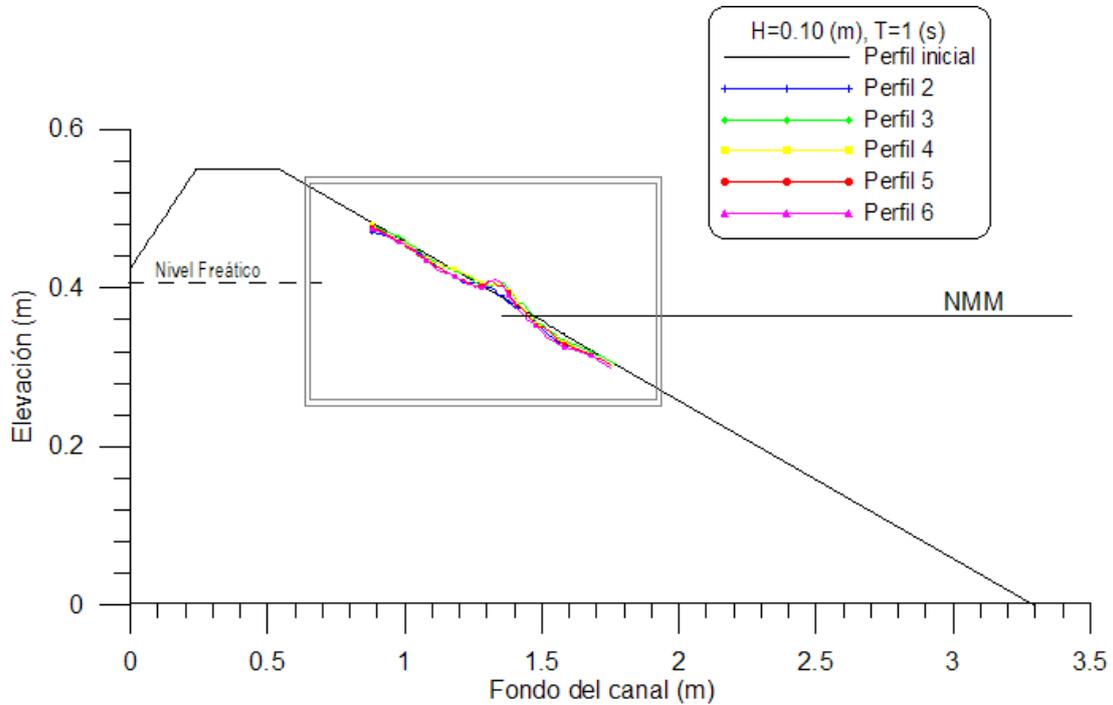


Figura C. 18 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 1$ s y altura $H=10$ cm.

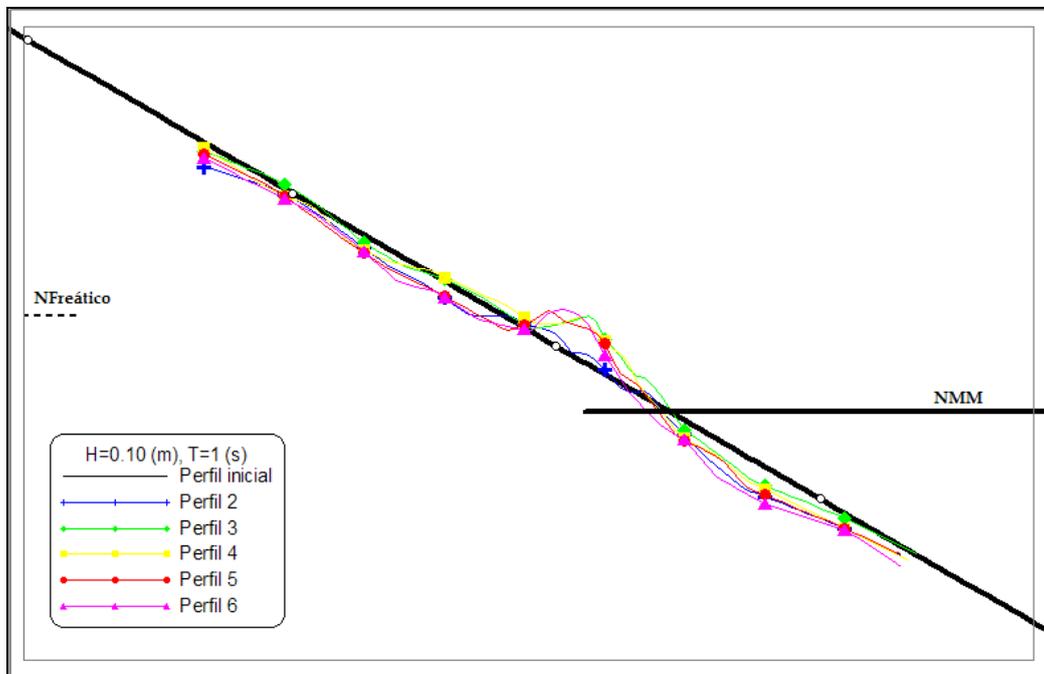


Figura C. 19 Acercamiento de la Figura C. 18

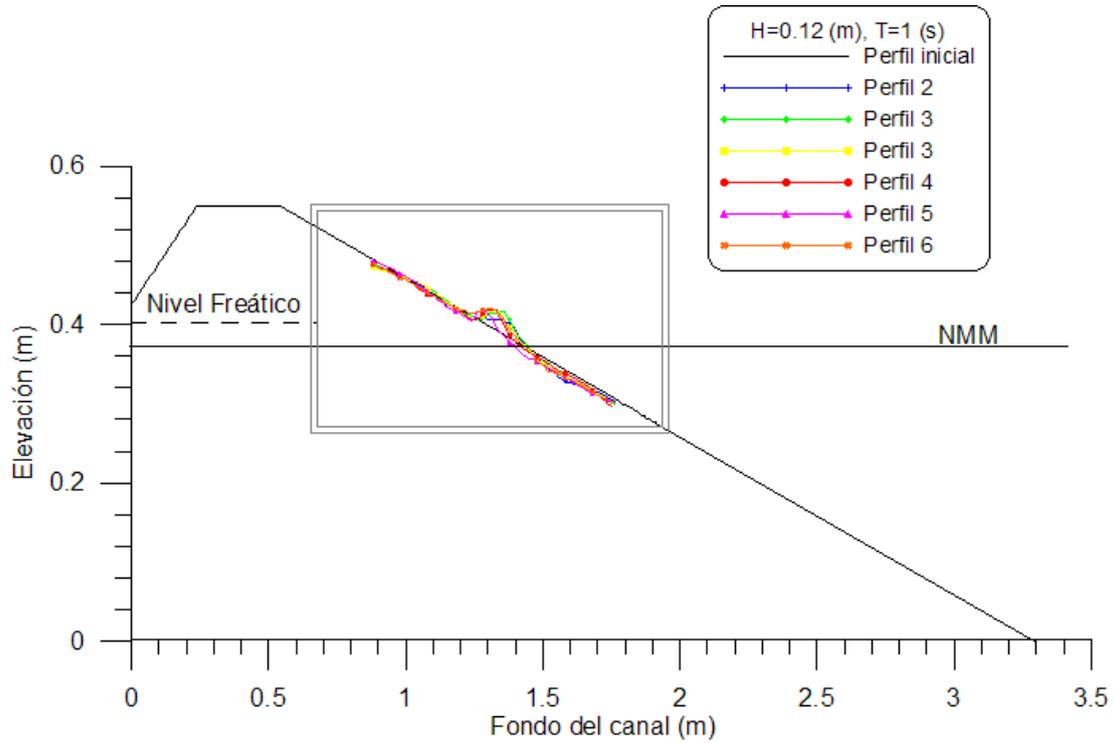


Figura C. 20 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 1s$ y altura $H=12cm$.

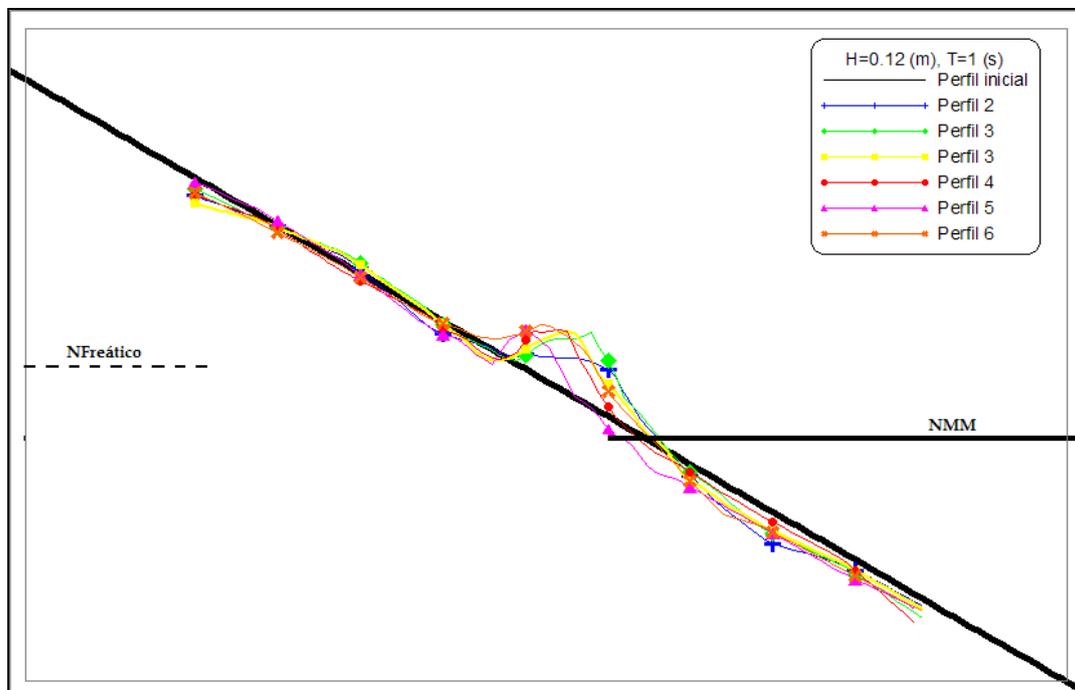


Figura C. 21 Acercamiento de la Figura C. 20

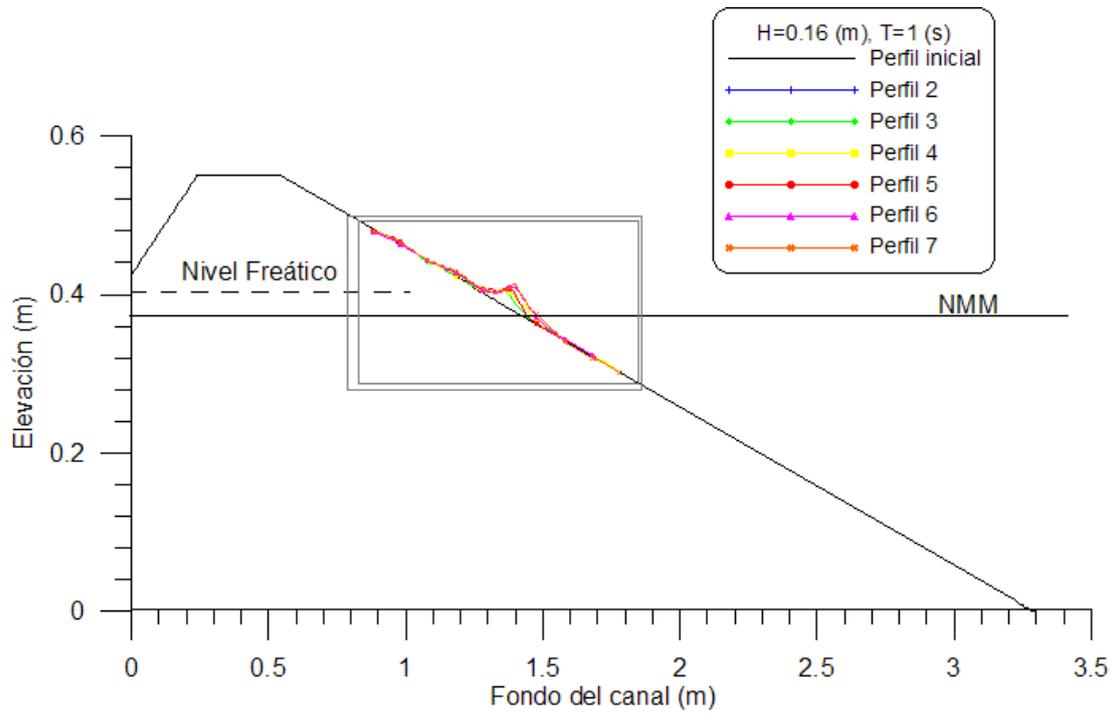


Figura C. 22 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 1s$ y altura $H=14cm$.

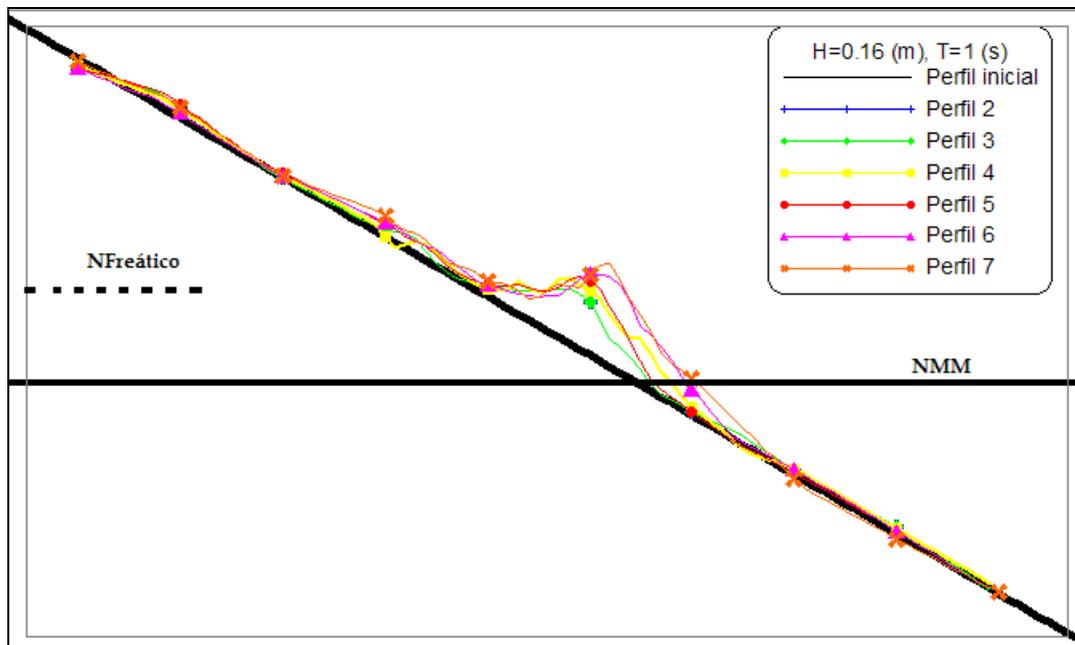


Figura C. 23 Acercamiento de la Figura C. 22

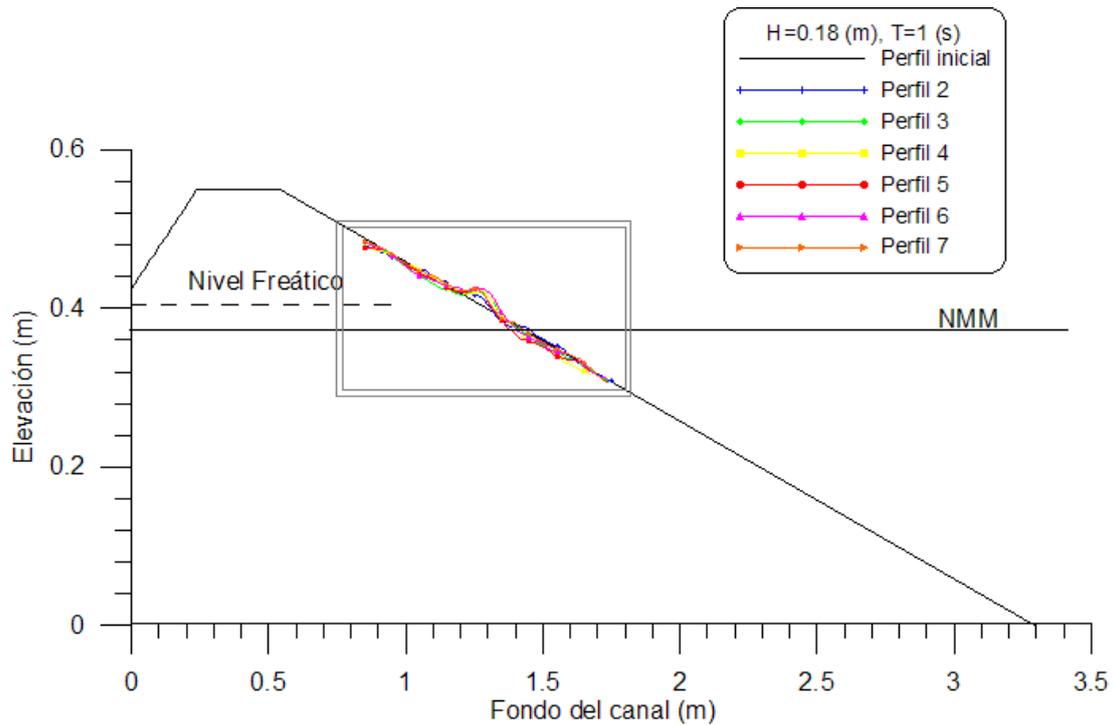


Figura C. 24 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 1$ s y altura $H = 16$ cm.

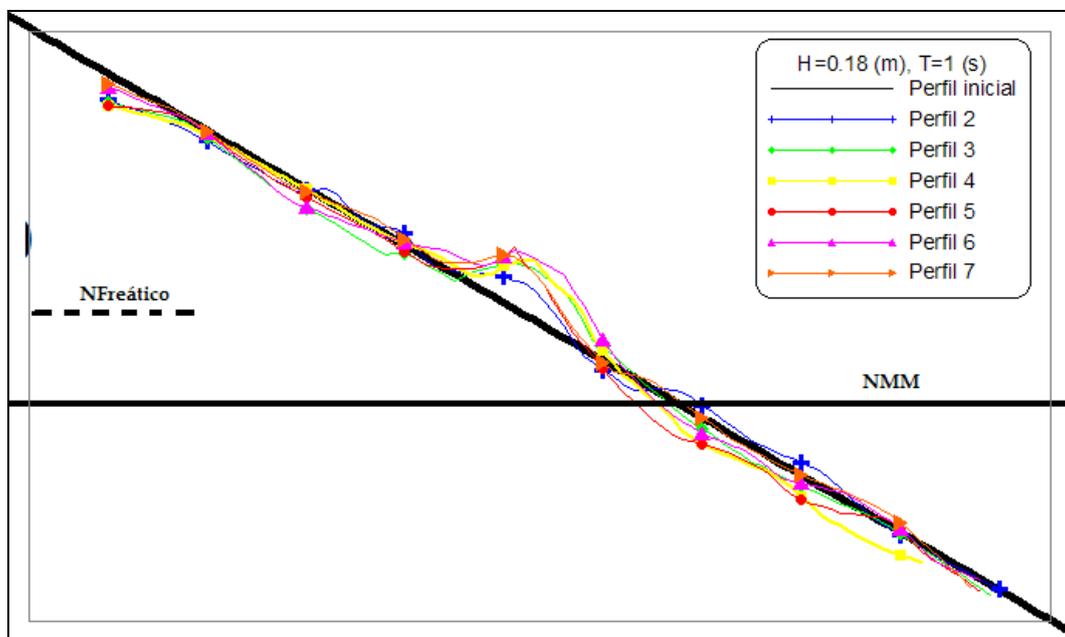


Figura C. 25 Acercamiento de la Figura C. 24

C.1.2.2 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 2$ s

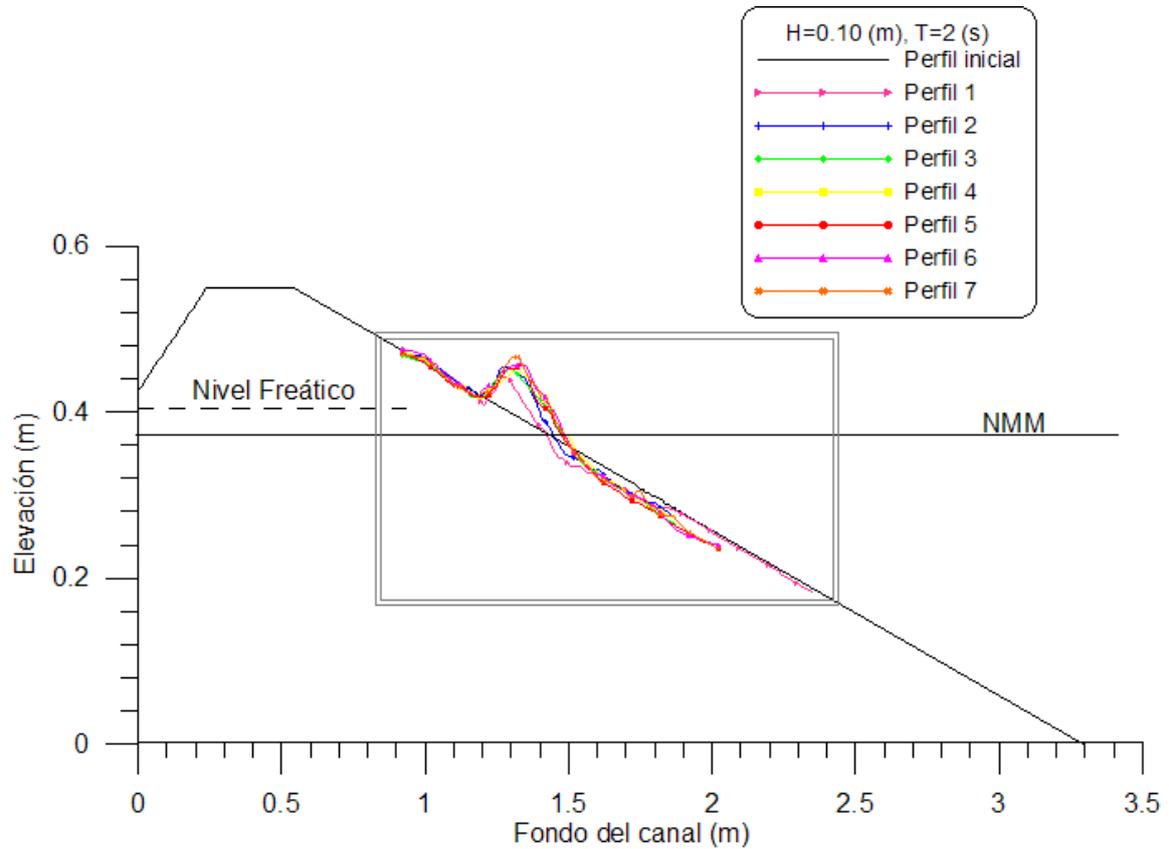


Figura C. 26 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 2$ s y altura $H=10$ cm.

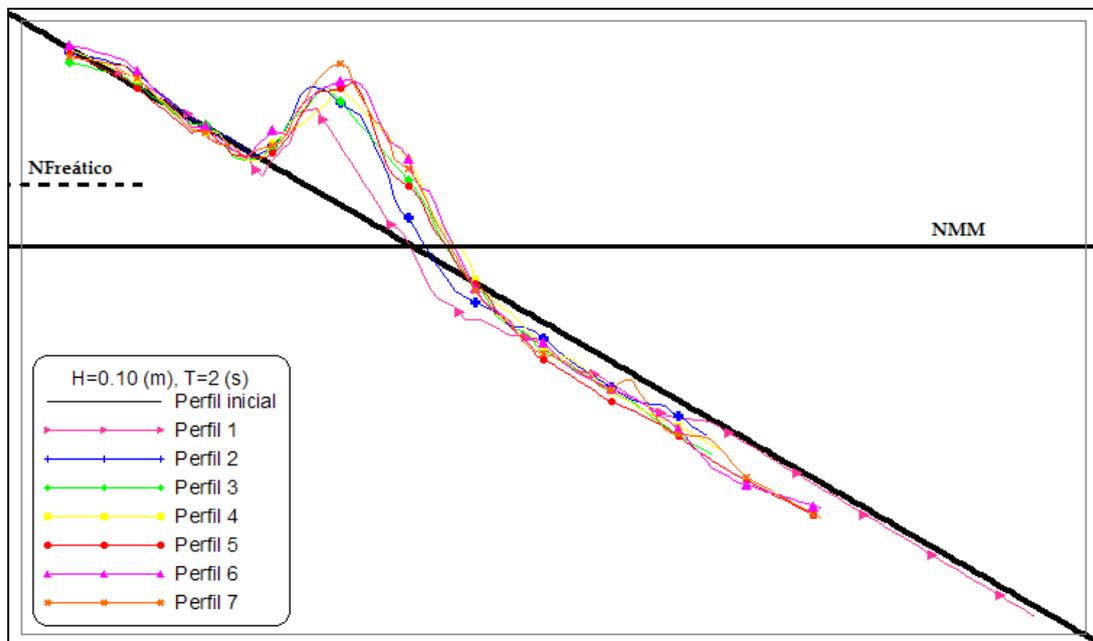


Figura C. 27 Acercamiento de la Figura C. 26

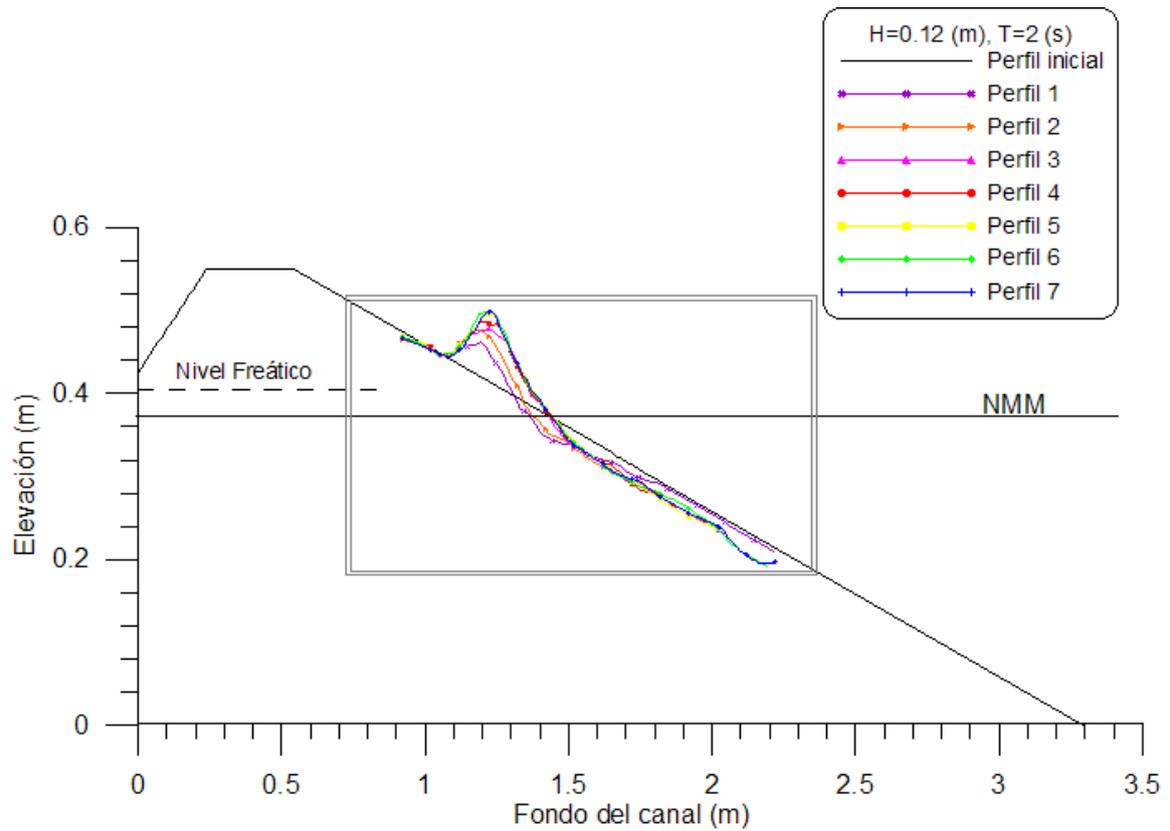


Figura C. 28 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 2s$ y altura $H=12cm$.

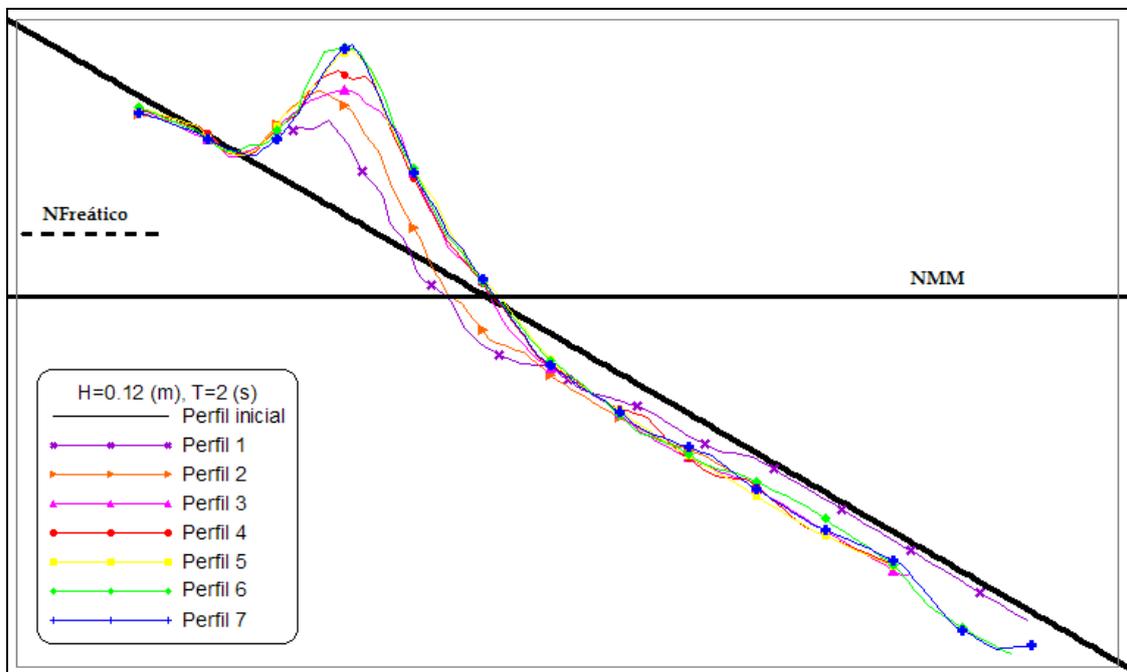


Figura C. 29 Acercamiento de la Figura C. 28

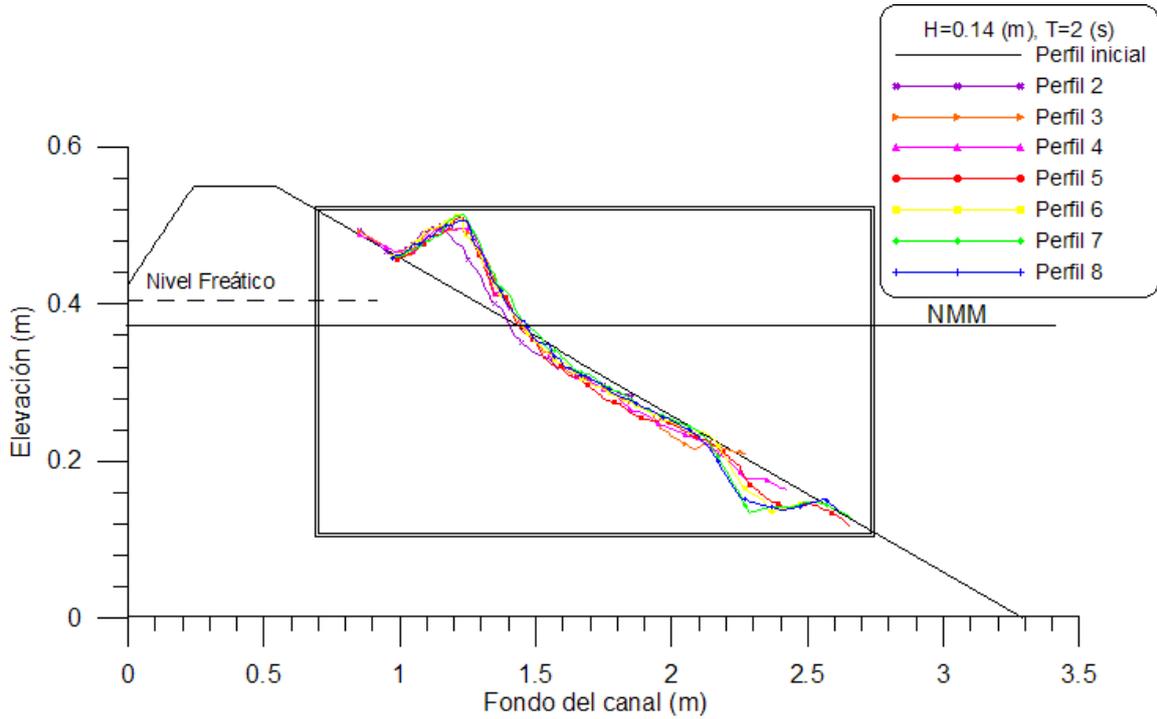


Figura C. 30 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 2s$ y altura $H=14cm$.

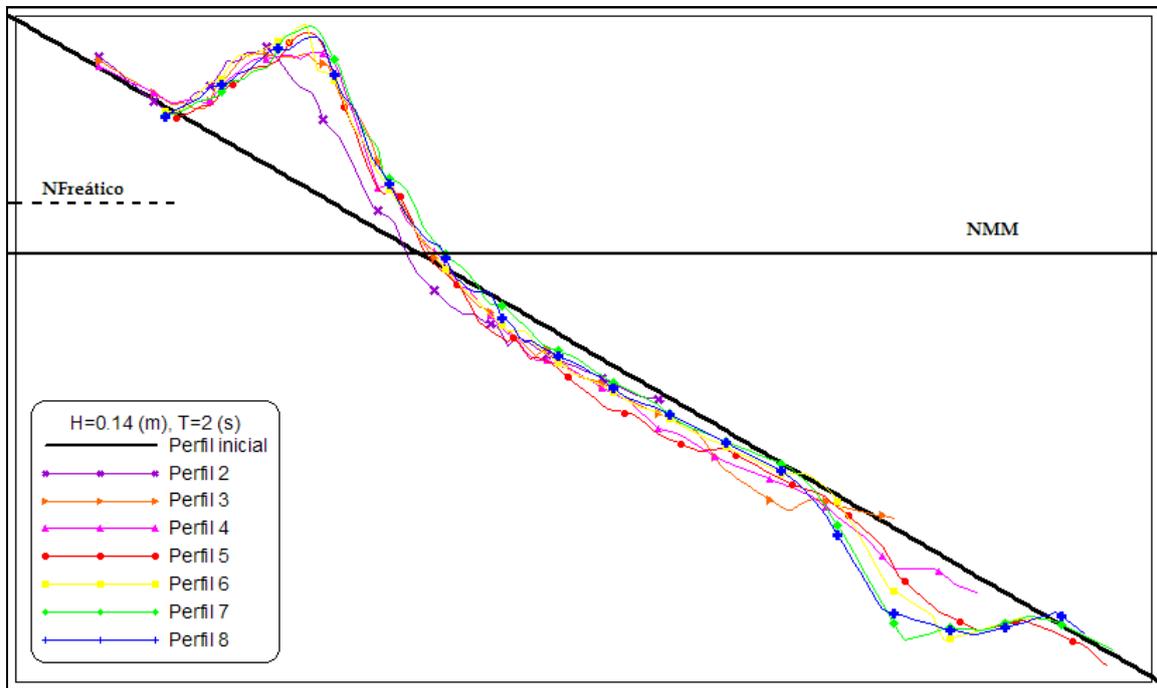


Figura C. 31 Acercamiento de la Figura C. 30

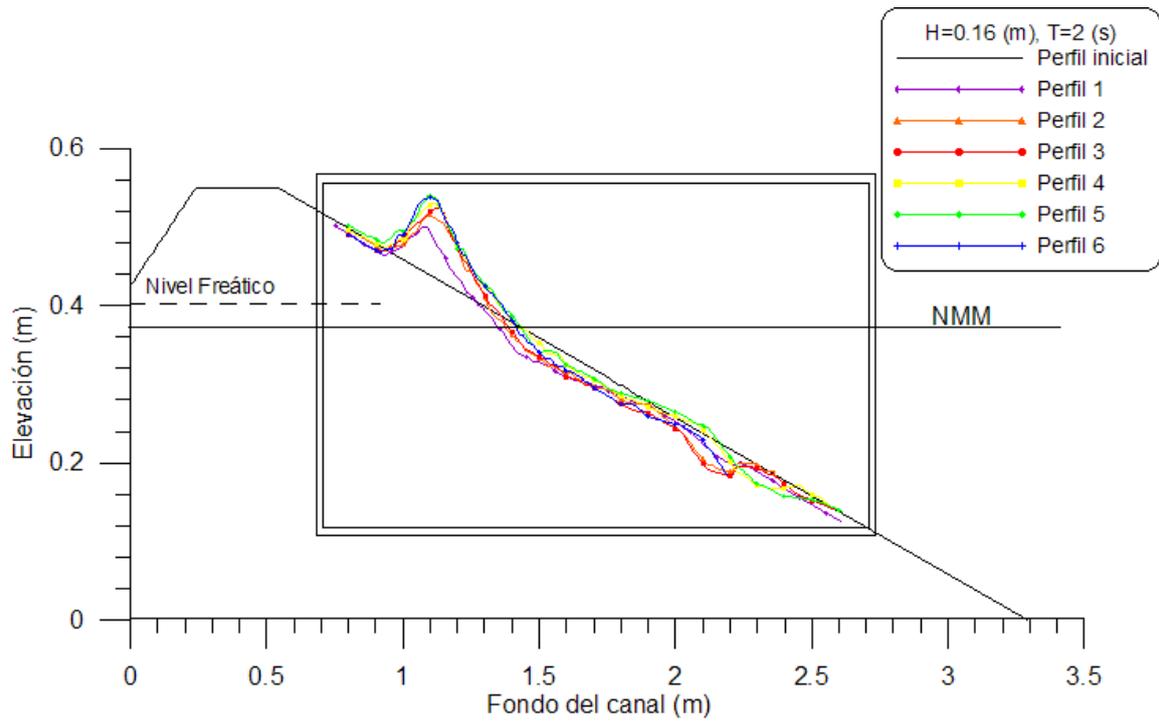


Figura C. 32 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 2s$ y altura $H=16cm$.

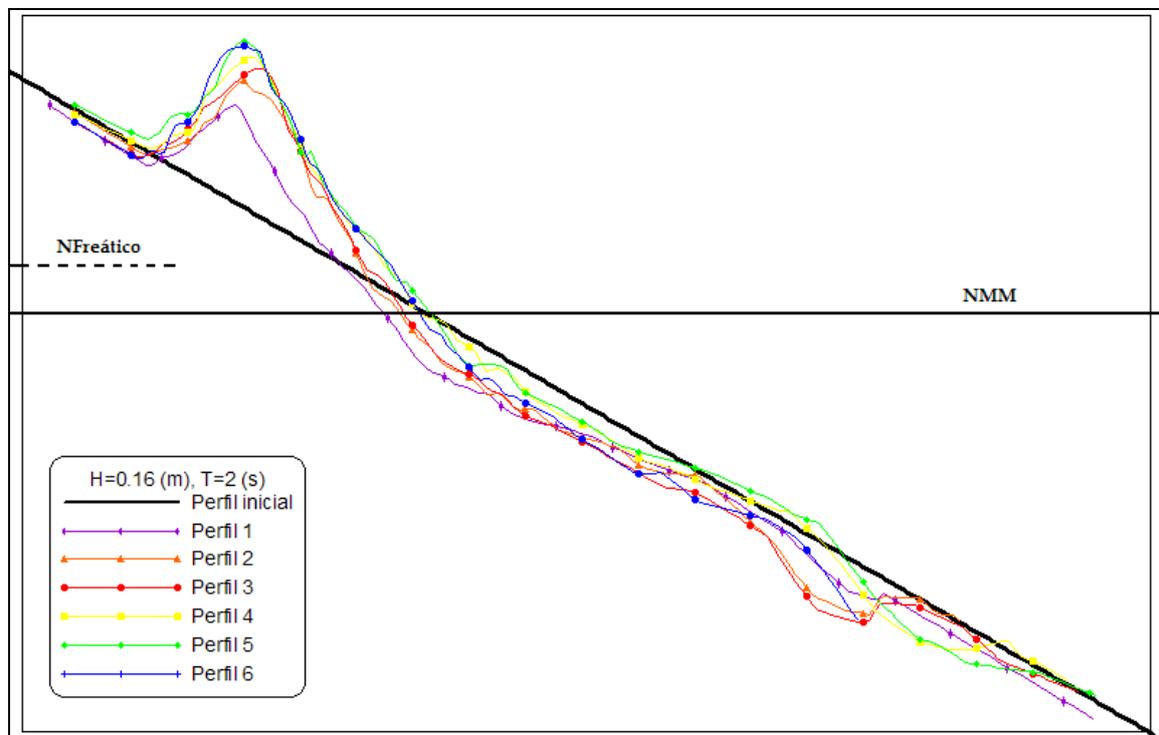


Figura C. 33 Acercamiento de la Figura C. 32

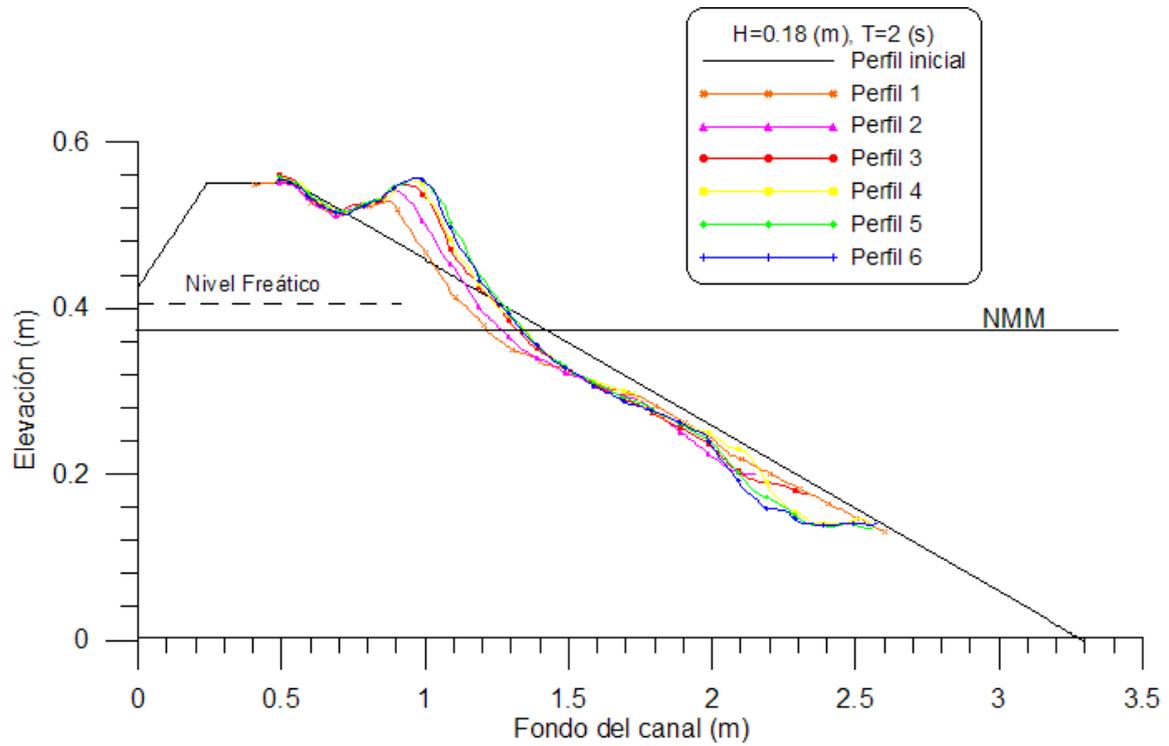


Figura C. 34 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 2s$ y altura $H=18cm$.

C.1.2.3 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 3$ s

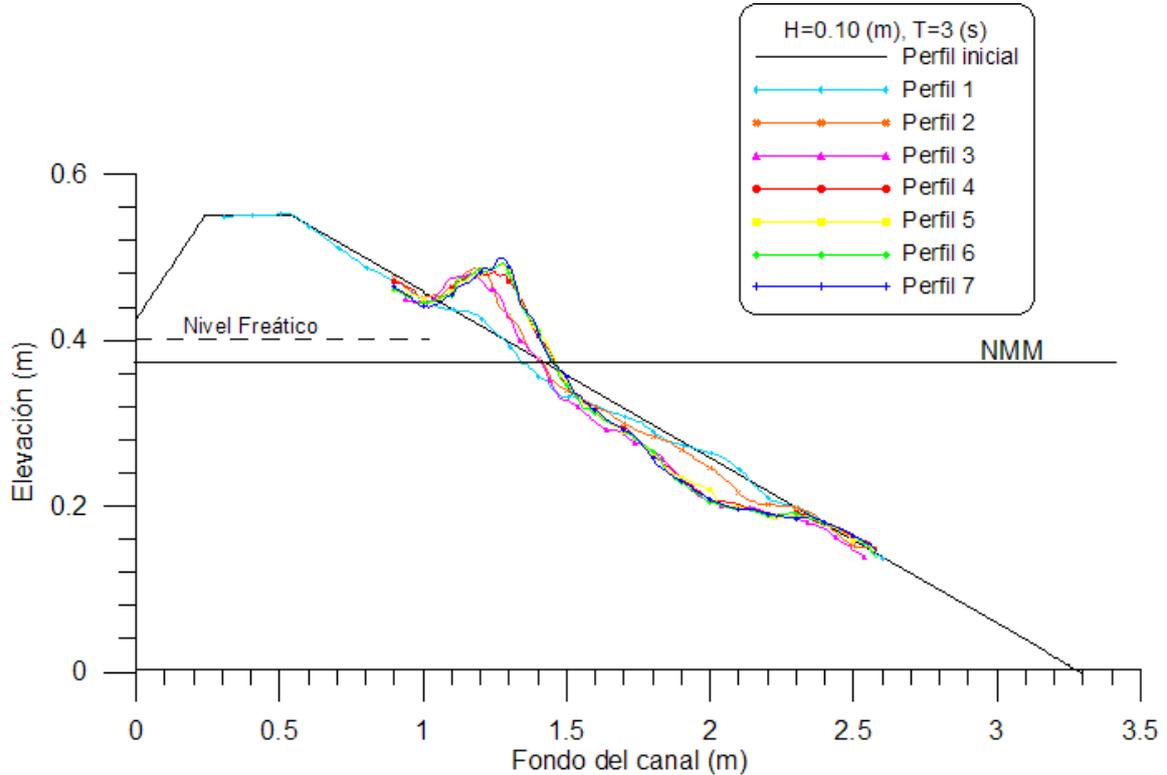


Figura C. 35 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 3$ s y altura $H = 10$ cm.

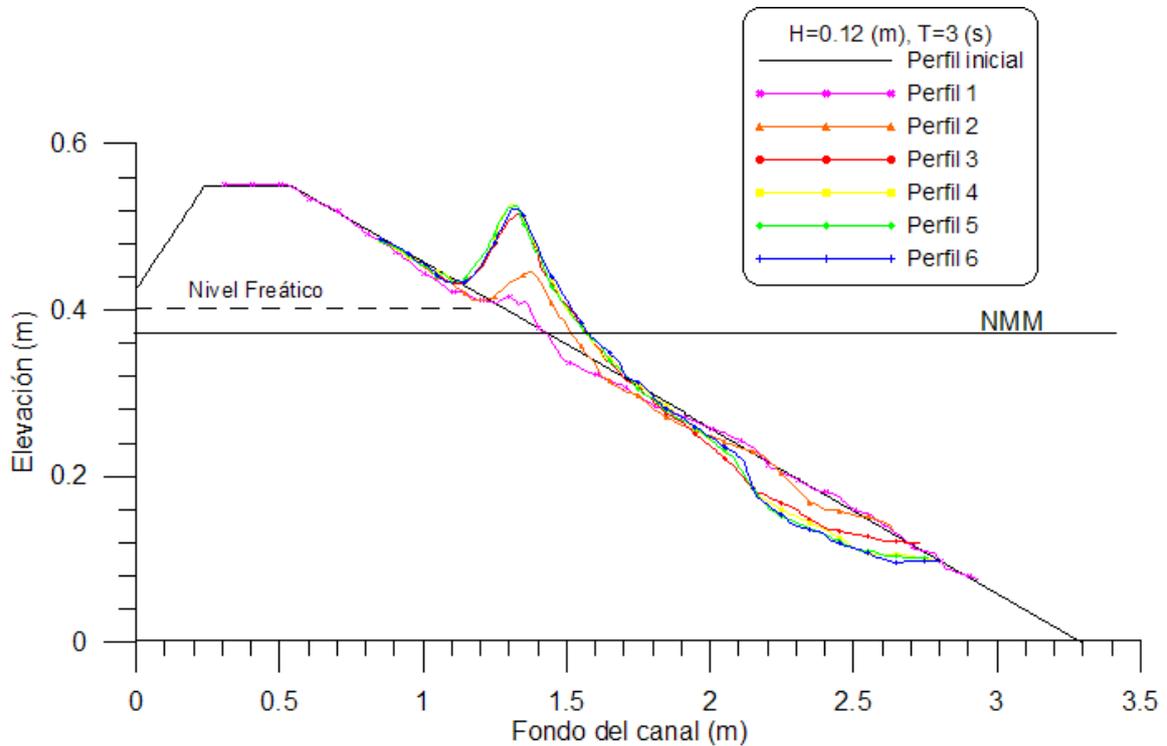


Figura C. 36 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 3$ s y altura $H = 14$ cm.

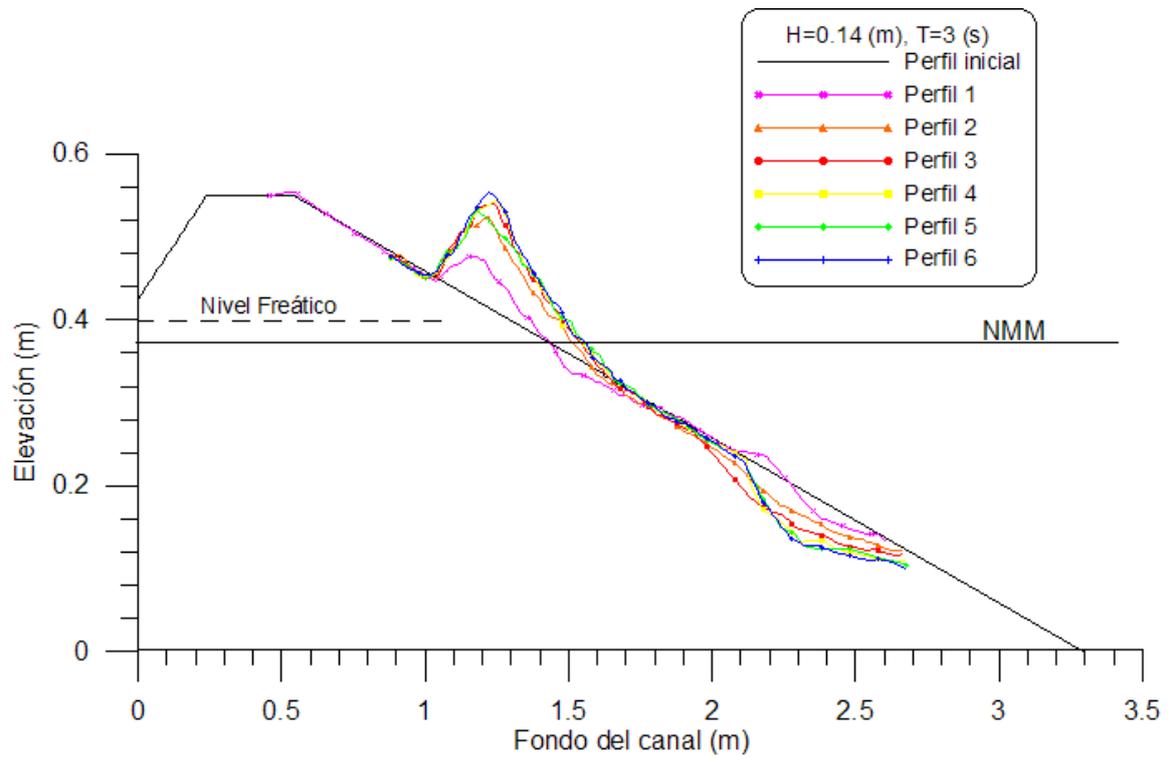


Figura C. 37 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 3$ s y altura $H=16$ cm.

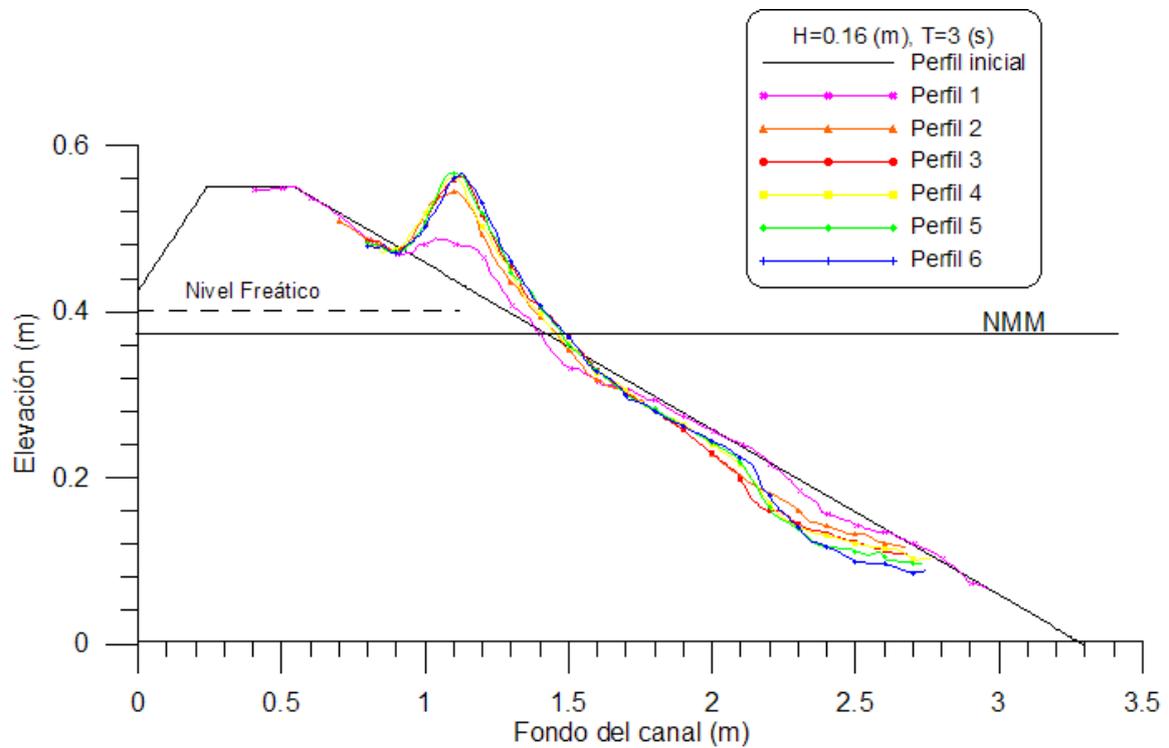


Figura C. 38 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 3$ s y altura $H=18$ cm.

C.1.2.4 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 4$ s

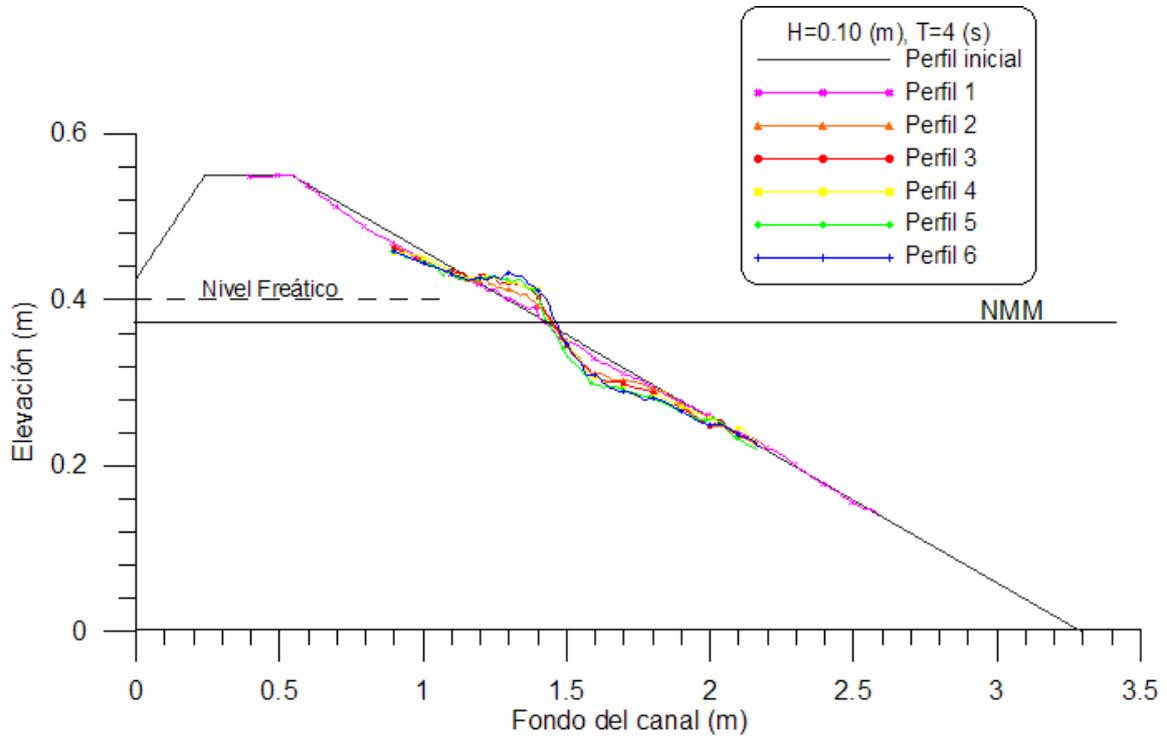


Figura C. 39 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 4$ s y altura $H = 10$ cm.

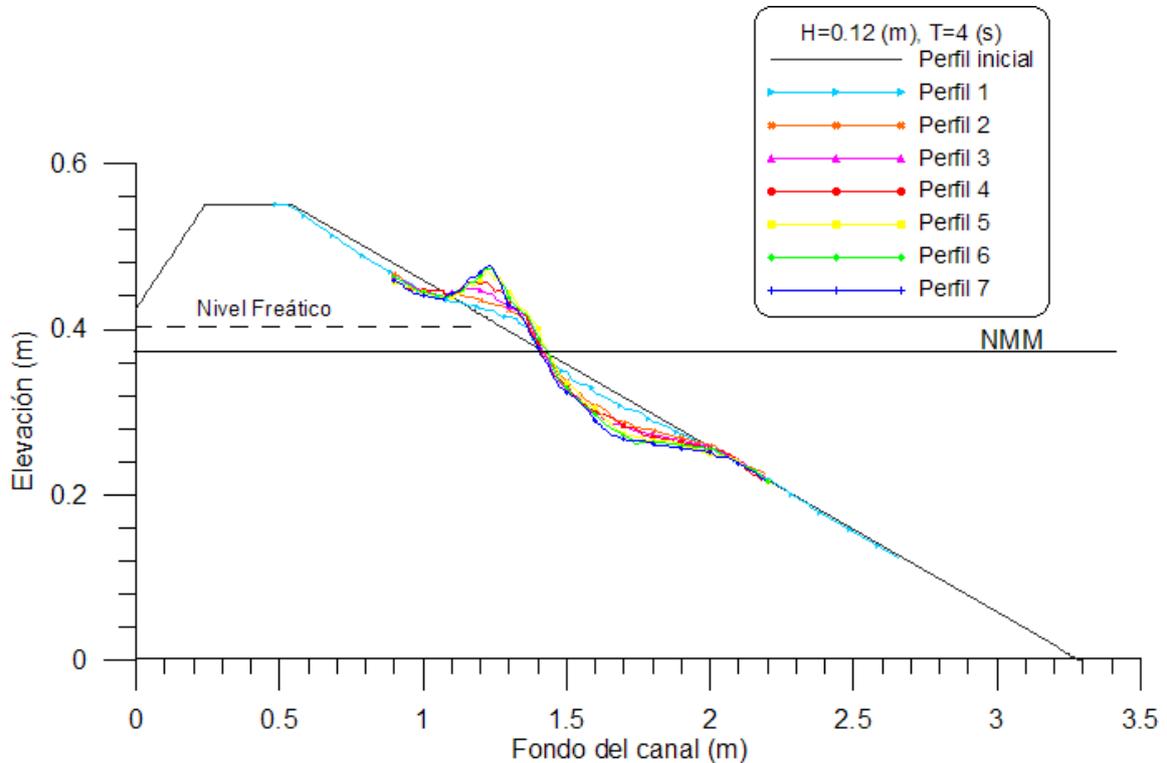


Figura C. 40 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 4$ s y altura $H = 12$ cm.

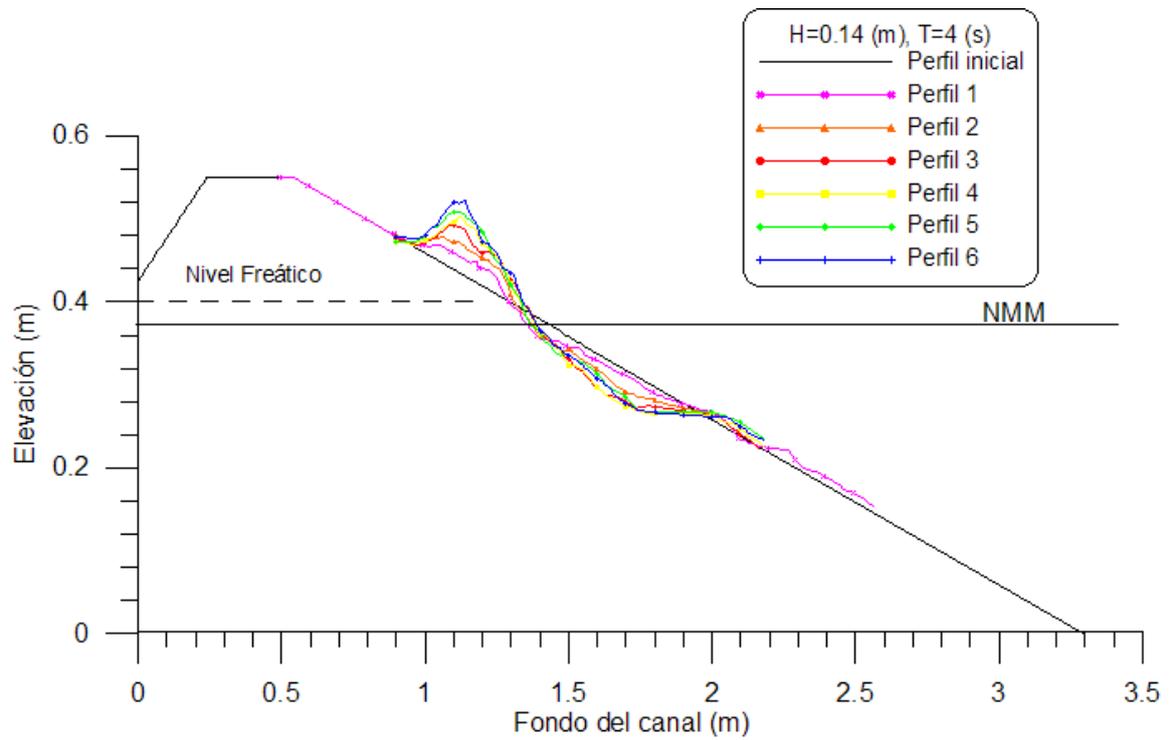


Figura C. 41 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 4s$ y altura $H = 14cm$.

C.2 Evolución del perfil de equilibrio para un periodo constante y variación de la altura de ola

En esta sección se presentan las graficas de la evolución del perfil transversal de las playas de material granular ensayadas cuando estas han alcanzado el perfil de equilibrio. Estas graficas tienen la finalidad de observar el comportamiento de los modelos al aumentar la altura, así mismo determinar que ocurre con la geometría de la berma en dichas condiciones.

C.2.1 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 1$ s

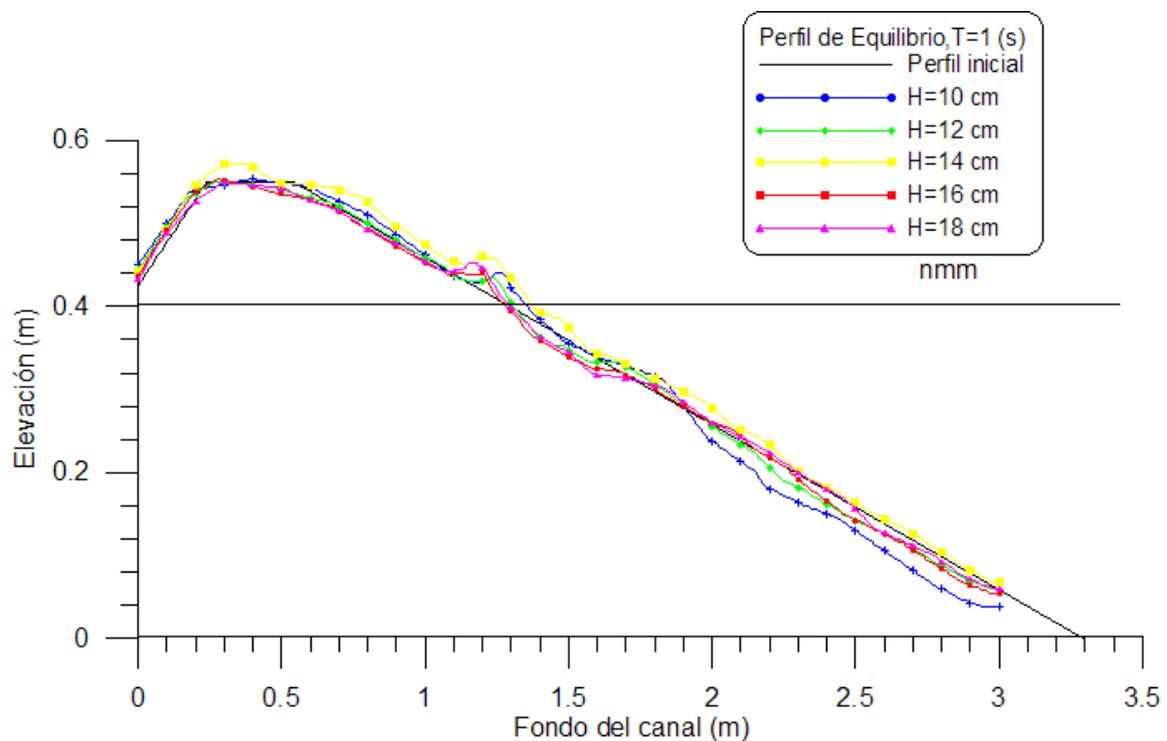


Figura C. 42 Perfil de equilibrio $T=1s$, caso 1.

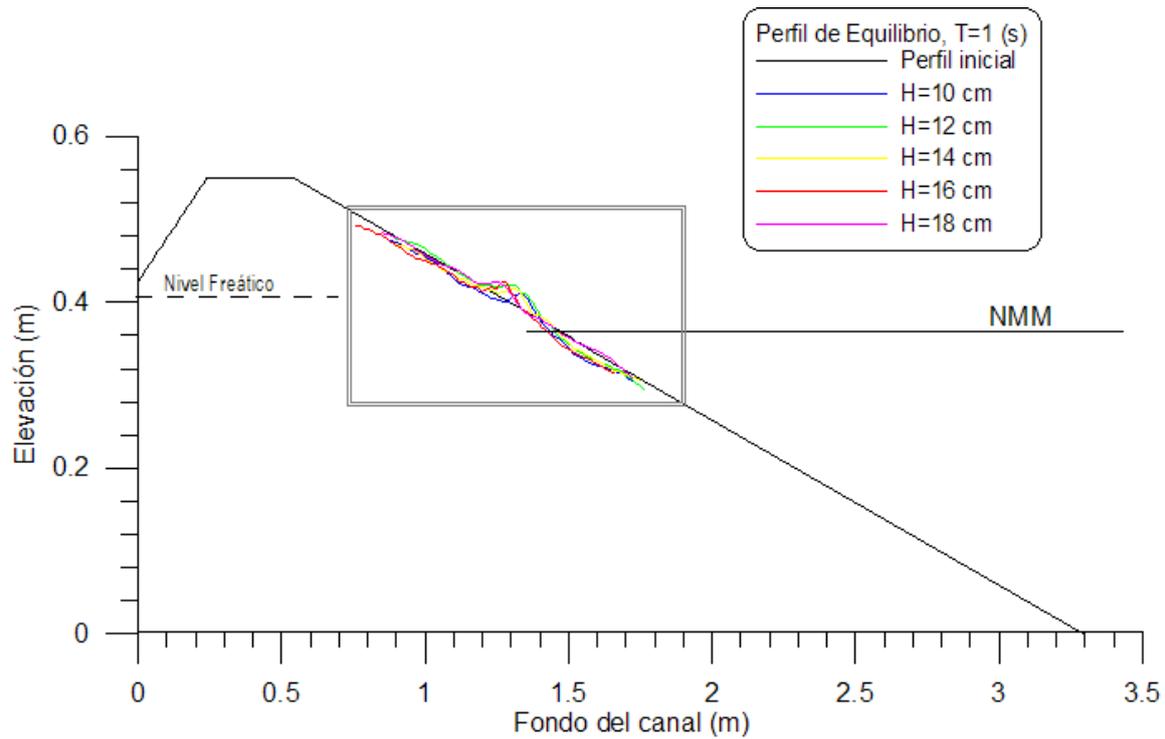


Figura C. 43 Perfil de equilibrio $T=1s$, caso 2.

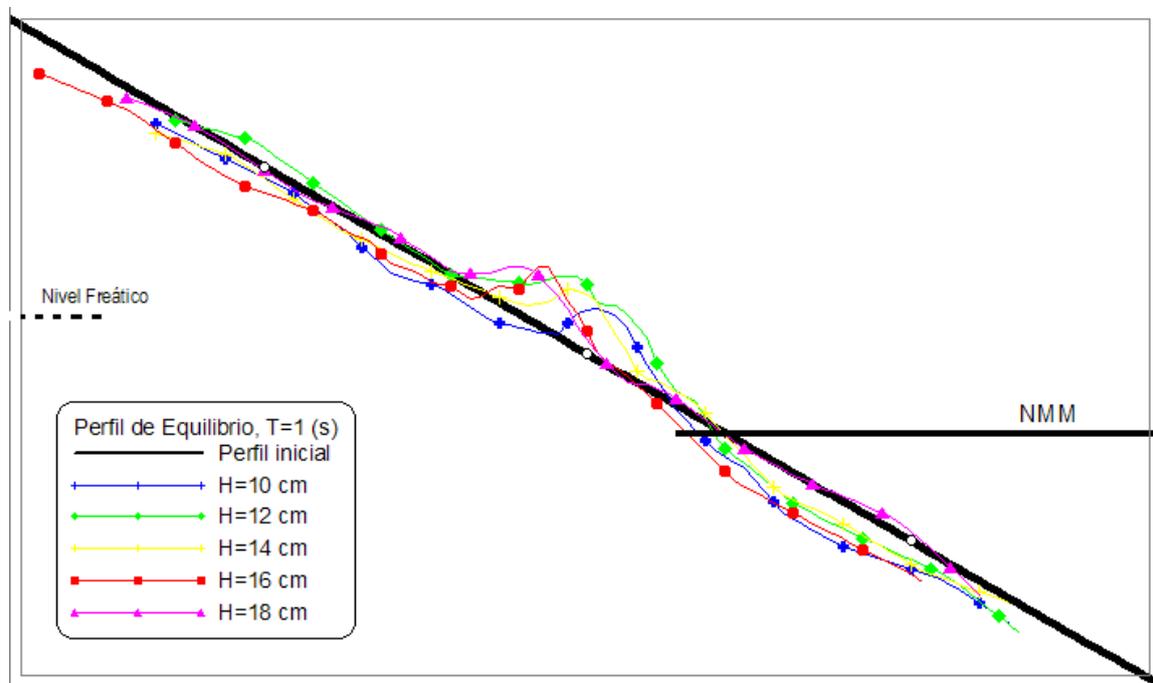


Figura C. 44 Acercamiento de la *Error! No se encuentra el origen de la referencia.*

C.2.2 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 2$ s

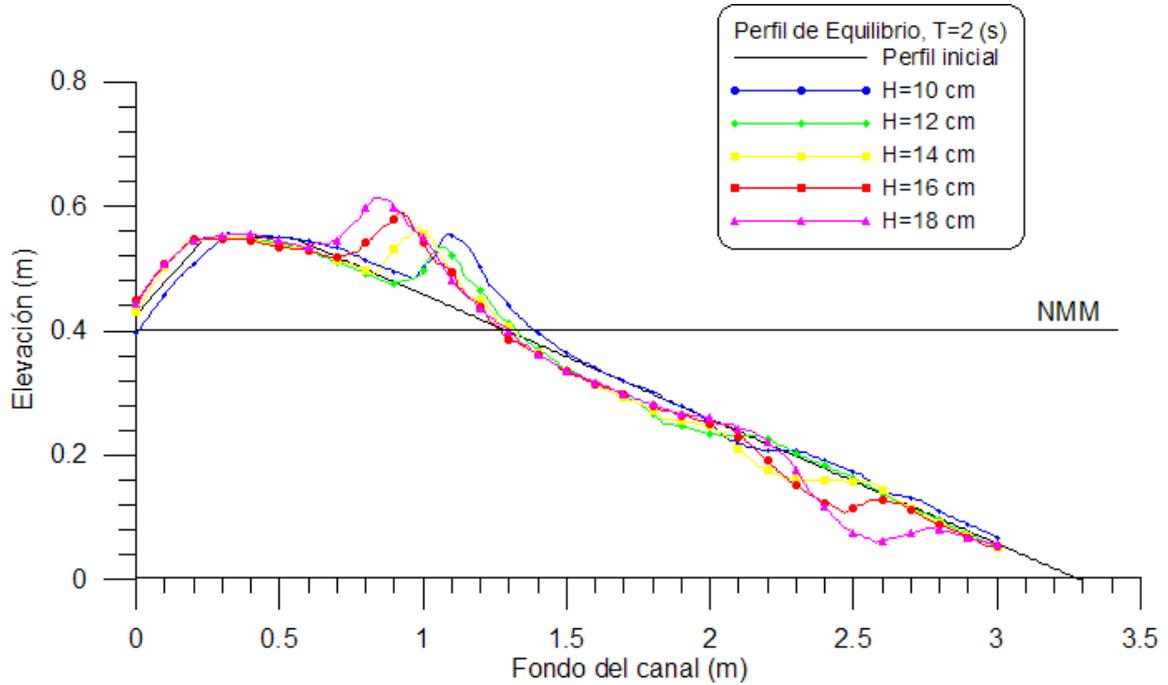


Figura C. 45 Perfil de equilibrio $T=2s$, caso 1.

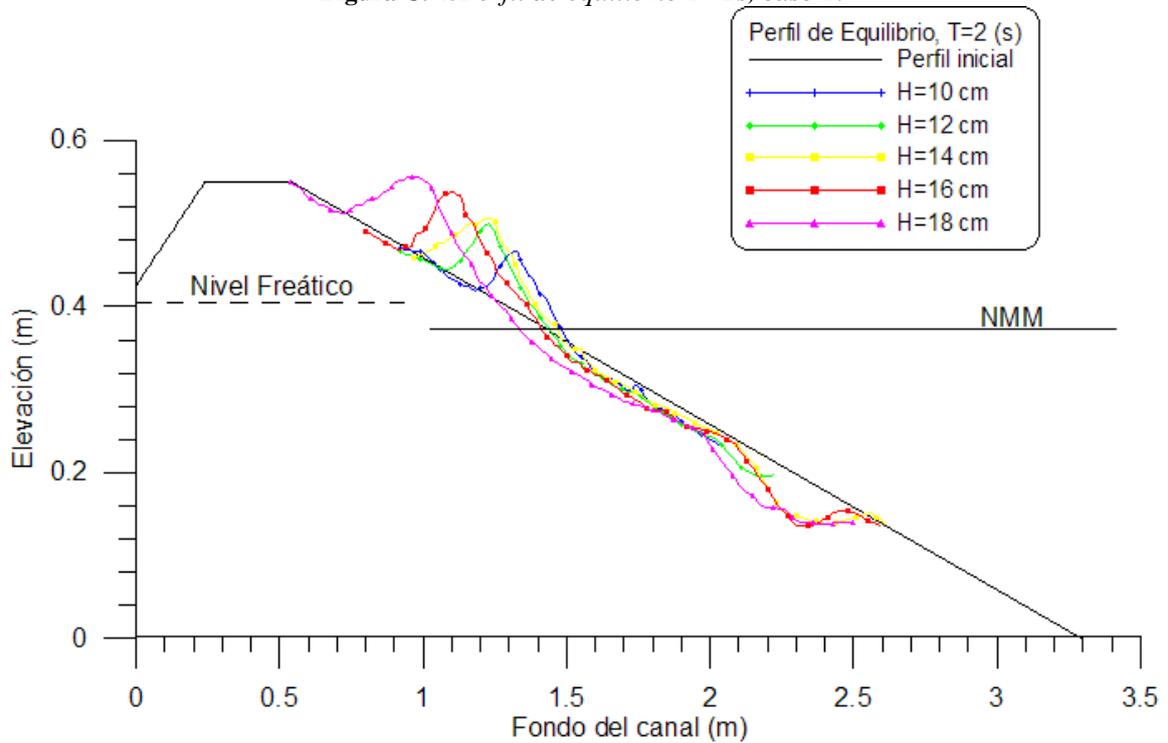


Figura C. 46 Perfil de equilibrio $T=2s$, caso 2.

C.2.3 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 3$ s

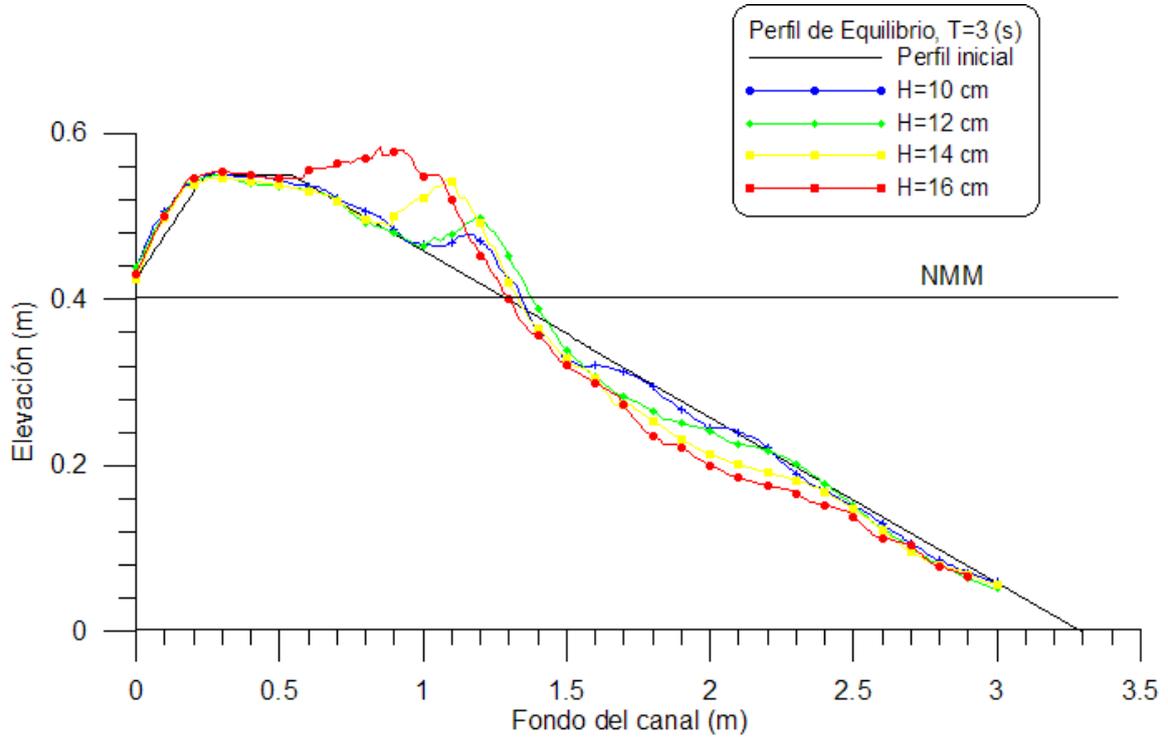


Figura C. 47 Perfil de equilibrio $T=3s$, caso 1.

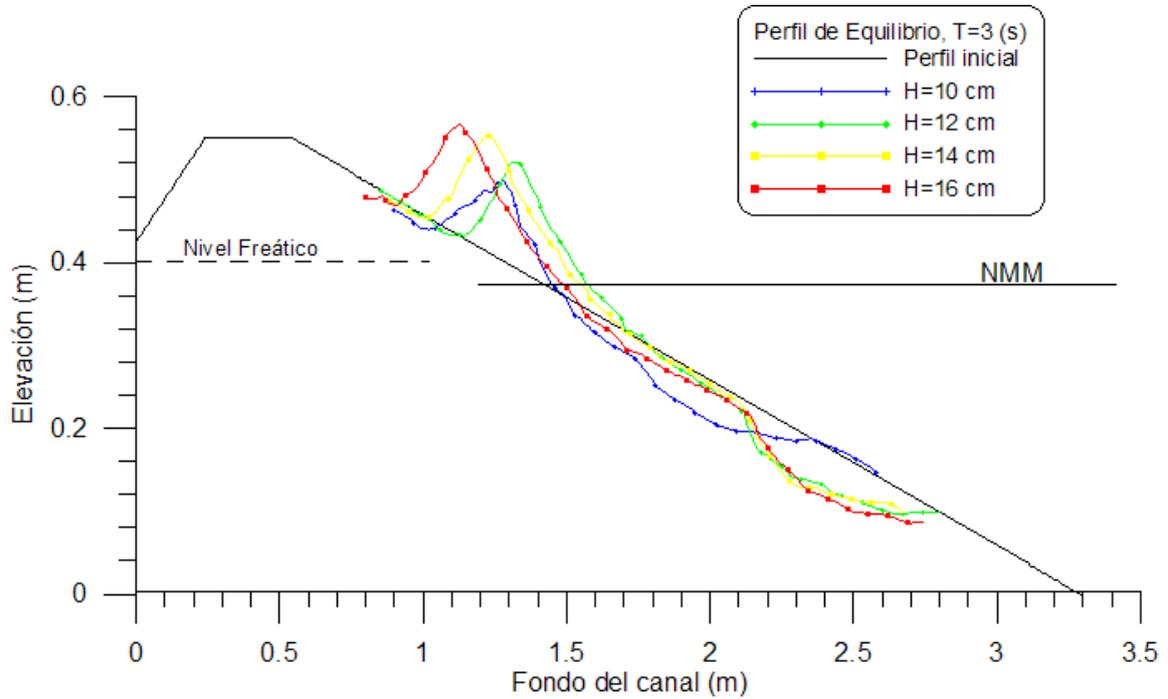


Figura C. 48 Perfil de equilibrio $T=3s$, caso 2.

C.2.4 Variación del perfil, para un tren de olas con período $T = 4s$

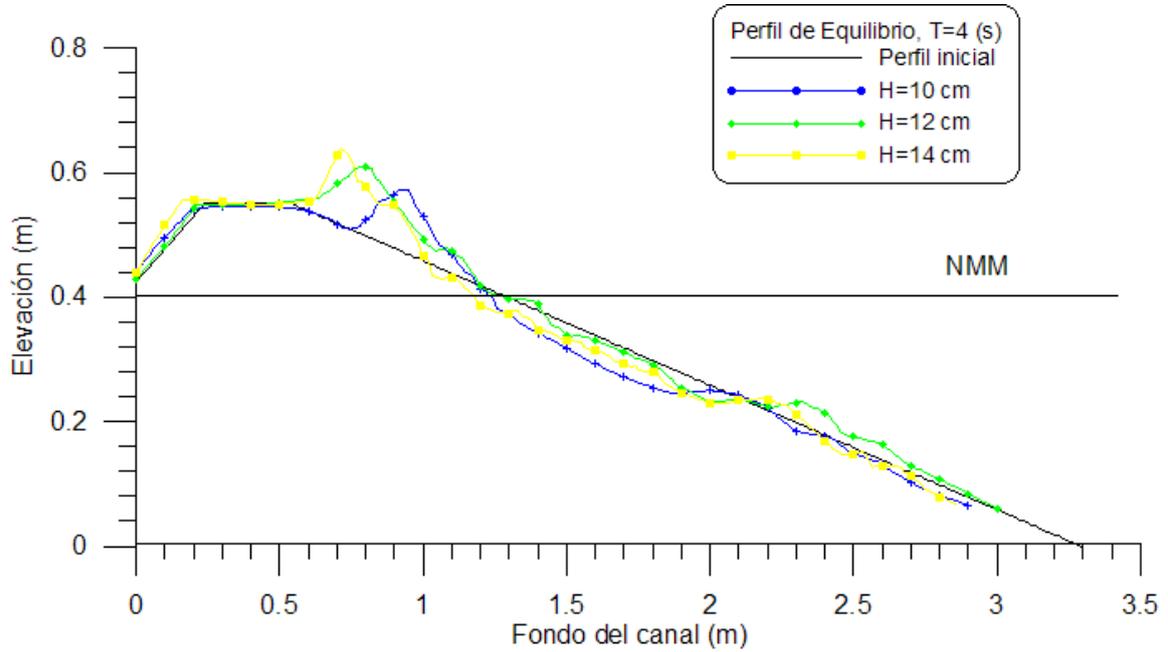


Figura C. 49 Perfil de equilibrio $T=4s$, caso 1.

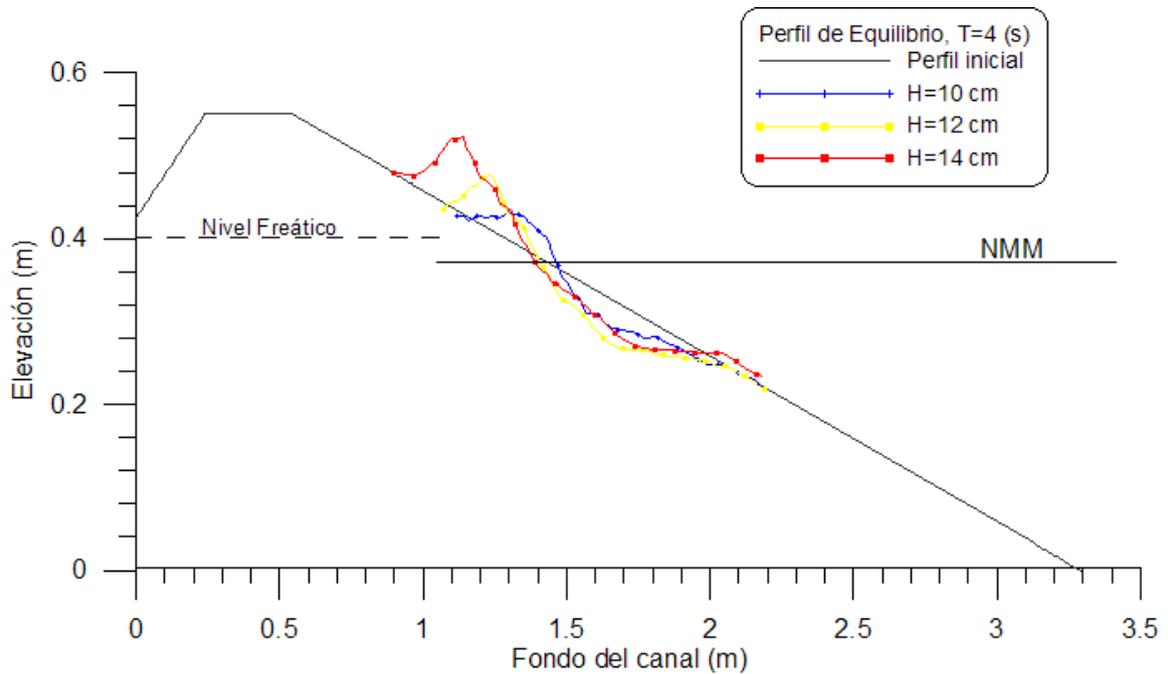


Figura C. 50 Perfil de equilibrio $T=4s$, caso 2.

C.3 Comparación de los perfiles de equilibrio entre los ensayos del caso 1 y los del caso 2

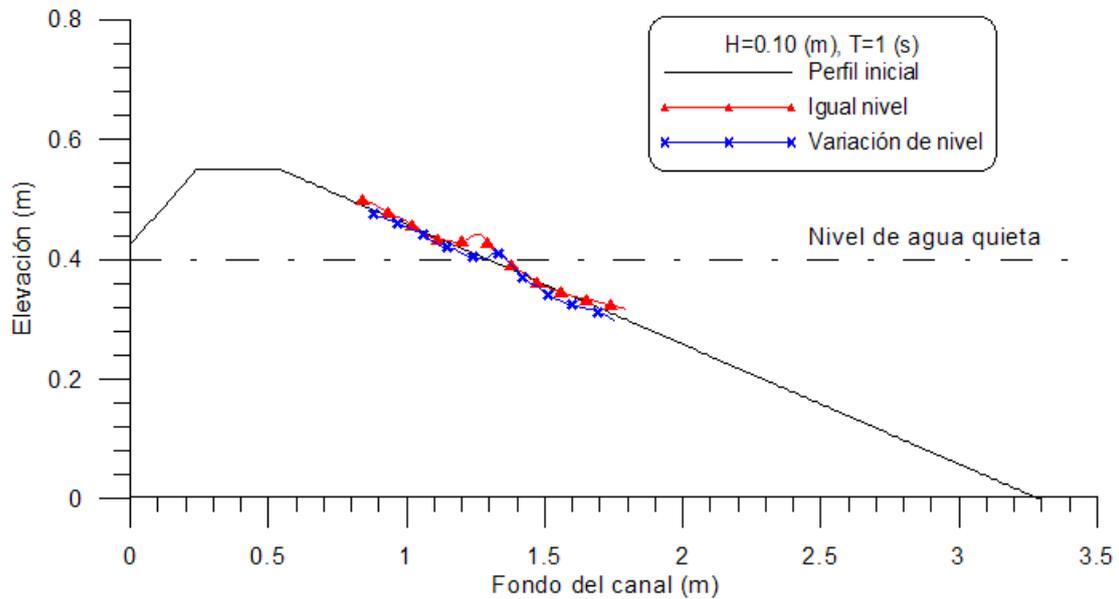


Figura C. 51 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=1$ s y $H=10$ cm.

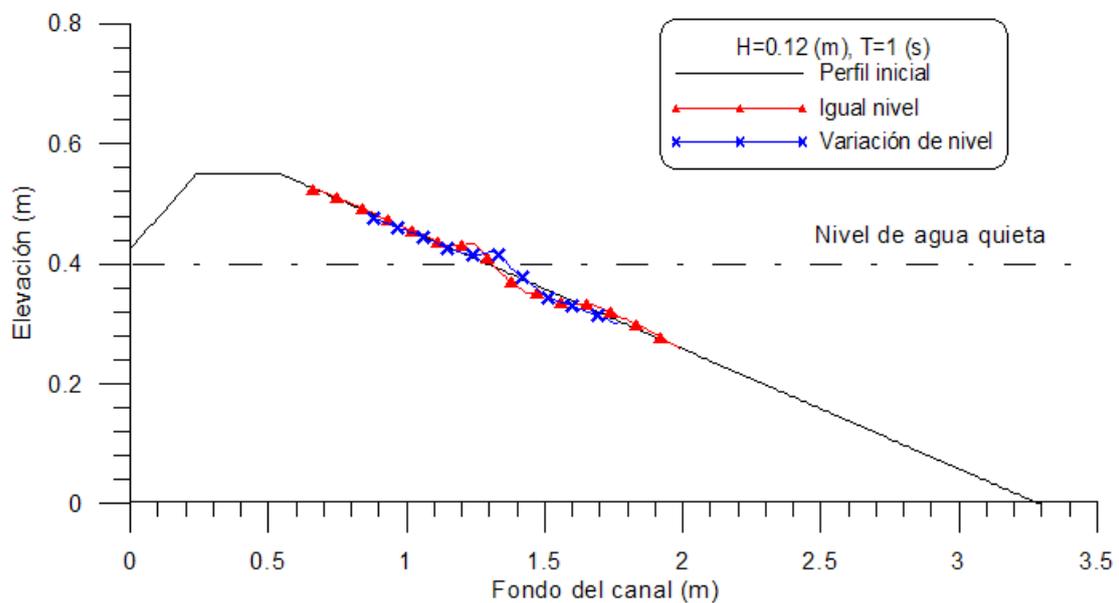


Figura C. 52 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=1$ s y $H=12$ cm.

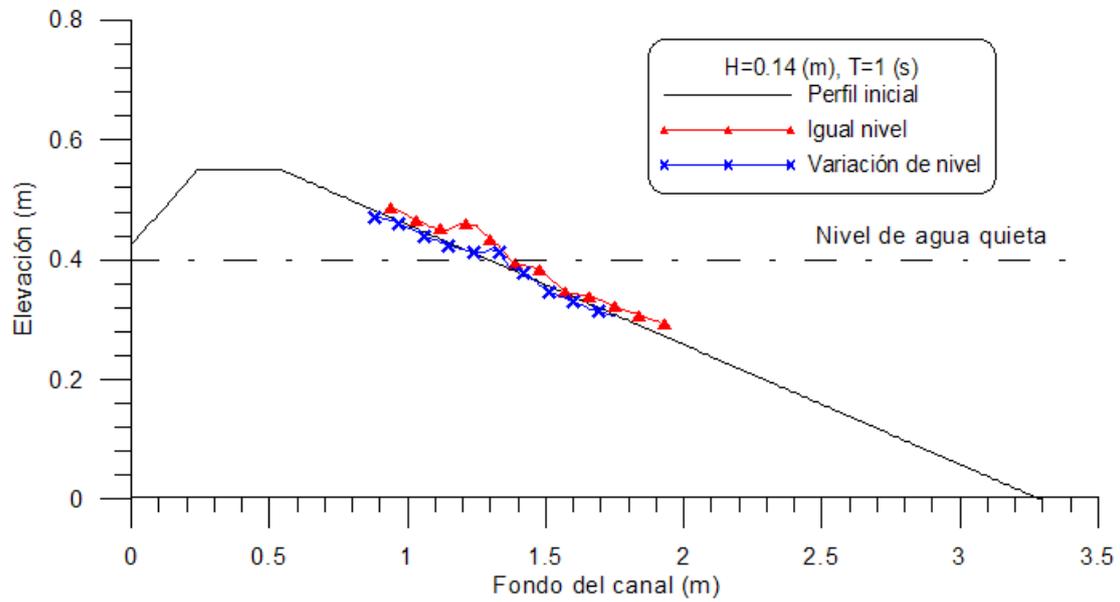


Figura C. 53 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=1$ s y $H=14$ cm.

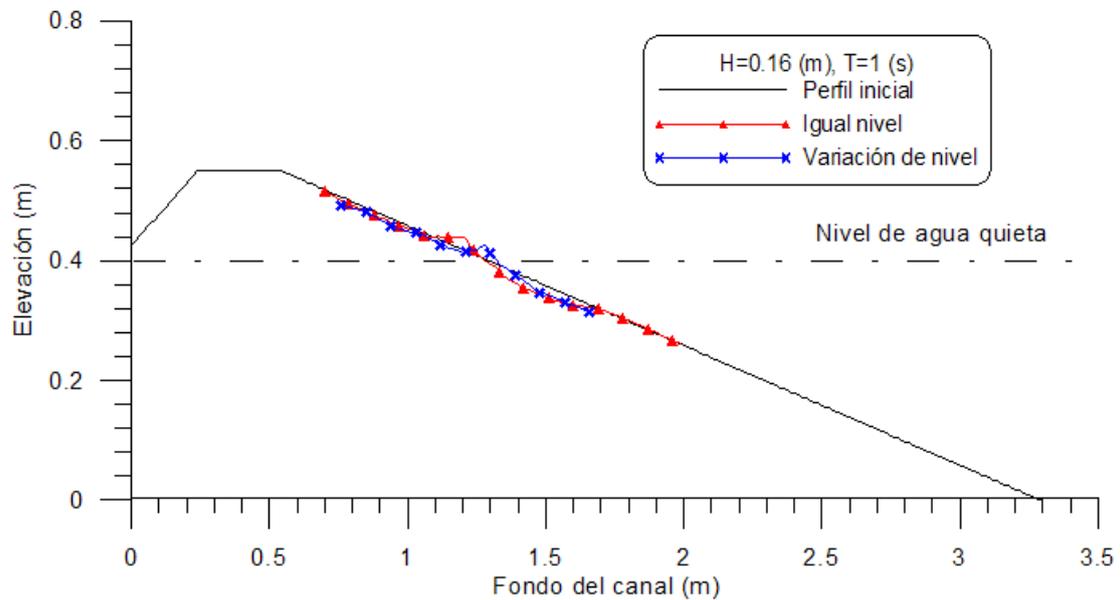


Figura C. 54 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=1$ s y $H=16$ cm.

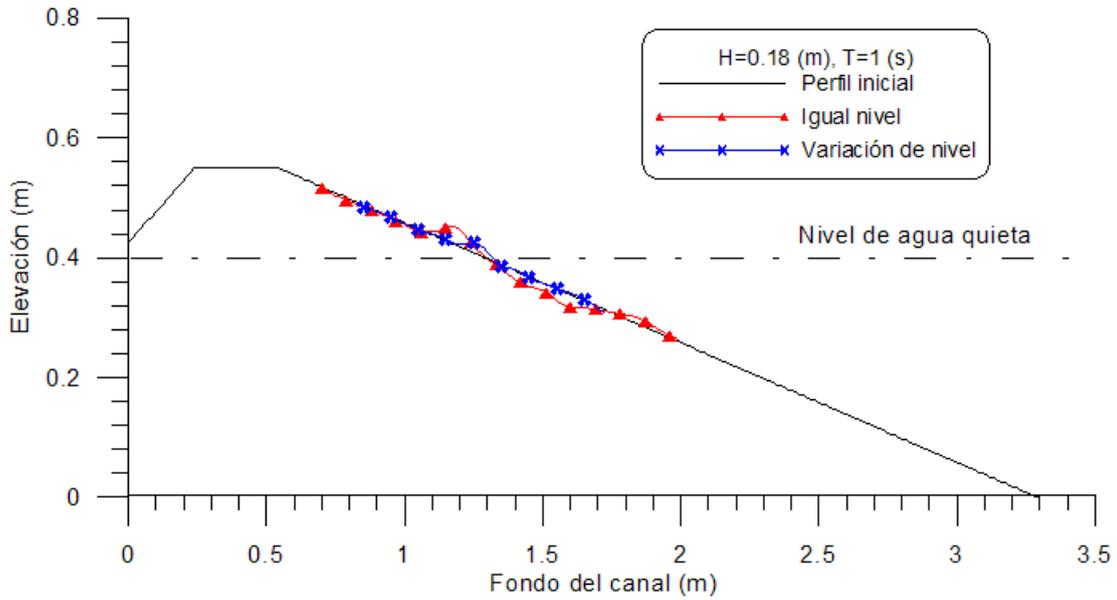


Figura C. 55 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para T=1s y H=18cm.

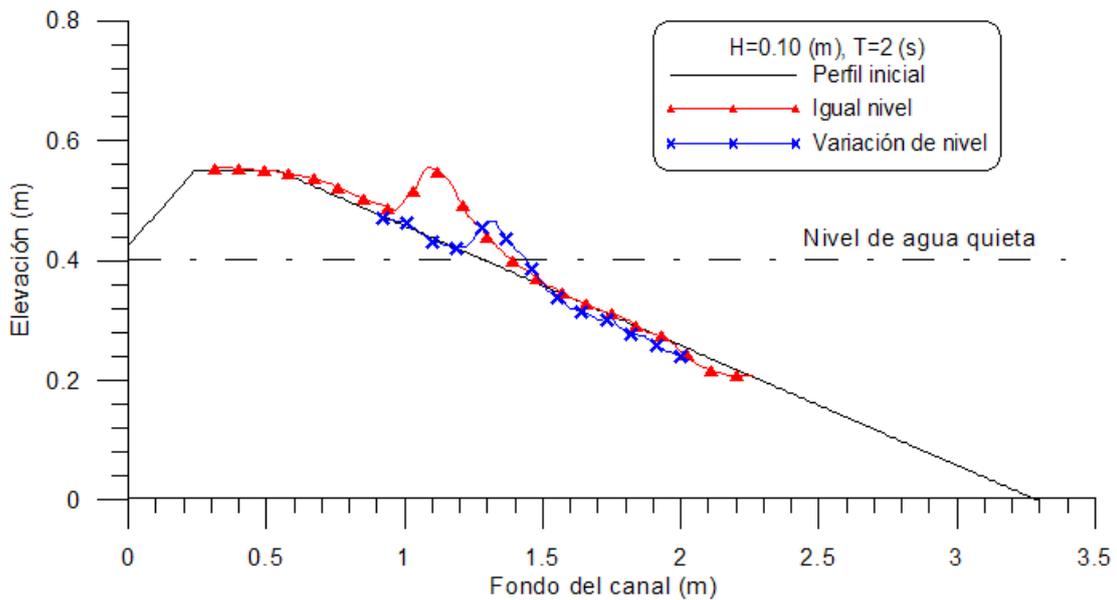


Figura C. 56 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para T=2s y H=10cm.

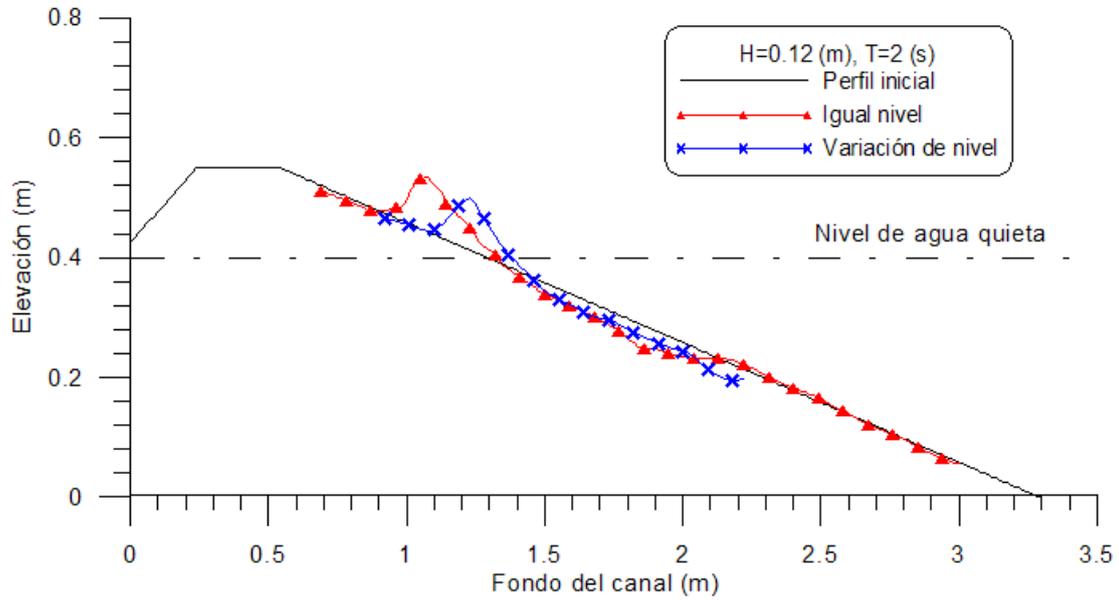


Figura C. 57 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=2s$ y $H=12cm$.

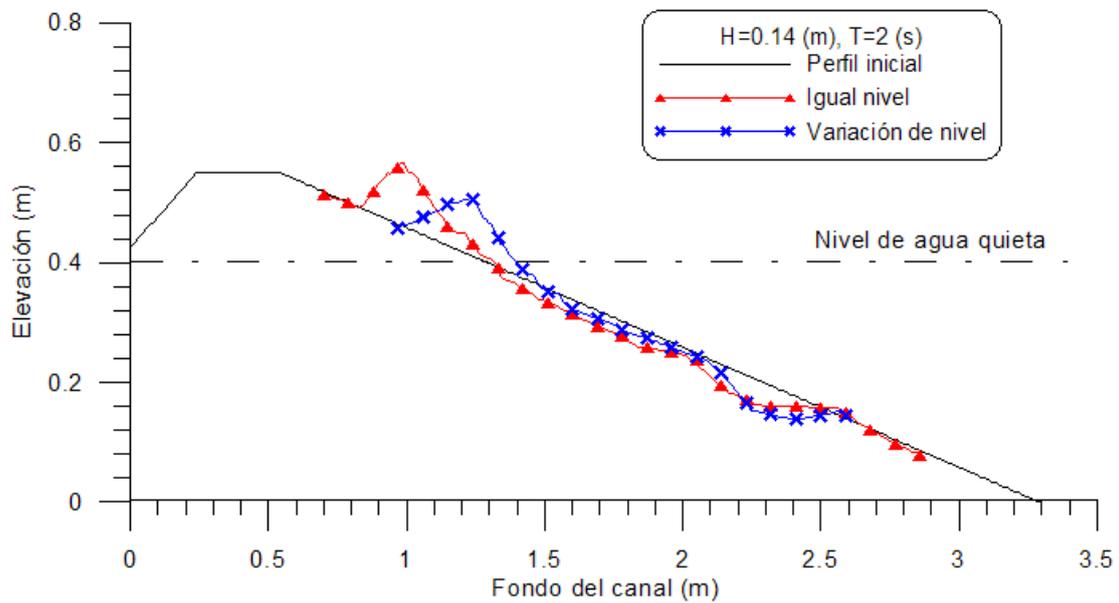


Figura C. 58 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=2s$ y $H=14cm$.

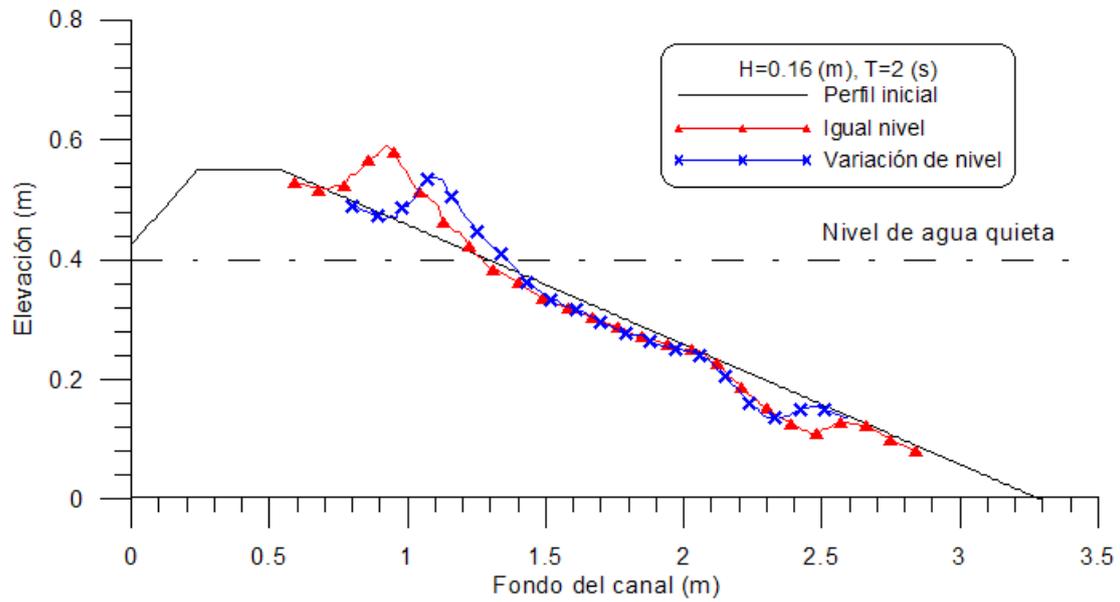


Figura C. 59 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=2$ s y $H=16$ cm.

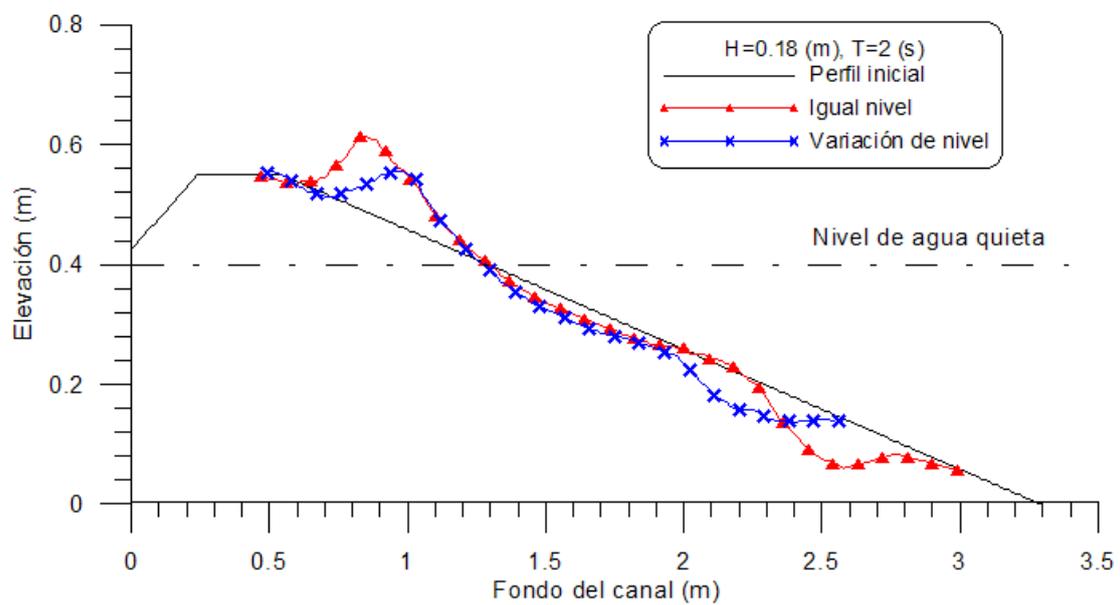


Figura C. 60 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=2$ s y $H=18$ cm.

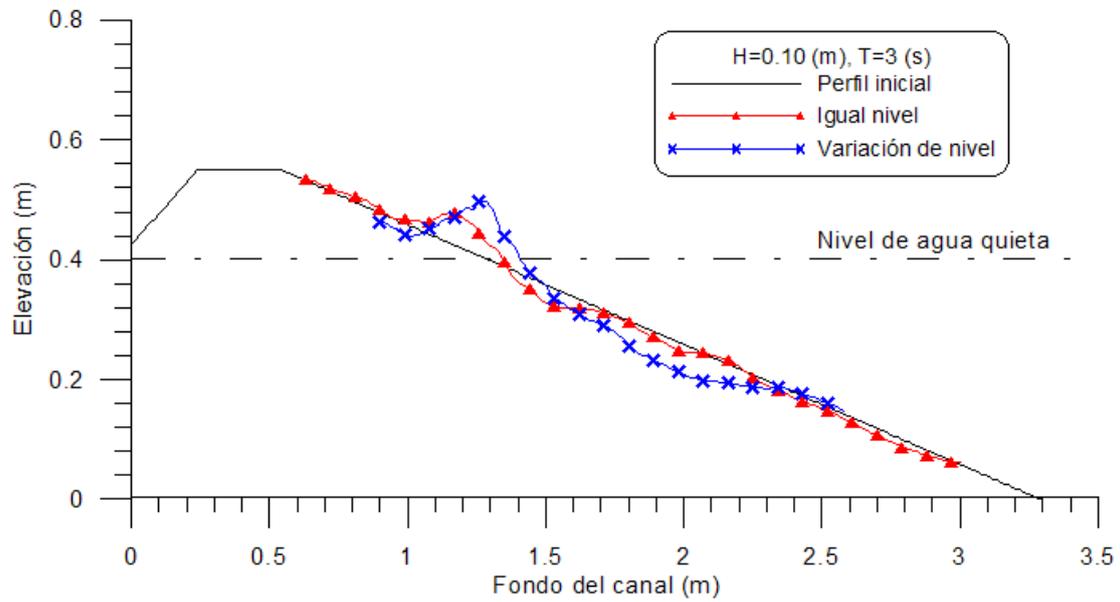


Figura C. 61 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=3$ s y $H=10$ cm.

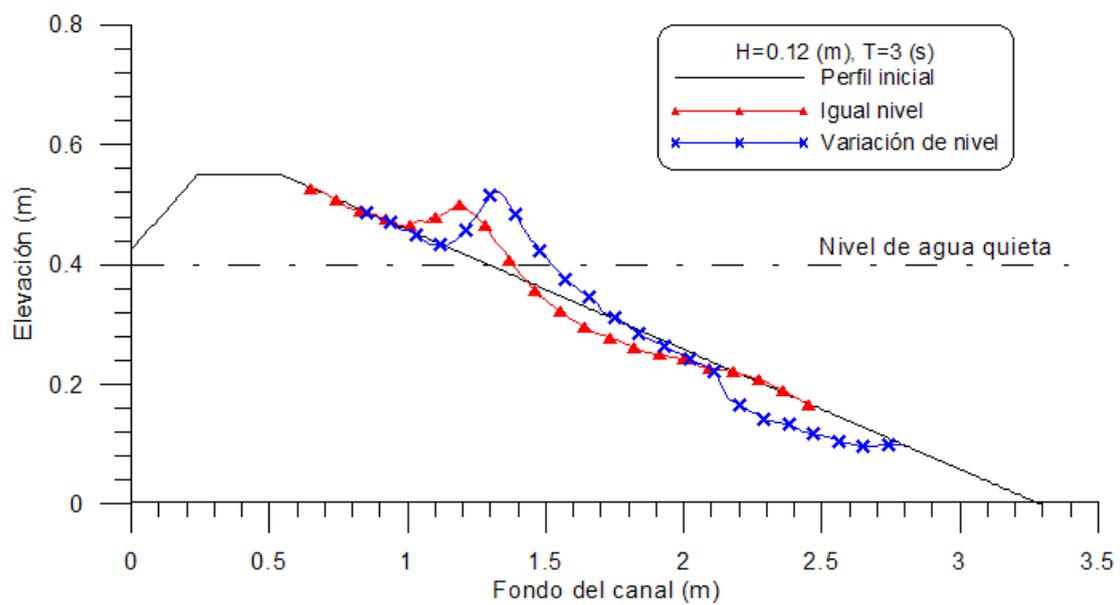


Figura C. 62 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=3$ s y $H=12$ cm.

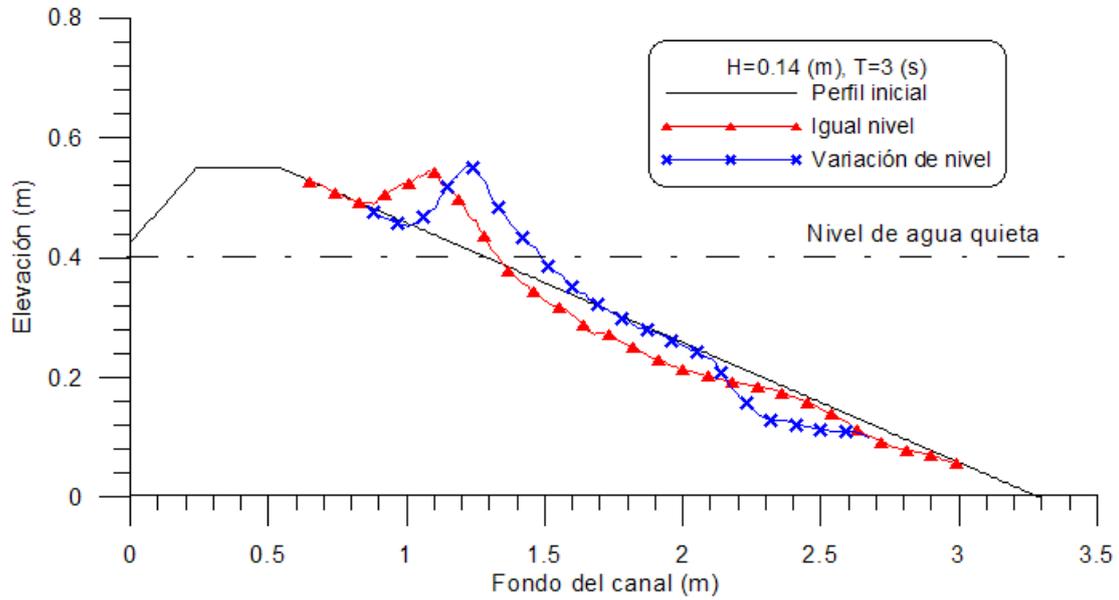


Figura C. 63 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=3$ s y $H=14$ cm.

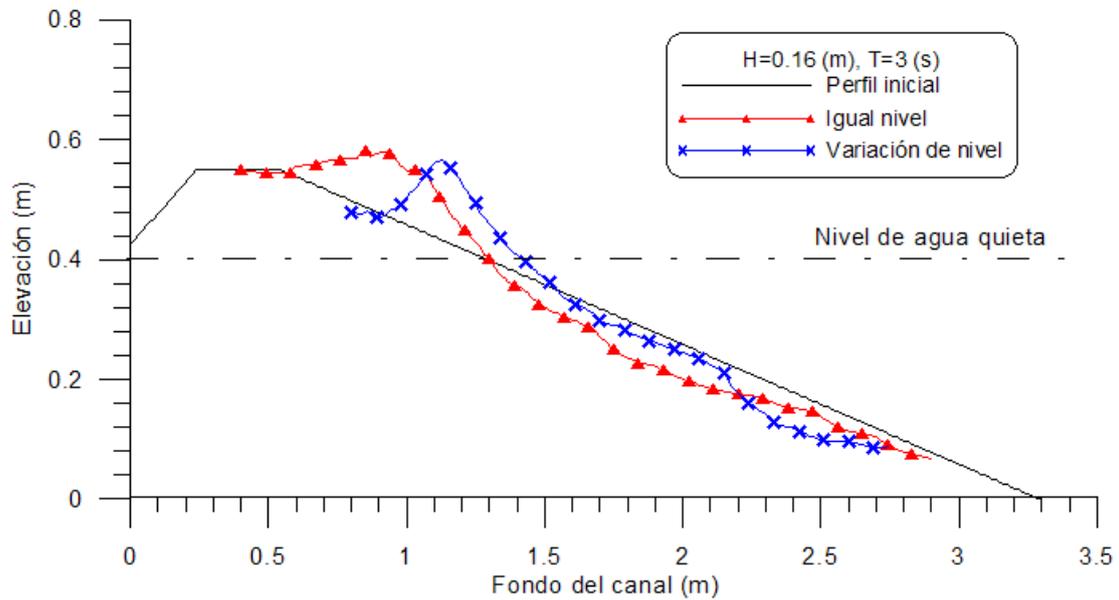


Figura C. 64 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=3$ s y $H=16$ cm.

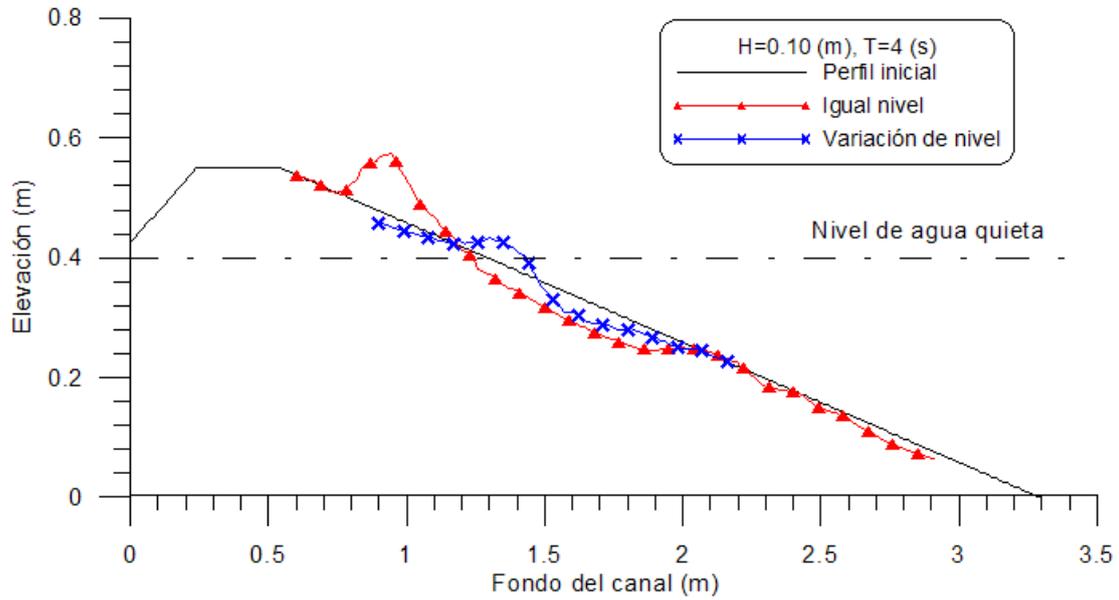


Figura C. 65 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=4$ s y $H=10$ cm.

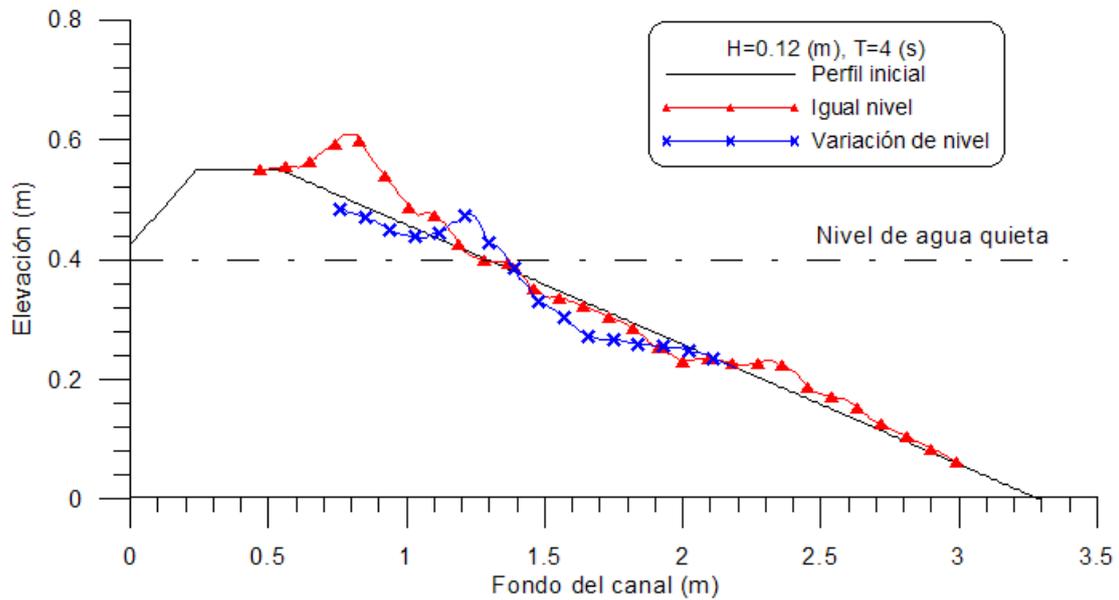


Figura C. 66 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=4$ s y $H=12$ cm.

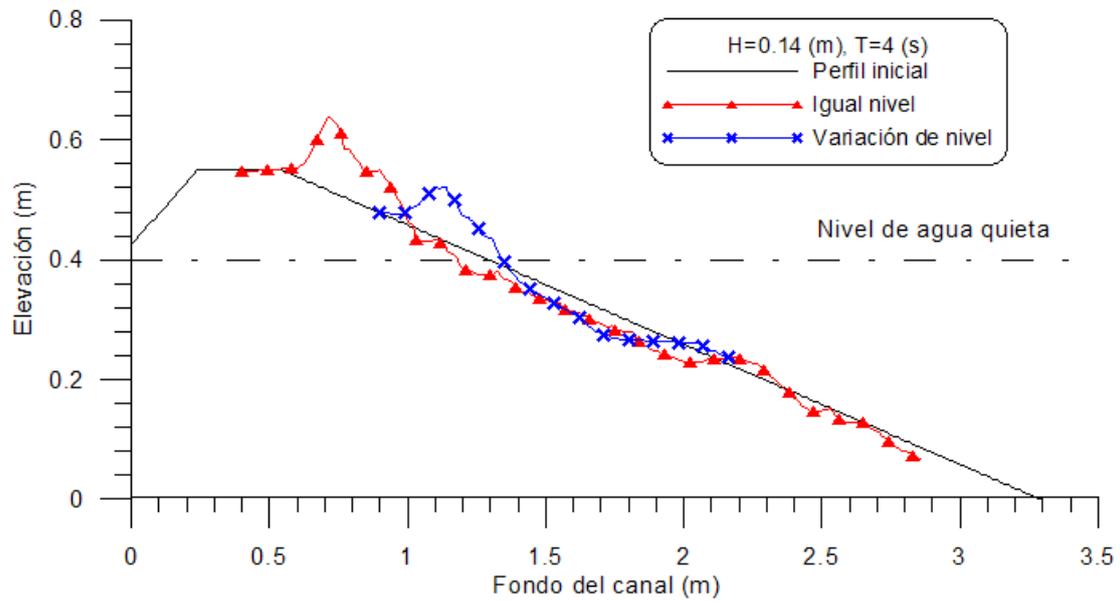


Figura C. 67 Comparación de perfiles de equilibrio entre el caso 1 y caso 2 para $T=4s$ y $H=14cm$.

C.4 Evolución de la reflexión

En este apartado se presentan las graficas de cómo evoluciona el coeficiente de reflexión a lo largo de cada una de las pruebas realizadas en el laboratorio, se observa lo que ya se ha mencionado en el capítulo 3 de este trabajo, que las playas experimentadas son reflexivas.

Las Figura C. 68 y Figura C. 72 corresponden a condiciones de oleaje con periodo $T = 1$ s y alturas de ola $H = 10, 12, 14$ y 18 cm, las Figura C. 69 y Figura C. 73 corresponden a condiciones de oleaje con periodo $T = 2$ s y alturas de ola $H = 10, 12, 14$ y 18 cm la Figura C. 70 y Figura C. 74 corresponden a condiciones de oleaje con periodo $T = 1$ s y alturas de ola $H = 10, 12, 14$ y 16 cm y finalmente las Figura C. 71 y Figura C. 75 a condiciones de oleaje con periodo $T = 1$ s y alturas de ola $H = 10, 12$ y 14 cm.

Para los ensayos con periodo $T=1$ s y alturas de ola $H = 10, 12$ y 14 cm, se obtuvo un coeficiente de reflexión de alrededor de 0.15 al inicio de los ensayos, sin embargo al paso del tiempo y conforme se va deformando el perfil de la playa este valor sufre cambios. La evolución del coeficiente de reflexión presenta un comportamiento diferente entre los ensayos sin variación del nivel freático y los ensayos en donde existe una variación de nivel, para el primer caso el coeficiente de reflexión tiene una tendencia en orden creciente llegando a tener una estabilidad rápida en valores que no superan al 0.2 , en cambio para los ensayos con afectación del nivel freático tienen un comportamiento del tipo oscilante primero orden decreciente luego creciente y nuevamente se repite este comportamiento tardando mucho mas tiempo en llegar a un valor constante además que el valor del coeficiente de reflexión no supera el valor que se tenía al inicio de los ensayos. Para el caso de los ensayos de periodo $T=1$ s y altura de ola $H=16$ y 18 cm el comportamiento es semejante en cuanto a que en los ensayos sin variación en el nivel freático el comportamiento primero es en orden creciente y en los ensayos con influencia del nivel freático es en orden decreciente sin embargo para los dos se presenta el comportamiento en oscilación, es decir aumentan y disminuyen los valores conforme el tren de oleaje deforma el perfil de la playa pero al igual que en los alturas anteriores la reflexión es mayor en los ensayos donde se tiene el nivel freático igual al nivel medio del mar.

Para los ensayos con periodo $T=2$ s se presentan valores iniciales del coeficiente de reflexión de alrededor de 0.4 y 0.45 para los ensayos sin influencia del nivel freático y de 0.3 a 0.35 en los ensayos donde existe una diferencia de niveles. Para los dos casos el CRT varia aumentando y disminuyendo según varia también el perfil transversal de la playa para el primer caso la variación es primero en orden decreciente y para el segundo caso es en orden creciente sin embargo es importante hacer notar que para ambos casos el valor del coeficiente de reflexión se estabiliza en valores que oscilan alrededor de 0.3 , siendo únicamente de mayor valor el que se obtiene para el ensayo con altura de ola $H=10$ cm y con influencia del nivel freático.

Con los ensayos de periodo de ola $T=3$ s se observa que para los dos casos el comportamiento del coeficiente de reflexión es oscilante pero en ambas situaciones al inicio

el valor varia en orden decreciente y mas adelante en orden creciente. Sin embargo para los primeros ensayos se tiene que el CRT alcanza valores de .045 al inicio y finaliza con valores de alrededor de 0.35, lo cual es el comportamiento esperado para la evolución de la reflexión dado que la playa fue alcanzando su estado de equilibrio, y durante este proceso la playa puede pasar por etapas de mayor y menor reflexión hasta que encuentra su forma de mayor disipación de energía. Para el caso de los ensayos donde existe una variación del nivel freático el comportamiento es similar pero el valor final del coeficiente de reflexión es mayor al valor que se tenia inicialmente.

Finalmente en los ensayos con periodo $T=4s$ se observa que para los ensayos sin variación del nivel el valor inicial del CRT es de alrededor de 0.7 llegando a un valor de alrededor de 0.48 cuando la playa se estabiliza. Para los ensayos con variación de nivel se observa que la reflexión evoluciona de forma creciente llegando a estabilizarse en un valor muy alto de aproximadamente 0.8.

C.4.1 Ensayos con el nivel freático igual al nivel medio del mar

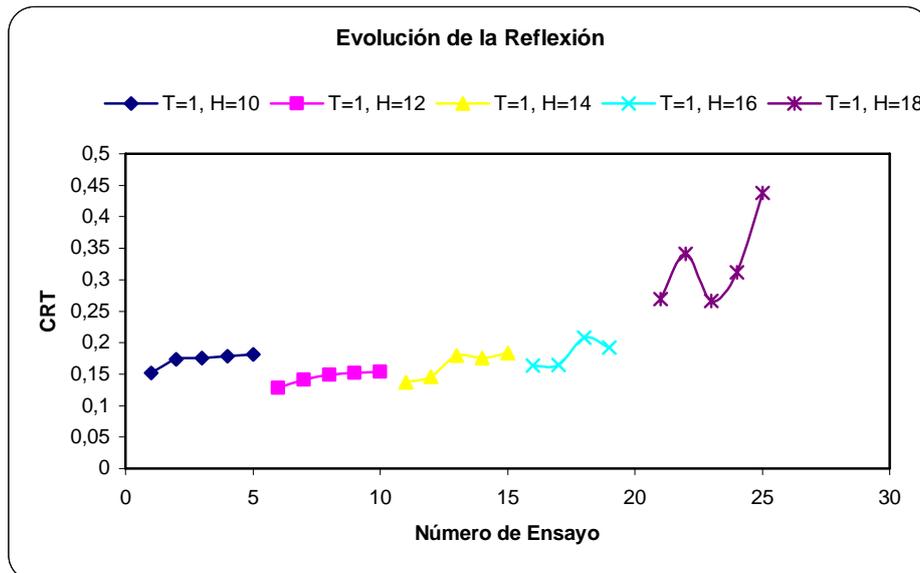


Figura C. 68 Evolución de la reflexión para los ensayos con periodo de ola $T=1$.

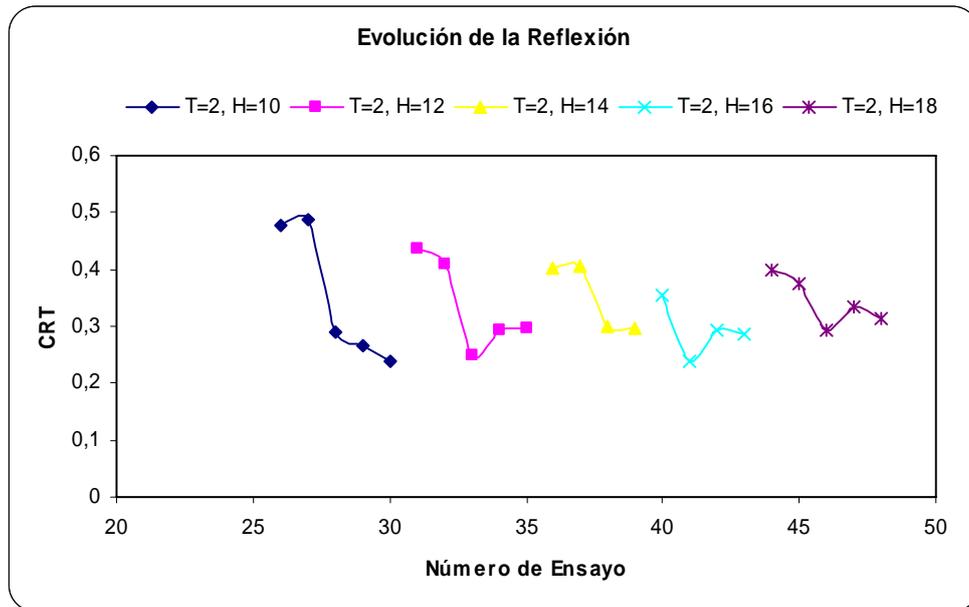


Figura C. 69 Evolución de la reflexión para los ensayos con periodo de ola $T=2$.

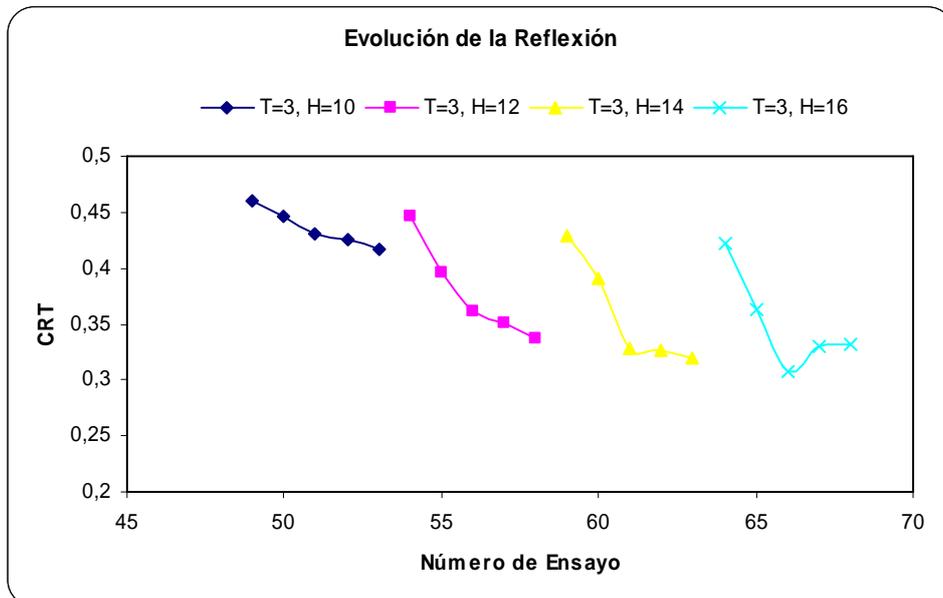


Figura C. 70 Evolución de la reflexión para los ensayos con periodo de ola $T=3$

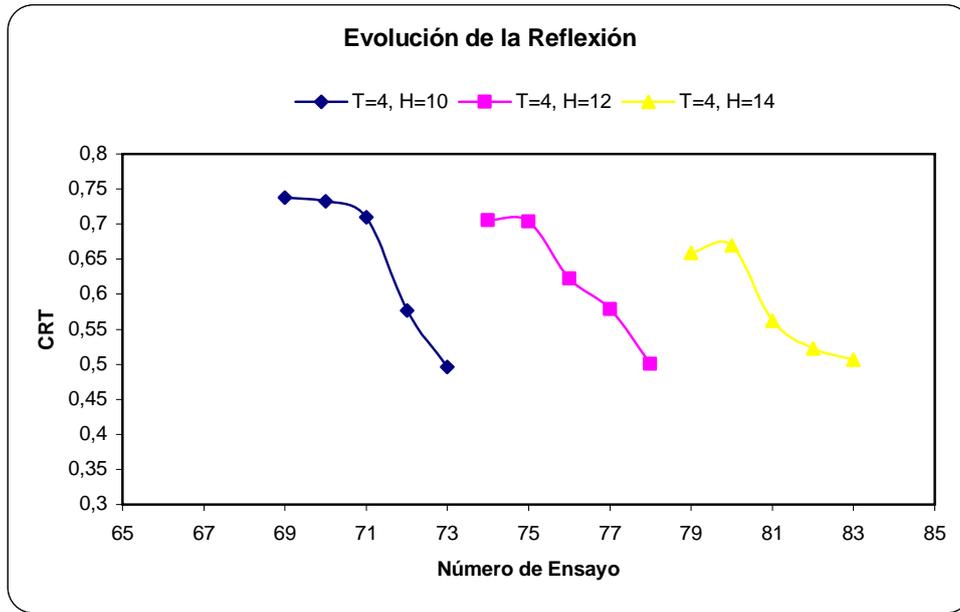


Figura C. 71 Evolución de la reflexión para los ensayos con periodo de ola $T=4$

C.4.2 Ensayos que incluyen la variación del nivel freático

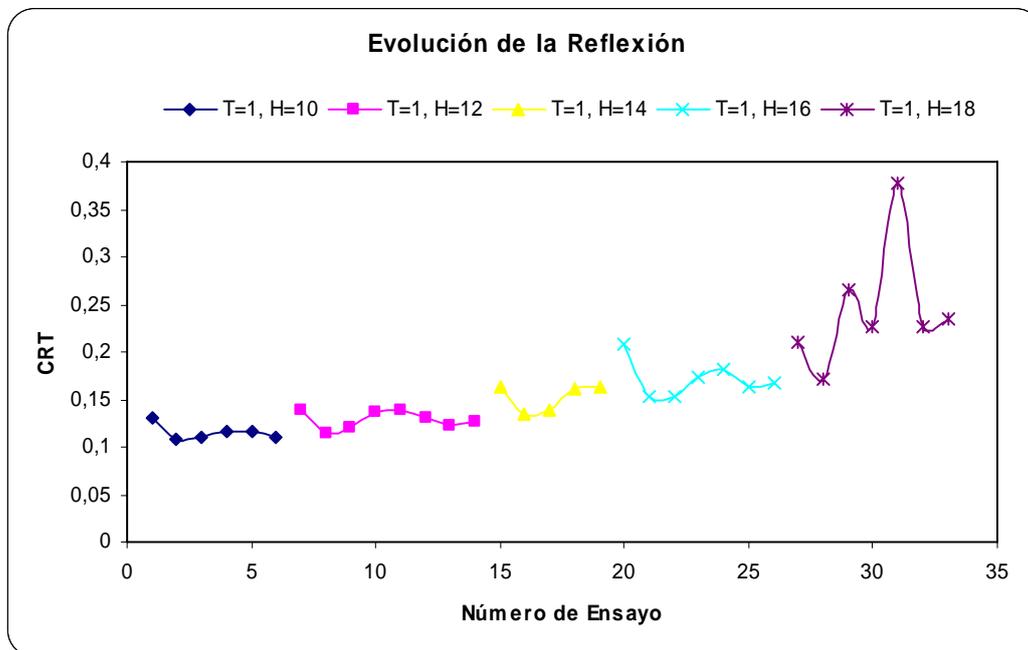


Figura C. 72 Evolución de la reflexión para los ensayos con periodo de ola $T=1$ y con variación del Nivel Freático.

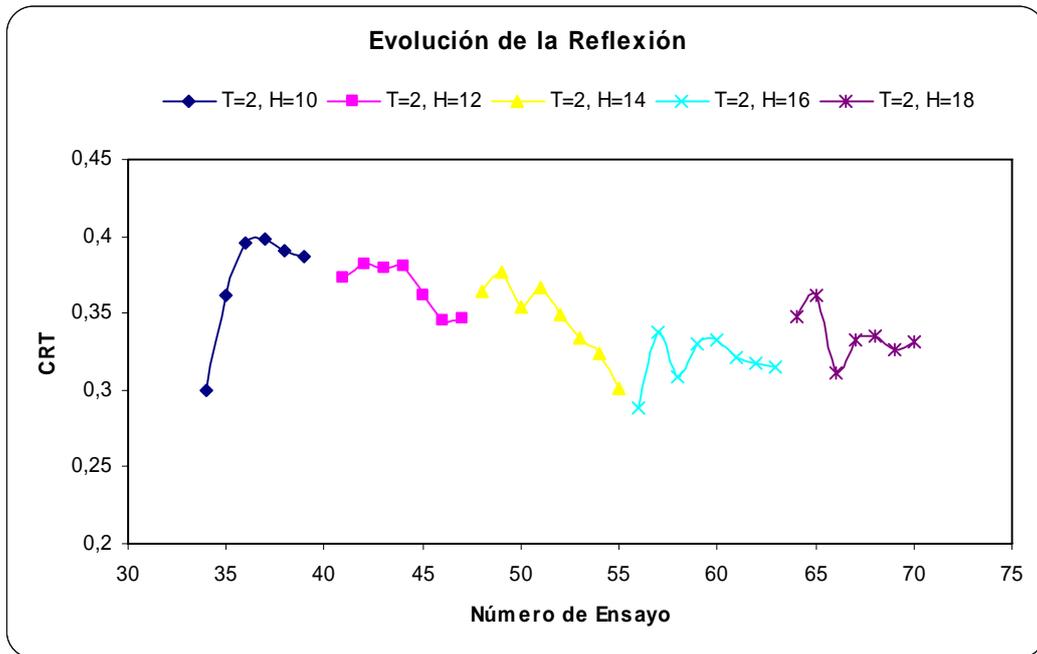


Figura C. 73 Evolución de la reflexión para los ensayos con periodo de ola T=2 y con variación del Nivel Freático.

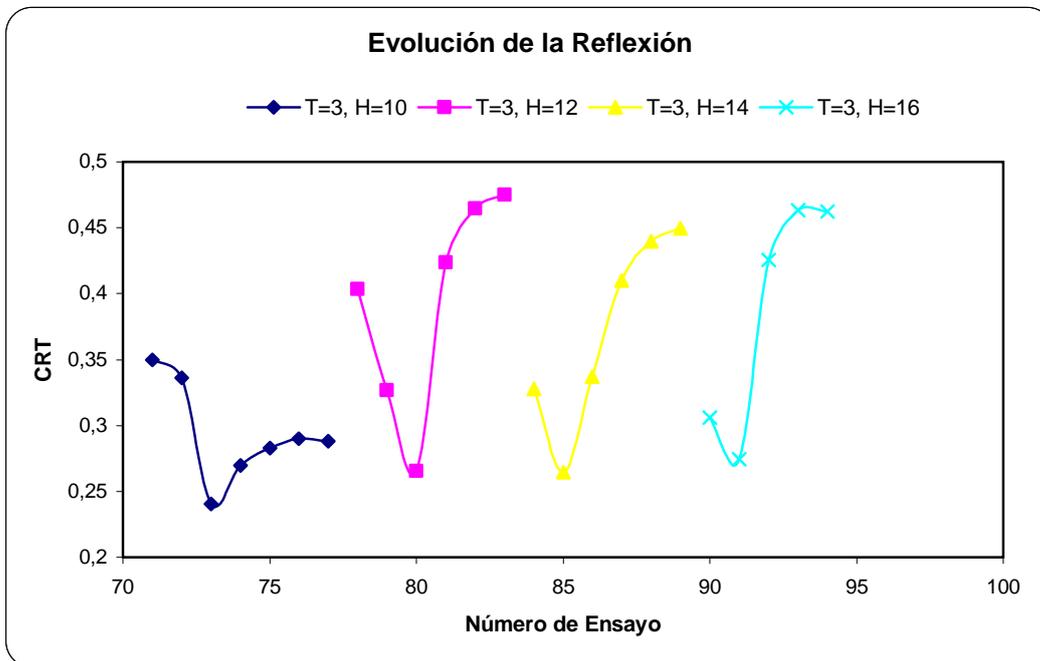


Figura C. 74 Evolución de la reflexión para los ensayos con periodo de ola T=3 y con variación del Nivel Freático.

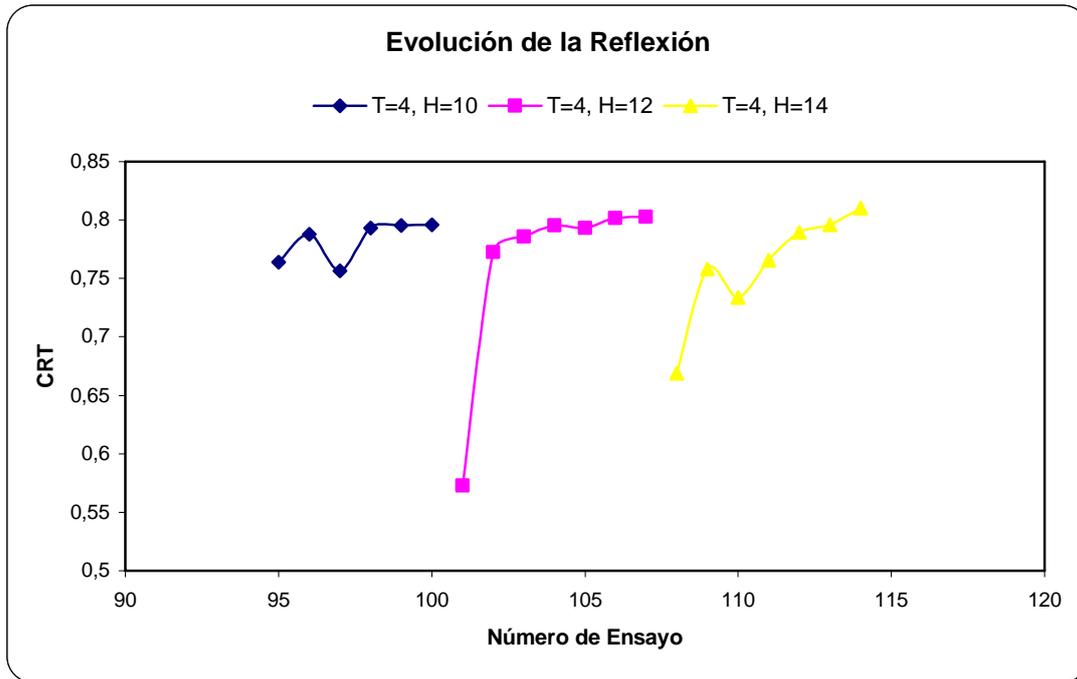


Figura C. 75 Evolución de la reflexión para los ensayos con periodo de ola $T=4$ y con variación del Nivel Freático.

C.5 Comportamiento del Ascenso Máximo del Oleaje durante los ensayos

En esta sección se presentan de forma grafica los valores de cada ascenso máximo por ola que se registro durante todas las modelaciones.

C.5.1 Ensayos con el nivel freático igual al nivel medio en reposo

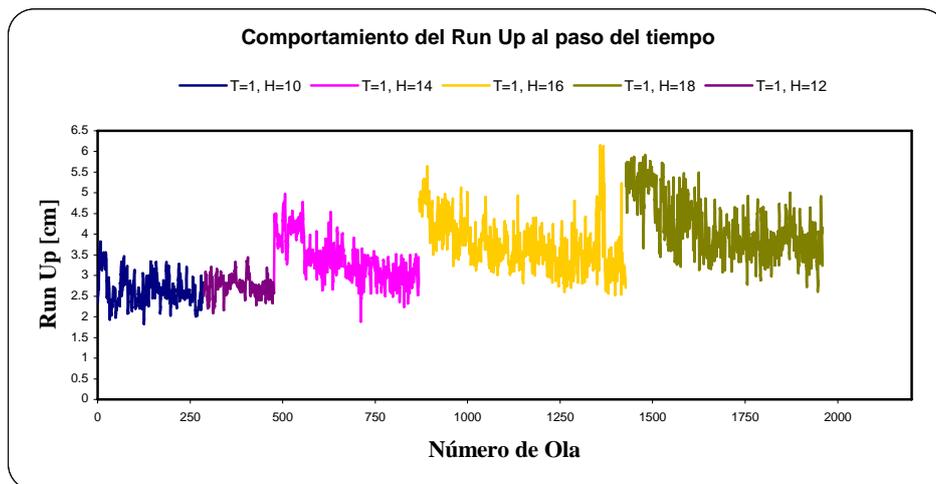


Figura C. 76 Comportamiento del ascenso máximo del oleaje durante los ensayos con periodo de ola $T=1$.

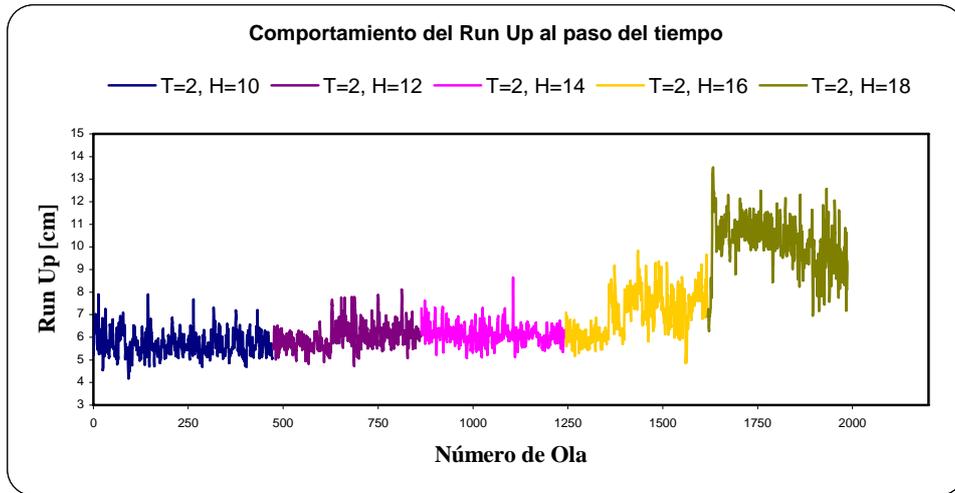


Figura C. 77 Comportamiento del ascenso máximo del oleaje durante los ensayos con periodo de ola $T=2$.

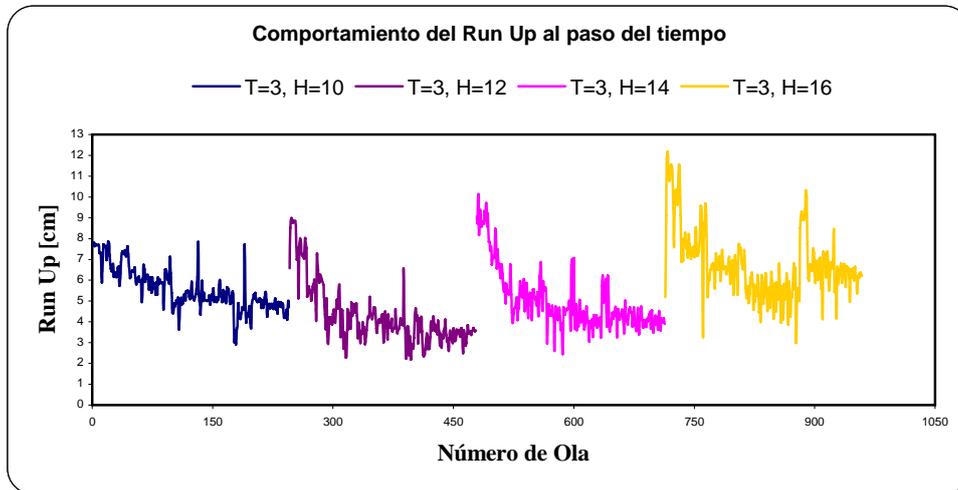


Figura C. 78 Comportamiento del ascenso máximo del oleaje durante los ensayos con periodo de ola $T=3$.

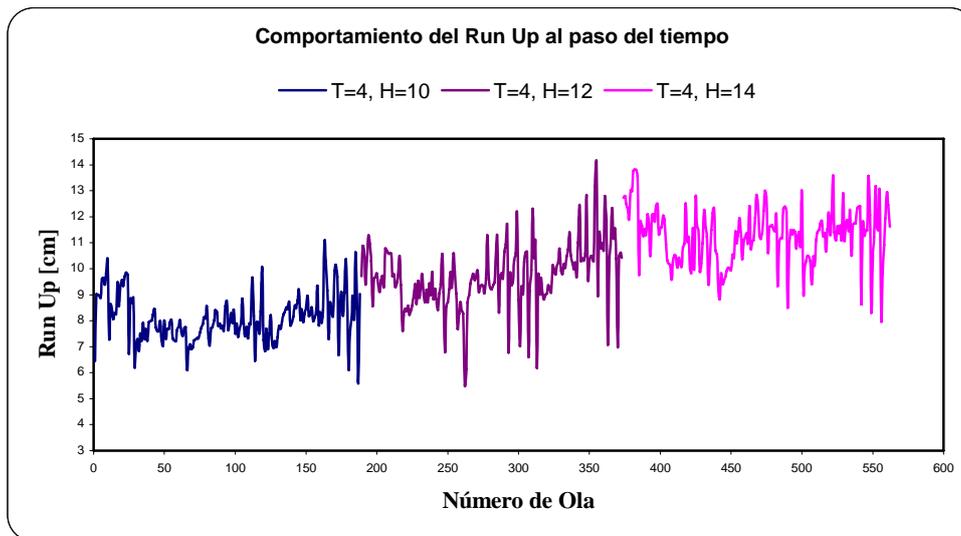


Figura C. 79 Comportamiento del ascenso máximo del oleaje durante los ensayos con periodo de ola $T=4$.

C.5.2 Ensayos que incluyen la variación del nivel freático

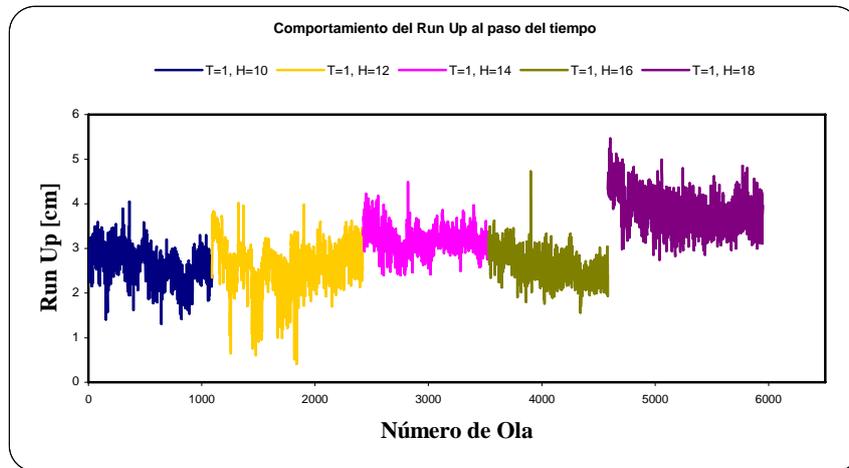


Figura C. 80 Comportamiento del ascenso máximo del oleaje durante los ensayos con periodo de ola $T=1$.

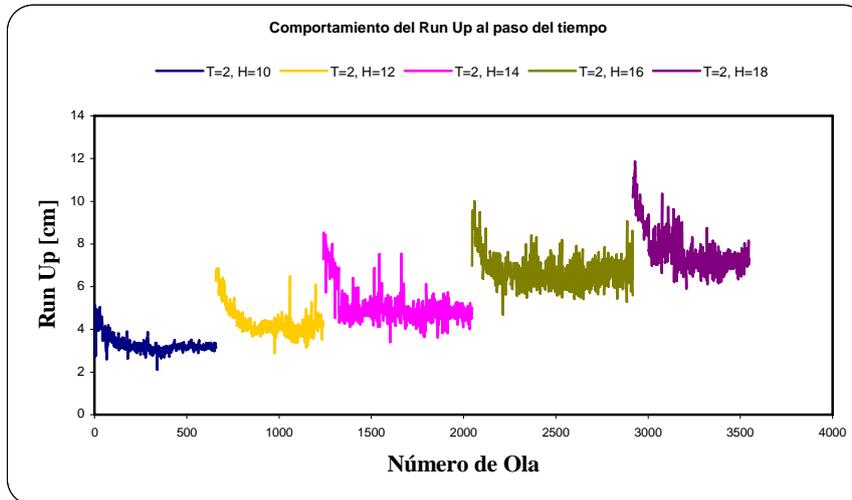


Figura C. 81 Comportamiento del ascenso máximo del oleaje durante los ensayos con periodo de ola $T=2$.

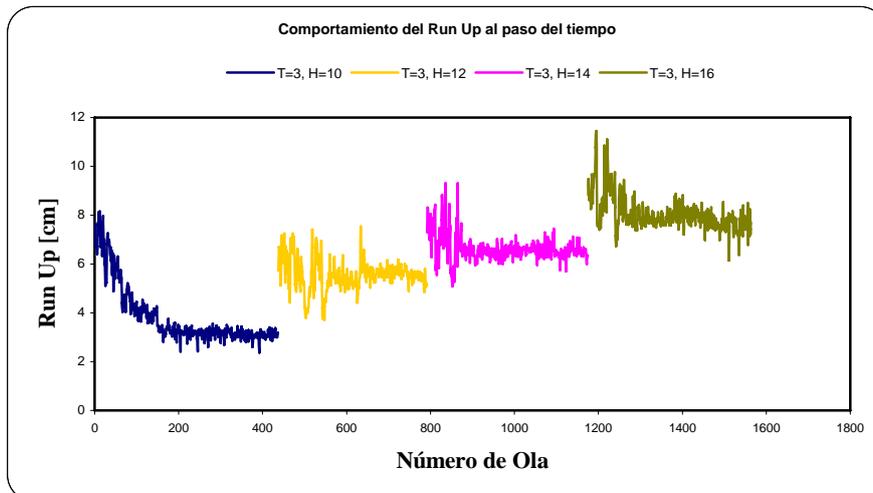


Figura C. 82 Comportamiento del ascenso máximo del oleaje durante los ensayos con periodo de ola $T=3$.

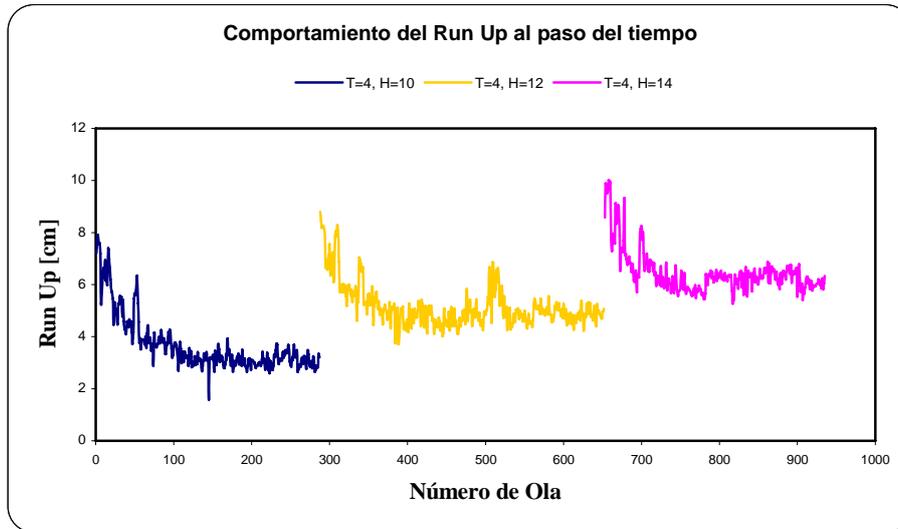


Figura C. 83 Comportamiento del ascenso máximo del oleaje durante los ensayos con periodo de ola $T=4$.

FUENTES CONSULTADAS

FUENTES CONSULTADAS

FUENTES CONSULTADAS

FUENTES CONSULTADAS

- ◆ Ashida, K., and Michiue M., 1972, Study on hydraulic resistance and bedload transport rate in alluvial streams, *Trans. Jpn. Soc. Civil Eng.*, 206, pp. 59–69.
- ◆ Austin M.J. and Masselink G., 2006, *Observations of morphological change and sediment transport on a steep gravel beach*. *Marine Geology*, Volume 229, Issues 1-2, 30 May 2006, pp. 59-77
- ◆ Austin M.J., Masselink G., 2006, Swash-groundwater interaction on a steep gravel beach. *Continental Shelf Research* 26 (20) pp 2503-2519
- ◆ Baquerizo A, Asunción. “*Reflexión del oleaje en playas. Métodos de evaluación y predicción*”, Tesis doctoral. Santander, Universidad de Cantabria, España, 1995.
- ◆ Benedicto, Izaskun “*Influencia de la Reflexión en la estabilidad de los diques en talud*”. Grupo de puertos y Costas, Universidad de Granada, 2002.
- ◆ Buscombe D. and Masselink G., 2006, Concepts in gravel beach dynamics. *Earth-Science Reviews*, 79 (1-2) pp. 33-52
- ◆ Conley, D.C., Griffin, J.G., 2004. Direct measurements of bed shear stress under the swash in the field. *Journal of Geophysical Research*, **109** (C03050)
- ◆ Cowen E.A., In Mei Sou, Liu P.L.-F., Raubenheimer B., 2006, *Journal of engineering mechanics*, Particle image velocimetry measurements within a laboratory-generated swash zone
- ◆ Cox, S. J. and M. J. Cooker, 1999, *The motion of a rigid body impelled by a sea-wave impact*. *Applied Ocean Research* **21**: 113-125.
- ◆ Cox, D.T., Hobensack, W. and Sukumaran, A., 2000, Bottom stress in the inner surf and swash zone. In: B. Edge (Editor), *27th International Conference on Coastal Engineering*. ASCE, Sydney, Australia pp.108-119
- ◆ Erikson, L., Larson, M., Hanson, H., 2004, Prediction of swash motion and run-up including the effects of swash interaction
- ◆ Guza, R.T. and Thornton, E.B., 1982, Swash oscillations on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 87: 483-491
- ◆ Hegge, B.J., and Masselink, G., 1991, Groundwater-table responses to wave run-up: an experimental study from Western Australia. *Journal of Coastal Research* **7** (3), pp. 623–634

- ◆ K. Horikawa, 1988. *Nearshore Dynamics and Coastal Processes*, University of Tokio Press, Tokio, Japan.
- ◆ HR Wallingford, 2002. “*Manual para la generación de oleaje y adquisición de datos*”
- ◆ Jackson N.L., Masselink G. Nordstrom K.F., 2003, The role of bore collapse and local shear stresses on the partial distribution of sediment load in the uprush of an intermediate-state beach
- ◆ Kobayashi, N. and Johnson, B.D., 2001, Sand suspension, storage, advection and settling in the surf and swash zones. *Journal of Geophysical Research*, 106 (C5): 9363-9376
- ◆ Komar, P.D. and Miller, M., 1973, The threshold of sediment movement under oscillatory water waves. *Journal of Sedimentary Petrology*, 43 pp. 1101-1110
- ◆ Kwang-Ho Lee, Norimi Mizutani, Dong-Soo Hur, Atsushi Kamiya, 2005, The effect of groundwater on topographic changes in a gravel beach, *Ocean Engineering*
- ◆ Lara, J.L., Losada, I. J. and Cowen, E.A., 2002, Large-scale turbulence structures over an immobile gravel-bed inside the surf zone. In: J.M. (Editor) 28th International Conference on Coastal Engineering. WS, Cardiff, UK, pp.1050-1061
- ◆ López de San Román-Blanco B., Coates T.T., Holmes P., Chadwick A.J., Bradbury A., Baldock T.E., Pedrozo-Acuña A., Lawrence J. and Grüne J., 2006, Large scale experiments on gravel and mixed beaches: Experimental procedure, data documentation and initial results, *Coastal Engineering Vol 53* pp 349-362
- ◆ Madsen, O.S. and Grant, W.D., 1975, The threshold movement of sediment movement under oscillatory waves: A discussion. *Journal of Sedimentary Petrology*, 45 pp.360-361
- ◆ Masselink, G. and Hughes, M.G., 1998. Field investigation of sediment transport in the swash zone. *Continental Shelf Res.* **18**, pp. 1179–1199
- ◆ Masselink, G. and Li, L., 2001, The role of swash infiltration in determining the beachface gradient: a numerical study, *Marine Geology, Volume 176, Issues 1-4,, Pages 139-156*
- ◆ Masselink G., and Li L., 2001, The role of swash infiltration in determining the beachface gradient: a numerical study
- ◆ Merkelbach L. M., 2006, A model for high-frequency acoustic Doppler current profiler backscatter from suspended sediment in strong current, *Continental Shelf Research* **26** pp. 1316-1335
- ◆ Pedrozo-Acuña A, 2005, Concerning swash on steep beaches. PhD thesis, University of Plymouth

- ◆ Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D.J. and Chadwick, A.J., 2004. Modelling swash zone morphological changes in gravel beaches, Physics of Estuaries and Coastal Seas (PECS). CD pp1-4, Merida, Mexico.
- ◆ Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D.J., Otta, A.K. and Chadwick A.J., 2006, On the cross-shore profile change of gravel beaches, Coastal Engineering Vol 53 pp 335-347
- ◆ Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D.J., Reeve, D.E., 2008, Wave-impact characteristics of plunging breakers acting on gravel beaches. *In press*
- ◆ Peregrine, D.H., 1967, Long waves on a beach. Journal of Fluid Mechanics (27) pp. 815-827
- ◆ Priestley, A. D., A. Pedrozo-Acuña, D. E. Reeve, D. J. Simmonds and T. E. Mason, 2006, Deriving Gravel Threshold Velocities in the Surf Zone from Passive Acoustic Analysis. Littoral 2006 – ‘Coastal Innovations and Initiatives’, University of Technology, Gdansk, Poland
- ◆ Puleo, J.A., Beach, R.A., Holman, R.A. and Allen, J.S., 2000, Swash zone sediment suspension and transport and the importance of bore generated turbulence. Journal of Geophysical Research, 105 (C7): 17021-17044
- ◆ Sekine, M., and G. Parker G., 1992, Bedload transport on transverse slopes, J. Hydraul. Eng., 118(4), pp. 513–535.
- ◆ Shields, A., 1936, Anwendung der ahnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung. Mitt. Preuss. Versuchsanst.. Wasserbau Schiffbau. W. P. Ott and J. C. van Uchelen, Translators, Rep. No. 167, W. M. Keck Lab. Hydraulic, Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California
- ◆ Silva, R., Govaere Georges & Francisco, M. (1998), A statistical tool for breakwater design. Reprinted from Coastal Engineering '98. Proceedings of the Conference American Society of Civil Engineers, Copenhagen, Denmark.
- ◆ Soulsby, R.L. and Whitehouse, R.J.S., 1997, Threshold of sediment motion in coastal environments. Proceedings of Pacific Coasts and Ports '97. Vol 1 pp. 149-154

METODOLOGÍA

La metodología que se siguió para la realización de este trabajo fue la siguiente.

Primeramente se investigó y se estudió el estado del arte relacionado con la morfodinámica de playas y el transporte de sedimentos, se investigaron las diferentes tipologías de playas existentes de acuerdo al material del que están constituidas, con particular interés en las playas de materiales gruesos (gravas) y de materiales mixtos (gravas y arenas), así también se hizo una revisión de los antecedentes sobre los procesos hidrodinámicos que afectan la estabilidad de las zonas costeras y las metodologías existentes para la medición del transporte de sedimentos, incluyendo aquellas en las que se menciona la influencia que tiene el nivel de aguas subterráneas sobre el transporte de sedimentos dentro de la zona de resaca. Hecho esto, se observó que existen escasas metodologías en cuanto a la caracterización y modelado del transporte de sedimentos en playas de grano grueso y/o playas mixtas, ya que la mayoría de las investigaciones existentes se concentran en playas de arena.

Por lo anterior, se decidió realizar el diseño de experimentos de tal forma que los resultados amplíen el panorama sobre como medir el transporte de sedimentos en playas de material grueso y mixto, bajo diferentes estados hidrodinámicos. Dichos ensayos se realizaron en el Laboratorio de Olas del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

El diseño de los experimentos fue un proceso bastante laborioso, ya que hubo que cambiar las condiciones de los ensayos en varias ocasiones por restricciones en la cantidad de material de la que se disponía y por las condiciones de estados de mar que se podían modelar en el canal de oleaje.

Una vez que se obtuvo el arreglo final de los ensayos se procedió a realizar el modelado y con ello la recolección de datos necesarios para la realización del presente documento. Posteriormente, se efectuó el procesamiento de datos y se hizo el análisis correspondiente de la información, validando y comparando los resultados con las teorías existentes.

DESCRIPCIÓN Y ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

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

Capítulo 1. Estado del Arte

En el primer capítulo se presenta la descripción de los conceptos y parámetros que determinan las características hidro y morfo-dinámicas que ocurren durante la modelación de las playas. Así también se hace una breve reseña sobre algunos modelos y/o formulaciones empleados para determinarlas.

Capítulo 2. Modelado de playas de grava en Laboratorio

Se presenta la descripción paso a paso de la metodología experimental seguida para la realización de los ensayos. Se describen las pruebas preliminares efectuadas para poder elegir las características geométricas de la playa más adecuadas así como también los parámetros del oleaje posibles de modelar en el canal de oleaje, por consiguiente se establece la forma en que se seleccionó la posición de la instrumentación requerida para la obtención y recolección de datos. Por último se describe la disposición final utilizada para la realización de los experimentos.

Capítulo 3. Resultados

Se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el estudio experimental. Se realiza una comparación entre los resultados obtenidos en la primera y la segunda etapa de los experimentos, así como también con algunas de las formulaciones planteadas en el capítulo 1.

Capítulo 4.- Conclusiones y Futuras Líneas de Trabajo

Se presentan las principales conclusiones a las que se llega en este trabajo y se indican algunas de las futuras líneas de investigación sobre el tema.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN UNA OLA.....	20
FIGURA 1.2 REFRACCIÓN DEL OLEAJE.....	21
FIGURA 1.3 DIFRACCIÓN DEL OLEAJE.....	21
FIGURA 1.4 REFLEXIÓN DEL OLEAJE DEBIDO A LA PRESENCIA DE ROMPEOLAS.....	22
FIGURA 1.5 TIPOS DE ROTURA DEL OLEAJE.....	23
FIGURA 1.6.- RUN-UP.....	27
FIGURA 1.7 EVOLUCIÓN DE PLAYA EN SUS DOS DIRECCIONES PRINCIPALES.....	28
FIGURA 1.8 PERFILES DE EROSIÓN Y ACUMULACIÓN.....	30
FIGURA 1.9 <i>ESQUEMA DE UN PERFIL DE PLAYA</i>	33
FIGURA 1.10 RELACIÓN ENTRE EL PARÁMETRO A Y EL TAMAÑO DE GRANO PROPUESTA POR MOORE (1982) Y MODIFICADA POR DEAN (1987).....	35
FIGURA 1.11 MODELO DE PERFIL DE EQUILIBRIO PROPUESTO POR INMAN ET AL.(1993).....	36
FIGURA 1.12 ESQUEMA DEL MODELO DE PERFIL DE EQUILIBRIO EN DOS TRAMOS.....	37
FIGURA 1.13 MORFOLOGÍAS POSIBLES DEL PERFIL EN DOS TRAMOS CONSIDERANDO SÓLO DISIPACIÓN.....	40
FIGURA 1.14 BALANCE ENERGÉTICO ENTRE DOS SECCIONES DE PLAYA.....	42
FIGURA 2.1 CRIBADO DE GRAVA.....	50
FIGURA 2.2 REJILLA UTILIZADA PARA EL CRIBADO DE GRAVAS.....	51
FIGURA 2.3 PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA DENSIDAD DE LAS GRAVAS.....	52
FIGURA 2.4 OBTENCIÓN DEL ÁNGULO DE REPOSO DE LAS GRAVAS.....	53
FIGURA 2.5 CURVA GRANULOMÉTRICA DEL MATERIAL CON QUE SE CONSTRUYÓ EL MODELO ENSAYADO.....	53
FIGURA 2.6 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CAÍDA DEL MATERIAL.....	54
FIGURA 2.7 DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD EN EL LABORATORIO.....	56
FIGURA 2.8 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA PLAYA DE ½" DE DIÁMETRO (ACOTACIONES EN METROS).....	57
FIGURA 2.9 MAGNITUD DE LAS DEFORMACIONES DEL PERFIL DE PLAYA DE $D_{50}=1/2''$	58
FIGURA 2.10 POSICIÓN RELATIVA DE LOS SENSORES DE NIVEL.....	59
FIGURA 2.11 <i>DISTANCIAMIENTO ENTRE LOS SENSORES DE NIVEL</i>	59
FIGURA 2.12 <i>POSICIÓN DE LOS SENSORES DE PRESIÓN, VISTA EN PERFIL</i>	60
FIGURA 2.13 <i>POSICIÓN DE LOS SENSORES DE PRESIÓN, VISTA EN PLANTA</i>	60
FIGURA 2.14 <i>SENSOR DE PRESIÓN COLOCADO EN LA PLAYA SOBRE UNA MALLA</i>	61
FIGURA 2.15 <i>UBICACIÓN DE LOS PIEZÓMETROS DENTRO DE LA PLAYA</i>	61
FIGURA 2.16 <i>ADV Y PIV DENTRO DEL CANAL DE OLEAJE</i>	62
FIGURA 2.17 <i>UBICACIÓN DE LAS CÁMARAS DE VIDEO</i>	63
FIGURA 2.18 <i>LOCALIZACIÓN DE ZONAS EN EL MODELO ENSAYADO</i>	65
FIGURA 3.1 EVOLUCIÓN DEL PERFIL TRANSVERSAL DE LA PLAYA A TRAVÉS DEL TIEMPO PARA $H=10\text{CM}$ Y $T=2\text{s}$	70
FIGURA 3.2 FORMAS DEL PERFIL DE ESTABLE PARA $T=3\text{ s}$ Y VARIAS ALTURAS DE OLA, CASO 1.....	71
FIGURA 3.3 FORMAS DEL PERFIL DE EQUILIBRIO, $T=3\text{ s}$ Y VARIAS ALTURAS DE OLA, CASO 2.....	71
FIGURA 3.4 PARÁMETROS REGISTRADOS DE LOS PERFILES ESTABLES.....	75
FIGURA 3.5 COMPARACIÓN DE PERFILES DE EQUILIBRIO ENTRE EL CASO 1 Y CASO 2 PARA $T=2\text{s}$ Y $H=18\text{CM}$	77
FIGURA 3.6 EVOLUCIÓN DE LA REFLEXIÓN PARA LOS ENSAYOS DEL CASO 1 Y PERIODO DE OLA $T=1\text{s}$	79
FIGURA 3.7 EVOLUCIÓN DE LA REFLEXIÓN PARA LOS ENSAYOS DEL CASO 2 Y PERIODO DE OLA $T=1\text{s}$	79
FIGURA 3.8 (IZQ.) CRT CON EL PERFIL INICIAL Y (DER.)CRT CUANDO SE ALCANZA EL PERFIL DE EQUILIBRIO.....	80
FIGURA 3.9 ESTIMACIÓN DEL RUN UP EXPERIMENTAL.....	82
FIGURA 3.10 VALORES DEL ASCENSO MÁXIMO DEL OLEAJE PARA UN PERIODO DE OLA $T=3\text{s}$ CUANDO LOS NIVELES DEL LADO EXPUESTO Y EL LADO PROTEGIDO DE LA PLAYA SON IGUALES A 40 CM.....	82

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.11 VALORES DEL ASCENSO MÁXIMO DEL OLEAJE PARA UN PERIODO DE OLA $T=3S$ CUANDO SE PRESENTA UNA DIFERENCIA DE 4 A 5 CM ENTRE LOS NIVELES DEL LADO EXPUESTO Y EL LADO PROTEGIDO DE LA PLAYA.	83
FIGURA 3.12 COMPARACIÓN DE LA ALTURA DE OLA DE LA MAQUINA Y LA OBTENIDA EN EL ANÁLISIS TEMPORAL.....	84
FIGURA 3.13 COMPARACIÓN DEL ASCENSO MÁXIMO DEL OLEAJE CUANDO SE ALCANZA EL EQUILIBRIO EN LA PLAYA.	85
FIGURA 3.14 COMPARACIÓN ENTRE Ru/H MEDIDO Y CALCULADO PARA EL CASO 1.....	86
FIGURA 3.15 COMPARACIÓN ENTRE Ru/H MEDIDO Y CALCULADO PARA EL CASO 2.....	87
FIGURA 3.16 PENDIENTES POSIBLES A UTILIZAR PARA EL CÁLCULO EL NÚMERO DE IRIBARREN.....	87
FIGURA 3.17 COMPARACIÓN ENTRE Ru/H MEDIDO Y CALCULADO, UTILIZANDO LOS DATOS DE LA PENDIENTE PROMEDIO DEL PERFIL DE EQUILIBRIO, (DER.) CASO 2, (IZQ.) CASO 1.....	88
FIGURA 3.18. COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE ASCENSO MÁXIMO DEL OLEAJE MEDIDOS Y CALCULADOS UTILIZANDO EL ÁNGULO PROMEDIO OBTENIDO DE LOS PERFILES ESTABLES, (DER.) CASO 2, (IZQ.) CASO 1.....	89
FIGURA 3.19 COMPARACIÓN ENTRE Ru/H MEDIDO Y EL CALCULADO UTILIZANDO LOS DATOS DE LA PENDIENTE PROMEDIO DEL ÁNGULO EQUIVALENTE, (DER.) CASO 2, (IZQ.) CASO 1.	91
FIGURA 3.20 COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE ASCENSOS MÁXIMOS MEDIDOS Y CALCULADOS UTILIZANDO EL ÁNGULO PROMEDIO EQUIVALENTE, (DER.) CASO 2, (IZQ.) CASO 1.	91
FIGURA 3.21 COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE ASCENSOS MÁXIMOS MEDIDOS Y CALCULADOS UTILIZANDO EL ÁNGULO PROMEDIO EQUIVALENTE EN TODOS LOS TRENES DE OLAS ENSAYADOS, (DER.) CASO 2, (IZQ.) CASO 1.....	92

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. GRANULOMETRÍA DE LA GRAVA UTILIZADA EN EL MODELO.	53
TABLA 2. TIEMPOS DE RECORRIDO DE LAS PARTÍCULAS EN UNA LONGITUD DE 80CM.	55
TABLA 3. VALORES DE LA POROSIDAD.....	56
TABLA 4. PARÁMETROS DE OLEAJE PROPUESTOS PARA LAS PRUEBAS PRELIMINARES.	57
TABLA 5. DEFORMACIONES MEDIDAS EN LA PLAYA.	58
TABLA 6. POSICIÓN DE LOS SENSORES DE PRESIÓN RESPECTO DE LA PALA.	60
TABLA 7. POSICIÓN DE LOS PIEZÓMETROS RESPECTO DE LA PALA.	61
TABLA 8. INFORMACIÓN SOBRE EL PROGRAMA EXPERIMENTAL REALIZADO.....	63
TABLA 9 DURACIÓN DE LAS PRUEBAS PARA CADA ENSAYO REALIZADO.....	64
TABLA 10. PERFILES ESTABLES ALCANZADOS EN LOS ENSAYOS CON PERIODO T=1 S.....	72
TABLA 11. PERFILES ESTABLES ALCANZADOS EN LOS ENSAYOS CON PERIODO T=2 S.....	73
TABLA 12. PERFILES ESTABLES ALCANZADOS EN LOS ENSAYOS CON PERIODO T=3 S.....	74
TABLA 13. SERIE FOTOGRÁFICA DE LOS PERFILES DE EQUILIBRIO ALCANZADOS EN LOS ENSAYOS CON PERIODO T=4 SEGUNDOS Y PARA CADA UNO DE LOS CASOS.	74
TABLA 14. VALORES DE LAS DEFORMACIONES OCURRIDAS EN LA PLAYA PARA EL PRIMER CASO EXPERIMENTAL.	76
TABLA 15. VALORES DE LAS DEFORMACIONES OCURRIDAS EN LA PLAYA PARA EL SEGUNDO CASO EXPERIMENTAL.	76
TABLA 16. CARACTERÍSTICAS DE LOS TRAMOS DEL PERFIL DE EQUILIBRIO.	78
TABLA 17. COEFICIENTES DE REFLEXIÓN QUE SE PRESENTAN EN LA PLAYA AL INICIO Y AL FINAL DE CADA ENSAYO.....	81
TABLA 18. DATOS DE LA RELACIÓN DEL ASCENSO MÁXIMO DEL OLEAJE Y LA ALTURA DE OLA PARA LOS ENSAYOS DEL CASO 1.....	84
TABLA 19. DATOS DE LA RELACIÓN DEL ASCENSO MÁXIMO DEL OLEAJE Y LA ALTURA DE OLA PARA LOS ENSAYOS DEL CASO 2.....	85
TABLA 20. VALORES DE LOS COEFICIENTES UTILIZADOS EN LA FORMULA DE LOSADA.	86
TABLA 21. ÁNGULOS DE LAS PENDIENTES QUE SE PRESENTAN EN EL PERFIL DE EQUILIBRIO PARA CADA ENSAYO.....	88
TABLA 22. OBTENCIÓN DEL TALUD EQUIVALENTE QUE GENERARÍA LOS RUN UP QUE SE PRESENTAN EN LOS MODELOS ENSAYADOS PARA EL CASO 1.	89
TABLA 23. OBTENCIÓN DEL TALUD EQUIVALENTE QUE GENERARÍA LOS RUN UP QUE SE PRESENTAN EN LOS MODELOS ENSAYADOS PARA EL CASO 1.	90

LISTA DE TABLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

A, a, α	Amplitud de la ola
a_n, b_n, A_n, B_n	Coefficientes de Fourier
C	Celeridad de la onda
ε	Función de error
g	Aceleración debida a la gravedad
H	Altura de ola
h	Profundidad o tirante de agua
H_{rms}	Altura cuadrática media
H_{m_0}	Altura de ola asociada la momento de orden cero
$H_{1/3}$	Altura de ola significativa
K	Permeabilidad
k	Número de onda
L	Longitud de onda
N	Número de datos que integran la señal
N_0	Número de ondas individuales en todo el registro
η	Perfil de la superficie libre del agua
n	Porosidad
T	Periodo asociado ala onda
t	Tiempo
Δt	Intervalo de tiempo
\bar{T}	Periodo medio
$T_{1/3}$	Periodo asociado a la altura de ola significativa
W	Función de peso utilizada
Δx	Separación entre sensores
σ, ω	Frecuencia angular
θ	Ángulo de incidencia del oleaje
z_I	Componentes complejas del espectro incidente
z_R	Componentes complejas del espectro reflejado
$ R , K_R(j\Delta f)^2$	Coefficiente de reflexión
$\varphi(j\Delta f)$	Fase

LISTA DE SÍMBOLOS
