

Tesis defendida por
Manuel Gerardo Verduzco Zapata
y aprobada por el siguiente comité

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Director del Comité

Dr. Alejandro Francisco Parés Sierra
Co-Director del Comité

Dr. José Pedro Osuna Cañedo
Miembro del Comité

Dr. Ismael Mariño Tapia
Miembro del Comité

Dr. Jaak Monbaliu
Miembro del Comité

Dr. Jesús Manuel Figueroa Rodríguez
*Coordinador del programa de posgrado
en ciencias en Oceanografía Física*

Dr. David Hilario Covarrubias
Rosales
Director de Estudios de Posgrado

16 de Noviembre de 2012

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA



Programa de Posgrado en Ciencias
en Oceanografía Física

Modificación de las características del oleaje por medio de
obstáculos sumergidos

Tesis

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta:

Manuel Gerardo Verduzco Zapata

Ensenada, Baja California, México
2012

Resumen de la tesis de Manuel Gerardo Verduzco Zapata, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS en Oceanografía Física.

Modificación de las características del oleaje por medio de obstáculos sumergidos

Resumen aprobado por:

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres

Se utilizó un modelo numérico para simular la interacción del oleaje, regular e irregular, con estructuras sumergidas. Dos series de experimentos se realizaron variando la sección transversal del obstáculo, así como parámetros adimensionales relevantes en el proceso de interacción, tales como la profundidad relativa, la pendiente de la ola, la razón entre la dimensión vertical de los obstáculos y la altura de ola o la profundidad local, la razón entre la longitud horizontal y la longitud de onda, y la razón entre la sumersión del obstáculo y la profundidad local. Cada parámetro tiene un efecto en los procesos de reflexión, disipación y transmisión del oleaje, los cuales se describen en este estudio. La transmisión y reflexión de oleaje regular interactuando con obstáculos cuadrados se estiman mediante dos ecuaciones paramétricas propuestas, cuyos coeficientes se estimaron mediante técnicas de regresión. Ambas ecuaciones son precisas ($R^2 > 0.90$) en el intervalo en el cual fueron probadas. Dichas fórmulas pueden utilizarse en la práctica o ser programadas en modelos numéricos espectrales de oleaje como el modelo *SWAN*, aunque se recomiendan más experimentos para evaluar la influencia de la dirección de propagación del oleaje.

Se propuso una ecuación para estimar el coeficiente de transmisión del oleaje irregular asociado a la interacción con obstáculos rectangulares, sin embargo su estructura es impráctica pues cuenta con 25 parámetros libres, y su precisión ($R^2 = 0.88$) no corresponde a la complejidad de la ecuación. Se recomiendan más estudios para evaluar los procesos de disipación asociados a este tipo de obstáculos, con el objetivo de simplificar y mejorar la ecuación propuesta para el oleaje irregular. Por último, se propuso una función de transferencia, basada en la aproximación LTA, para estimar la forma del espectro transmitido. Esta función cuenta además, con un término de disipación y un término de corrección, necesarios debido a la simplificación en el cálculo de las interacciones no lineales. La función de transferencia propuesta, a pesar de su relativa simplicidad, da una buena aproximación de la forma final del espectro.

Palabras Clave: Obstáculos sumergidos, transmisión y reflexión del oleaje, evolución espectral, método *VOF*, *CADMAS-SURF*.

Abstract of the thesis presented by Manuel Gerardo Verduzco Zapata as a partial requirement to obtain the Doctor of Science degree in Physical Oceanography.

Wave modification due to submerged obstacles

Abstract approved by:

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres

A numerical wave model was used to simulate regular and irregular wave interacting with submerged structures. Two series of experiments were performed varying the obstacle cross section, as well as several non-dimensional parameters relevant in the interaction process, as the relative depth, wave steepness, ratio between vertical dimension and wave height or local depth, ratio between horizontal length and wavelength, and ratio between obstacle submergence and local depth. Each parameter has an effect on the wave reflection, dissipation and transmission processes, which are described in this study. Transmission and reflection of regular waves interacting with squared obstacles are estimated through two proposed parametric equations, which coefficients were calculated using regression techniques. Both equations are accurate in the interval where they were tested ($R^2 > 0.90$). These formulae could be used in regular practice or be programmed in numerical spectral wave models as the SWAN model, although more experiments are recommended to evaluate the influence of direction of wave propagation.

An equation was proposed to estimate the transmission coefficient of irregular waves interacting with rectangular obstacles. However, its structure is unpractical, since it has 25 free parameters, and its precision ($R^2 = 0.88$) does not correspond to the equation complexity. More experiments are recommended to evaluate the dissipation processes related to rectangular obstacles, in order to simplify and improve the proposed equation. Lastly, a transfer function was proposed, based on the LTA approximation, which estimates the transmitted spectrum. Moreover, this transfer function has dissipation and correction terms, necessary due to the simplification in the non-linear interaction calculation. The proposed transfer function, despite its relatively simplicity, gives a good approximation of the transmitted wave spectrum.

Keywords: Submerged obstacles, wave transmission and reflection, spectral evolution, VOF method, CADMAS-SURF.

Dedicatorias

A mis abuelos, por enseñarme el significado de la vida de tan distintas maneras.

A mi increíble papá, mi madre querida y a mi hermana consentida, que con su amor y ejemplo me motivan a dar lo mejor de mí.

A mi esposa Jules, a quien amo con todo mi corazón.

Agradecimientos

A mi comité, por su dedicación, sus enseñanzas y por guiarme pacientemente durante toda esta etapa del doctorado.

A mis profesores del posgrado, en especial al Dr. Francisco Ocampo, al Dr. Pedro Osuna, al Dr. Alejandro Parés y al Dr. Manuel Figueroa, porque aparte de sus conocimientos, siempre me brindaron su amistad.

A CICESE y al Departamento de Oceanografía Física, por darme la oportunidad de continuar con mis estudios de posgrado mediante el acceso a becas e instalaciones. Agradezco al excelente personal docente y al Grupo de Oleaje, que siempre está dispuesto a brindar su apoyo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por su financiamiento a través de la beca para estudios de doctorado y del proyecto DIROC-IOA 62520. Este trabajo contribuye en los proyectos PE-OleajePBC (CONACYT-SENER 119798), RugDiSmarCTRLo-a (CONACYT-SEP Ciencia Básica 155793, 2012-2014) y al proyecto Determinación del potencial energético del oleaje en la Península de Baja California (CONACYT-SENER 119798, 2010-2013).

Al Dr. Koji Kawasaki, a la Dra. Kiku Masami y al Lic. Julian Delgado, por su apoyo en la configuración del modelo numérico CADMAS-SURF; así como a IPICYT, CATAVINyA y OCOMEX, por el soporte computacional brindado en la realización de los experimentos numéricos. Agradezco también a José M. Domínguez O. y a Francisco J. Ponce I., por su apoyo en la elaboración de imágenes digitales.

A Dolores, Citlali, Norma, Julieta Castro, Mónica Sánchez, Carmen Labastida y en general al personal administrativo que siempre me ayudó a salir de cuantas complicaciones me busqué a lo largo de mis estudios.

A mi querida familia, por el cariño y apoyo que me han brindado durante toda mi vida.

y en especial

A mi esposa Julieta, por su amor incondicional y paciencia, y por la oportunidad de compartir nuestras vidas en esta nueva etapa que comenzamos.

Tabla de contenido

Resumen	3
Abstract	4
Dedicatorias	5
Agradecimientos	6
Lista de figuras	9
Lista de tablas	11
Capítulo 1. Introducción	12
1.1 Generalidades	12
1.2 Antecedentes	13
1.3 Objetivo general	19
1.4 Objetivos específicos	19
1.5 Revisión de los capítulos	20
Capítulo 2. Metodología	21
2.1 Descripción del modelo numérico	21
2.1.1 Ecuaciones gobernantes	21
2.1.2 Método <i>VOF</i>	24
2.1.3 Condiciones de frontera	25
2.2 Configuración del modelo numérico (CS)	26
2.3 Parámetros adimensionales	27
2.4 Cálculo de la transmisión y reflexión del oleaje	30
2.5 Formulación de las ecuaciones paramétricas	34
Capítulo 3. Resultados	36
3.1 Validación del modelo utilizando oleaje regular	36
3.2 Validación del modelo utilizando oleaje irregular	41
3.3 Influencia de los parámetros adimensionales en K_r	44
3.4 Influencia de los parámetros adimensionales en K_t	49
3.5 Cambio espectral	57
3.6 Ecuaciones paramétricas	58
3.6.1 K_r con obstáculos con sección transversal cuadrada	58
3.6.2 K_t con obstáculos con sección transversal cuadrada	60
3.6.3 K_t con obstáculos tipo placa	61
Capítulo 4. Discusión	63

4.1 Influencia de los parámetros adimensionales en K_r y K_t	63
4.2 Función de transferencia para obtener S_T	65
4.3 Validación de las ecuaciones paramétricas propuestas.....	83
Capítulo 5. Conclusiones	87
Referencias bibliográficas.....	89

Lista de figuras

Figura 1. Configuración del tanque de oleaje numérico	13
Figura 2. Estimación del espectro transmitido (S_T) después de obstáculos	18
Figura 3. Ubicación de las variables en una celda de la malla numérica	22
Figura 4. Diagrama de flujo del desarrollo de ecuaciones paramétricas	35
Figura 5. Comparación entre elevaciones teóricas de la superficie y el modelo CS	37
Figura 6. (a) Comparaciones entre velocidades numéricas y teóricas. (b) Espectros separados utilizando el método de Mansard y Funke (1980).	39
Figura 7. Comparación entre los coeficientes de transmisión y reflexión numéricos con los teóricos y experimentales reportados en la literatura	40
Figura 8. Espectro incidente, reflejado y transmitido, obtenidos mediante el método de Mansard y Funke (1980) (sin obstáculo).	43
Figura 9. Comparación de los coeficientes de transmisión y reflexión experimentales reportados en la literatura y los coeficientes calculados con el modelo CS	44
Figura 10. Variaciones de K_r en función de la profundidad relativa	46
Figura 11. Variación de K_r en función de los parámetros adimensionales	47
Figura 12. Variación de K_r en función de B/λ_p y otros parámetros adimensionales	48
Figura 13. Variación de K_t en función de d_s/h (obstáculos cuadrados)	50
Figura 14. Variación de K_t en función de d_s/h (obstáculos rectangulares)	52
Figura 15. Variación de K_t en función de B/λ_p y otros parámetros adimensionales	53
Figura 16. Variación de K_t en función de h/λ_p y otros parámetros adimensionales	54
Figura 17. Agrupamiento de K_t en función de los parámetros adimensionales	55
Figura 18. Variación de K_t en función de d_s/h , casos con profundidades relativas de (a) 0.2, (b) 0.4, y (c) 0.6.	56
Figura 19. Cambio del espectro incidente al interactuar con un obstáculo sumergido	58
Figura 20. Flujo de energía al interactuar con un obstáculo sumergido tipo placa	70
Figura 21. Método propuesto para estimar el espectro transmitido (S_{Te})	72
Figura 22. Método propuesto para estimar el factor de corrección, S_F , en h/λ_p de 0.20.	73
Figura 23. Método propuesto para estimar S_F , en una profundidad relativa de 0.40.	74
Figura 24. Método propuesto para estimar S_F , en una profundidad relativa de 0.60.	75
Figura 25. Cambio espectral con sus términos fuentes correspondientes a la pérdida de energía, interacciones no lineales y corrección de forma: Casos en $h/\lambda_p = 0.2$	76
Figura 26. Cambio espectral con sus términos fuentes correspondientes a la pérdida de energía, interacciones no lineales y corrección de forma: Casos en $h/\lambda_p = 0.4$	78

<i>Figura 27. Cambio espectral con sus términos fuentes correspondientes a la pérdida de energía, interacciones no lineales y corrección de forma: Casos en $h/\lambda_p = 0.6$</i>	<i>80</i>
<i>Figura 28. Sobrestimación y subestimación del modo fundamental y de primer orden</i>	<i>82</i>
<i>Figura 29. Comparaciones entre K_t y K_r obtenidos con el modelo CS y las Ecs. 25 y 26</i>	<i>85</i>
<i>Figura 30. Comparaciones entre K_{te} estimado con la Ec. 27 y el modelo CS</i>	<i>86</i>

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Parámetros adimensionales utilizados en los experimentos numéricos.</i>	28
<i>Tabla 2. Valores asignados a los diferentes parámetros adimensionales</i>	30
<i>Tabla 3. Criterio propuesto por Isaacson (1991) para obtener el espaciamiento óptimo entre los sensores del método de Mansard y Funke (1980)</i>	33
<i>Tabla 4. Comparación de resultados recopilados de la literatura y los valores calculados con el modelo CS (obstáculos cuadrados)</i>	41
<i>Tabla 5. Comparación de resultados experimentales recopilados de la literatura y los valores calculados con el modelo CS (obstáculos tipo placa)</i>	43
<i>Tabla 6. Comparación entre los valores estimados con las Ecs. 25 y 26 y el modelo CS</i>	84

Capítulo 1. Introducción

1.1 Generalidades

El estudio del oleaje es de gran interés en la Oceanología, así como en la ingeniería oceánica y costera. Uno de los principales propósitos de su análisis es predecir las características del estado de mar y su interacción con el medio que lo rodea, el cual puede ser un escenario natural como el mar abierto, costas y playas, así como infraestructura como plataformas petroleras, puertos y asentamientos costeros. La influencia del oleaje en las actividades humanas es importante y con frecuencia se requiere modificar sus propiedades con diferentes finalidades: filtrar características no deseables del oleaje y mantener una región específica con los parámetros necesarios para minimizar la erosión o el asolvamiento, o para generar una zona de calma adecuada para una marina; así como para redirigir y enfocar la energía del oleaje hacia dispositivos extractores de energía. Un método para modificar las características del oleaje consiste en el uso de obstáculos, colocados estratégicamente para lograr objetivos en específico. Un obstáculo o estructura con su corona posicionada en o por debajo de la superficie libre del fluido minimiza el impacto visual y mantiene el valor turístico de la zona de despliegue. Este tipo de obstáculos, si se diseñan apropiadamente, pueden ser muy eficientes para reducir la energía del oleaje (Dattatri et al., 1978; Johnson et al., 2005; Elchahal et al., 2006). En esta tesis se consideraron obstáculos sumergidos bidimensionales con secciones transversales cuadradas y rectangulares, fijos a cierta distancia por encima del fondo marino, como se muestra en la Fig. 1. En este esquema se puede visualizar la configuración del tanque numérico utilizado en las pruebas realizadas en este estudio.

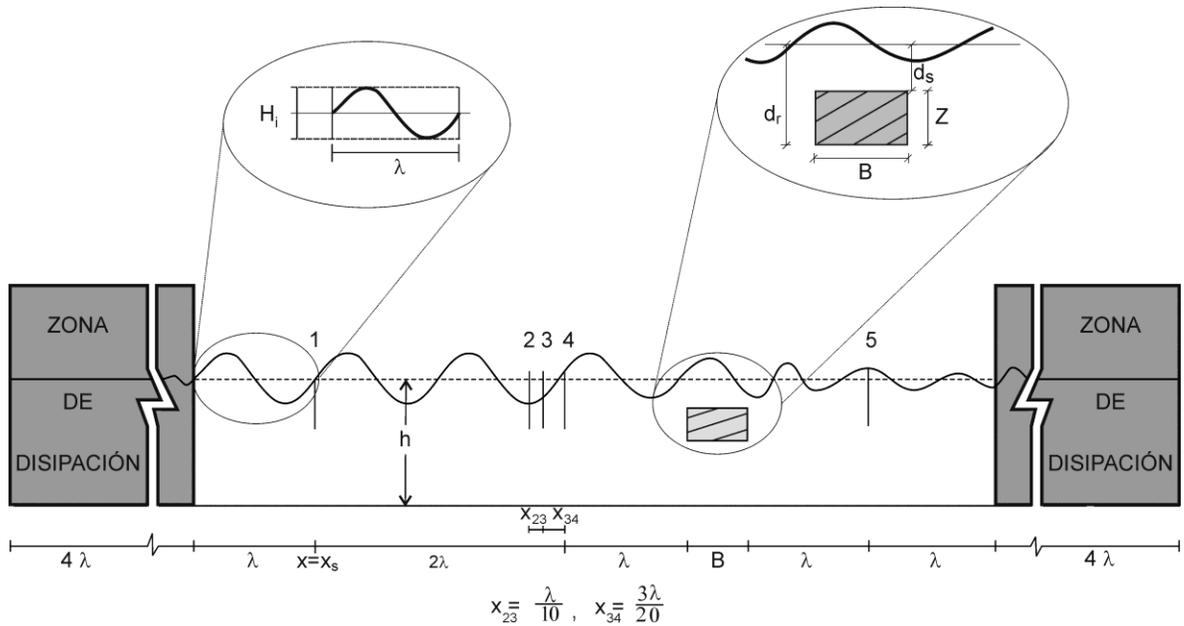


Figura 1. Configuración del tanque de oleaje numérico conformado por un canal con diez metros de profundidad y dos zonas de disipación para tratar las fronteras abiertas. La generación de oleaje se encuentra en $x=x_s$. Se colocaron cinco sensores a lo largo del canal para medir las elevaciones de la superficie. Se utilizaron diferentes dimensiones de obstáculos, con la finalidad de estudiar la transmisión y reflexión del oleaje.

1.2 Antecedentes

En el estudio y diseño de obstáculos y rompeolas, es de suma importancia estimar la cantidad de energía que se transmite y refleja desde estas estructuras para decidir si un determinado diseño es apropiado. Se han desarrollado diversos estudios para proponer funciones de transferencia que estimen la transformación de las olas al interactuar con obstáculos sumergidos. Algunas de estas expresiones estiman los coeficientes de transmisión (K_t) y reflexión (K_r) con buena confiabilidad estadística. En los párrafos siguientes se presenta una revisión del tema, para dar cierto contexto a la investigación de esta tesis.

Se han hecho contribuciones importantes para estimar K_t y K_r asociados a obstáculos sumergidos, tanto fijos como anclados. Carr et al. (1950) estudió placas horizontales fijas en la superficie, en aguas someras. Desarrollaron una

expresión utilizando teoría lineal para obtener K_r , en función de la longitud de la placa, la longitud de onda y del calado (d_r) del obstáculo. Propusieron que K_t se puede obtener al utilizar una relación lineal con K_r , pero Wiegel (1964), utilizando información de laboratorio, encontró que K_t no tiende a seguir esa relación, debido a los importantes procesos de disipación que producen estos tipos de obstáculos.

Stoker (1957) propuso expresiones de K_t y K_r asociadas a placas delgadas fijas en la superficie, en aguas someras y como función de la longitud de onda y de la placa. Para obtener buenos resultados, la longitud de la placa debe ser comparable a la longitud de onda. Estas expresiones no toman en cuenta el proceso de disipación. Sin embargo, de Wiegel (1964) se puede concluir que este proceso tiene un papel importante en la transmisión del oleaje. Sendil y Graf (1974, 1975) estudiaron el problema en un canal de oleaje, utilizando olas regulares con diferentes alturas y periodos. Al igual que los investigadores anteriores, concluyeron que la transmisión es función de la longitud de onda y de la placa, pero sugirieron que la pendiente de la ola también participa en el proceso, aunque en menor medida. El estudio fue extendido por Sundar y Dakshinamoorthy (1980), quienes modificaron con base en resultados experimentales, la expresión de K_t propuesta por Stoker (1957). Mantuvieron la dimensión horizontal de la placa, normalizada con la longitud de onda, como el parámetro más importante. Sin embargo, similar a Sendil y Graf (1975), los autores recomendaron un factor de corrección para incorporar la influencia de la pendiente de la ola en la transmisión del oleaje.

Patarapanich y Cheong (1989) estudiaron experimentalmente el mismo tipo de obstáculos, pero colocados por debajo de la superficie e interactuando tanto con oleaje regular como irregular. Encontraron que K_t y K_r son función de la razón entre la longitud del obstáculo y la longitud de onda, la pendiente del oleaje, la sumersión del obstáculo y la profundidad relativa (profundidad/longitud de onda). Con ondas regulares, encontraron que una dimensión horizontal adecuada, para

obtener valores bajos de K_t , corresponde a 50-70% de la longitud de onda que se encuentre por encima de la placa. Por otro lado, la sumersión es adecuada cuando su valor está entre 5 y 15% de la profundidad local. Los resultados con oleaje irregular tuvieron un comportamiento similar a los del oleaje regular, aunque los valores de sumersión más adecuados se reportaron entre 10 y 20%, ligeramente mayores a los resultados con oleaje regular. Los autores no reportaron expresiones de los coeficientes de transmisión y reflexión.

Brossard y Chagdali (2001) realizaron experimentos en un canal de oleaje y encontraron que con valores de sumersión entre 48 y 74% de la profundidad local, K_t es alrededor de 0.80 mientras que con valores de 24%, se obtiene un K_t de 0.50. Brossard et al. (2009) extendieron dicho estudio, encontrando que existe una transferencia de energía del modo fundamental de las olas hacia armónicos que se propagan corriente abajo del obstáculo. Este proceso se relacionó con la razón entre la dimensión horizontal de la placa y las longitudes de onda presentes en la región somera encima de ella. Al comparar obstáculos tipo placa con obstáculos rectangulares asentados sobre el fondo, concluyeron que los primeros son más eficientes para bloquear la energía del oleaje, debido a que éstos propician la generación de vórtices en sus extremos, provocando disipación. Por otra parte, Yu (2002) explicó la importancia de la longitud de la placa en la transmisión de la energía del oleaje. Con cierta relación entre la longitud de la placa y la de onda, los flujos sobre y debajo de la placa se presentan fuera de fase, provocando una corriente pulsante con sentido contrario a la propagación del oleaje, la cual interfiere con las olas, generando un tipo de rompeolas activo. El autor explicó que las placas muy largas minimizan dicho pulso, y tanto las placas como los obstáculos asentados en el fondo tienen el mismo comportamiento disipativo. En el mismo documento, se revisaron resultados de investigaciones anteriores reportados en la literatura. Se describieron varias expresiones de K_t y K_r asociadas a placas con espesor cero (placas delgadas), la mayoría desarrolladas utilizando teoría lineal.

Koutandos et al. (2005) utilizaron un canal para estudiar el efecto de obstáculos flotantes con sección rectangular en el oleaje regular e irregular. Encontraron que la eficiencia del dispositivo es adecuada (K_t bajos) cuando tiene una dimensión horizontal correspondiente a un cuarto de la longitud de la onda, resultado corroborado por Liu et al. (2008). La razón más eficiente entre calado y la profundidad local estuvo entre 0.20 y 0.30. Concluyeron que los coeficientes de transmisión y reflexión siguen una tendencia similar tanto con oleaje regular como irregular, aunque el coeficiente de disipación (K_d) es mayor en el último caso, debido a los complejos procesos físicos que ocurren al interactuar el oleaje y la estructura. Con obstáculos similares, Rageh et al. (2009) desarrollaron ecuaciones paramétricas para estimar K_t y K_r , en función de varios parámetros adimensionales como la longitud de la placa, la longitud de onda y la profundidad local, así como el diámetro y el espaciamiento de los pilotes utilizados para fijar la estructura. Sus resultados concuerdan razonablemente bien con mediciones. Una limitación es que las ecuaciones propuestas son válidas únicamente para obstáculos que se encuentran en la superficie.

Zheng et al. (2007) estudiaron el problema incluyendo la dirección de propagación del oleaje como variable. Describieron los efectos que el ángulo de incidencia, la sumersión, la dimensión horizontal del obstáculo y el espesor tienen en K_t y K_r . Se encontró que el aumento en el ángulo de incidencia tiende a disminuir e incrementar K_t y K_r , respectivamente. Finalmente propusieron expresiones para estimar sus valores. Su estudio fue extendido por Liu et al. (2009), quienes estudiaron la interacción del oleaje con dos placas horizontales sumergidas. De estos estudios se concluye que K_t aumenta con el espesor de la placa. Ambos estudios utilizaron teoría lineal, suponiendo un fluido invíscido, irrotacional e incompresible.

Rahman et al. (2006) desarrollaron un modelo numérico basado en el método de volumen de fluido (VOF) y estudiaron la dinámica de un obstáculo

rectangular sumergido anclado mediante amarres. Estimaron K_t , K_r y las fuerzas en los amarres, los cuales se compararon satisfactoriamente con resultados experimentales. Bung et al. (2008) observaron en pruebas de laboratorio la presencia de vórtices en el extremo de obstáculos horizontales, tipo placa, al interactuar con el oleaje. Dichos vórtices estuvieron relacionados con la posición del rompimiento del oleaje por encima del obstáculo, los cuales favorecen o entorpecen el flujo de retorno por debajo de la estructura. Los experimentos fueron reproducidos mediante el modelo numérico *FLOW 3D*, basado en el método *VOF*. Los resultados fueron similares a los del laboratorio. De estos artículos se puede concluir que los modelos basados en el método *VOF* son apropiados para simular las interacciones entre el oleaje y estructuras, sin las limitaciones de la teoría lineal.

Hasta el momento sólo se ha hecho referencia a estudios que pretenden estimar la transmisión y reflexión del oleaje. Está claro que una estimación correcta de estos procesos es necesaria para un diseño adecuado de las estructuras de protección costera. Sin embargo, en ocasiones es necesario también predecir el cambio que sufrirá el espectro del oleaje que incide al obstáculo, lo que producirá un nuevo espectro transmitido. La forma de este nuevo espectro es de gran importancia en el diseño de la infraestructura que se encuentre detrás de los obstáculos, pues da información no sólo de la altura de ola transmitida, sino también información sobre los periodos. Se ha encontrado, de manera limitada, información acerca del cambio espectral provocado por obstáculos. Baba (1984) abordó el tema utilizando obstáculos trapezoidales asentados sobre el fondo marino (rompeolas tradicionales), donde concluyó que la frecuencia asociada al pico espectral (f_p) permanece prácticamente constante, aunque existe una reducción de la energía. Por otra parte, Van der Meer et al. (2000) utilizaron rompeolas tradicionales emergidos y sumergidos con su cresta ubicada en la superficie libre. Estimaron el coeficiente de transmisión asociado a dichas estructuras y propusieron un modelo sencillo que estima la forma del

espectro transmitido (S_T), basándose en el espectro incidente (S_I) y en K_t . Propusieron reducir el espectro incidente al multiplicarlo por K_t^2 , y posteriormente distribuir equitativamente parte de la energía total en el intervalo de frecuencias entre 1.5 y 3.5 f_p . Los resultados fueron confirmados por Van der Meer et al. (2005) con obstáculos sumergidos, concluyendo que el 60% de la energía se encuentra en frecuencias menores a 1.5 f_p , mientras que la forma del espectro en frecuencias entre 1.5 y 3.5 f_p se puede aproximar al distribuir equitativamente el 40% restante de la energía en dicho intervalo, como se muestra en la Fig. 2. El procedimiento es sencillo y da una idea de la distribución de la energía, sin embargo sólo se estudiaron casos con obstáculos tradicionales.

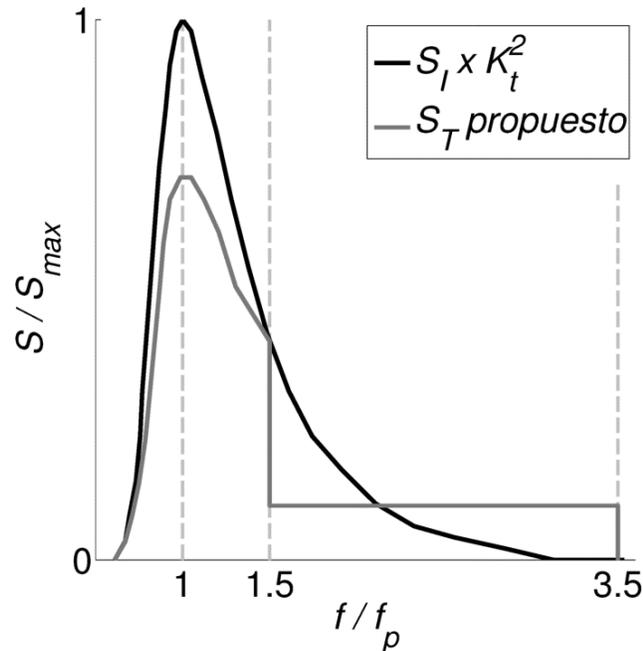


Figura 2. Gráfica adaptada de Van der Meer et al. (2000) (p. 924), donde se ilustra el método propuesto por los autores para estimar la forma del espectro transmitido (S_T) después de obstáculos tradicionales sumergidos.

En esta tesis se utilizó el modelo numérico *CADMAS-SURF* (CDIT, 2001), desarrollado en Japón en el 2001 por el *Coastal Development Institute of Technology*, para simular la interacción entre el oleaje y estructuras, y encontrar

expresiones empíricas que estimen la transmisión y reflexión. Se realizaron series de experimentos donde se variaron algunos parámetros adimensionales para estudiar el efecto que tiene el tamaño de la estructura, la pendiente de la ola, la sumersión y la profundidad relativa en la transmisión y reflexión del oleaje. Se propusieron varias expresiones empíricas y sus coeficientes fueron evaluados mediante análisis de regresión. Dichas fórmulas pueden utilizarse en la práctica o ser programadas en modelos numéricos espectrales de oleaje como el modelo *SWAN*, aunque se recomiendan más estudios para evaluar los procesos de disipación asociados a obstáculos rectangulares, con el objetivo de simplificar y mejorar la ecuación propuesta para el oleaje irregular. Así mismo, se encontró una función de transferencia que estima el cambio del espectro incidente al interactuar con obstáculos rectangulares, lo que resulta en una aproximación de la distribución en frecuencias de la energía transmitida. Los resultados obtenidos representan una contribución al proyecto Determinación del potencial energético del oleaje en la Península de Baja California, apoyado por *CONACYT-SENER* (119798).

1.3 Objetivo general

Analizar la modificación del oleaje debido a su interacción con obstáculos sumergidos y obtener una función de transferencia que represente el efecto del obstáculo en el espectro del oleaje incidente.

1.4 Objetivos específicos

1. Determinar los efectos en el oleaje debido a su interacción con obstáculos cuadrados y rectangulares.
2. Analizar el cambio espectral del oleaje incidente al propagarse en ambientes con obstáculos sumergidos.

1.5 Revisión de los capítulos

Esta tesis se divide en cinco capítulos. En el capítulo de introducción se da una breve revisión de los antecedentes del problema, con la finalidad de darle contexto a la investigación que se presenta. En el capítulo 2 se revisa el modelo *CADMAS-SURF* que se utilizó para llevar a cabo la fase experimental; y se describen los parámetros adimensionales fundamentales para el planteamiento del problema. Así mismo, se describe la técnica utilizada por Mansard y Funke (1980) que se utilizó para separar el espectro del oleaje incidente del reflejado en los experimentos numéricos. En la sección 3 se presentan y describen los resultados en términos de los parámetros adimensionales. En esta sección se proponen ecuaciones empíricas para estimar los coeficientes de transmisión y reflexión del oleaje. En el capítulo 4 se discuten los resultados y se comparan con los reportados en investigaciones anteriores. Así mismo se propone una función de transferencia para estimar el cambio espectral del oleaje transmitido. Finalmente, en el capítulo 5, se presentan las conclusiones y recomendaciones finales.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Descripción del modelo numérico

2.1.1 Ecuaciones gobernantes

Los experimentos se llevaron a cabo en un canal de oleaje numérico bidimensional, *CADMAS-SURF (CS)*, el cual utiliza una variable F para trazar la superficie libre (ver método *VOF* descrito en la sección 2.1.2). Las ecuaciones que se resuelven son la ecuación de continuidad (1) y las ecuaciones de Navier-Stokes (2-3),

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = S_p \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - \beta_x u + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - \beta_z w + S_w - g \quad (3)$$

donde el sistema coordenado Cartesiano se utiliza y u y w son las componentes horizontales y verticales de la velocidad, respectivamente. Las variables son el tiempo (t), la presión (p), la densidad (ρ), la viscosidad cinemática (ν), la gravedad (g) y el factor de disipación (β) el cual es cero excepto en la zona de disipación. Las expresiones S , mostradas en las Ecs. (1-3) y (6), representan los términos de forzamiento del oleaje, con intensidad q en el punto de generación $x=x_s$ y cero en $x \neq x_s$, como propone Kawasaki (1999):

$$\begin{aligned}
 S_p &= q(z,t) \\
 S_u &= uq(z,t) \\
 S_w &= wq(z,t) + \frac{v}{3} \frac{\partial q(z,t)}{\partial z} \\
 S_F &= Fq(z,t)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

para p , u , w y F respectivamente.

El modelo utiliza una malla Euleriana con celdas rectangulares, las cuales pueden tener diferentes tamaños. Las variables escalares (F , p) se colocan en el centro de la celda (i,k) , mientras que los vectores de velocidad se encuentran en los puntos medios de sus fronteras $(i\pm 1/2, k\pm 1/2)$, como se muestra en la Fig. 3.

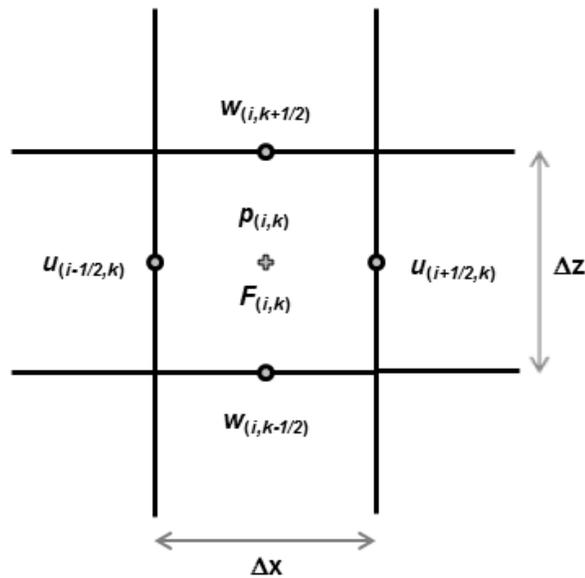


Figura 3. Ubicación de las variables en una celda de la malla numérica. Las variables F y p se encuentran colocadas en el centro (i,k) , mientras que u y w se posicionan en los puntos medios $(i\pm 1/2, k\pm 1/2)$ de las fronteras de la celda.

El procedimiento para calcular las variables u , w y p se describe a continuación:

1) Se utilizan aproximaciones explícitas de las Ecs. (2-3) para calcular la primera estimación de las velocidades, usando condiciones iniciales o valores previos de

las variables. Para los términos diferentes a los advectivos, se utiliza un esquema de segundo orden centrado en el espacio, mientras que en el tiempo se usa el método explícito de Euler. Los términos advectivos se calculan mediante una combinación del esquema centrado en el espacio y *upwind*, ponderados con un parámetro ζ , lo que permite mantener la estabilidad numérica. La forma general de la expresión de dicho esquema (para una malla con celdas de longitud variable) se muestra en la Ec. 5, donde F_{UX} es el término $u \partial u / \partial x$. De manera similar se puede extender para los demás términos advectivos.

$$F_{UX} = \left(\frac{u_{i+1/2,k}}{\Delta x_\zeta} \right) \left[\Delta x_{i+1} DUL + \Delta x_i DUR + \zeta \operatorname{sgn}(u) (\Delta x_{i+1} DUL - \Delta x_i DUR) \right]$$

donde

$$DUL = \frac{(u_{i+1/2,k} - u_{i-1/2,k})}{\Delta x_i}$$

$$DUR = \frac{(u_{i+3/2,k} - u_{i+1/2,k})}{\Delta x_{i+1}}$$

$$\Delta x_\zeta = \Delta x_{i+1} + \Delta x_i + \zeta \operatorname{sgn}(u) (\Delta x_{i+1} - \Delta x_i)$$

(5)

y $\operatorname{sgn}(u)$ es igual al signo de $u_{i+1/2,k}$.

2) Para satisfacer la ecuación de continuidad, se ajustan las presiones iterativamente en cada celda y los cambios en las velocidades inducidos en este proceso se suman a las calculadas en el paso anterior.

3) Se utilizan los resultados obtenidos para actualizar la configuración del fluido, mediante el método *VOF* descrito en la siguiente sección.

2.1.2 Método VOF

Por lo general se prefiere usar mallas Eulerianas a las Lagrangianas en problemas donde se involucran superficies libres que tengan deformaciones considerables. Esto es, el flujo se calcula relativo a una malla fija en el espacio, lo que requiere un promediado de las propiedades del flujo en cada celda computacional, en cada paso de tiempo. Lo anterior suaviza todas las variables del flujo, siendo especialmente importante en regiones con superficies libres, pues en ocasiones éstas pueden suavizarse a tal grado que no representen la realidad. Para evitar este problema, el programa CS utiliza el método de Volumen de Fluido (VOF) (Hirt y Nichols, 1980,1981), donde se usa una función F , la cual representa la cantidad de fluido dentro de una celda, con valor de uno cuando está llena y cero cuando está vacía. El valor promedio de esta función en cada celda, representa el fluido total contenido. La evolución de la función F está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + w \frac{\partial F}{\partial z} = S_F \quad (6)$$

donde S_F es cero excepto en el punto de generación del oleaje ($x=x_s$). Para resolver la Ec. 6 y evitar el suavizado numérico, se utiliza una aproximación de diferencias finitas denominado “donador-receptor”. En este método, se utiliza el valor de F tanto corriente arriba como corriente abajo, para establecer una aproximación de la forma de la superficie, para después utilizarla en el cálculo del flujo. El volumen (V) total que cruza la frontera de una celda por unidad de área, es $V=u'\Delta t$, donde u' representa la velocidad normal a la frontera. El signo de u' determina la celda donadora (celda que pierde fluido) y receptora (la que recibe). La cantidad de fluido que gana o cede una celda depende de la manera en que la superficie de F esté distribuida en la celda donadora. Cuando el flujo tiene una dirección normal a la superficie, la cantidad de F que se advecta se determina

mediante el valor de la celda receptora. Por otra parte, cuando el flujo es tangente a la superficie, se utiliza la información de F de la celda donadora. La cantidad de F advectada se define con la siguiente expresión:

$$F = \min(F_{RD}|V| + CF, F_D \Delta_D) \quad (7)$$

donde

$$CF = \max[(1.0 - F_{RD})|V| - (1.0 - F_D)\Delta_D, 0.0]$$

y los subíndices R y D indican valores de las celdas receptoras y donadoras, respectivamente; y Δ es la longitud de la celda en la dirección del flujo. El subíndice RD indica que el valor puede obtenerse tanto de la celda receptora como de la donadora, siguiendo el criterio descrito en el párrafo anterior. La Ec. 7 asegura la estabilidad del esquema y al mismo tiempo minimiza la difusión numérica (Rudman, M, 1997).

2.1.3 Condiciones de frontera

Para minimizar la reflexión numérica, se utilizó una condición de radiación tipo Orlanski (Orlanski, 1976) además de una zona de disipación en cada extremo (Hinatsu, 1992). En la superficie libre se aplicaron dos condiciones de frontera cinemáticas y una dinámica. Las condiciones de frontera cinemáticas definen la velocidad paralela y la normal a la superficie. En la primera, la velocidad se fija igual a la velocidad calculada en la interface con la celda vecina llena de fluido. En la segunda, las velocidades entre las celdas de superficie y las que caen fuera del fluido se determinan de tal manera que se cumpla la ecuación de continuidad. La condición dinámica define la presión en la superficie, la cual se calcula al realizar una interpolación lineal entre la presión atmosférica y la calculada en la celda

adyacente a la superficie. En las fronteras del fluido en contacto con sólidos se utilizó la condición de impenetrabilidad y libre deslizamiento, las cuales establecen que la velocidad normal a la superficie sólida tiene valor cero y la tangencial no tiene gradiente normal a la frontera, respectivamente.

2.2 Configuración del modelo numérico (CS)

En la Fig. 1 se muestra un esquema que describe el canal de oleaje numérico, el cual tiene una profundidad constante (h) de diez metros y una longitud aproximada de 14 longitudes de onda. En sus extremos se aplica una condición de radiación tipo Orlandi junto con una zona de disipación, la cual se extiende cuatro longitudes de onda hacia el interior del dominio numérico. Se colocaron cinco sensores a lo largo del canal para medir la elevación de la superficie libre. El sensor 1 se colocó en la posición de generación de oleaje ($x=x_s$), donde en el caso de los experimentos con oleaje regular se impusieron, por default, ondas de Stokes de quinto orden. Sin embargo, las ondas generadas se propagan de acuerdo a la teoría de oleaje correspondiente, la cual depende de la altura de ola incidente, su periodo y la profundidad local (LeMéhauté, 1976). En los experimentos con oleaje irregular, se utilizó como forzamiento un espectro tipo JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) (Ec. 8) en términos de la altura de ola significativa (H_s) y el periodo asociado al pico espectral (T_p) (Goda, 2000).

$$S(f) = \beta_j H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp\left[-1.25(T_p f)^{-4}\right] \gamma^{\exp\left[-\frac{(T_p f - 1)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (8)$$

donde

$$\beta_j = \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \left[1.094 - 0.01915 \ln(\gamma)\right]$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a \approx 0.07 : f \leq f_p \\ \sigma_b \approx 0.09 : f > f_p \end{cases} \quad (9)$$

Los parámetros σ y γ controlan la forma espectral. Al primero se le asignan valores σ_a y σ_b , dependiendo de su posición relativa a f_p (ver Eq. 9). La diferencia en sus valores genera el ancho espectral a ambos lados de f_p . El segundo es un término de escala de la energía del pico espectral. Los valores promedio de σ_a , σ_b y γ , calculados en el Mar del Norte son de 0.07, 0.09 y 3.3, respectivamente (Hasselmann et al., 1973).

Por otro lado, las dimensiones de las celdas de la malla numérica variaron conforme el siguiente criterio:

$$\Delta z = h/100$$

y

$$\Delta x = \min \begin{cases} \lambda/100 \\ 4\Delta z \end{cases} \quad (10)$$

en la dirección vertical y horizontal, respectivamente. El paso de tiempo (Δt) se mantuvo constante en cada experimento, pero se varió de 0.001 a 0.01 segundos entre experimentos dependiendo del tamaño de celda utilizado, para mantener la estabilidad numérica. En todos los casos, el intervalo de muestreo (Δt_m) se fijó en 0.01 segundos.

2.3 Parámetros adimensionales

Cuando un tren de olas interactúa con un obstáculo sumergido, parte de la energía es bloqueada y reflejada mediante ondas con altura H_r . Otra parte de la energía se transmitirá por encima y/o por debajo del obstáculo, provocando una altura de ola (H_t) en la parte posterior de la estructura. La energía sobrante que no es reflejada ni transmitida, es necesariamente disipada por la interacción entre el oleaje y el obstáculo. La razón entre H_t y la altura del oleaje incidente H (H_i o H_s

en el caso de oleaje regular e irregular, respectivamente) está dada por K_i , mientras que la razón entre H_r y H se representa con K_r . Para proponer las variables que se utilizaron en los experimentos numéricos, se utilizó un análisis dimensional (basado en el teorema Buckingham Π (Buckingham, 1914)), el cual dice que toda relación dimensionalmente homogénea entre M magnitudes físicas que pueda ser expresada en términos de N dimensiones fundamentales, se puede describir como función de $M-N$ parámetros adimensionales e independientes denominados Π : $f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{M-N})$. Con base en resultados previos reportados en la literatura, se propuso que las magnitudes físicas relevantes en el proceso de interacción entre oleaje y estructura son la longitud (λ) y la altura (H) de ola, la profundidad local (h), la sumersión del obstáculo (d_s), así como su longitud (B) y espesor (Z) (el símbolo λ_p se utilizó en los experimentos con oleaje irregular y corresponde a la longitud de onda asociada a f_p en regiones donde la profundidad es h). Debido a que todas tienen unidades de longitud ($N=1$), existen cuatro y cinco parámetros adimensionales para los obstáculos cuadrados ($M=5$) y rectangulares ($M=6$), respectivamente, los cuales se muestran en la Tabla 1 (ver Fig. 1).

Tabla 1. Parámetros adimensionales utilizados en los experimentos numéricos.

Tipo de obstáculo	Tipo de oleaje	Parámetros adimensionales	Descripción
Cuadrado	Regular	h/λ H/λ d_s/h H/Z	Profundidad relativa. Pendiente del oleaje. Sumersión relativa. Altura relativa de ola.
Rectangular	Irregular	h/λ_p H_s/λ_p d_s/h Z/h B/λ_p	Profundidad relativa. Pendiente del oleaje. Sumersión relativa. Espesor relativo. Longitud relativa.

En el presente trabajo, se propone que tanto K_r como K_t pueden representarse por medio de expresiones empíricas que estén en función de los parámetros adimensionales descritos en la Tabla1, de tal forma que con obstáculos cuadrados y oleaje regular se tenga:

$$K_t = H_t / H_i = f_1 \left(\frac{h}{\lambda}, \frac{H_i}{\lambda}, \frac{ds}{h}, \frac{H_i}{Z} \right) \quad (11)$$

$$K_r = H_r / H_i = f_2 \left(\frac{h}{\lambda}, \frac{H_i}{\lambda}, \frac{ds}{h}, \frac{H_i}{Z} \right) \quad (12)$$

mientras que con obstáculos rectangulares y oleaje irregular,

$$K_t = H_t / H_s = f_3 \left(\frac{h}{\lambda_p}, \frac{H_s}{\lambda_p}, \frac{ds}{h}, \frac{Z}{h}, \frac{B}{\lambda_p} \right) \quad (13)$$

A cada parámetro adimensional se le asignaron valores, y con base en un diseño experimental factorial, todas las combinaciones posibles fueron simuladas con la finalidad de determinar la importancia relativa de cada parámetro en K_t y en K_r . En todos los experimentos la profundidad h se mantuvo constante (10 m). Los valores asignados, mostrados en la Tabla 2, se definieron de tal manera que se reprodujeran situaciones reales donde este tipo de obstáculos pueden utilizarse. La profundidad relativa se varió de aguas intermedias ($h/\lambda < 0.5$) a aguas profundas ($h/\lambda > 0.5$) (Young, 1999), las cuales son profundidades típicas para desplegar dichas estructuras. Por otro lado, la pendiente del oleaje utilizada en todos los casos corresponde a oleaje con pendiente suave, para prevenir el rompimiento del oleaje antes de llegar al obstáculo (van der Meer et al., 2005). La sumersión relativa, ds/h , representa la posición relativa del obstáculo en la columna de agua. Valores más grandes de este parámetro significan que el obstáculo se encuentra posicionado más cerca del fondo. Sin embargo, se definieron de tal manera que el obstáculo siempre se encuentre cerca de la superficie, pues se espera que al sumergir más la estructura, ésta interactúe menos con el oleaje, disminuyendo la disipación de la energía del oleaje. La altura relativa de ola se escogió para tener estructuras cuadradas de hasta cinco veces la altura de ola y un mínimo de una. Esto asegura que las fuerzas de inercia predominen en los experimentos (Dean y Harleman, 1966). El espesor relativo, Z/h , si se mantiene con un valor pequeño, es un parámetro que tiene una contribución secundaria en K_t y K_r . Sin embargo, dos valores fueron asignados para cuantificar su efecto. Finalmente, se espera

que la longitud relativa, B/λ_p , contribuya significativamente en la transmisión del oleaje, y sus valores se limitan hasta un cuarto de la longitud de onda, pues obstáculos más largos podrían llegar a ser imprácticos en situaciones ingenieriles reales.

Tabla 2. Valores asignados a los diferentes parámetros adimensionales utilizados en los experimentos numéricos.

Tipo de obstáculo	Parámetros adimensionales	Valores				
Cuadrado	h/λ_p	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
	H/λ_p	0.015	0.020	0.025	0.030	
	d_s/h	0.000	0.025	0.050		
	H/Z	1.00	0.50	0.20		
Rectangular	h/λ_p	0.20	0.40	0.60		
	H_s/λ_p	0.013	0.022	0.030		
	d_s/h	0.00	0.05	0.15	0.20	0.25
	Z/h	0.02	0.08			
	B/λ_p	0.10	0.15	0.20	0.25	

2.4 Cálculo de la transmisión y reflexión del oleaje

Mansard y Funke (1980) propusieron una técnica utilizando tres sensores para calcular K_r y K_t . Cada sensor mide una señal que corresponde a la suma de la amplitud del oleaje incidente más el reflejado, y al conocer las distancias entre sensores se puede plantear tres ecuaciones (una por cada sensor) en términos de dichas amplitudes, las diferentes fases y las señales medidas. Dichas ecuaciones se resuelven mediante cuadrados mínimos, lo que permite descomponer la señal de elevaciones en el espectro incidente y reflejado. Tanto para oleaje regular como irregular, los sensores 2, 3 y 4 se utilizaron con dicho propósito (ver Fig. 1). El espectro de densidad de varianza incidente, S_i , y el reflejado, S_R , con unidades de $longitud^2/tiempo$, se definen de la siguiente manera:

$$S_I = \frac{|Z_{I,f}|^2}{2\Delta f} \quad (14)$$

$$S_R = \frac{|Z_{R,f}|^2}{2\Delta f} \quad (15)$$

donde

$$Z_{I,f} = \frac{1}{D_f} [B_{1,f}(R1_f + iQ1_f) + B_{2,f}(R2_f + iQ2_f) + B_{3,f}(R3_f + iQ3_f)]$$

$$Z_{R,f} = \frac{1}{D_f} [B_{1,f}(R1_f - iQ1_f) + B_{2,f}(R2_f - iQ2_f) + B_{3,f}(R3_f - iQ3_f)]$$

$$D_f = 2(\sin^2 \beta_f + \sin^2 \gamma_f + \sin^2(\gamma_f - \beta_f))$$

$$R1_f = \sin^2 \beta_f + \sin^2 \gamma_f$$

$$R2_f = \sin \gamma_f \sin(\gamma_f - \beta_f)$$

$$R3_f = -\sin \beta_f \sin(\gamma_f - \beta_f)$$

$$Q1_f = \sin \beta_f \cos \beta_f + \sin \gamma_f \cos \gamma_f$$

$$Q2_f = \sin \gamma_f \cos(\gamma_f - \beta_f) - 2 \sin \beta_f$$

$$Q3_f = \sin \beta_f \cos(\gamma_f - \beta_f) - 2 \sin \gamma_f$$

$$B_{p,f} = [A_{p,f} \cos(\alpha_{p,f}) + i A_{p,f} \sin(\alpha_{p,f})] \quad (16)$$

y $B_{p,f}$ son los coeficientes de Fourier donde p representa el número de sensor (1, 2, 3). El delta y la componente de la frecuencia están representados con Δf y f , respectivamente. Los valores $A_{p,f}$ y $\alpha_{p,f}$ pueden calcularse de análisis de autoespectros y espectros cruzados, respectivamente. Las longitudes adimensionales β_f y γ_f son determinadas al medir las distancias entre los sensores 2-3 (X_{23}) y 2-4 (X_{24}), respectivamente:

$$\beta_f = \frac{2\pi X_{23}}{\lambda_f}$$

$$\gamma_f = \frac{2\pi X_{24}}{\lambda_f}$$

(17)

Con ciertos espaciamentos entre los sensores (2, 3 y 4) utilizados para la separación de espectros, las expresiones $Z_{I,f}$ y $Z_{R,f}$ (Eq. 16) pueden llegar a ser indeterminadas (cuando el denominador (D_f) es cero). Para evitar esta singularidad se definieron X_{23} y X_{24} de tal manera que no se cumpla que X_{23} sea un múltiplo de $\lambda/2$ y simultáneamente X_{24} sea un múltiplo de X_{23} .

Una vez obtenido S_R se puede calcular K_r mediante la raíz cuadrada del cociente del momento de orden cero del oleaje reflejado ($m_{o,R}$) y del incidente ($m_{o,I}$). Dichos momentos se calculan al obtener el área bajo la curva de cada espectro, por lo que se integran con límites entre f_{min} a f_{max} , (frecuencia mínima y máxima, respectivamente), quedando:

$$K_r = \sqrt{\frac{m_{o,R}}{m_{o,I}}} = \sqrt{\frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} S_{R,f} \Delta f}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} S_{I,f} \Delta f}} \quad (18)$$

Se utiliza el mismo procedimiento para calcular K_t , sustituyendo S_R por S_T (espectro transmitido). La expresión entonces queda:

$$K_t = \sqrt{\frac{m_{o,T}}{m_{o,I}}} = \sqrt{\frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} S_{T,f} \Delta f}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} S_{I,f} \Delta f}} \quad (19)$$

Las variables f_{min} y f_{max} estrictamente corresponden a cero e infinito (Holthuijsen, 2007), respectivamente. Sin embargo, el límite superior por lo general se sustituye por una frecuencia máxima, determinada por la frecuencia de Nyquist, definida con la Ec. (20):

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t_m} \quad (20)$$

Al sustituir el valor del intervalo de muestreo $\Delta t_m = 0.01$ en la Ec. (20), se obtiene que f_N es de 50 Hz. Sin embargo, esta frecuencia queda muy distante del margen de aplicación del método de Mansard y Funke. Para establecer una f_{max} más adecuada, es necesario analizar la precisión del método, la cual está en función del espaciamiento entre sensores tal y como lo reporta Isaacson (1991), quien propone el criterio de la Tabla 3 para proponer la longitud de onda mínima discernible utilizando esta metodología.

Tabla 3. Criterio propuesto por Isaacson (1991) para obtener el espaciamiento óptimo entre los sensores utilizados para separar el espectro incidente (S_I) del reflejado (S_R) mediante el método de Mansard y Funke (1980).

Longitudes de onda	Valores recomendados de X_{23}/X_{24}
$\lambda_{min} \geq (1/2) X_{24}$	0.35 - 0.48 ó 0.52 - 0.65
$\lambda_{min} \geq (1/3) X_{24}$	0.45 - 0.65

Si por el contrario se fijan las distancias X_{23} y X_{24} , se puede despejar λ_{min} de las expresiones de la Tabla 3 y utilizar la relación de dispersión lineal del oleaje para obtener su frecuencia asociada, que corresponde a la frecuencia máxima que puede representarse mediante el método de Mansard y Funke. Por lo tanto, la expresión para calcular f_{max} queda:

$$f_{max} = \frac{\sqrt{g \left(\frac{2\pi}{\lambda_{min}} \right) \tanh \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda_{min}} \right) h \right]}}{2\pi} \quad (21)$$

2.5 Formulación de las ecuaciones paramétricas

En ciertas situaciones, tanto ingenieriles como de investigación, es necesario cuantificar de manera práctica la cantidad de energía de las olas que se refleja y transmite debido a su interacción con obstáculos, así como el cambio espectral inherente en el proceso. Para ello se requiere el uso de fórmulas que tomen en cuenta cada uno de los parámetros, o por lo menos los más importantes, que intervienen en el proceso de interacción entre el oleaje y la estructura. Lo ideal es contar con expresiones matemáticas que calculen las incógnitas deseadas. Sin embargo, el proceso de interacción entre las olas y los obstáculos es por lo general muy complejo para resolverse de manera analítica. Por lo tanto, se puede abordar el problema mediante simulaciones numéricas, lo que permite recopilar los datos necesarios para su post-procesamiento. Del resultado del análisis de datos se podrá evaluar si es posible tomar como base alguna ecuación existente y modificarla por medio de coeficientes de corrección, o si es necesario proponer ecuaciones paramétricas totalmente nuevas, cuyos coeficientes se deben estimar mediante análisis de regresión. Cualquiera que sea el camino que se tome, al final se debe hacer un estudio para validar las ecuaciones propuestas. El proceso para proponer las ecuaciones paramétricas se resume en el diagrama de flujo mostrado en la Fig. 4.

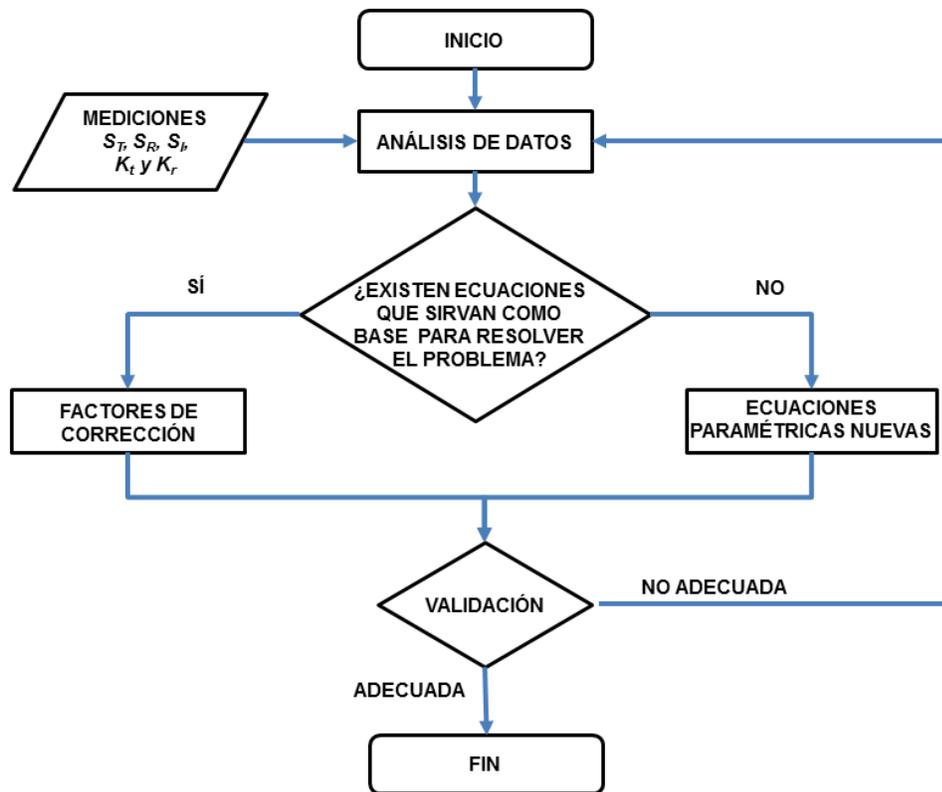


Figura 4. Diagrama de flujo del desarrollo de ecuaciones paramétricas para estimar K_t y K_r , así como de la función de transferencia para estimar el cambio espectral del oleaje transmitido.

Capítulo 3. Resultados

3.1 Validación del modelo utilizando oleaje regular

Se realizaron varios experimentos para verificar que el modelo CS está configurado correctamente. Estos experimentos preliminares consistieron en simular olas de Stokes de quinto orden para evaluar su evolución a través del canal sin obstáculos, y comparar los resultados con la correspondiente teoría de oleaje. La Fig. 5a muestra la elevación de la superficie (η) normalizada registrada por el sensor 4, entre 12 y 22 periodos de oleaje (T) posteriores al comienzo del experimento. Al tomar en cuenta la profundidad h , la altura de ola H_i y su periodo T , la teoría correspondiente para este ejemplo de acuerdo a LeMéhauté (1976), es una ola de Stokes de segundo orden, la cual también se grafica para su comparación con los resultados experimentales. La Fig. 5b muestra una comparación entre η teórica y experimental (normalizadas) de la serie de tiempo completa.

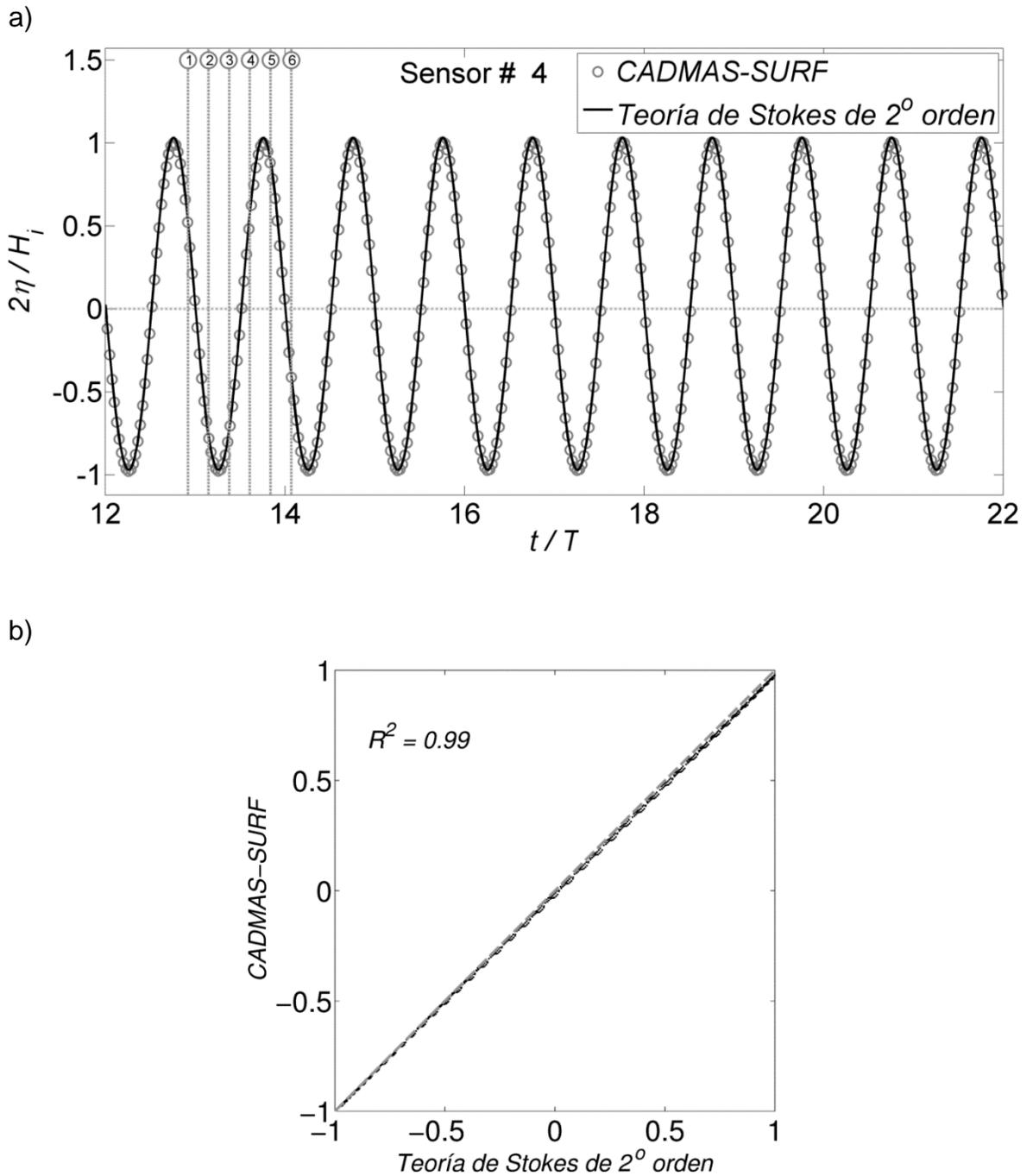
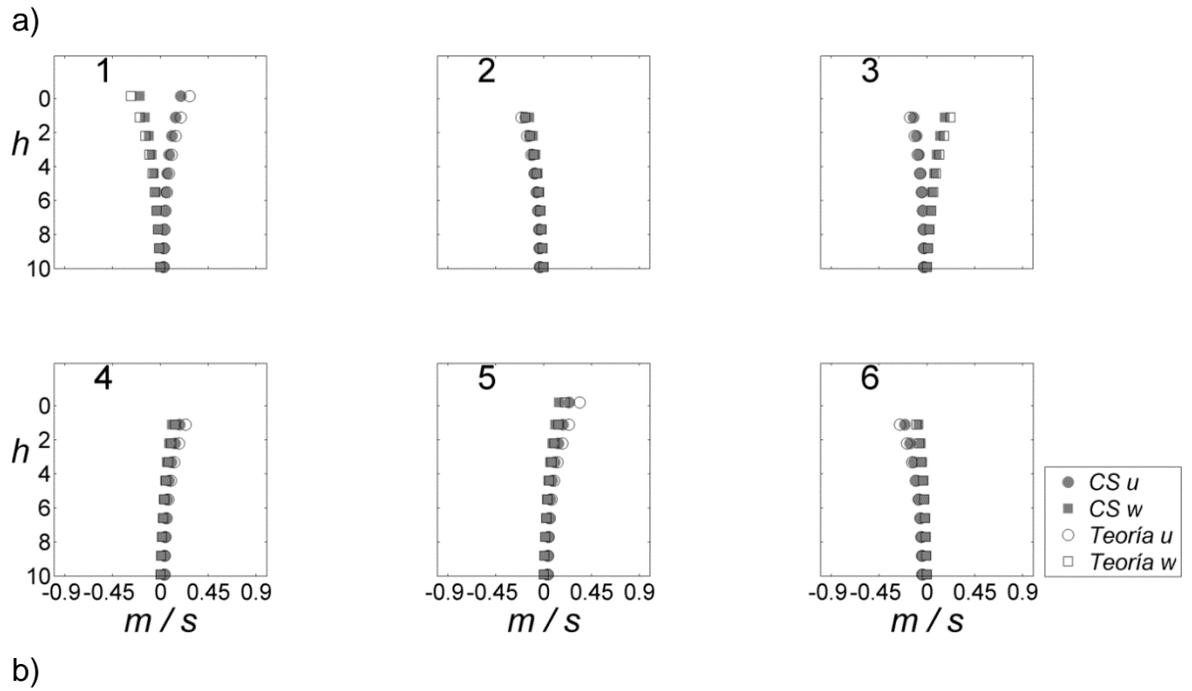


Figura 5. (a) Evolución en el tiempo de la superficie normalizada ($2\eta/H_i$), calculada mediante el modelo CS (círculos) y la teoría de Stokes de segundo orden (línea), la cual es la teoría de oleaje que corresponde a la h , T y H_i utilizadas (LeMéhauté, 1976). (b) Comparación entre la elevación teórica y experimental de la superficie correspondiente a la serie de tiempo completa. La línea gris punteada corresponde a los valores donde ocurriría una correspondencia exacta.

La Fig. 6a muestra las velocidades orbitales instantáneas, u y w , correspondientes a los seis pasos de tiempo marcados en la Fig. 5a, donde la teoría se compara con las estimaciones del modelo CS. Los resultados concuerdan bastante bien con la teoría, indicando que el modelo calcula estimaciones confiables. La Fig. 6b muestra los espectros incidente, reflejado y transmitido, obtenidos mediante la técnica de tres sensores mencionada en el capítulo anterior. El espectro incidente (S_I) y el transmitido (S_T) son prácticamente idénticos, mientras que en este caso específico los valores del espectro reflejado (S_R) prácticamente son cero, tal como se esperaba debido a la ausencia de obstáculo. Sin embargo, es necesario hacer notar que a lo largo de todos los experimentos, se presentó una señal de reflexión con valor hasta de 16%, aún en ausencia de obstáculos. Este error es atribuido en parte a la reflexión numérica y en mayor medida a la precisión del método utilizado para obtener los espectros, ya que se reconoce que ésta es considerablemente menor al calcular K_r , en comparación con el cálculo de K_t (Isaacson, 1991). Las desviaciones de la teoría lineal, la cual es base del método de separación utilizado, puede contribuir a este error (aunque el método de Mansard y Funke es menos sensible a dichas desviaciones, comparado con otros métodos (Lin y Huang, 2004)). Para valorar la contribución de la reflexión numérica en el error, se compararon las elevaciones de la superficie y la longitud de onda obtenidas con el modelo CS y las teóricas. La comparación se hace con gráficas como la Fig. 5, donde se observa que las olas tienen longitudes y amplitudes similares a la teoría durante toda la serie de tiempo, indicando que el ruido numérico causado por la frontera abierta puede despreciarse (Hinatsu, 1992). Por otro lado, el error total reportado no es tan grande cuando se compara con la reflexión que se reporta comúnmente tanto en canales numéricos como de laboratorio. Por ejemplo, Lara et al. (2006) encontró una reflexión en su simulación numérica de hasta 10%. Hughes (1993) describió varios tipos de esponjas que se utilizan en canales de laboratorio, y reportó que siempre hubo reflexión, hasta en un 10%.



b)

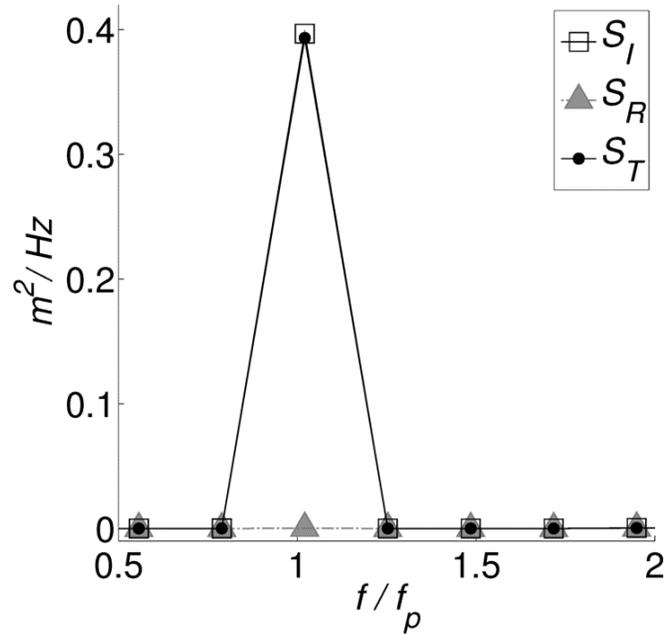


Figura 6. (a) Velocidades numéricas y teóricas, u y w , de las partículas de agua, en los seis pasos de tiempo marcados en la Fig. 5a; y (b) Espectro incidente (S_I), reflejado (S_R) y transmitido (S_T), separados utilizando el método de Mansard y Funke (1980).

Finalmente, se hicieron comparaciones entre los valores de K_t y K_r reportados en la literatura y los encontrados en este trabajo. Ijima et al. (1976) presentaron coeficientes de transmisión teóricos y experimentales asociados a obstáculos con sección transversal circular. Tolba (1999) realizó experimentos para estudiar la reflexión y transmisión del oleaje en estructuras cuadradas flotantes. Koutandos et al. (2004) utilizaron un modelo numérico para estimar K_t y K_r con obstáculos similares. Li et al. (2005) desarrollaron un método para calcular K_t y presentaron curvas de este coeficiente asociado a estructuras rectangulares y cilíndricas. Estos valores se utilizaron para estimar K_r mediante la relación lineal $K_r^2 = 1 - K_t^2$, tal como lo sugieren los autores. Los resultados se muestran en la Tabla 4 y en la Fig. 7. De los resultados se concluyen que no existe una diferencia estadísticamente significativa, indicando que el modelo numérico CS puede reproducir con precisión este tipo de experimentos.

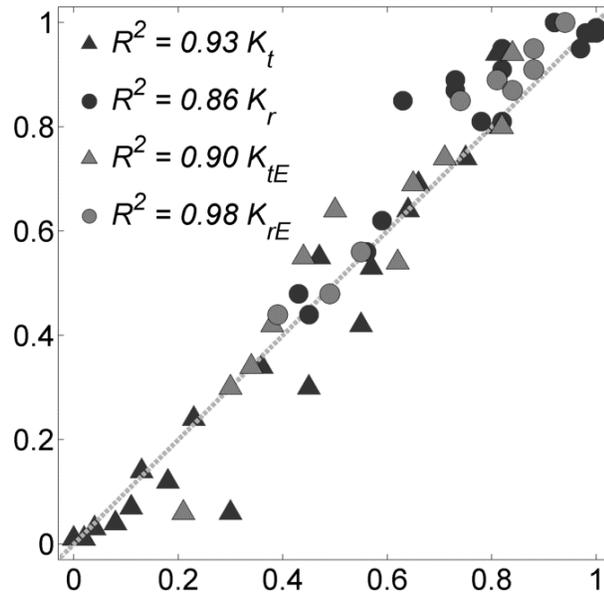


Figura 7. Comparación entre los coeficientes de transmisión y reflexión teóricos (K_t , K_r) y experimentales (K_{tE} , K_{rE}) reportados en la literatura (Ijima et al. (1976); Tolba (1999); Koutandos et al. (2004); Li et al. (2005)) y los coeficientes calculados con el modelo CS. La línea gris punteada representa una correspondencia exacta.

Tabla 4. Comparación de resultados recopilados de la literatura y los valores calculados con el modelo CS (K_{tC} y K_{rC}). La profundidad, la longitud y el número de onda, el calado y la longitud del obstáculo están expresados con h , λ , k , d_r y B , respectivamente, como se muestra en la Fig. 1.

Exp.	Tipo de obstáculo	$kB/2$	d_r/h	B/λ	K_t	K_{tE}	K_r	K_{rE}	K_{tC}	K_{rC}
1	[]	3.00	0.750	0.95	0.00	-	1.00	-	0.01	0.99
2	[]	0.40	0.500	0.12	0.57	-	0.82	-	0.53	0.81
3	[]	2.00	0.500	0.63	0.02	-	1.00	-	0.01	0.99
4	[]	1.00	0.750	0.31	0.13	-	0.99	-	0.14	0.98
5	[]	0.50	0.750	0.15	0.23	-	0.97	-	0.24	0.95
6	[]	1.00	0.250	0.32	0.18	-	0.98	-	0.12	0.98
7	[]	2.00	0.250	0.63	0.11	-	0.99	-	0.07	0.98
8	[]	1.00	0.250	0.31	0.08	-	1.00	-	0.04	0.98
9	[]	2.00	0.250	0.64	0.04	-	1.00	-	0.03	0.98
10	[]	0.35	0.200	0.11	0.75	0.71	0.43	0.49	0.74	0.48
11	[]	0.50	0.200	0.16	0.64	0.50	0.63	0.74	0.64	0.85
12	[]	0.58	0.200	0.19	0.55	0.38	0.73	0.84	0.42	0.87
13	[]	0.69	0.200	0.22	0.45	0.30	0.82	0.88	0.30	0.95
14	[]	0.82	0.200	0.26	0.3	0.21	0.92	0.94	0.06	1.00
15	[]	0.24	0.25	0.08	0.81	0.84	0.45	0.39	0.94	0.44
16	[]	0.35	0.250	0.11	0.66	0.65	0.56	0.55	0.69	0.56
17	[]	0.50	0.250	0.16	0.47	0.44	0.73	0.81	0.55	0.89
18	[]	0.58	0.250	0.19	0.36	0.34	0.82	0.88	0.34	0.91
19	O	0.50	0.400	0.16	0.62	0.62	0.78	-	0.54	0.81
20	O	0.30	0.400	0.10	0.81	0.82	0.59	-	0.80	0.62

Exp. 1-9 K_t y K_r obtenidos de Li et al. (2005); exp. 10-18 K_t y K_r reportados en Koutandos et al. (2004); exp. 10-18 K_{tE} y K_{rE} obtenidos experimentalmente por Tolba (1999); exp 19-20 K_r presentado en Li et al. (2005); exp 19-20 K_t y K_{tE} obtenidos teórica y experimentalmente por Iijima et al. (1976); exp 1-20 K_{tC} y K_{rC} estimados en este estudio mediante el modelo CS.

3.2 Validación del modelo utilizando oleaje irregular

Se realizaron varios experimentos para verificar la configuración correcta del modelo CS para simular oleaje irregular. Estos experimentos preliminares se realizaron para reproducir los resultados reportados por Koutandos et al. (2005), donde se forzó el modelo con un espectro JONSWAP. Las series de tiempo de las

velocidades y elevaciones correspondientes al espectro, se calcularon mediante las siguientes expresiones (Jung et al., 2012):

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m)$$

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\cosh(k_m(h+z))}{\sinh(k_m h)} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m)$$

$$w(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\sinh(k_m(h+z))}{\sinh(k_m h)} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m)$$

(22)

donde

$$a_m = \sqrt{2S(f)\Delta f} \quad (23)$$

y $S(f)$ representa el espectro *JONSWAP* de acuerdo a la sección 2.2.

La Tabla 5 muestra los parámetros utilizados en los experimentos. Los primeros tres se hicieron sin la presencia de obstáculos para analizar los espectros S_I , S_R y S_T . Al no haber obstáculos, S_R debe de ser casi nulo, mientras que S_I y S_T deben tender a ser idénticos. En la Fig. 8 se muestra dicha comparación, además de comparar la H_s del forzamiento con la obtenida de S_I . Se puede observar cómo S_R tiene valores cercanos a cero (en todos los casos considerados K_R no excedió del 6%), mientras que S_T es similar a S_I , tal como se esperaba. Así mismo, la diferencia entre la altura de ola significativa obtenida mediante S_I (H_{m0}) y la H_s del forzamiento es muy pequeña en los tres casos. Estos resultados indican que el modelo simula correctamente este tipo de espectros.

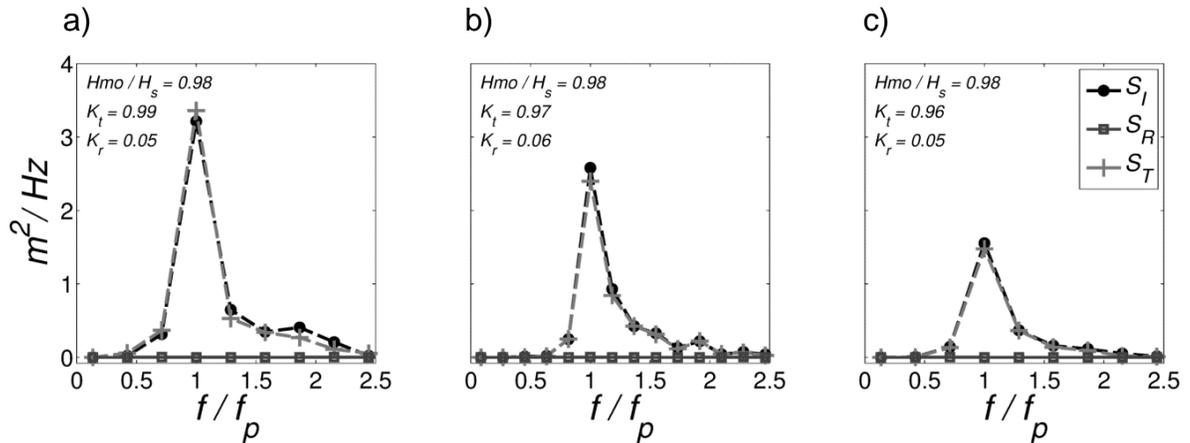


Figura 8. Espectro incidente (S_I), reflejado (S_R) y transmitido (S_T), obtenidos mediante el método de Mansard y Funke (1980) de los experimentos 1-3 (a, b y c, respectivamente) de la Tabla 4 (sin obstáculo).

Tabla 5. Comparación de resultados experimentales recopilados de la literatura (K_{tE} y K_{rE}) y los valores calculados con el modelo CS (K_{tC} y K_{rC}). La profundidad, la longitud y el número de onda, el calado y la longitud vertical y horizontal del obstáculo están expresados con h , λ_p , k , d_r , Z y B , respectivamente.

Exp.	h/λ_p	d_r/h	Hs/λ_p	Z/h	B/λ_p	K_{tE}	K_{rE}	K_{tC}	K_{rC}
1	0.08	-	0.012	-	-	-	-	0.99	0.05
2	0.15	-	0.023	-	-	-	-	0.97	0.06
3	0.19	-	0.029	-	-	-	-	0.96	0.05
4	0.08	0.33	0.012	0.75	0.08	0.87	0.44	0.79	0.40
5	0.15	0.33	0.023	0.75	0.15	0.67	0.66	0.60	0.64
6	0.19	0.33	0.029	0.75	0.19	0.50	0.60	0.43	0.59
7	0.08	0.25	0.012	0.75	0.08	0.91	0.39	0.83	0.35
8	0.15	0.25	0.023	0.75	0.15	0.72	0.62	0.66	0.61
9	0.19	0.25	0.029	0.75	0.19	0.57	0.62	0.53	0.68
10	0.08	0.20	0.012	0.75	0.08	0.92	0.35	0.86	0.35
11	0.15	0.20	0.023	0.75	0.15	0.76	0.57	0.70	0.58
12	0.19	0.20	0.029	0.75	0.19	0.60	0.57	0.57	0.58

Por otro lado, para analizar si el modelo es capaz de reproducir la interacción entre oleaje irregular y estructuras, se utilizaron los experimentos 4 al 12 de la Tabla 5, donde se comparan los K_r reportados en la literatura y los obtenidos mediante el modelo CS. Los resultados se muestran en la gráfica de dispersión de la Fig. 9. El modelo tiende a subestimar el coeficiente de

transmisión, sin embargo las diferencias no son estadísticamente significativas, por lo que el modelo CS se puede utilizar para estudiar la interacción entre el oleaje irregular y obstáculos.

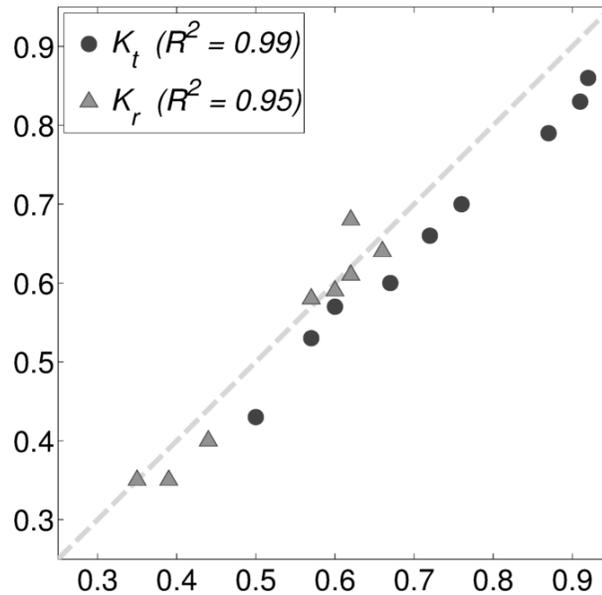


Figura 9. Comparación de los coeficientes de transmisión y reflexión experimentales (K_{tE} y K_{rE}) reportados en la literatura por Koutandos et al. (2005) y los coeficientes calculados con el modelo CS. La línea gris punteada corresponde a los valores donde ocurriría una correspondencia exacta.

3.3 Influencia de los parámetros adimensionales en K_r

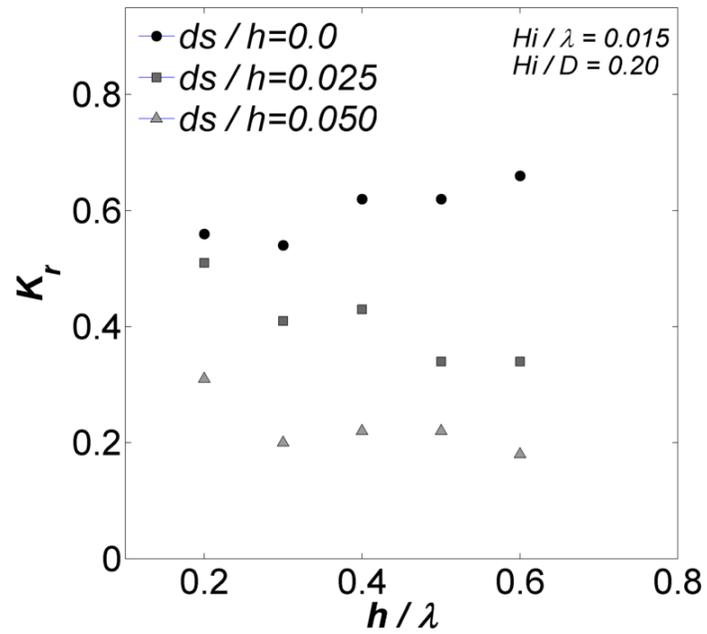
En el caso de los experimentos con oleaje regular y obstáculos con sección transversal cuadrada, se observó que la sumersión relativa es claramente inversamente proporcional a K_t en los casos con altura relativa de ola (H_i/Z) de 0.2 y 0.5. Su influencia es mayor en aguas profundas, debido a la distribución de la energía cinética promedio contenida en una ola. En aguas intermedias dicha distribución es relativamente uniforme con la profundidad, mientras que en aguas profundas la energía se encuentra concentrada cerca de la superficie y decae exponencialmente con la profundidad (Dean y Harleman, 1966). De esta manera, la sumersión relativa es un factor muy importante, especialmente en aguas

profundas, pues permitirá que el obstáculo interactúe en mayor o menor medida con el oleaje incidente. Su influencia será menor al aproximarse a aguas someras, debido a que olas relativamente más largas alcanzan a interactuar con obstáculos colocados a mayor profundidad. Este hecho se observa claramente en la Fig. 10, donde la distancia entre los valores de K_r , relacionados con diferentes sumersiones relativas, tiende a ser más corta al aproximarse a aguas someras.

En la Fig. 11 se puede observar que la influencia de la pendiente de la ola es importante cuando el obstáculo se encuentra cerca de la superficie, y su efecto disminuye con la profundidad, especialmente en aguas profundas. Las tendencias son las mismas con tamaños relativos de ola de 0.5 y 0.20. Sin embargo, en el valor más grande considerado ($H_i/Z = 1.0$), ni la pendiente de la ola ni la sumersión ni la profundidad relativa parecen tener algún efecto en K_r , el cual se mantuvo alrededor de 0.20. Esto sugiere que un obstáculo con una sección cuadrada no es un buen diseño para bloquear la energía del oleaje en casos en que la altura relativa de las olas sea menor o igual a 1.0 (obstáculo con dimensiones iguales o menores que la altura de la ola).

Por otra parte, en los experimentos con oleaje irregular y obstáculos con sección transversal rectangular, la reflexión siempre tuvo valores entre 0.10 - 0.50 aproximadamente (ver Fig. 12). Esto es similar a lo encontrado por otros autores, donde reportan que este tipo de obstáculos tienden a disipar la energía del oleaje en vez de reflejarla, en especial cuando éstos se encuentran cerca de la superficie (Wiegel, 1964; Patarapanich y Cheong, 1989; Brossard et al., 2009).

a)



b)

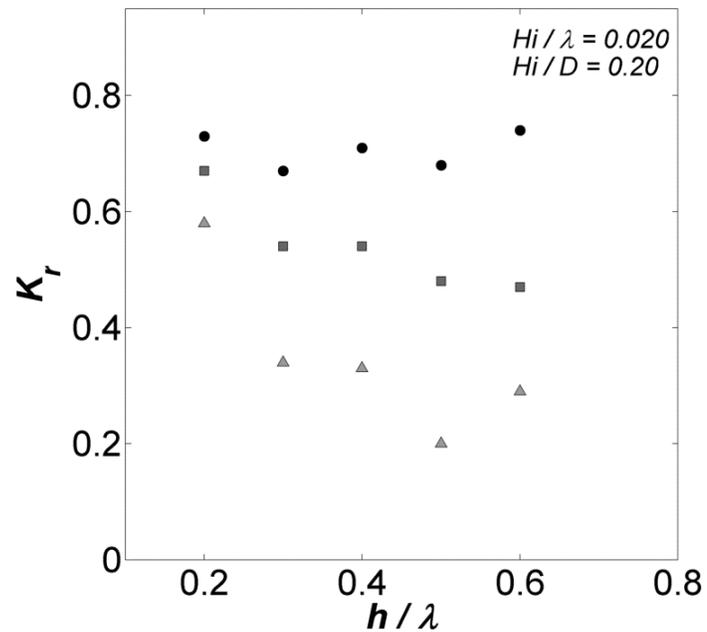


Figura 10. Variaciones de K_r en función de la profundidad relativa (a) $H_i/\lambda = 0.015$ y (b) $H_i/\lambda = 0.020$. Se puede observar cómo d_s/h tiene una mayor influencia en aguas profundas, y pierde importancia cuando h/λ se aproxima a aguas someras.

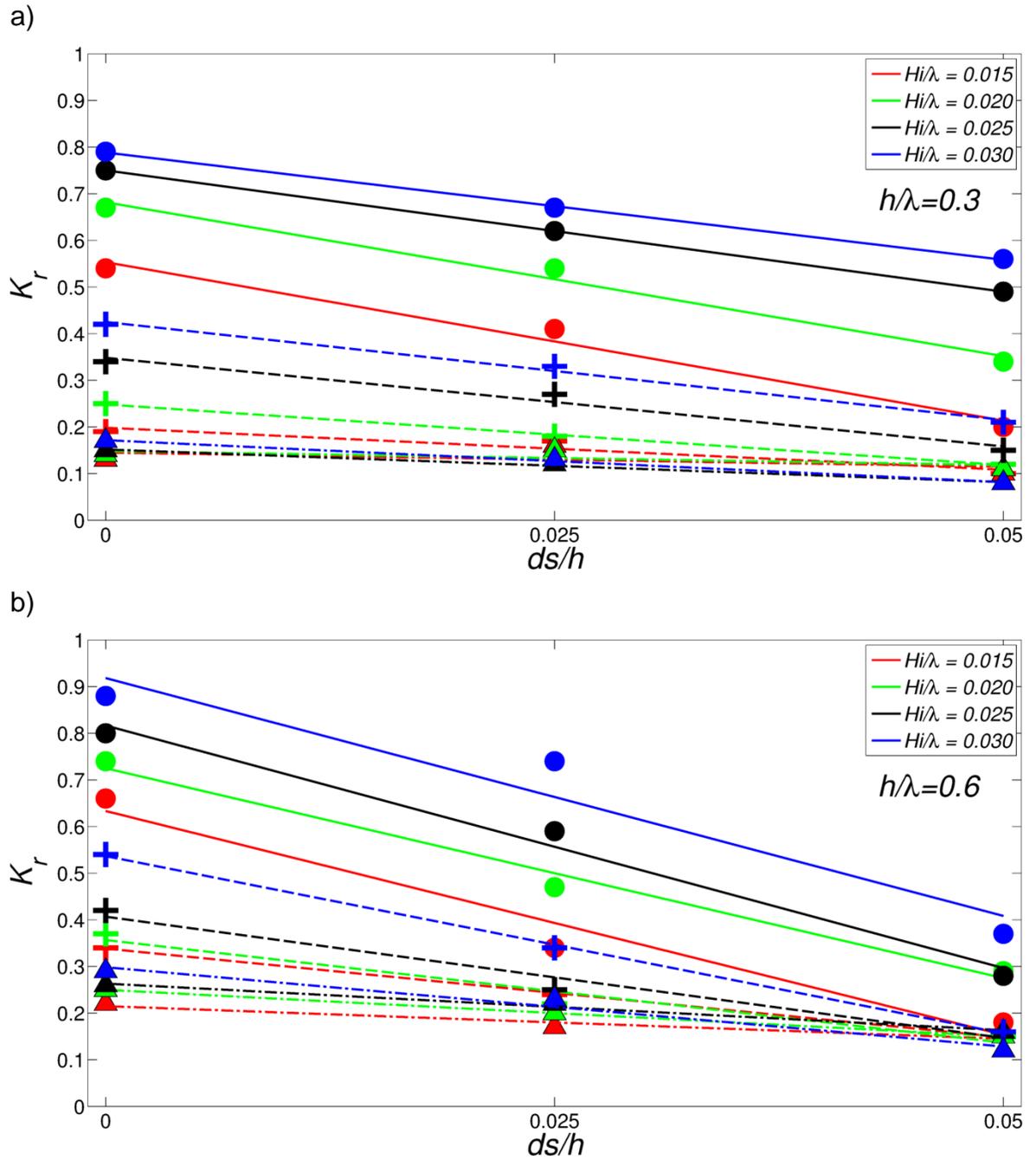
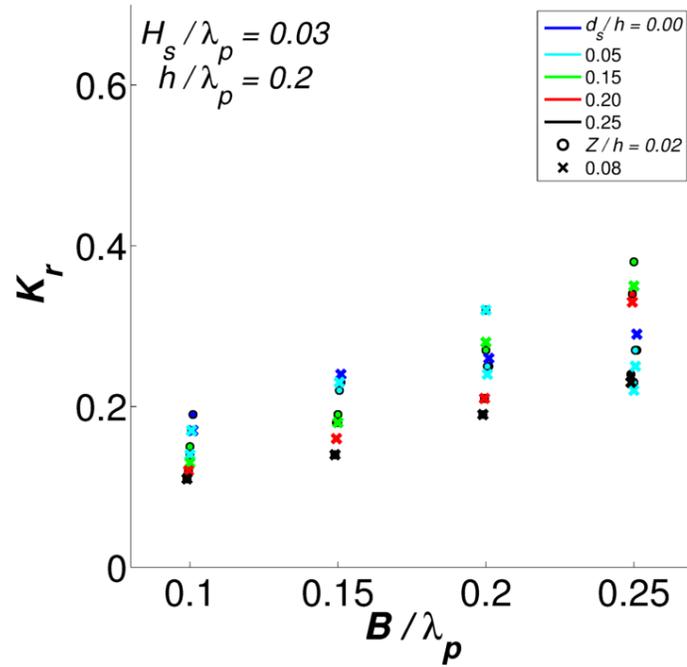


Figura 11. Variación de K_r en función de los parámetros adimensionales (a) aguas intermedias y (b) aguas profundas. Los símbolos tipo círculo, cruz y triángulo corresponden a tamaños relativos de ola de 0.20, 0.50 y 1.0, respectivamente.

a)



b)

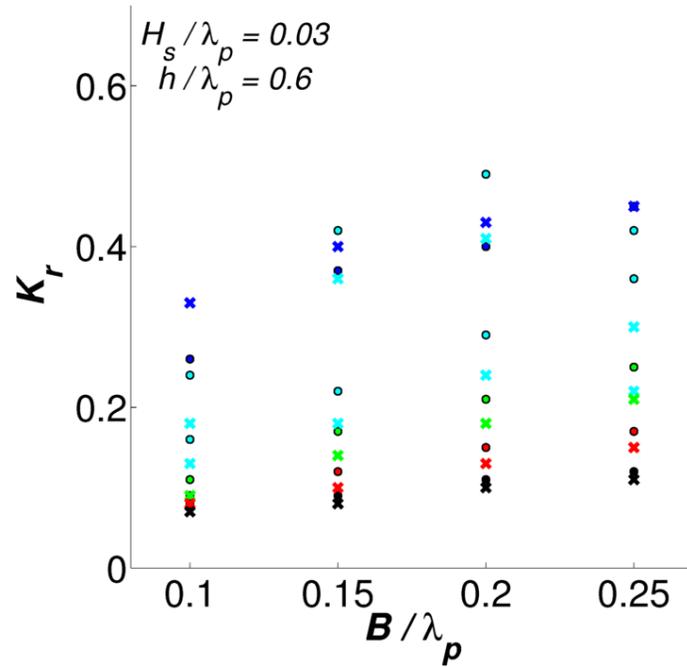


Figura 12. Variación de K_r en función de B/λ_p y otros parámetros adimensionales, tales como d_s/h , Z/h , H_s/λ_p y h/λ_p ; en casos de: (a) aguas intermedias y (b) aguas profundas. Se puede observar cómo el tamaño relativo tiende a tener una relación directamente proporcional con K_r , y tiene mayor influencia en regiones cercanas a la superficie.

3.4 Influencia de los parámetros adimensionales en K_t

En el caso de los experimentos con oleaje regular y obstáculos con sección transversal cuadrada, se observó de manera muy clara que K_t tiene una relación inversa con K_r . Por ejemplo, se observó que con alturas relativas de olas de entre 0.20 y 0.50, K_t es claramente proporcional a la sumersión relativa, como se muestra en la Fig. 13. La sumersión relativa contribuye significativamente en la transmisión del oleaje, y sus efectos tienen mayor relevancia al combinarse con profundidades relativas que tienden a aguas profundas, tal como se expuso en la sección anterior. A su vez, la pendiente de la ola presentó una relación inversa con K_t , como se puede observar en la Fig. 13, donde los valores más altos de este parámetro se asocian con K_t menores.

En los experimentos con oleaje irregular y obstáculos con sección transversal rectangular se observó que K_t y K_r no siguen una relación lineal, debido a que estos obstáculos producen más disipación y menos reflexión, comparados con los de sección cuadrada. Esto quiere decir que cuando disminuye K_t , no necesariamente aumenta K_r . El coeficiente de disipación, K_d , juega entonces un papel importante en este tipo de obstáculos. Por otra parte, intuitivamente se podría pensar que mientras más profundo se encuentre el obstáculo, mayor será K_t . Sin embargo, de los resultados (ver Fig. 14) se pudo observar que existe una región cercana a la superficie libre, donde K_t disminuye al aumentar la profundidad, hasta llegar a una sumersión crítica, d_{sc} , (típicamente entre 0 y 15% de la profundidad h) donde se observa un punto de inflexión de tal manera que si se le sumerge aún más, la transmisión empezará a incrementarse según lo esperado. A su vez, el tamaño relativo de la estructura en la horizontal (B/λ_p) tiene también una fuerte influencia en la transmisión del oleaje. En el intervalo de valores utilizados de este parámetro, se observó una relación inversamente proporcional a K_t (ver Fig. 15).

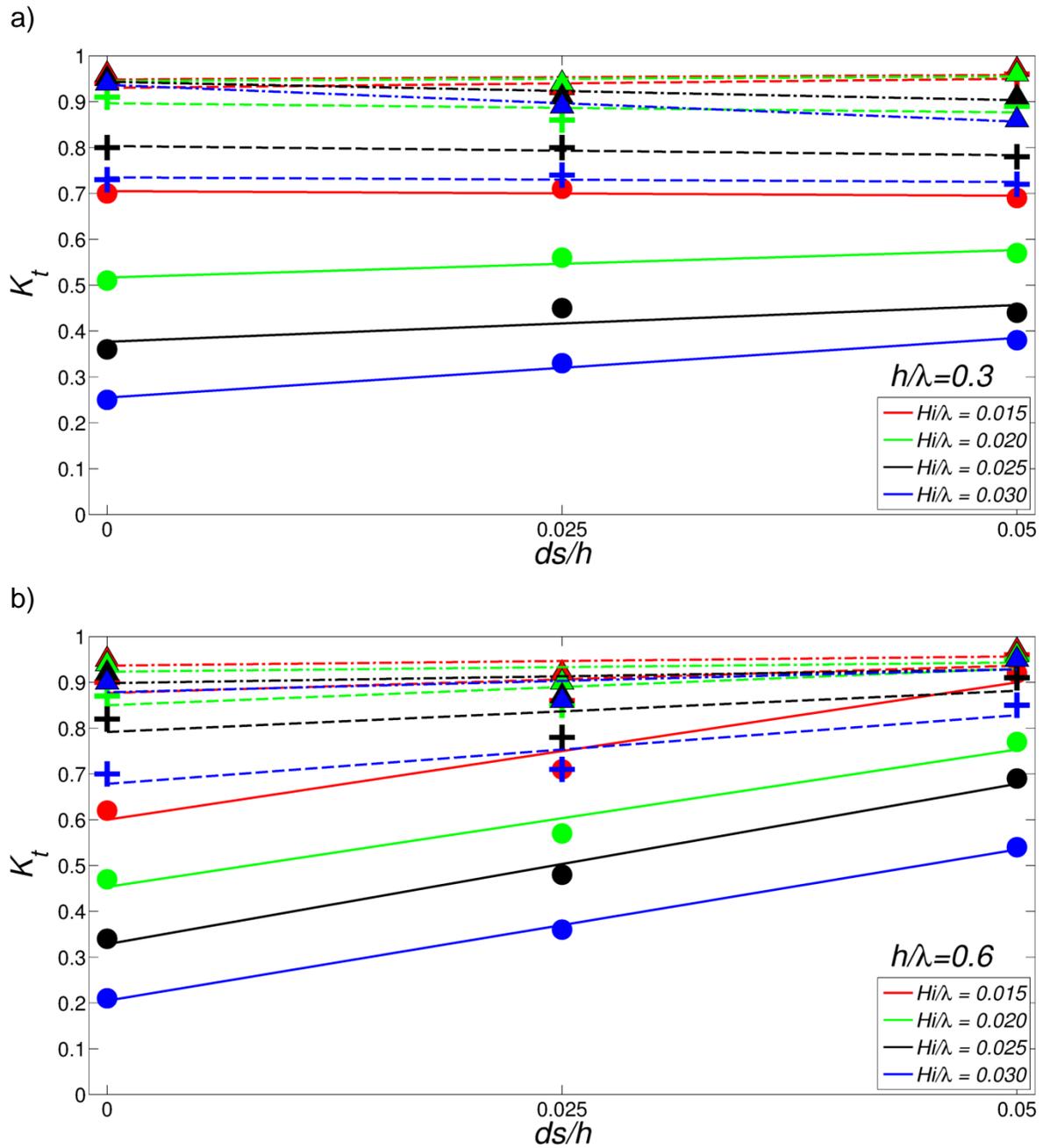


Figura 13. Variación de K_t en función de ds/h y otros parámetros adimensionales, tales como H/Z , H/λ y h/λ ; en casos de: (a) aguas intermedias y (b) aguas profundas. Los símbolos tipo círculo, cruz y triángulo corresponden a tamaños relativos de ola de 0.20, 0.50 y 1.0, respectivamente.

Los demás parámetros adimensionales (el espesor relativo, la pendiente de la ola y la profundidad relativa) tienen una influencia menos apreciable en la variación de K_t . Sin embargo, su importancia radica en que modifican la manera en que d_s/h y B/λ_p afectan la transmisión del oleaje. Por ejemplo, en la Fig. 14b, se puede observar que en ciertos experimentos, donde los obstáculos tienen un espesor relativo más grande (0.08) y en especial con longitudes relativas grandes y colocados en aguas profundas (e.g. $B/\lambda_p = 0.20$ y 0.25 y $h/\lambda_p = 0.6$), d_{sc} no se puede observar con la resolución de la pruebas realizadas. En la Fig. 16 se muestra la variación de K_t con h/λ_p . Se puede observar la formación de tres grupos con tendencias diferentes:

- a) Con sumersiones relativas mayores o iguales a 0.15, K_t se incrementa al incrementar h/λ_p . La explicación de este comportamiento se deduce al tomar en cuenta la concentración de la energía cinética de las olas, la cual es mayor en la región cercana a la superficie y disminuye exponencialmente con la profundidad en aguas profundas, resultando en una menor interacción entre el oleaje y la estructura.
- b) Con obstáculos colocados en la superficie ($d_s/h = 0$). La tendencia general es contraria al grupo previo. Un incremento en h/λ_p está asociado a una disminución en K_t , debido a que conforme la profundidad relativa tiende a aguas profundas, la alta concentración de energía cercana a la superficie (la cual disminuye exponencialmente con la profundidad) permite una interacción más intensa entre el oleaje y la estructura.
- c) Con sumersiones relativas alrededor de $d_s/h = 0.05$, la tendencia general es disminuir K_t al aumentar el valor de h/λ_p de 0.2 a 0.4. Sin embargo, con $h/\lambda_p = 0.6$, K_t incrementó su valor. Lo anterior muestra claramente cómo h/λ_p modifica la posición de la profundidad crítica.

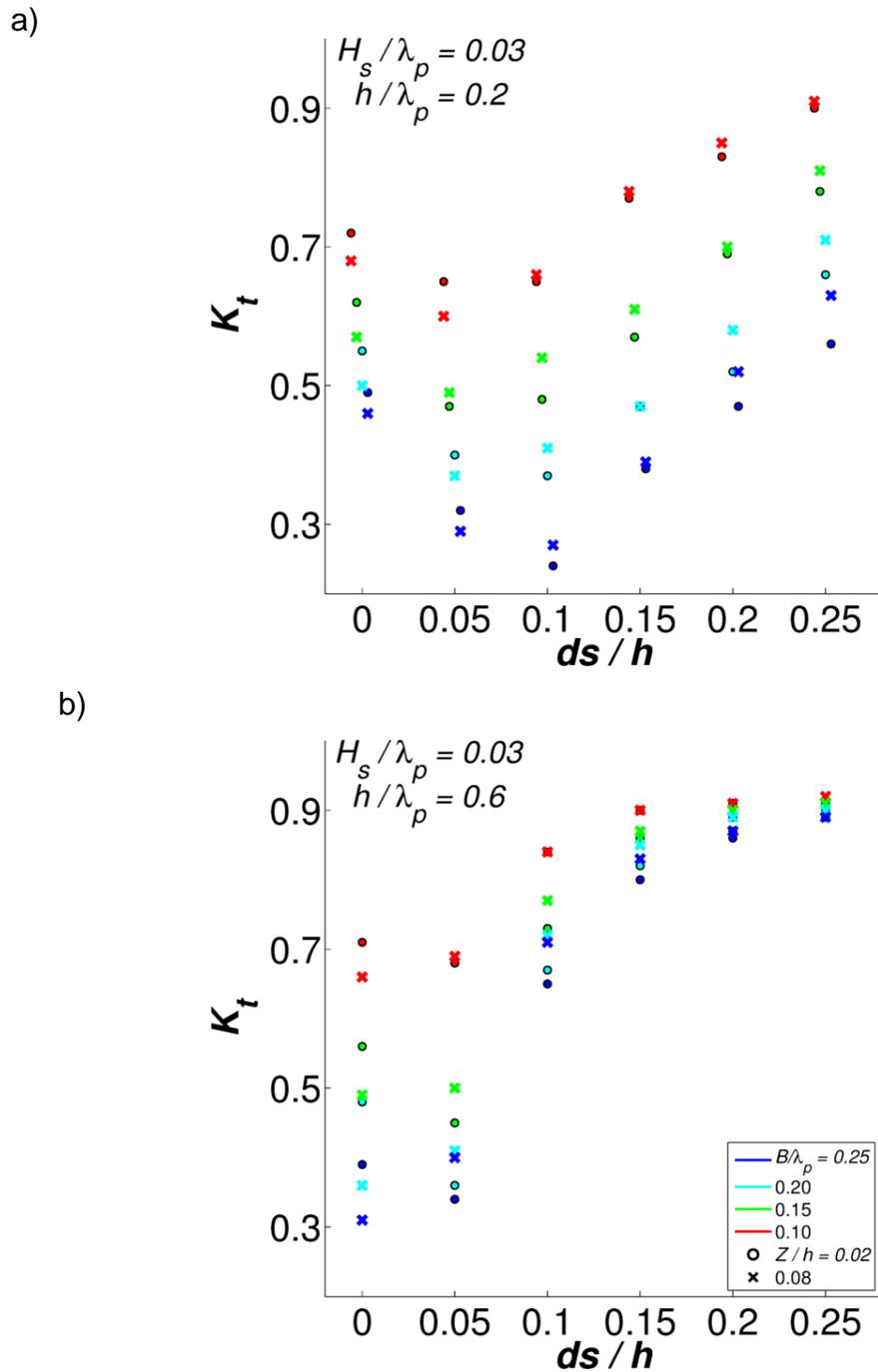


Figura 14. Variación de K_t en función de d_s/h y otros parámetros adimensionales, tales como B/λ_p , Z/h , H_s/λ_p y h/λ_p ; en casos de: (a) aguas intermedias y (b) aguas profundas. Se puede observar, en algunos casos, profundidades críticas (d_{sc}) entre 0.0 y 0.15. La posición de estas profundidades dependen de los demás parámetros adimensionales, como el tamaño relativo del obstáculo y el espesor relativo.

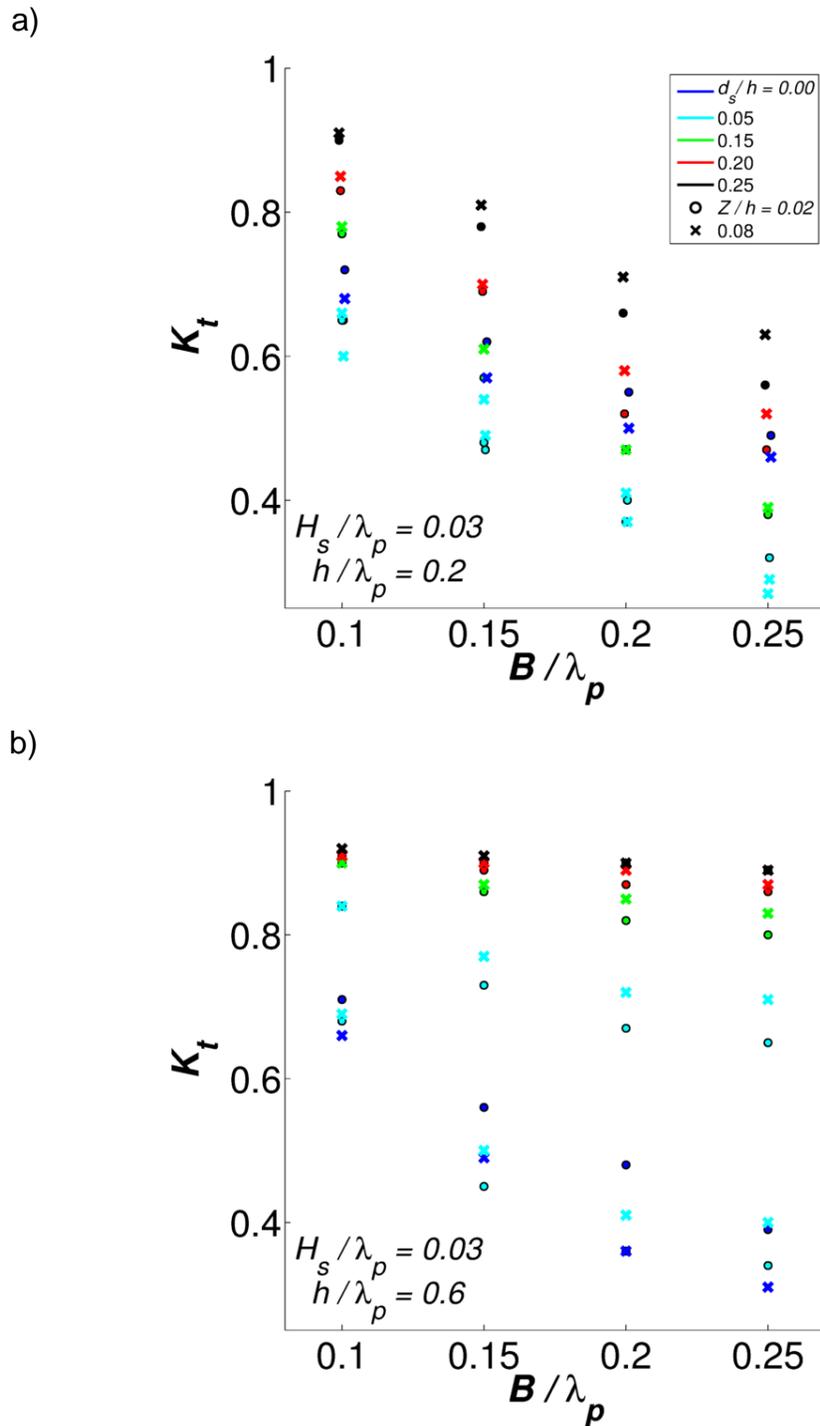


Figura 15. Variación de K_t en función de B/λ_p y otros parámetros adimensionales, tales como d_s/h , Z/h , H_s/λ_p y h/λ_p ; en casos de: (a) aguas intermedias y (b) aguas profundas. Se puede observar cómo el tamaño relativo es indirectamente proporcional a K_t , y tiene mayor influencia en regiones cercanas a la superficie.

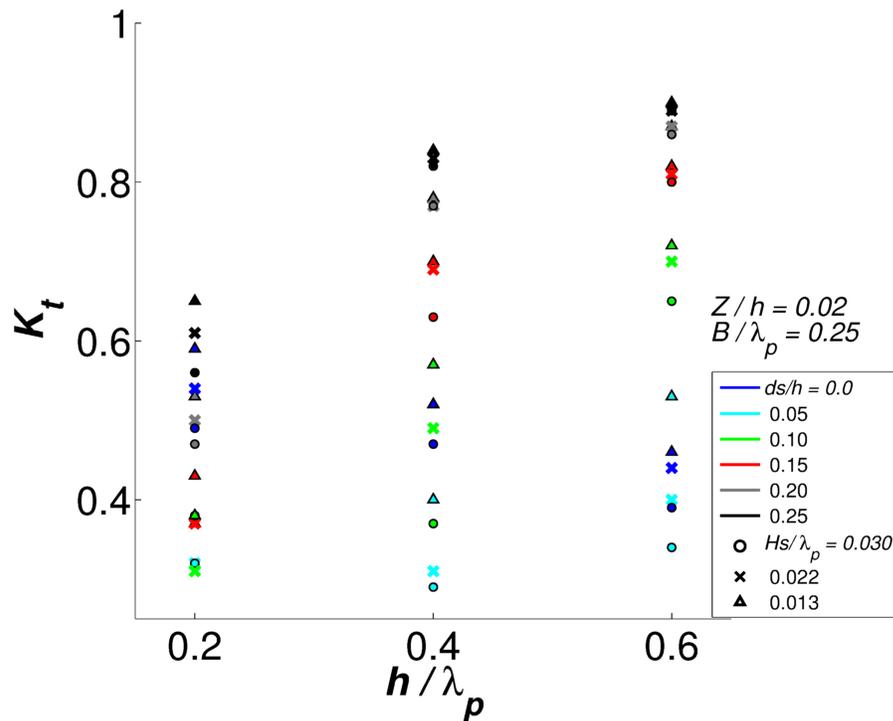


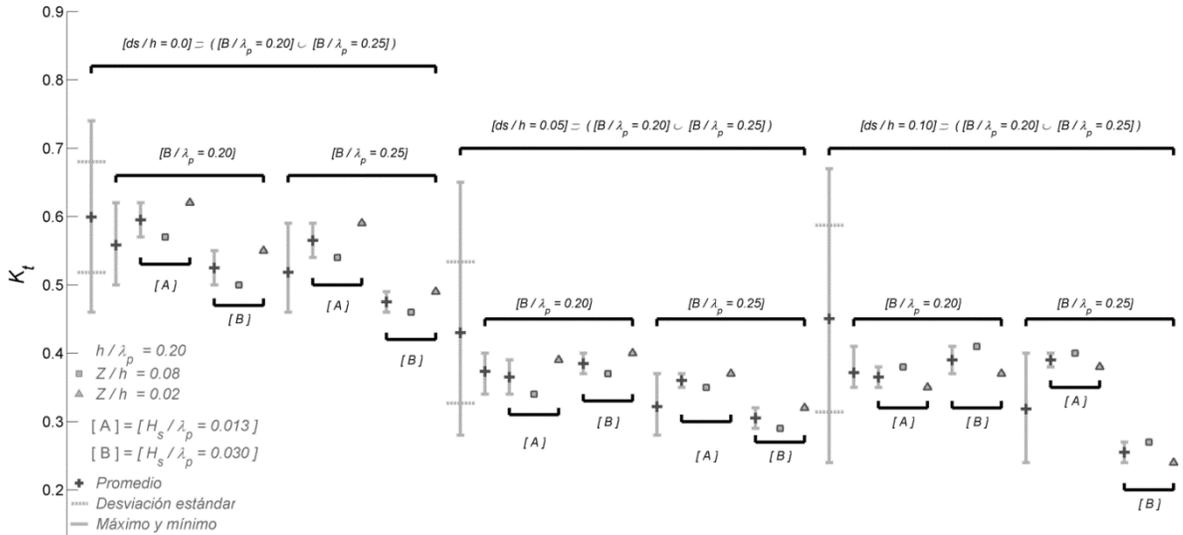
Figura 16. Variación de K_t en función de h/λ_p y otros parámetros adimensionales, tales como d_s/h , H_s/λ_p y B/λ_p . Se puede observar cómo la influencia de h/λ_p depende de las combinaciones de los demás parámetros.

La influencia que tiene la pendiente de la ola en K_t también varía dependiendo de los otros parámetros. Por ejemplo, conforme la profundidad relativa se acerca a aguas profundas, y la sumersión relativa es mayor o igual a 0.20, la pendiente prácticamente no tiene influencia en la transmisión del oleaje. Por otro lado, con sumersiones menores y en especial con placas largas ($B/\lambda_p > 0.20$), las pendientes mayores están asociadas con una reducción de K_t (ver Fig. 16), probablemente debido a disipación por rompimiento y a la formación de remolinos en el extremo del obstáculo.

En las Figs. 17 y 18, se puede observar de manera más clara la influencia de los parámetros adimensionales. Estas imágenes revelan que el espesor relativo es indirectamente proporcional a K_t cuando el obstáculo se encuentra cerca de la superficie. Sin embargo, llega un punto donde su influencia en la

transmisión del oleaje se revierte. La magnitud de la sumersión relativa en la que esto sucede está ligada a la profundidad relativa. Más aún, en los casos en aguas profundas y un espesor relativo de 0.08, no se pudo identificar una sumersión crítica.

a)



b)

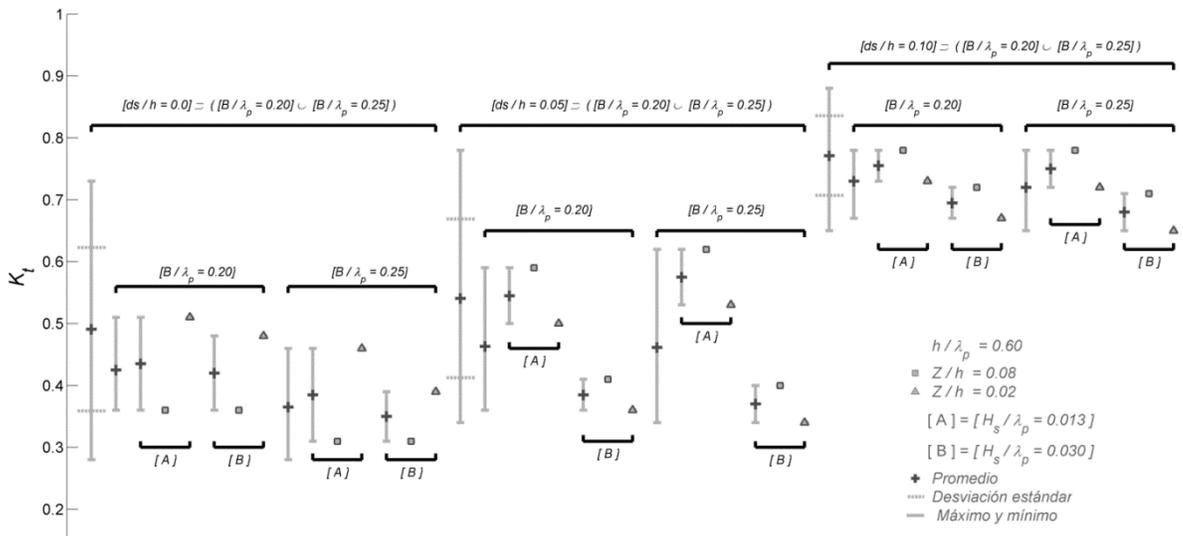


Figura 17. Agrupamiento de la transmisión del oleaje en función de los parámetros adimensionales. Se muestra de manera general la tendencia de K_t al modificar las combinaciones de los diferentes parámetros utilizados en los experimentos; caso (a): aguas intermedias ($h/\lambda_p=0.2$); caso (b): aguas profundas ($h/\lambda_p=0.6$).

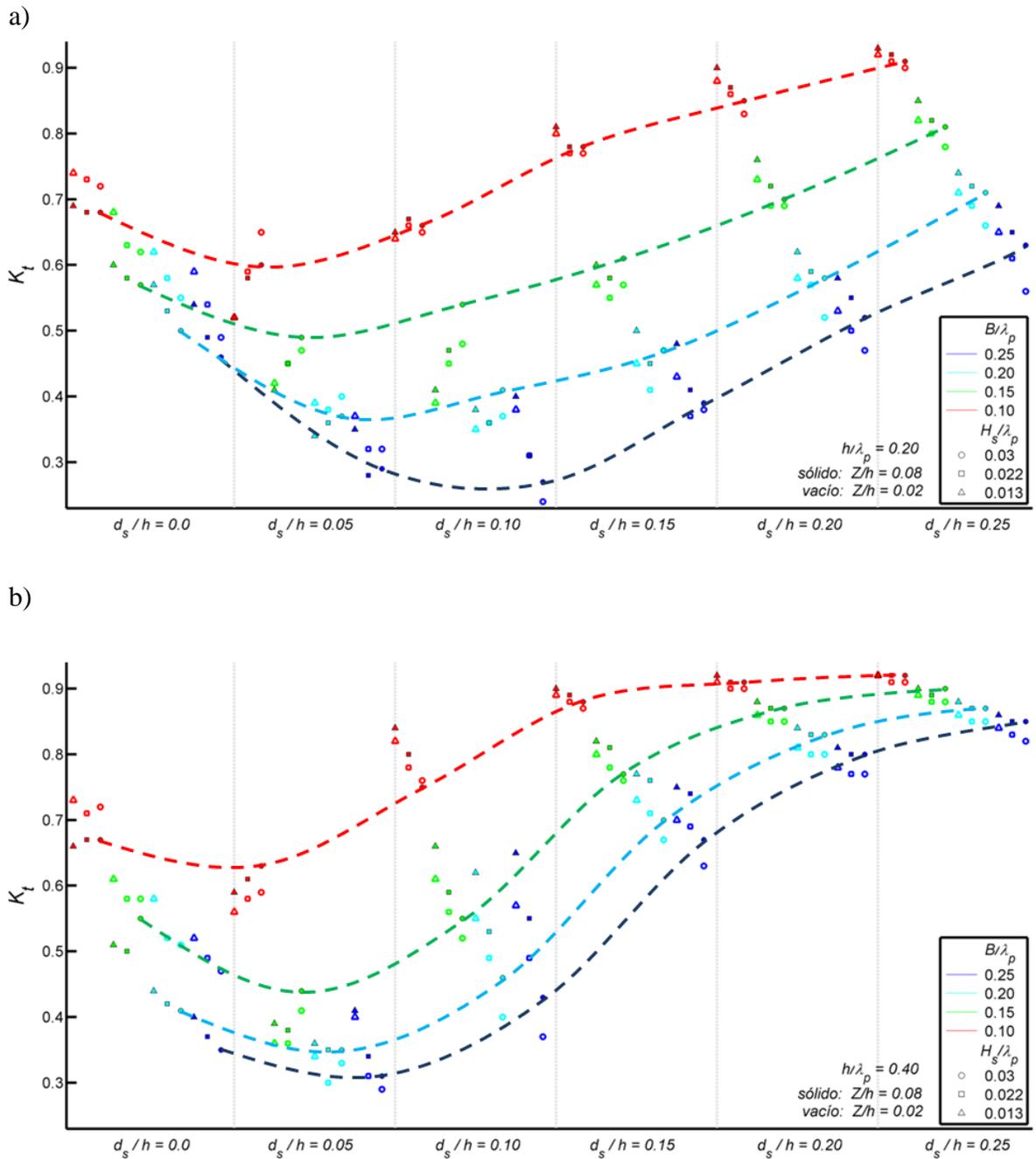


Figura 18. Variación de K_t en función de d_s/h y de otros parámetros adimensionales relevantes, como la longitud relativa, el espesor relativo y la pendiente de la ola, para los casos con profundidades relativas de (a) 0.2, (b) 0.4, y (c) 0.6.

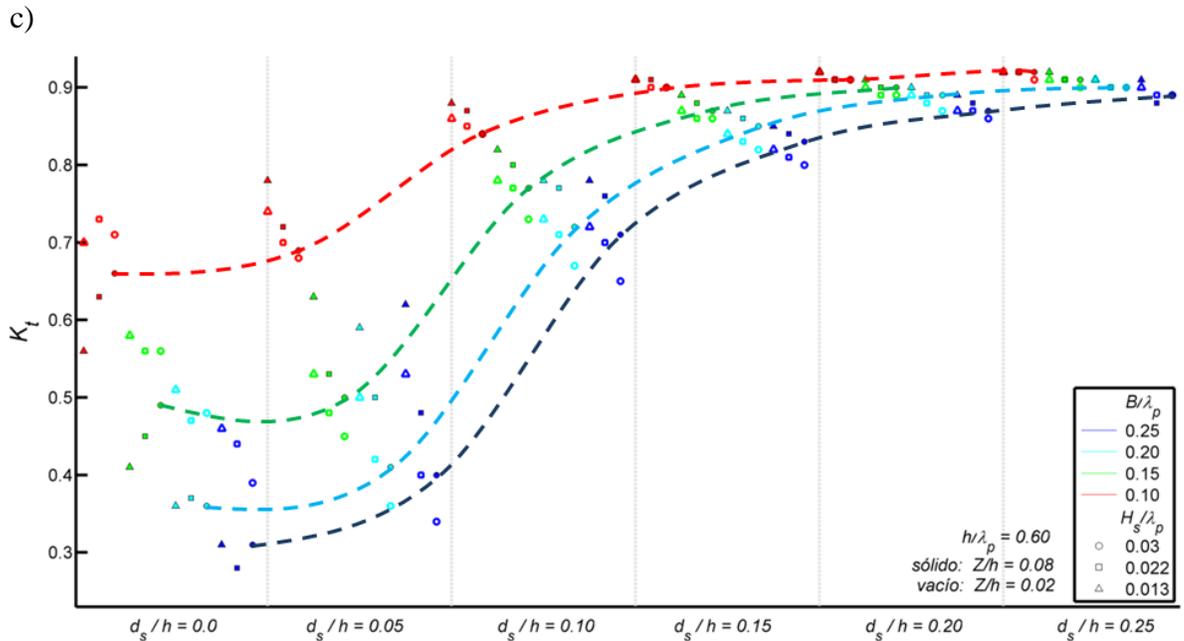


Figura 18 (continuación). Variación de K_t en función de d_s/h y de otros parámetros adimensionales relevantes, como la longitud relativa, el espesor relativo y la pendiente de la ola, para los casos con profundidades relativas de (a) 0.2, (b) 0.4, y (c) 0.6.

3.5 Cambio espectral

El espectro del oleaje al interactuar con un obstáculo, sufre un cambio en su forma original. Este cambio, por lo general, no modifica la posición del periodo asociado al pico espectral (T_p). Sin embargo, el espectro transmitido (S_T) es resultado de ciertas transformaciones que pueden ser desde una reducción en la energía disponible en el espectro, hasta la generación de super-armónicos que se observan como picos de energía en frecuencias altas ($2f_p$, $4f_p$, $8f_p$...). En otros casos, particularmente en sumersiones relativas muy someras (aproximadamente entre 0.05 - 0.15, dependiendo de h/λ_p), y con K_t menores que 0.35, el espectro sufre una transformación más severa y existe una transferencia mayor de energía hacia frecuencias altas. Algunos ejemplos del cambio espectral se muestran en la Fig. 19. El espectro incidente está representado con la línea de color gris claro, y corresponde a un espectro JONSWAP normalizado tanto en frecuencia como en energía. La línea gris oscuro es el espectro transmitido. Se puede observar que

en los casos (b) y (c) se genera un super-armónico en la frecuencia correspondiente a dos veces la frecuencia asociada al pico espectral.

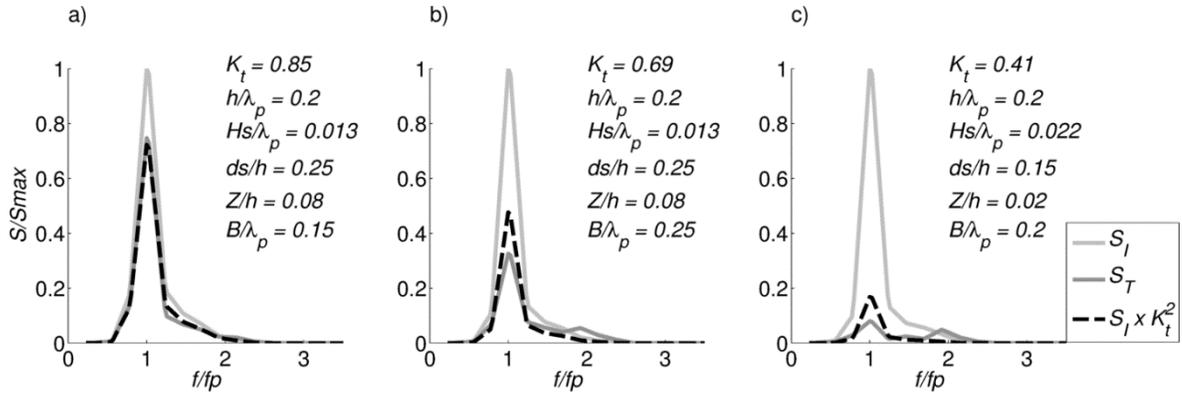


Figura 19. Cambio del espectro incidente (normalizado en frecuencia y energía) al interactuar con un obstáculo sumergido (a) escenario donde se produce una simple reducción de la energía disponible, (b) generación de super-armónico de primer orden y (c) intensa redistribución de la energía.

3.6 Ecuaciones paramétricas

3.6.1 K_r con obstáculos con sección transversal cuadrada

Para proponer una ecuación paramétrica que represente el coeficiente de reflexión asociado a obstáculos sumergidos con sección transversal cuadrada (interactuando con oleaje regular), es importante entender su dependencia con respecto a los diferentes parámetros adimensionales. De los resultados de los experimentos numéricos de la Tabla 2, descritos en la sección 3.3, se observó que K_r presenta un comportamiento inversamente exponencial con respecto a la altura relativa de ola, de tal manera que se propone una expresión general de la forma:

$$\log(K_r) = A - B \log\left(\frac{H_s}{Z}\right) \quad (24)$$

Los logaritmos en la Ec. 24 permiten visualizar una variación lineal de K_r (en H/Z). Se realizó una regresión con base en cuadrados mínimos para estimar los coeficientes A y B, correspondientes a cada experimento. Posteriormente se hacen dos nuevas regresiones para proponer funciones que estimen los valores de A y B, en términos de uno o varios de los parámetros adimensionales restantes. Después de analizar los resultados se concluyó que la profundidad y la sumersión relativa, así como la pendiente de la ola tienen un impacto tanto en A como en B, por lo que la ecuación del coeficiente de reflexión estimado (K_{re}) se sugiere de la forma:

$$K_{re} = \min \left\{ \frac{A}{\left(\frac{H_i}{Z} \right)^B}, 1.0 \right\} \quad (25)$$

donde,

$$A = a_1 \left(\frac{ds}{h} \right) + a_2 \left(\frac{h}{\lambda} \right) + a_3 \left(\frac{H_i}{\lambda} \right) + a_4 \left(\frac{ds}{h} \right) \left(\frac{H_i}{\lambda} \right)$$

$$B = b_0 + b_1 \left(\frac{ds}{h} \right) + b_2 \left(\frac{h}{\lambda} \right) + b_3 \left(\frac{H_i}{\lambda} \right) + b_4 \left(\frac{ds}{h} \right) \left(\frac{H_i}{\lambda} \right) + b_5 \left(\frac{ds}{h} \right) \left(\frac{h}{\lambda} \right)$$

$$a_1 = 1.1865$$

$$a_2 = 0.1283$$

$$a_3 = 6.4334$$

$$a_4 = -121.9349$$

$$b_0 = 1.0392$$

$$b_1 = -12.1082$$

$$b_2 = -0.5516$$

$$b_3 = 1.1955$$

$$b_4 = 625.1360$$

$$b_5 = -13.7445$$

Los valores mínimos y máximos posibles de K_{re} deben de fijarse iguales a cero y uno, respectivamente.

3.6.2 K_t con obstáculos con sección transversal cuadrada

Un procedimiento similar se utilizó para encontrar una expresión del coeficiente de transmisión (K_{te}). La ecuación que finalmente se sugiere es del tipo:

$$K_{te} = \min \left\{ \begin{array}{l} A \left(\frac{H_i}{Z} \right)^B \\ 1.0 \end{array} \right. \quad (26)$$

donde

$$A = a_0 + a_1 \left(\frac{ds}{h} \right) + a_2 \left(\frac{h}{\lambda} \right) + a_3 \left(\frac{H_i}{\lambda} \right) + a_4 \left(\frac{ds}{h} \right) \left(\frac{H_i}{\lambda} \right)$$

$$B = b_0 + b_1 \left(\frac{ds}{h} \right) + b_2 \left(\frac{h}{\lambda} \right) + b_3 \left(\frac{H_i}{\lambda} \right) + b_4 \left(\frac{ds}{h} \right) \left(\frac{H_i}{\lambda} \right) + b_5 \left(\frac{ds}{h} \right) \left(\frac{h}{\lambda} \right)$$

$$a_0 = 1.0111$$

$$a_1 = -0.1060$$

$$a_2 = 2.2699$$

$$a_3 = 1.0526$$

$$a_4 = -87.6240$$

$$b_0 = -0.4419$$

$$b_1 = 9.3254$$

$$b_2 = 0.0958$$

$$b_3 = 41.8137$$

$$b_4 = -346.6160$$

$$b_5 = -14.9230$$

Los valores mínimos y máximos posibles de K_{te} deben ser iguales a cero y uno, respectivamente. Se puede observar que la Ec. 26 es similar a la Ec. 25, pero con la altura relativa de ola directamente proporcional a K_t .

3.6.3 K_t con obstáculos tipo placa

Con obstáculos con sección transversal rectangular delgada (tipo placa), se realizó un mayor número de experimentos para observar la influencia de d_g/h en la transmisión del oleaje. Se utilizaron valores que van desde la superficie hasta un valor de 25% del tirante de agua ($d_g/h=0.25$). En la sección anterior se reportó la presencia de una sumersión crítica d_{sc} , entre 0 y $0.15 h$, donde K_t es mínimo. A mayor profundidad, K_t aumenta con d_g/h . Este comportamiento no se observó en los experimentos con sección cuadrada. La curva de la variación de K_t con d_g/h tiene una forma de V, con su vértice en d_{sc} , y es difícil ajustar una ecuación sencilla que represente este fenómeno. Más aún, la posición de su vértice cambia dependiendo de la combinación entre los otros parámetros adimensionales. Los procesos de disipación que ocurren en esta zona son muy importantes y la variación de K_t no se puede analizar adecuadamente con la resolución utilizada. Por este motivo, no se pudo obtener una ecuación que estime K_t dentro de esta región ($0.05 \leq d_g/h \leq 0.10$).

Aunque es deseable tener una ecuación que estime K_t en cualquier escenario (cualquier combinación de los parámetros adimensionales), se encontró que dicha ecuación tiende a tener demasiados parámetros libres, lo que la vuelven impráctica e inclusive imprecisa en la obtención de extrapolaciones. Un ejemplo es la Ec. 27, la cual estima el coeficiente de transmisión, haciendo uso de 25 parámetros libres.

$$K_{te} = \frac{c_1 - c_3}{\left(\frac{B}{\lambda_p}\right)^{c_2}} \quad (27)$$

$$\begin{aligned}
C_1 = & 0.6 - 0.5\left(\frac{h}{\lambda}\right) - 5.1\left(\frac{H_s}{\lambda}\right) - 1.4\left(\frac{Z}{h}\right) - 7.9\left(\frac{d_s}{h}\right) \\
& + 5.1\left(\frac{h}{\lambda_p}\right)\left(\frac{H_s}{\lambda_p}\right) + 19.6\left(\frac{h}{\lambda_p}\right)\left(\frac{d_s}{h}\right) + 19.3\left(\frac{Z}{h}\right)\left(\frac{d_s}{h}\right) \\
& + 17.1\left(\frac{d_s}{h}\right)^2 - 64.7 * \left(\frac{h}{\lambda_p}\right)^2 \left(\frac{d_s}{h}\right)^2 - 1876.3 * \left(\frac{Z}{h}\right)^2 \left(\frac{d_s}{h}\right)^3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_2 = & 0.5\left(\frac{h}{\lambda_p}\right) + 8.7 * \left(\frac{H_s}{\lambda_p}\right) + 21.6 * \left(\frac{d_s}{h}\right) + 5.4 * \left(\frac{h}{\lambda_p}\right)\left(\frac{Z}{h}\right) \\
& - 44.6 * \left(\frac{h}{\lambda_p}\right)\left(\frac{d_s}{h}\right) - 31.4 * \left(\frac{H_s}{\lambda_p}\right)\left(\frac{d_s}{h}\right) - 25.1 * \left(\frac{Z}{h}\right)\left(\frac{d_s}{h}\right) \\
& - 85.4 * \left(\frac{d_s}{h}\right)^2 + 115.8 * \left(\frac{d_s}{h}\right)^3 + 314.3 * \left(\frac{h}{\lambda_p}\right)^2 \left(\frac{d_s}{h}\right)^2 \\
& + 171 * \left(\frac{h}{\lambda_p}\right)^2 \left(\frac{d_s}{h}\right)^3 - 1035.7 * \left(\frac{h}{\lambda_p}\right)^3 \left(\frac{d_s}{h}\right)^3 + 2392.5 * \left(\frac{Z}{h}\right)^2 \left(\frac{d_s}{h}\right)^3
\end{aligned}$$

$$C_3 = 0.50 \frac{Z}{h}$$

Los resultados descritos en esta sección se discuten en más detalle en el siguiente capítulo, donde se incluyen comparaciones entre las estimaciones de las Ecs (25-27) y los resultados obtenidos mediante el modelo CS.

Capítulo 4. Discusión

4.1 Influencia de los parámetros adimensionales en K_r y K_t

La sumersión relativa y la altura relativa de las olas resultaron ser los parámetros que más influyeron en los coeficientes de reflexión y transmisión, en los casos con oleaje regular y estructuras cuadradas. No se observó d_{sc} como en el caso de los obstáculos tipo placa. Sin embargo, se debe considerar que en el diseño experimental no se utilizaron valores de d_s/h mayores que 0.05 (se estima que d_{sc} se encuentra entre 0 y 0.15 h).

Los obstáculos tipo placa interactúan de manera distinta con el oleaje que los obstáculos cuadrados. Estas estructuras son más disipativas, debido a que detienen o disipan la energía del oleaje al alterar el curso del flujo tanto por el bloqueo directo debido al choque del flujo con el cuerpo del obstáculo, así como por la interacción fluido-fluido inducida por éste. En la sección 1.2, se explicó acerca de una corriente de retorno que se produce por debajo de la placa, interfiriendo con las velocidades orbitales del oleaje incidente (Graw, 1992; Yu, 2002, Bung et al., 2008). Bung et al. (2008) muestran cómo este flujo está ligado a los vórtices que se generan en el extremo posterior de la placa. Observaron que la posición del rompimiento de las olas juega un papel determinante en la generación y propagación de dichos vórtices. Por ejemplo, cuando el rompimiento ocurre en la región contigua posterior al extremo del obstáculo, se provoca un vórtice contrario a las manecillas del reloj con dirección hacia el fondo, lo que induce una corriente que debilita el flujo de retorno. Por otra parte, si el rompimiento ocurre en el extremo anterior, se presentan (en general) un par de vórtices, uno en la parte superior y otro en la inferior, con sentidos contrarios, los cuales se dirigen hacia la superficie.

De la discusión anterior, se sugiere que los parámetros que contribuyen directamente con la posición del rompimiento (en caso de que existiera), son los que más influencia tienen en K_t . De los resultados se infiere que los parámetros más relevantes son la sumersión relativa y el tamaño horizontal relativo de la placa. Por ejemplo, al aumentar d_s/h (con los demás parámetros fijos), se crean condiciones que no favorecen el rompimiento, por lo que la distancia que tiene que recorrer el oleaje para finalmente romper tiende a incrementarse. Si el obstáculo no tiene esta longitud requerida, no habrá rompimiento y el oleaje tenderá a estabilizarse después del obstáculo. Eso liga entonces K_t con d_s/h , así como con B/λ_p . Si este último parámetro tiene valores pequeños, la ola puede tener las condiciones para el rompimiento, pero no la distancia necesaria para que ocurra. Por otro lado, el resto de los parámetros también juegan un papel relevante en el proceso. La sumersión relativa intensifica su influencia en aguas profundas, debido a la distribución vertical de la energía del oleaje, concentrada cerca de la superficie. Esto provoca que los distintos valores de la sumersión relativa estén ligados a cambios más abruptos en K_t en aguas profundas. Por su parte, la pendiente del oleaje también está directamente relacionada con el rompimiento, puesto que cuanto mayor sea su valor, más inestable será el perfil del oleaje, en especial cuando la sumersión sea somera. Así mismo, existe cierta relación entre la pendiente y la profundidad relativa, dada por el número de Ursell, que presenta una influencia decisiva en la transferencia de energía de frecuencias bajas a altas, lo que impacta en la forma del espectro.

Por último, el espesor relativo se considera un parámetro que mientras menor sea su valor, menor será la transmisión del oleaje (Zheng et al., 2007; Liu et al., 2009). Liu et al. (2009) demostraron que esto es cierto cuando B/λ_p tiene valores entre 0 y 0.4. Sin embargo, llega un punto en el que la influencia del espesor en K_t se invierte periódicamente. De los resultados obtenidos en la presente tesis, se observó que d_s/h , ligada a h/λ_p , también provoca esta inversión en la influencia de Z/h en la transmisión del oleaje.

4.2 Función de transferencia para obtener S_T

Con la finalidad de proponer una función de transferencia que describa el cambio espectral, es necesario analizar los procesos físicos que se llevan a cabo al interactuar el oleaje con los obstáculos sumergidos. Por ejemplo, en todos los casos considerados se presentó una reducción de la energía disponible en el espectro. Esto indica que existe un proceso de bloqueo de energía por parte del obstáculo. Parte de esa energía perdida se reflejó al llegar al obstáculo, y parte fue disipada en la región vecina. Como ya se ha expuesto, el diseño de las placas favorece la disipación de la energía por rompimiento de las olas. Además, la estructura bloquea parte de la energía incidente mediante un flujo de retorno (Yu, 2002). Sin embargo, se reconoce en la literatura que la disipación asociada con estos procesos no modifica sustancialmente el periodo asociado al pico espectral del oleaje, y más aún, si se desea expresar el rompimiento como una función de transferencia en términos de energía, ésta tendría la misma distribución de energía que el espectro original. De esta manera, una primera aproximación para obtener S_T es multiplicar el espectro incidente por K_t^2 . Dicha operación no explica el cambio presentado en los espectros en ciertos experimentos, sin embargo proporciona una aproximación de la cantidad de energía en el espectro transmitido.

Para explicar el cambio de forma del espectro, es necesario considerar las interacciones no lineales que se llevan a cabo en la región por encima del obstáculo, las cuales son las responsables de transferir energía de frecuencias bajas a altas (Kojima et al., 1990; Brossard et al., 2009). Estas interacciones se denominan triadas, las cuales son importantes solamente en aguas someras (Holthuijsen, 2007). Específicamente, los componentes del oleaje cercanos a la frecuencia del pico espectral, tienden a crear super-armónicos, formando olas de Stokes con un pico secundario en aproximadamente el doble de f_p . Esta energía se agrega a la energía existente en $2f_p$, la cual estará ligada a la energía

localizada en f_p . Sin embargo, en la región posterior al obstáculo, esta energía puede disiparse o puede propagarse como ondas libres. La disipación por rompimiento reduce la energía del espectro, mas no impide la formación de los super-armónicos.

Es necesario, para que se lleve a cabo la transferencia de energía asociada a las interacciones por triadas, que se cumplan las siguientes condiciones de resonancia (Nwogu, 1994):

$$\begin{aligned} f_1 + f_2 &= f_3 \\ k_1 + k_2 &= k_3 \end{aligned} \quad (28)$$

; donde f son las frecuencias, k los números de onda y los subíndices son los distintos componentes del oleaje.

Si las condiciones se cumplen (estricta o aproximadamente), existirá transferencia de energía, la cual dependerá de las diferencias de fase de las tres componentes de oleaje consideradas (φ_1, φ_2 y φ_1, φ_3). Esta diferencia de fase se puede expresar mediante la bi-fase $\beta_{1,2}$:

$$\beta_{1,2} = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_{1+2} \quad (29)$$

en donde φ_1, φ_2 y $\varphi_{1+2} = \varphi_3$ son las fases de los tres componentes del oleaje que están interactuando entre sí. La bi-fase no es constante en el tiempo ni en el espacio, y cambia en función de la disipación de la energía al interactuar con el obstáculo. Una versión completa de la bi-fase, que tome en cuenta la evolución de la energía del espectro mientras se llevan a cabo las interacciones, no es sencilla. Sin embargo, existen en la literatura aproximaciones de la función de transferencia asociada a las interacciones no lineales por triadas, sin tomar en cuenta la

evolución de la energía del espectro. Un ejemplo es el método LTA (*lumped-triad approximation*) propuesto por Eldeberky (1996), el cual es una aproximación basada en la acumulación de triadas para estimar la transferencia de energía de $f/2$ a f , mediante las siguientes expresiones:

$$S_{nl}(f) = S_{nl}^+(f) + S_{nl}^-(f) \quad (30)$$

$$; S_{nl}^+(f) = \max \left\{ 0, C_{nl} C C_g \left| \text{sen}(\bar{\beta}) \right| \left[E^2(f/2) - 2E(f/2)E(f) \right] \right\}$$

$$S_{nl}^-(f) = -2S_{nl}^+(2f)$$

$$C_{nl} = 2\pi J^2 \alpha_{EB}$$

$$J = \frac{k^2(f/2)(gh + 2C^2(f/2))}{k(f)h \left[gh + \frac{2}{15}gh^3k^2(f) - \frac{2}{5}f^2h^2 \right]}$$

El término $S_{nl}^+(f)$ es siempre positivo y representa la energía que recibe el espectro en la frecuencia f , proveniente de la componente $f/2$. Por su parte, el término $S_{nl}^-(f)$ representa la transferencia de energía de f hacia $2f$. El parámetro C_{nl} es un coeficiente de acoplamiento, el cual depende de dos coeficientes, J y α_{EB} . El primero es un coeficiente de interacción propuesto por Madsen y Sorensen (1993) y el segundo es un parámetro libre con un valor típico alrededor de 0.10. Por último, C , C_g , k son la rapidez de fase, la velocidad de grupo y el número de onda, respectivamente. Los términos (f) y $(f/2)$ indican el valor de la variable en cuestión en la frecuencia f y $f/2$, respectivamente.

Por su parte, la bi-fase es estimada directamente del espectro y del tirante local de agua, en términos del número de Ursell:

$$\bar{\beta} = -90^\circ + 90^\circ \tanh(\delta / Ur) \quad (31)$$

donde δ es un parámetro libre (con valores entre 0.2 y 0.6 e inclusive mayores) y U_r es el número de Ursell, el cual es una medida del grado de no linealidad del oleaje, y se puede definir como:

$$U_r = \left(\frac{g}{8\pi^2 \sqrt{2}} \right) \left(\frac{H_{m0} T_m^2}{h^2} \right) \quad (32)$$

$$; T_m = \frac{m_0}{m_1} = \frac{\int_0^{\infty} E(f) df}{\int_0^{\infty} f E(f) df}$$

Esta aproximación es sencilla y actualmente está implementada como término fuente en modelos espectrales de tercera generación como el modelo SWAN, donde las transferencias no lineales asociadas a triadas son calculadas cuando U_r es menor o igual a la unidad.

Se implementó el método LTA en los experimentos con $U_r \leq 1$ y se observó que en la mayoría de los casos el espectro incidente tiende a adoptar la forma final de S_T . Sin embargo, en algunos casos se estimaron espectros transmitidos con picos de energía en $2f_p$, los cuales no fueron observados en los espectros obtenidos de los datos experimentales. Estas discrepancias parecen tener relación con la magnitud de K_t (por lo tanto de la disipación de la energía). Por ejemplo, en los experimentos con altos coeficientes de transmisión (e.g. $K_t \geq 0.90$), sin importar que las condiciones para que se lleven a cabo las interacciones no lineales se cumplieran, se observó que prácticamente no hubo transferencia de energía del modo fundamental (f_p) a los modos secundarios. Inclusive se observó una pequeña transferencia de energía a frecuencias bajas. Sin embargo, la forma del espectro permanece prácticamente idéntica y se puede aproximar al multiplicar el espectro incidente por K_t^2 .

Por otro lado, varios de los experimentos que inicialmente tuvieron un valor de $U_r > 1$, también presentaron transferencia de energía al primer super-armónico. Esto es debido a que a pesar de que inicialmente el espectro no cumple con las condiciones de resonancia, éste cambia gracias a los procesos de disipación y con él cambia el escenario del espectro. El espectro reducido gracias a la disipación (obtenido al multiplicar $S_i \times K_T^2$), puede cumplir con $U_r \leq 1$, y producir las interacciones no lineales responsables de la transferencia de energía.

Los experimentos que nunca cumplieron dichas condiciones, son aquellos con sumersión relativa $ds/h = 0$. Cuando el obstáculo se encuentra en la superficie, U_r tiene valor infinito y los resultados son similares a los correspondientes a los experimentos con $K_t > 0.90$, es decir, tienden a mantener la forma espectral con una ligera transferencia de energía a frecuencias bajas.

De lo anterior se puede concluir que los cambios en la forma del espectro incidente dependen principalmente del coeficiente de transmisión y de U_r . El primero nos da una idea de la energía que se pierde en el sistema, (ya sea por disipación o por reflexión), mientras que U_r introducido en la expresión de la bi-fase, nos da información acerca de las condiciones de resonancia necesarias para llevar a cabo las interacciones no lineales. Se propone una expresión general del espectro transmitido estimado (S_{Te}):

$$S_{Te}(f) = \{S_i(f) \times K_t^2\} + S_{nl}(f) + S_F(f, K_t, U_r) \quad (33)$$

El primer término fuente a la derecha de la igualdad representa el espectro reducido en energía. El segundo término proporciona la primera aproximación de la redistribución de la energía y corresponde a las interacciones no lineales por triadas. Por último, el tercero es un término de corrección (S_F), cuya función es disminuir el error asociado a no considerar la evolución de la energía del espectro.

En algunos casos esta corrección suprime totalmente las interacciones no lineales (e.g. $K_t > 0.90$), y en otros redistribuye parcialmente la energía de frecuencias altas a bajas (o viceversa). El flujo de redistribución de la energía se muestra en la Fig. 20, donde se incluyen los términos fuente de la Ec. 33. De los resultados se observó que el espectro se puede dividir en tres regiones (E_1 , E_2 y E_3). El coeficiente de transmisión parece influir de manera diferente a la energía de cada región. Dependiendo de ciertas combinaciones entre parámetros adimensionales y K_t , se fuerza la transferencia de energía mediante el factor de corrección S_F , como se explica en los párrafos siguientes. Se sugiere el siguiente esquema:

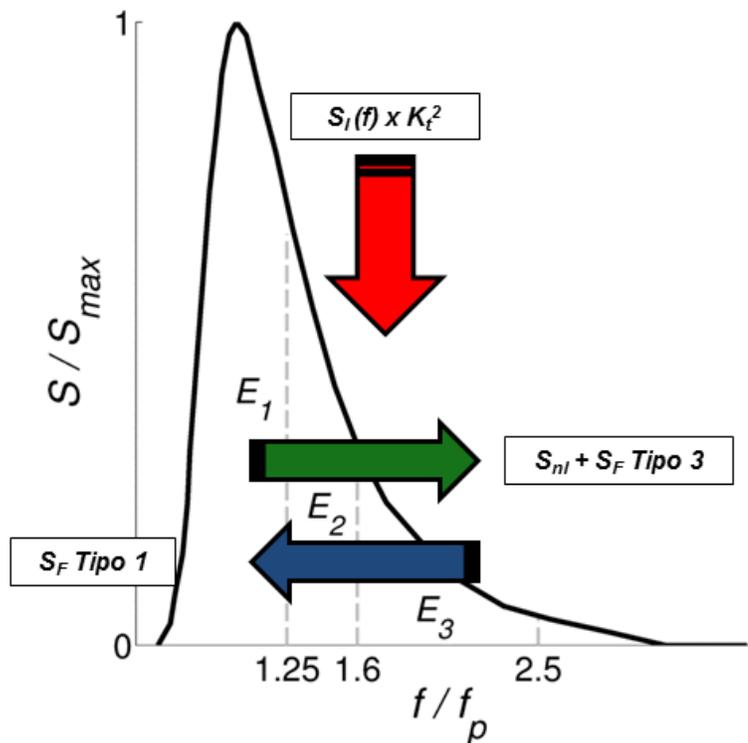


Figura 20. Flujo de energía en el espectro al interactuar con un obstáculo sumergido tipo placa. En rojo se muestra el proceso de reducción de energía. En verde la redistribución de energía a frecuencias altas mediante las interacciones no lineales y/o el factor de corrección Tipo 3. En azul se muestra el flujo de energía a frecuencias bajas, mediante el factor de corrección Tipo 1.

El procedimiento de estimación del espectro transmitido se explica de manera gráfica en el diagrama de flujo de la Fig. 21. El primer paso es encontrar

el espectro reducido al multiplicar el espectro incidente por K_t^2 . Posteriormente se calcula U_r para evaluar la necesidad de calcular el término S_{nl} . Si U_r es ≤ 1 , se hace el cálculo N veces, para obtener la primera aproximación del espectro transmitido. Los N ciclos se realizan para aproximar la evolución del espectro al interactuar con el obstáculo. Se propone $N = 5$. Posteriormente, si $0.64 < K_t < 0.77$, se divide entre dos el término S_{nl} . Esto es debido a que en esta región, en ocasiones el espectro transmitido medido presenta redistribución de energía, y en otras no. Para disminuir el error en este intervalo, se hace un promedio entre $S_{nl} = 0$ y el valor de S_{nl} calculado.

Después de estimar el término S_{nl} , se obtiene la forma preliminar del espectro, S_{TT} , al sumarle al espectro reducido las interacciones no lineales: $K_t^2 S_l + S_{nl}$. A continuación se hace el cálculo del factor de corrección, S_F , dependiendo de la profundidad relativa, K_t y de U_r , como se observa en los diagramas de las Figs. 22-24. El factor S_F puede ser del Tipo 1 y del Tipo 3, si la transferencia de energía se lleva a E_1 y a E_3 , respectivamente.

Finalmente se suma S_{TT} más S_F y se obtiene el espectro estimado S_{Te} .

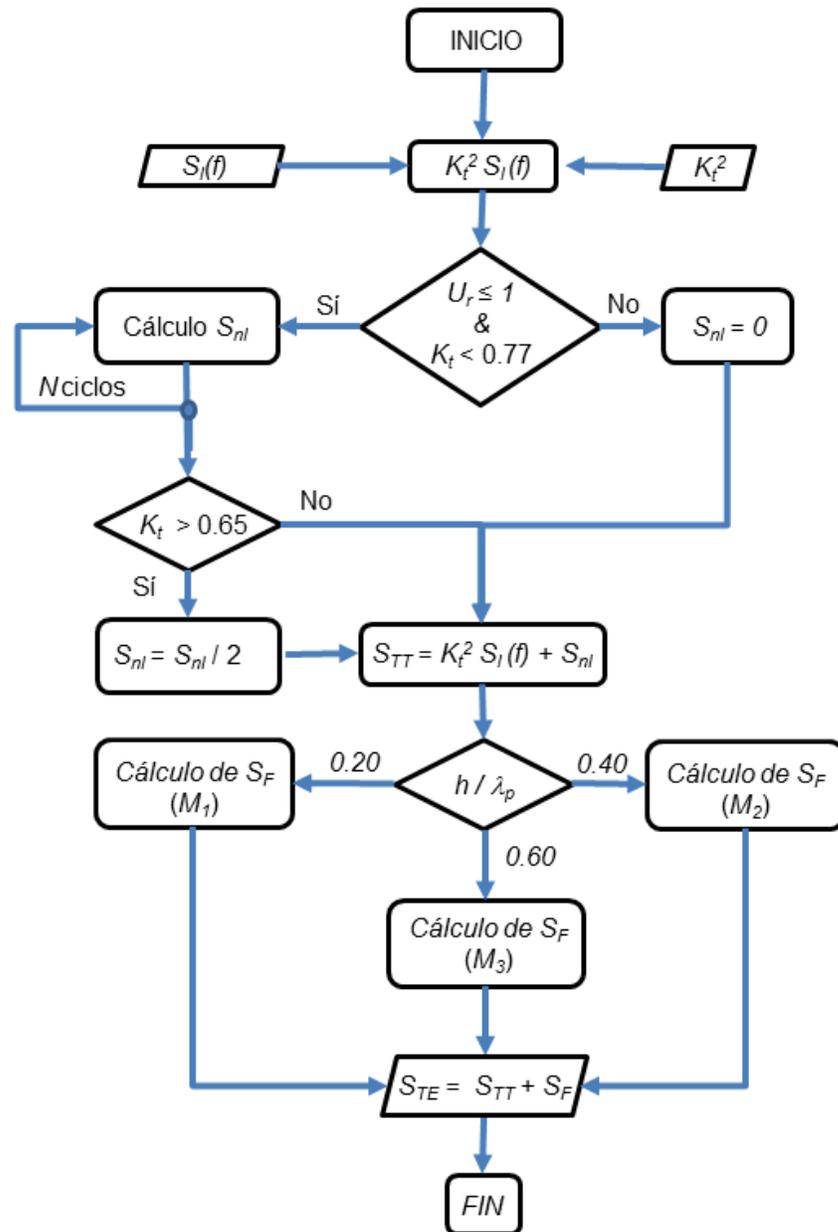


Figura 21. Método propuesto para estimar el espectro transmitido (S_{Te}). Se observa que S_{Te} depende de U_r , la profundidad relativa y del coeficiente de transmisión. El espectro transmitido es resultado de la suma de los términos fuente $S_i \times K_t^2 + S_{nl} + S_F$.

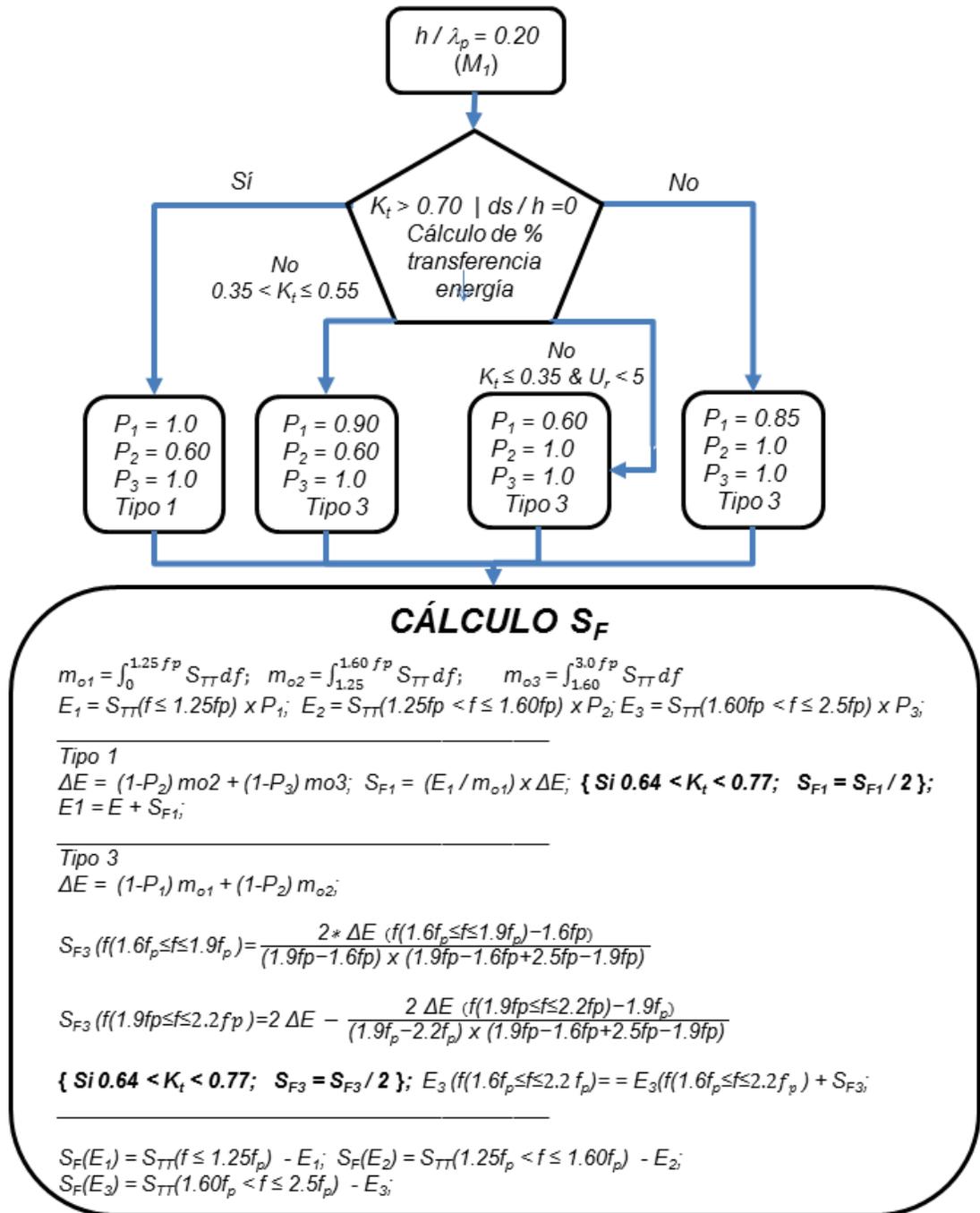


Figura 22. Método propuesto para estimar el factor de corrección, S_F , en una profundidad relativa de 0.20.

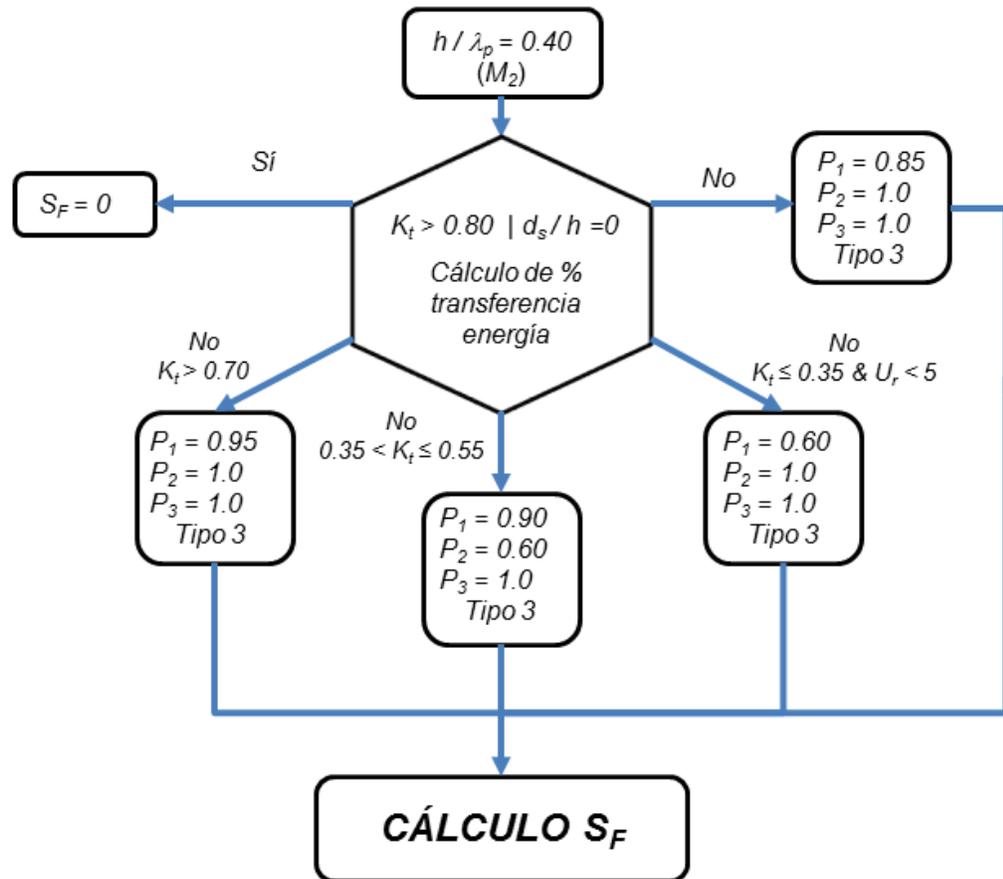


Figura 23. Método propuesto para estimar S_F , en una profundidad relativa de 0.40.

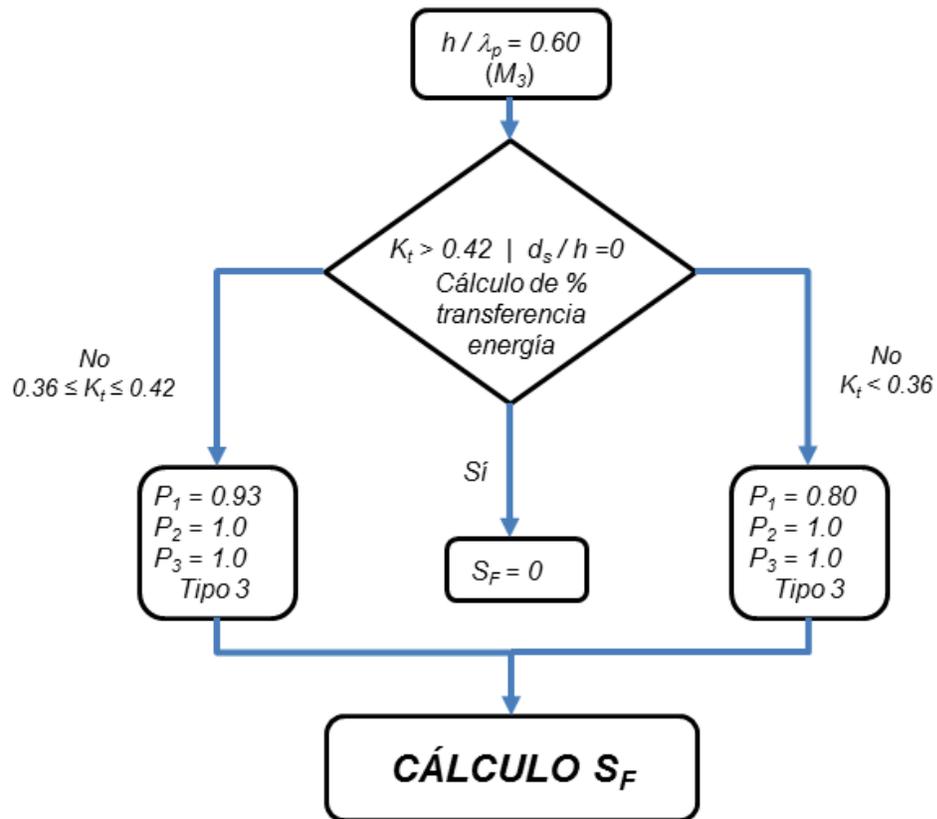
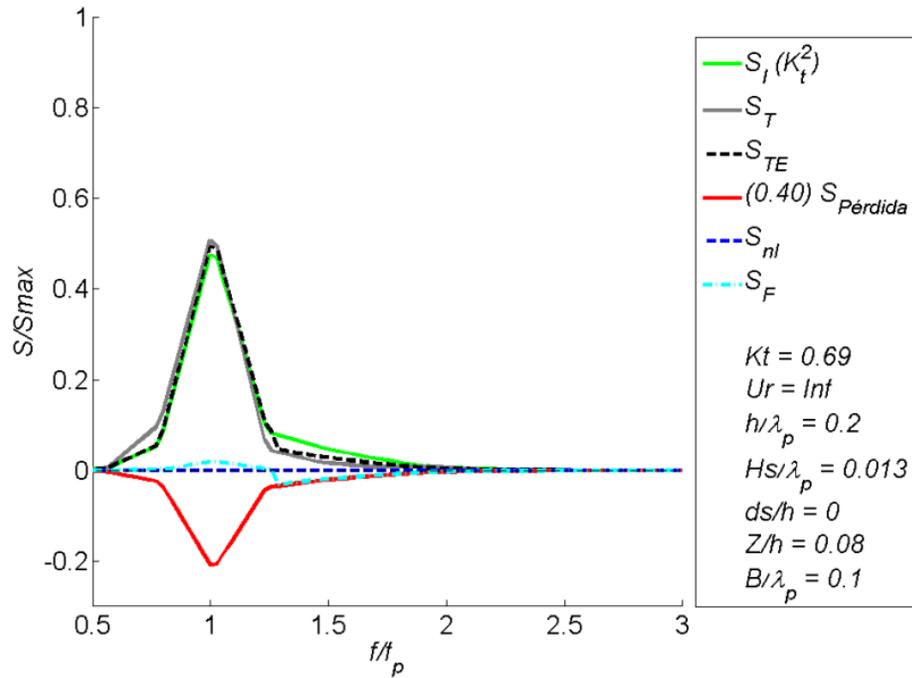


Figura 24. Método propuesto para estimar S_F , en una profundidad relativa de 0.60.

A continuación se presentan algunos de los resultados del algoritmo anterior. En las gráficas de las Figs. 25-28 se presentan espectros con sus términos fuentes. En rojo se grafica el término de reducción de energía $S_{pérdida} = (S_I \times [1 - K_t^2])$, el cual, por cuestiones visuales, se presenta escalado con un factor de 0.40; en azul oscuro la redistribución de la energía debida a las interacciones no lineales; en azul claro el término de corrección. El espectro incidente reducido ($S_I \times K_t^2$), el espectro transmitido y el espectro estimado, están representados con los colores verde, gris y negro, respectivamente.

a)



b)

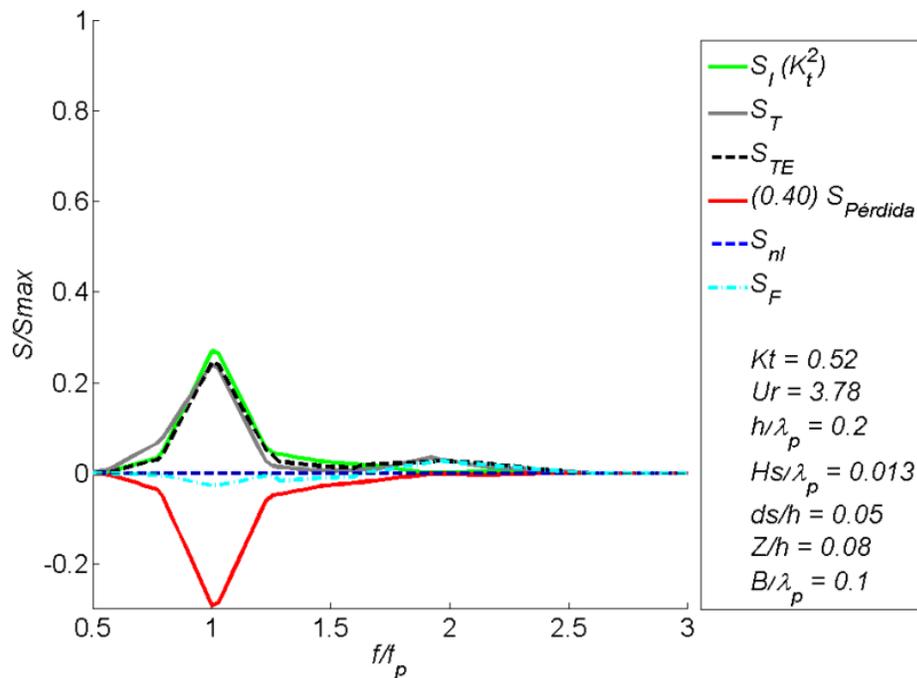
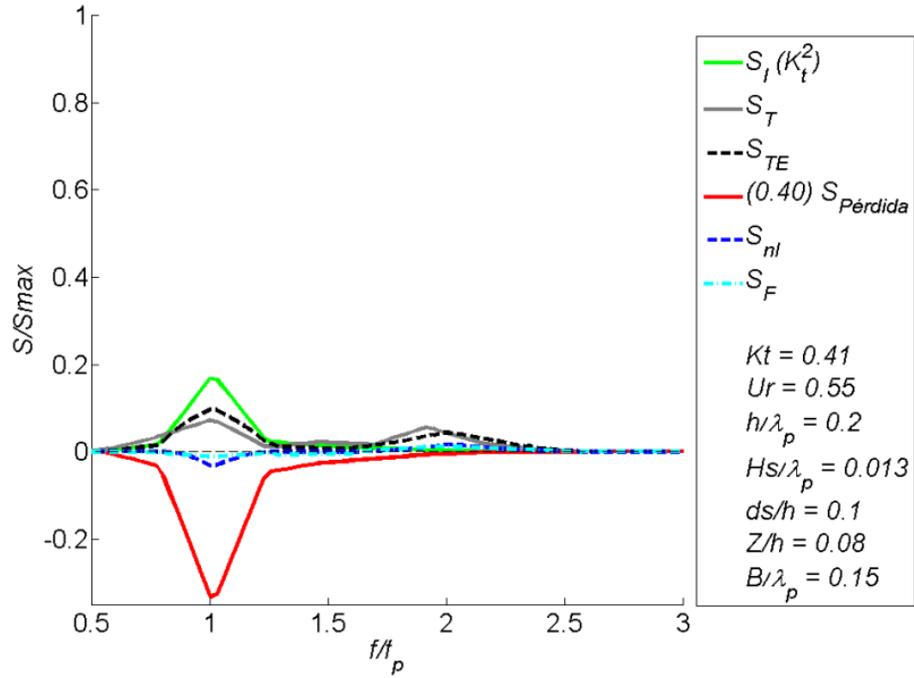


Figura 25. Cambio espectral con sus términos fuentes correspondientes a la pérdida de energía, interacciones no lineales y corrección de forma: Casos en $h/\lambda_p = 0.2$; (a) $d_s/h = 0.0$; (b) $d_s/h = 0.05$; (c) $d_s/h = 0.10$; y (d) $d_s/h = 0.25$.

c)



d)

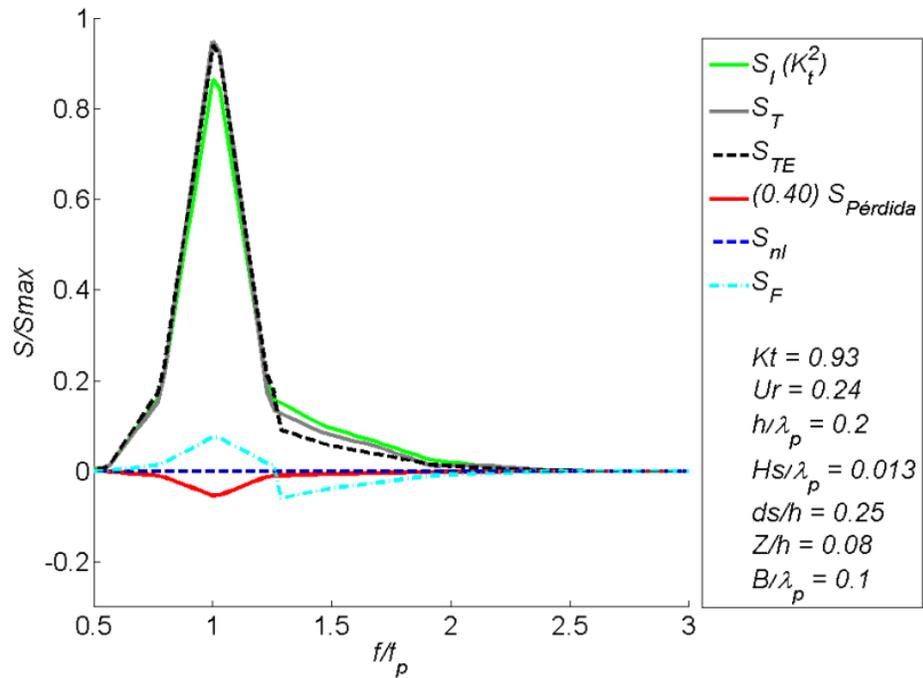
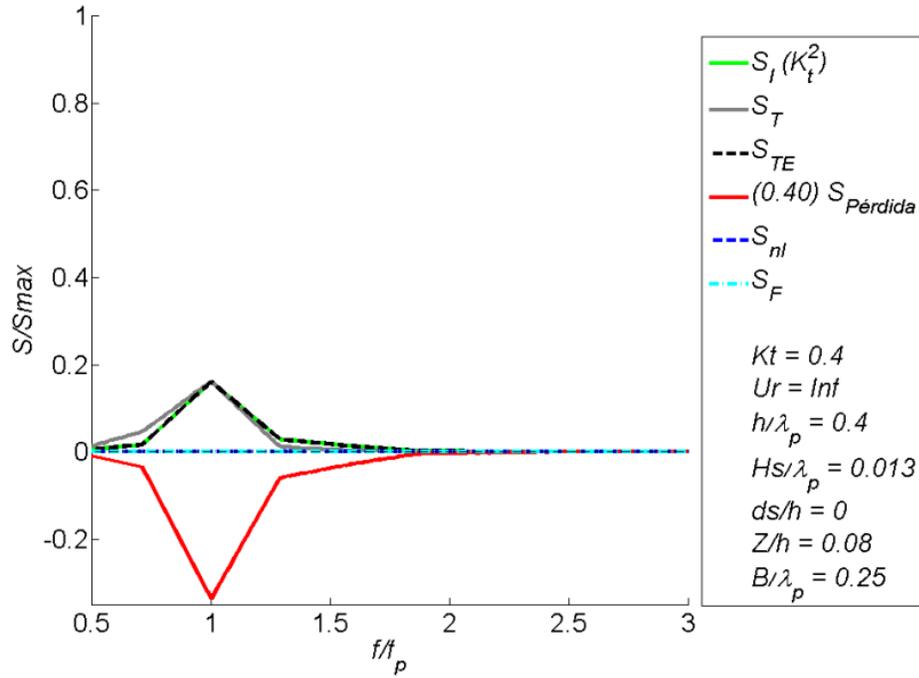


Figura 25. (continuación). Cambio espectral con sus términos fuentes correspondientes a la pérdida de energía, interacciones no lineales y corrección de forma: Casos en $h/\lambda_p = 0.2$; (a) $d_s/h = 0.0$; (b) $d_s/h = 0.05$; (c) $d_s/h = 0.10$; y (d) $d_s/h = 0.25$.

a)



b)

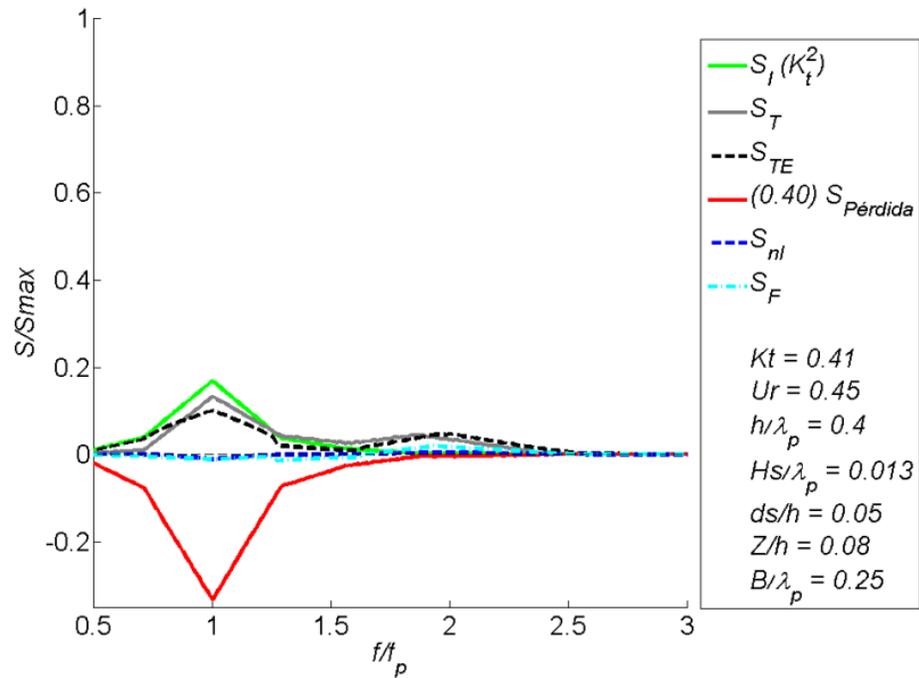


Figura 26. Cambio espectral con sus términos fuentes correspondientes a la pérdida de energía, interacciones no lineales y corrección de forma: Casos en $h/\lambda_p = 0.4$; (a) $d_s/h = 0.0$; (b) $d_s/h = 0.05$; (c) $d_s/h = 0.10$; y (d) $d_s/h = 0.25$.

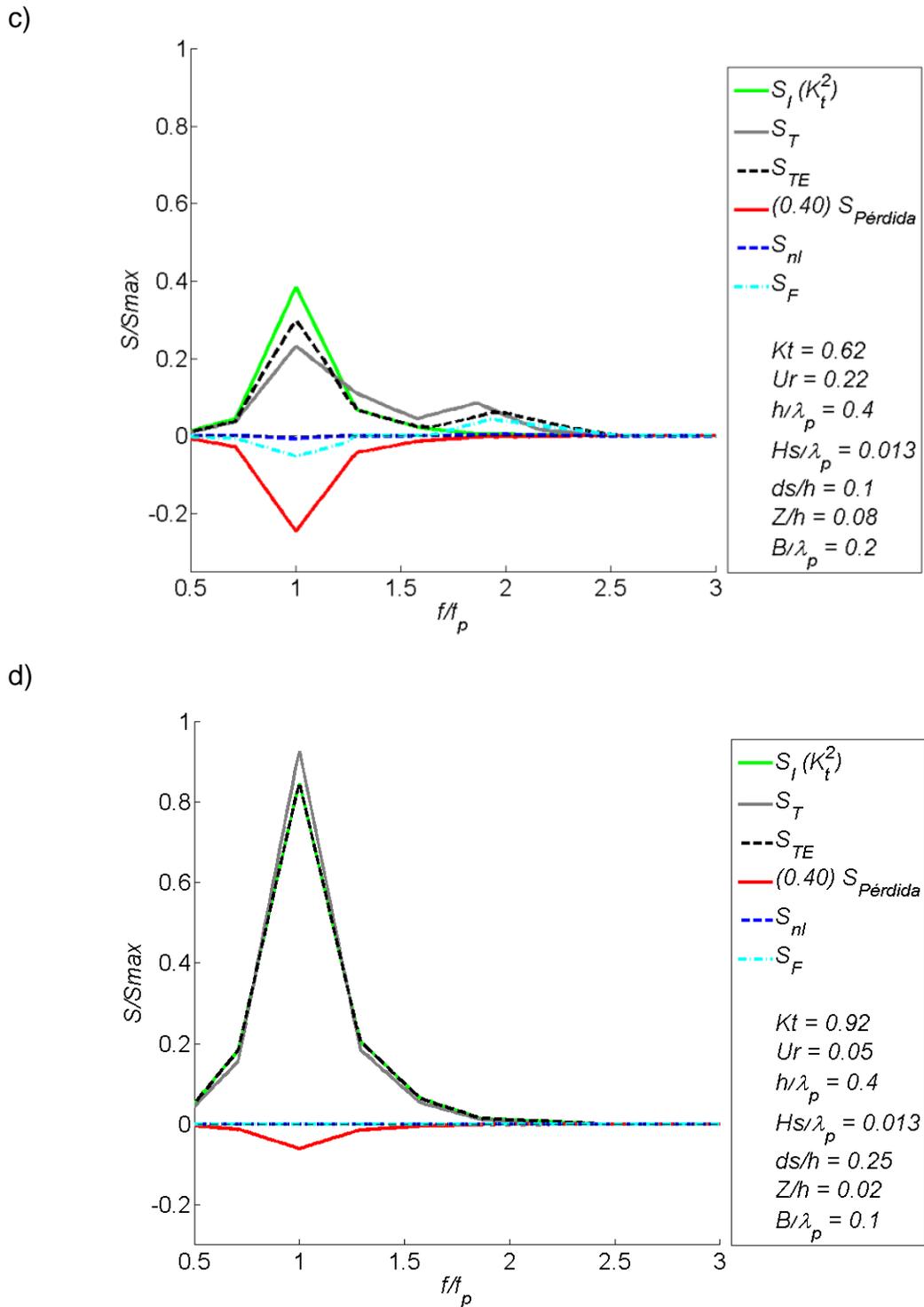
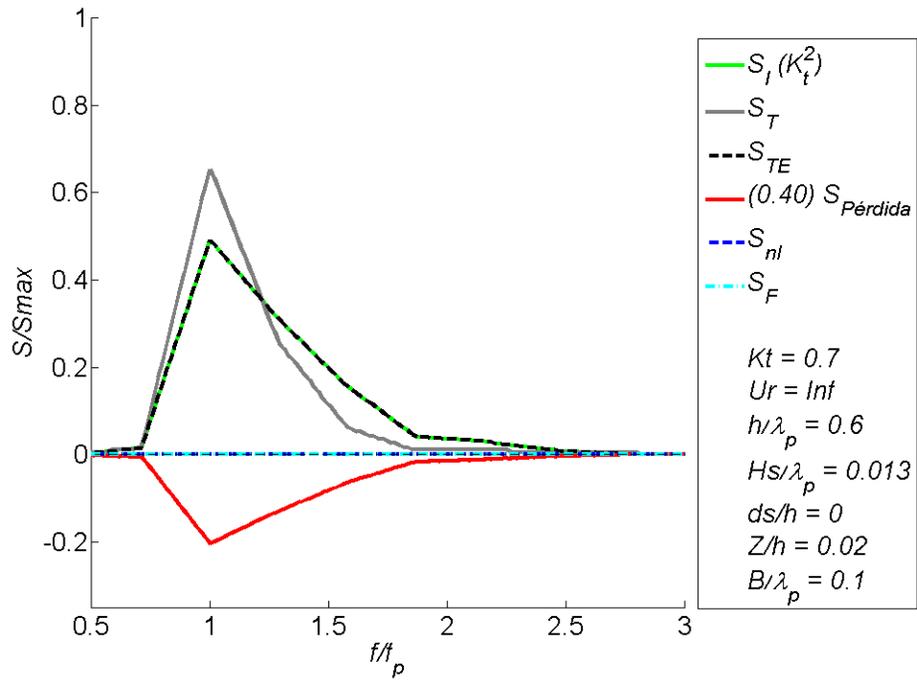


Fig. 26 (continuación). Cambio espectral con sus términos fuentes correspondientes a la pérdida de energía, interacciones no lineales y corrección de forma: Casos en $h/\lambda_p = 0.4$; (a) $d_s/h = 0.0$; (b) $d_s/h = 0.05$; (c) $d_s/h = 0.10$; y (d) $d_s/h = 0.25$.

a)



b)

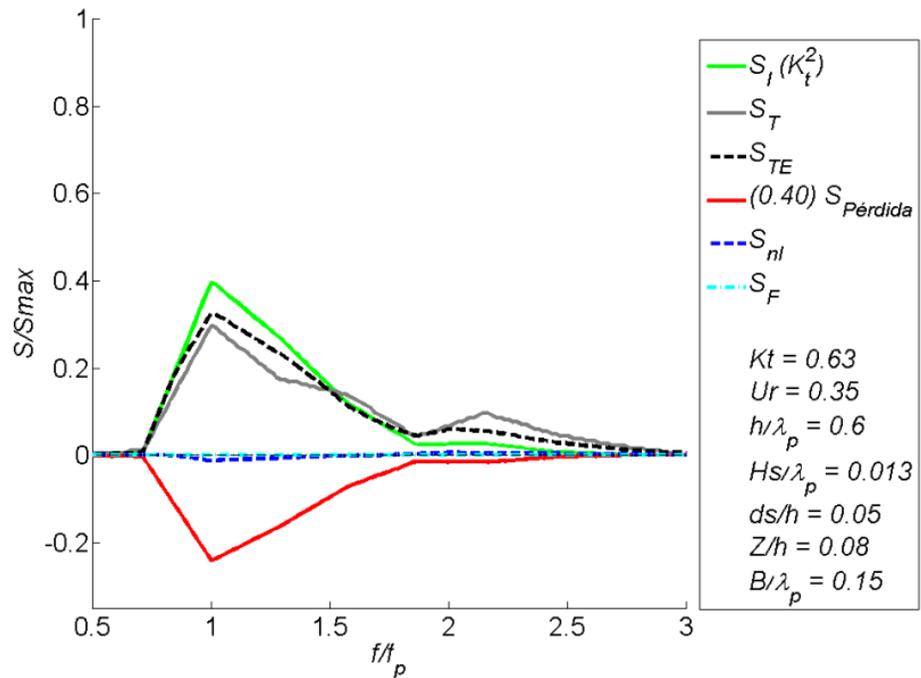


Figura 27. Cambio espectral con sus términos fuentes correspondientes a la pérdida de energía, interacciones no lineales y corrección de forma: Casos en $h/\lambda_p = 0.6$; (a) $d_s/h = 0.0$; (b) $d_s/h = 0.05$; (c) $d_s/h = 0.10$; y (d) $d_s/h = 0.25$.

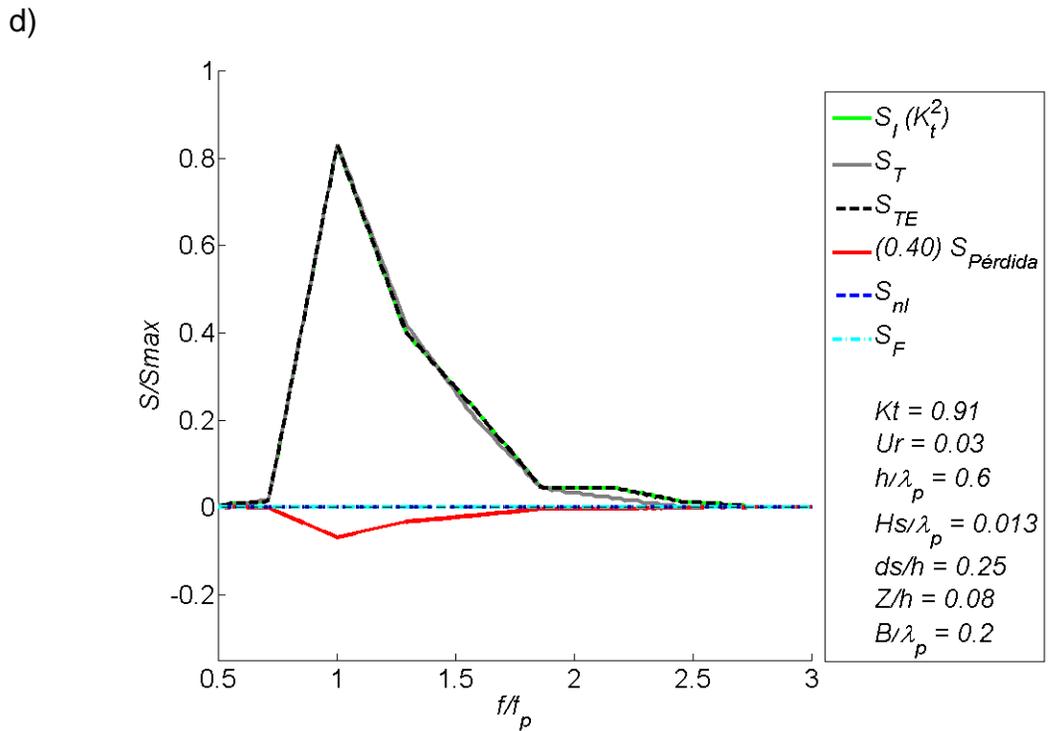
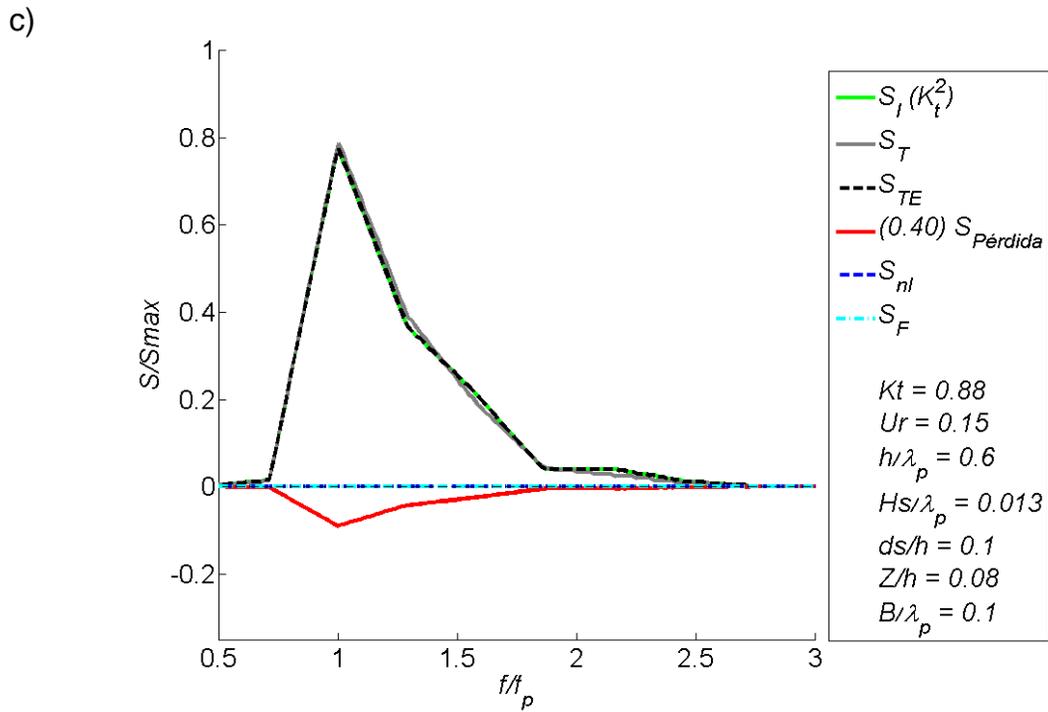


Fig. 27 (continuación). Cambio espectral con sus términos fuentes correspondientes a la pérdida de energía, interacciones no lineales y corrección de forma: Casos en $h/\lambda_p = 0.6$; (a) $d_s/h = 0.0$; (b) $d_s/h = 0.05$; (c) $d_s/h = 0.10$; y (d) $d_s/h = 0.25$.

Se puede observar en las gráficas anteriores, que el espectro estimado (S_{TE}), proporciona una idea aproximada de la forma del espectro transmitido. En algunos casos, pierde cierta precisión, por ejemplo, cuando $d_s/h \leq 0.15$ y $K_t < 0.4$. Mientras más somera sea la región encima del obstáculo, más favorable es el escenario para la transferencia de energía. Sin embargo, dicha transferencia es dependiente de la evolución de la energía del espectro, donde con K_t muy bajos, los cambios parecen ser (en ocasiones) importantes y no se pueden despreciar. Los resultados obtenidos mediante el procedimiento propuesto tienden a sobrestimar y subestimar la energía del modo fundamental y del primer superarmónico, respectivamente (ver Fig. 28). Sin embargo, el espectro estimado da una idea adecuada de la distribución general de la energía.

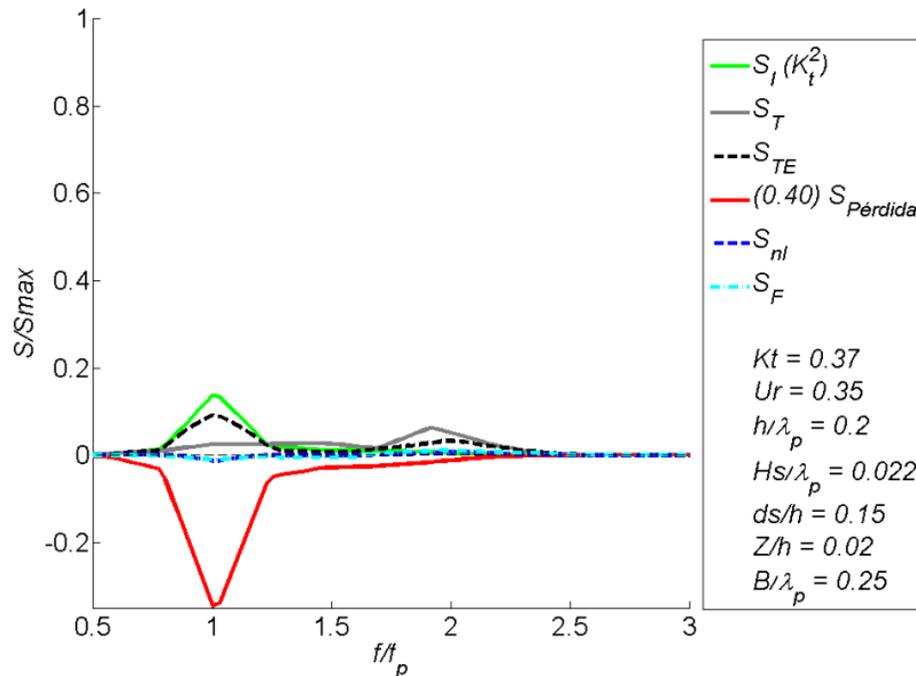


Figura 28. Ejemplo de sobrestimación y subestimación del modo fundamental y de primer orden, respectivamente, debido probablemente al cambio importante en la evolución de la energía del espectro.

Otro caso es en aguas profundas, cuando los obstáculos se posicionan en la superficie. El método propuesto estima espectros más anchos. En el espectro

transmitido medido, se observa que K_t afecta de manera más importante a las frecuencias mayores a f_p (ver Fig. 27a).

4.3 Validación de las ecuaciones paramétricas propuestas

Se realizaron 20 experimentos para validar las Ecs. 25 y 26. Las pruebas 1-10 y 11-20 tienen parámetros adimensionales con valores que caen dentro y fuera de los límites del intervalo de la Tabla 1, respectivamente. La configuración de las pruebas y sus resultados se muestran en la Tabla 6, donde se puede observar que K_{re} y K_{te} tienen valores similares a los encontrados por el modelo CS. Las comparaciones entre los resultados de las ecuaciones propuestas y los del modelo CS se muestran en la Fig. 29. Se puede observar que el modelo propuesto para K_r funciona adecuadamente tanto para valores interpolados como extrapolados, con coeficientes de correlación $R^2 = 0.98$ y 0.96 , respectivamente. Por otra parte, la ecuación de K_t también hace estimaciones adecuadas, con un $R^2 = 0.98$ y 0.93 , con valores interpolados y extrapolados, respectivamente. Estos resultados sugieren que ambas ecuaciones pueden utilizarse inclusive con valores de los parámetros adimensionales que estén ligeramente fuera del dominio de los valores utilizados en la Tabla 1. Sin embargo, se sugieren más experimentos para extender el intervalo de aplicación de dichas ecuaciones con más confiabilidad estadística.

Tabla 6. Comparación entre los valores estimados con las ecuaciones 25 y 26 (K_{re} y K_{te} , respectivamente) y el modelo CS (K_{rc} y K_{tc}). Los primeros diez experimentos tienen parámetros adimensionales con valores que caen dentro del dominio de la Tabla 1. El segundo grupo se hizo para investigar la eficiencia de las ecuaciones paramétricas cuando se utilizan valores que caen ligeramente fuera del dominio (extrapolación).

Ex.	h	h/λ	H_i/λ	ds/h	H_i/Z	K_{rc}	K_{re}	K_{tc}	K_{te}
1	10	0.210	0.023	0.000	0.908	0.12	0.19	0.96	0.99
2	10	0.250	0.015	0.010	0.500	0.22	0.22	0.93	0.88
3	10	0.280	0.026	0.020	0.783	0.18	0.20	0.87	0.88
4	10	0.333	0.019	0.030	0.713	0.12	0.17	0.86	0.90
5	10	0.400	0.027	0.040	0.479	0.26	0.26	0.67	0.68
6	10	0.446	0.020	0.050	0.281	0.2	0.24	0.76	0.73
7	10	0.446	0.020	0.000	0.225	0.65	0.63	0.56	0.53
8	10	0.520	0.029	0.010	0.275	0.69	0.63	0.44	0.39
9	10	0.550	0.018	0.020	0.206	0.38	0.42	0.65	0.65
10	10	0.590	0.021	0.030	0.219	0.39	0.38	0.67	0.63
11	10	0.127	0.020	0.070	1.208	0.09	0.05	0.96	1.00
12	10	0.160	0.010	0.060	1.500	0.04	0.07	0.99	1.00
13	10	0.180	0.010	0.070	1.375	0.09	0.08	0.99	1.00
14	10	0.190	0.010	0.010	0.142	0.52	0.48	0.79	0.97
15	10	0.190	0.010	0.020	0.128	0.53	0.43	0.72	0.91
16	10	0.610	0.031	0.030	0.159	0.66	0.73	0.37	0.32
17	10	0.610	0.031	0.040	0.142	0.62	0.68	0.34	0.36
18	10	0.620	0.032	0.050	1.300	0.18	0.12	0.95	1.00
19	10	0.620	0.032	0.060	0.186	0.41	0.40	0.58	0.56
20	10	0.637	0.020	0.010	0.155	0.63	0.64	0.42	0.48

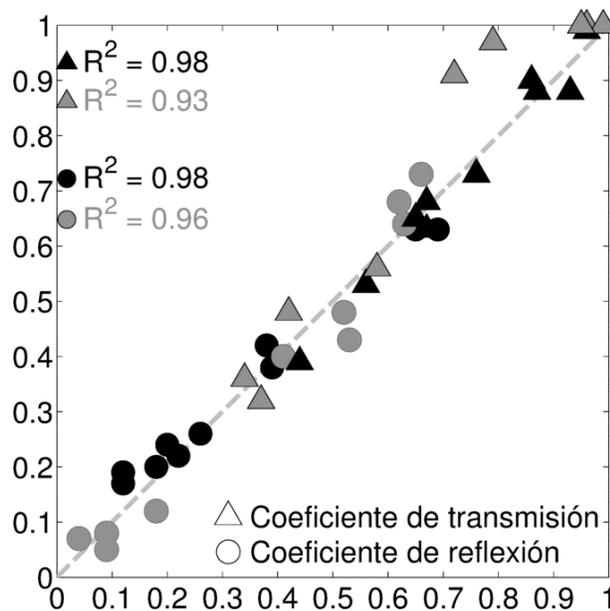


Figura 29. Comparaciones entre K_t y K_r obtenidos con el modelo CS y las ecuaciones 25 y 26. La línea gris punteada corresponde a valores donde la relación entre los coeficientes obtenidos y los estimados es igual a la unidad. Los colores negro y gris son para indicar experimentos con valores interpolados y extrapolados, respectivamente. Las fórmulas propuestas concuerdan bien con los cálculos numéricos, aun cuando se utilizan valores en los parámetros adimensionales que caen ligeramente fuera del dominio definido en la Tabla 1.

Los resultados correspondientes a la Ec. 27 se muestran en la gráfica de dispersión de la Fig. 30. Se puede observar que existe una dispersión no despreciable de los datos, y el coeficiente de correlación es igual a 0.88. A pesar de contar con 25 parámetros libres, la fórmula propuesta no tiene una precisión superior a las fórmulas correspondientes a los obstáculos con sección cuadrada. Lo anterior es debido a que el proceso físico que producen estos obstáculos al interactuar con el oleaje es complejo y no se pueden reproducir con la resolución propuesta en la Tabla 2. Es necesario modificar estos datos, aumentando la resolución especialmente en la zona donde se espera ocurra d_{sc} . Así mismo, se debe de poner especial interés en la generación de los vórtices en los extremos de la placa, pues éstos juegan un papel importante en la disipación del oleaje. El poder predecir su aparición será de gran utilidad para mejorar la forma y la precisión de la Ec. 27.

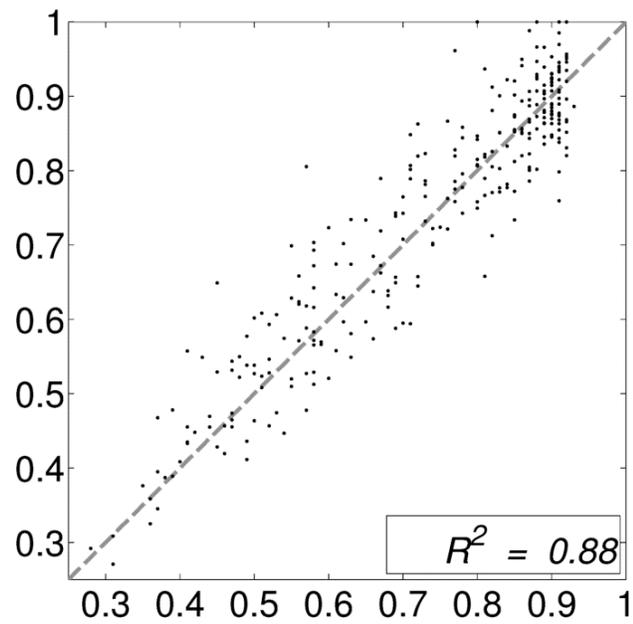


Figura 30. Comparaciones entre K_{te} estimado con la Ec. 27 y el modelo CS. La línea gris punteada corresponde a valores donde la razón entre los coeficientes obtenidos y los estimados es igual a la unidad.

Capítulo 5. Conclusiones

Se analizó la interacción entre el oleaje y dos tipos de obstáculos sumergidos. Los de sección transversal cuadrada son estructuras altamente reflectivas. Su eficiencia depende en gran medida del bloqueo directo de la energía del oleaje, lo que provoca olas que se reflejan en sentido contrario a la dirección de propagación del oleaje incidente. Por otra parte, los obstáculos tipo placa son estructuras más disipativas, reduciendo la cantidad de energía que se refleja.

Se propusieron dos ecuaciones paramétricas en función de parámetros adimensionales relevantes en la dinámica de los procesos para encontrar los coeficientes de transmisión y reflexión de la energía del oleaje ocasionada por obstáculos cuadrados fijos sumergidos. Se encontró que la altura relativa de ola tiene una relación exponencial con K_r . La influencia de la pendiente del oleaje, la sumersión y la profundidad relativa se tomaron en cuenta en las expresiones paramétricas. Por otro lado, se encontró que la altura relativa de ola también afecta exponencialmente a K_t . Los resultados sugieren que las ecuaciones propuestas (25 y 26) son precisas al estimar K_r y K_t , respectivamente, inclusive con valores de parámetros adimensionales ligeramente fuera del dominio que se utilizó al inferir la ecuación.

Los resultados sugieren que si estos tipos de obstáculos se necesitan como rompeolas en aguas profundas, su tamaño no debe ser menor que cinco veces la altura de ola y no se deben colocar por debajo de $d_s/h=0.05$. Cuando se quieran desplegar en aguas transicionales, se recomiendan obstáculos entre 2.4 y cinco veces la altura de ola incidente.

Se propuso una ecuación paramétrica que estima K_t asociado a obstáculos tipo placa, cuya forma general está en términos del tamaño horizontal relativo de

la estructura, y sus coeficientes son función del resto de los parámetros adimensionales. Sin embargo, se concluye que no tiene una precisión adecuada a pesar de contar con 25 parámetros libres. Se recomiendan un mayor número de experimentos, especialmente en la zona donde se espere identificar d_{sc} , con la finalidad de poder predecir con exactitud su posición. También se recomienda estudiar con más detalle la generación de los vórtices en los extremos de la placa, pues impactan directamente en la disipación de la energía del oleaje.

Se propuso una función de transferencia, basada en la aproximación LTA, para estimar el cambio espectral del oleaje incidente debido a su interacción con obstáculos. Esta función tiene tres términos, donde se incluyen la disipación de la energía ($K_t^2 S_l$), las interacciones no lineales por triadas (S_{nl}), y un término de corrección (S_F) por despreciar la evolución de la energía del espectro al calcular las interacciones. El término de disipación depende del coeficiente de transmisión total del sistema. La función de transferencia propuesta, a pesar de su relativa simplicidad, da una buena aproximación de la forma final del espectro.

Referencias bibliográficas

- Baba, M. (1984). Irregular wave transmission over a submerged breakwater. *Sadhana*, 7, 351-367.
- Brossard, J., Perret, G. Blonce, L., & Diedhiou, A. (2009). Higher harmonics induced by a submerged horizontal plate and a submerged rectangular step in a wave flume. *Coastal Engineering*, 56, 11-22.
- Brossard, J. y Chagdali, M. (2001). Experimental investigation of the harmonic generation by waves over a submerged plate. *Coastal Engineering*, 42, 277-290.
- Buckingham, E. (1914). On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. *Phys. Rev.*, 4, 345-376.
- Bung, D., Hildebrandt, A., Oertel, M., Schlenkhoff, A., & Schlurmann, T. (2008). Bore propagation over a submerged horizontal plate by physical and numerical simulation. *Proceedings 31th Int. Conf. on Coastal Engineering*, 3542-3553.
- Carr, J., Knapp, R. (1950). *Mobile breakwater studies*. California, Institute of Technology.
- Coastal Development Institute of Technology of Japan (2001). Research and development of a numerical wave flume; CADMAS-SURF Report of the research group for development of numerical wave flume for the design of maritime structures.
- Dattatri, J., Raman, H., & Shankar, N. (1978). Performance characteristics of submerged breakwaters. *Proceedings 16th Int. Conf. on Coastal Engineering*, 2153-2171.
- Dean, R., Harleman, D. (1966). *Interaction of Structures and Waves*. In: Ippen, A., *Estuary and coastline hydrodynamics*. New York, McGRAW-HILL.
- Elchahal, G., Younes, R., & Lafon, R. (2006). Wave interaction with fixed and floating vertical breakwater based on analytical modelling. *Proceedings of FEDSM 2006*.
- Eldeberky, Y., (1996). *Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone*, (Ph.D. thesis). Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering.
- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*. Singapore. World Scientific.

Graw, K. (1992). The submerged plate as a wave filter, the stability of the pulsating flow phenomenon. *Coastal Engineering*, 1153-1160.

Hasselmann K., Barnett, T. Bouws, E. Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K, Ewing, J., Gienapp, H. Hasselmann, D., Kruseman, P. Meergurg, A., Müller, P., Olbers, D., Richter, K., Sell, W. & Walden, H. (1973). Measurements of wind –wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (*JONSWAP*). Hamburg. Deutsches Hydrographisches Institut.

Hinatsu, M. (1992). Numerical simulation of unsteady viscous nonlinear waves using moving grid system fitted on a free surface. *J. Kansai Soc. Naval Architects Japan* 21,1-11.

Hirt, C., Nichols, B. (1981). A computational method for free surface hydrodynamics. *Journal of Pressure Vessel Technology* 103, 136-141.

Hirt, C., Nichols, B. (1981b). Volume of Fluid (VOF) method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of Computational Physics* 39, 201-225.

Holthuijsen, L. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. New York. Cambridge University Press.

Hughes, S. (1993). *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. Singapore, World Scientific.

Ijima, T., Chou, C., & Yoshida, A. (1976). Method of analyses for two-dimensional water wave problems. *Proceedings 15th Int. Conf. on Coastal Engineering*, 2717-2736.

Isaacson, M. (1991). Measurement of regular wave reflection. *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering*, 117, 553-569.

Johnson, H., Karambas, T., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Gonzalez-Marco, D. & Caceres, I. (2005). Modelling of waves and currents around submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 52, 949-969.

Jung, T., Lee, S., & Cho, Y. (2012). Characteristics of wave reflection for vertical and slit caissons with porous structures. *Journal of Applied Mathematics*, 1-15.

Kawasaki, K. (1999). Numerical simulation of breaking and post-breaking wave deformation process around a submerged breakwater. *Coastal Engineering*, 41, 201-223.

- Kojima, H., Ijima, T. & Yoshida, A., 1990. Decomposition and interception of long waves by a submerged horizontal plate. *Coastal Engineering Proceedings*, 1228-1241.
- Koutandos, E., Karambas, T., & Koutitas, C. (2004). Floating breakwater response to waves action using a Boussinesq model coupled with a 2DV elliptic solver. *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering*, 130, 243-255.
- Koutandos, E., Prinos, P., & Gironella, X. (2005). Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characteristics. *Journal of Hydraulic Research*, 43, 174-188.
- Lara, J., García, N., & Losada, I. (2006). RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. *Coastal Engineering*, 53, 395-417.
- LeMéhauté, B. (1976). *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*. New York, Springer.
- Li, D., Panchang, V., Tang, Z., Demirbilek, Z., & Ramsden, J. (2005). Evaluation of an approximate method for incorporating floating docks in harbour wave prediction models. *Canadian J. Civ. Eng.*, 32, 1082-1092.
- Lin, C., Huang, C. (2004). Decomposition of incident and reflected higher harmonic waves using four wave gauges. *Coastal Engineering*, 51, 395-406.
- Liu, Y., Li, Y., & Teng, B. (2009). Wave motion over two submerged layers of horizontal thick plates. *Journal of Hydrodynamics*, 21, 453-462.
- Liu, Y., Li, Y., Teng, B., & Dong, S. (2008). Wave motion over a submerged breakwater with an upper horizontal porous plate and a lower horizontal solid plate. *Ocean Engineering*, 35, 1588-1596.
- Madsen, P., Sørensen, O. (1992). A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part2. A slowly-varying bathymetry. *Coastal Engineering*, 18, 183-204.
- Mansard, E., Funke, E. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least square method. *Proceedings 17th Coastal Engineering*, 154-172.
- Nwogu, O. (1994). Nonlinear evolution of directional wave spectra in shallow water, *Proceedings 24th Int. Conf. on Coastal Engineering*, 467-481.

- Orlanski, I. (1976). A Simple Boundary Condition for Unbounded Hyperbolic Flows. *Journal of Computational Physics*, 21(3), 251-269.
- Patarapanich, M., Cheong, H. (1989). Reflection and transmission characteristics of regular and random waves from a submerged horizontal plate. *Coastal Engineering*, 13, 161-182.
- Rageh, O., Koraim, A., & Salem, T. (2009). Hydrodynamic efficiency of partially immersed caissons supported on piles. *Ocean Engineering*, 36, 1112-1118.
- Rahman, A., Mizutani, N., & Kawasaki, K. (2006). Numerical modeling of dynamic responses and mooring forces of submerged floating breakwater. *Coastal Engineering*, 53, 799-815.
- Rudman, M. (1997). Volume-tracking methods for interfacial flow calculations. *Int. Journal for numerical methods in fluids*, 24, 671-691.
- Sendil, U., Graf, W. (1974). Transmission of regular waves past floating plates. *Proceedings 14th Conf. Coastal Engineering*, 1924-1936.
- Sendil, U., Graf, W. (1975). Transmission of regular waves past fixed plates. *Proceedings XVI Congress of Int. Association of Hydraulic Research*, 254-261.
- Stoker, J. (1957). *Water waves, the mathematical theory with applications*. New York, Interscience.
- Sundar, V., Dakshinamoorthy, S. (1980). Wave transmission characteristics of fixed and floating breakwaters. *7th Australian Hydraulics and Fluid Mechanics Conf.*, 18-22.
- Tolba, E. (1999). *Behaviour of floating breakwaters under wave action*. (Tesis de doctorado) Suez Canal University, Canal de Suez.
- van der Meer, J., Briganti, R., Zanuttigh, B., & Wang, B. (2005). Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change. *Coastal Engineering*, 52, 915-929.
- van der Meer, J., Regeling, H. & de Waal, J. (2000). Wave transmission: spectral changes and its effects on run up and overtopping. *Proceedings 27th Int. Conf. on Coastal Engineering*, 2156-2168.
- Wiegel, R. (1964). *Oceanographical Engineering*. New York, Dover.
- Young, I. (1999). *Wind Generated ocean waves*, Vol. 2. Amsterdam, Elsevier.

Yu, X. (2002). Functional performance of a submerged and essentially horizontal plate for offshore wave control: a review. *Coastal Engineering Journal*, 44, 127-147.

Zheng, Y., Liu, P. Shen, Y., & Sheng, S. (2007). On the radiation and diffraction of linear water waves by an infinitely long rectangular structure submerged in oblique seas. *Ocean Engineering*, 34, 436-450.