

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS DE RESONANCIA PORTUARIA:
GENERACIÓN, TRANSITORIEDAD,
NO LINEALIDAD Y ACOPLAMIENTO
GEOMÉTRICO

Presentada por: D. GABRIEL DÍAZ HERNÁNDEZ

Dirigida por: D. IÑIGO JAVIER LOSADA RODRÍGUEZ
D. MAURICIO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

Marzo, 2006

CAPÍTULO 2
ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

El gran número de fuerzas generadoras involucradas en el fenómeno de resonancia portuaria, hacen que su estudio sea una tarea compleja. La gran variedad en los factores asociados al oleaje incidente, las combinaciones posibles en su transformación, y tomando en cuenta la alta variabilidad que presentan las oscilaciones para pequeños cambios en las geometrías portuarias y mareales, dan pie a un verdadero océano de posibilidades de estudiar el fenómeno. Por esto se deben de organizar las técnicas que la literatura promueve y mostrar un enfoque ordenado de los elementos involucrados en el fenómeno.

El conocimiento del fenómeno de resonancia portuaria atañe al ingeniero marítimo tanto a la hora de diseñar una estructura, como en las labores continuas de gestión operativa, a través de conocer las variables del oleaje que se propaga desde el exterior, y su posible vinculación con el fenómeno en cuestión. Actualmente las herramientas que ayudan a medir, observar, y evaluar las acciones de un oleaje como posiblemente elemento forzador de episodios de resonancia portuaria, están limitadas a la medición de las ondas de bajo periodo ($T=5s$ a $T=30s$), que a través de técnicas estadísticas de análisis de series temporales del oleaje, se puede llegar a diferir la existencia de energía de baja frecuencia vinculada a los trenes medidos, considerados como el máximo factor desencadenante de la resonancia, Bernabeu (1994). Las boyas, correntímetros, mareógrafos y sensores de presión, son los que brindan la información de la situación del oleaje en las zonas de interés, y dependiendo de las capacidades computacionales y analíticas, el ingeniero puede llegar a minimizar el tiempo de evaluación de toda la energía asociada al oleaje, y a continuación predecir la posible liberación de energía en las bandas de frecuencia cercanas a las frecuencias de oscilación naturales de las dársenas portuarias, y finalmente diseñar planes de acción ante riesgo de sufrir sobre-elevaciones extraordinarias derivadas de episodios de resonancia portuaria.

En este capítulo se intenta realizar una revisión del estado actual del conocimiento relacionado al fenómeno de resonancia portuaria, y posteriormente en el siguiente capítulo, plantear los objetivos y ambiciones de este trabajo de Tesis con base en lo estudiado. Se presenta en primer lugar una revisión bibliográfica de los procesos del oleaje asociados al fenómeno de resonancia portuaria, las diferentes formas de

CAPÍTULO 2

generación y manifestación de la banda de baja frecuencia del oleaje que inducen el fenómeno, se presentan las diferentes técnicas de análisis de oleaje agrupado con onda larga vinculada y su liberación, posteriormente se mencionarán los estudios relacionados con fenómenos meteorológicos asociados al fenómeno de resonancia, y finalmente se hace una revisión de las técnicas y modelos numéricos que tradicionalmente se han utilizado para el estudio de resonancia portuaria.

2.2 DEFINICIÓN DE RESONANCIA PORTUARIA

Si nos remontamos a la física clásica, a un oscilador armónico simple se le conoce como un cuerpo de masa m unido a un muelle elástico de constante k . Además la experiencia nos muestra que la amplitud de un cuerpo vibrante tal como un resorte o un péndulo, decrece gradualmente hasta que se detiene, viendo que la amplitud de la oscilación disminuye exponencialmente con el tiempo (característica esencial de la oscilación amortiguada). Por tanto, la energía del oscilador también disminuye. Estas pérdidas de energía son debidas al trabajo de la fuerza F_r de rozamiento viscoso opuesta a la velocidad, sabiéndose que la energía perdida por la partícula que experimenta una oscilación amortiguada es absorbida por el medio que la rodea. Por otro lado, si se desea mantener las oscilaciones en el sistema, se ha de aplicar una fuerza oscilante al oscilador amortiguado.

Se pueden apreciar tres tipos diferentes del comportamiento oscilatorio armónico amortiguado:

- Si la frecuencia de excitación es muy pequeña (lo que equivale a hacer oscilar el extremo superior del muelle muy lentamente), el muelle oscila prácticamente en fase con la excitación y con su misma amplitud.
- Si la frecuencia de excitación coincide con la frecuencia característica del muelle, la amplitud de oscilación va creciendo cada vez más, y comienza a resonar; en este caso, las oscilaciones del muelle están retrasadas alrededor de un cuarto de fase respecto a la excitación.
- Y finalmente si la frecuencia de excitación es muy alta, el resonador oscila con una amplitud muy pequeña y casi en oposición de fase.

Además, si la constante de atenuación (debida al rozamiento) es muy pequeña, el estado transitorio adquiere relevancia; por tanto, es necesario esperar algún tiempo para observar los tipos de comportamiento mencionados.

Análogamente si miramos hacia el campo de la Ingeniería Marítima, el oleaje que excita a una masa de agua semi-encerrada e interconectada con una bocana, guarda el mismo principio físico y nos lleva a la experiencia del fenómeno de resonancia portuaria, siempre que las frecuencias de un oleaje derivado del oleaje exterior, coincidan con los

modos naturales de oscilación del cuerpo de agua, pudiendo llegar a generar sobre-amplificaciones importantes del oleaje que en el interior de las dársenas de los puertos.

Sand (1982), menciona que a pesar de que las amplitudes de las ondas que inciden sobre un puerto, y que fomentan los episodios de resonancia, rara vez superan el metro y generalmente oscilan en el orden de los centímetros, se puede llegar a alcanzar niveles críticos de amplitud del oleaje dando lugar a periodos de inactividad y problemas de navegabilidad, y efectos estructurales en los amarres de los buques que conlleva tener grandes retrasos y pérdidas económicas que se pueden ver reflejadas en el desarrollo económico de toda una región.

Santás (1999), apunta que los factores forzadores que comúnmente provocan los episodios de resonancia portuaria son las ondas atmosféricas u ondas de acoplamiento-atmósfera, y las ondas largas vinculadas a grupos de oleaje, lo cual se tratará en el punto siguiente.

2.3 ONDAS LARGAS ASOCIADAS A LA RESONANCIA PORTUARIA

Las oscilaciones de largo periodo conocidas como ondas largas forman una parte muy importante del régimen total de oscilaciones del mar. Estas oscilaciones de baja frecuencia (0.002 a 0.033 Hertz), se manifiestan en diversas formas, en gran parte influidos por los factores morfológicos de los contornos en donde se propagan dichas ondas, transformándose en una combinación de efectos de refracción, difracción, pérdida de energía por absorción parcial con los contornos, disipación por rotura y reflexión.

Dentro de las ondas largas y para los fines de este estudio, se considerarán por un lado aquellas que están asociadas a grupos de olas, que constan generalmente de 4 a 10 olas con el valor más probable de 5 olas por grupo, según lo observado por Sedivy (1978), y que afectan principalmente a los puertos tanto en problemas de agitación en las bocanas de entrada como problemas de resonancia en las dársenas interiores. Y aquellas resultantes de la acción de las fuerzas atmosféricas (frentes de baja presión) sobre la superficie libre, que afectan principalmente a aquellas instalaciones portuarias con geometrías alargadas y con fondo somero, Gomis *et al.* (1993).

Además de estas dos formas de existencia de las ondas largas, existen las ondas infragravatorias con periodos entre 30 segundos y 5 minutos y que se producen por el efecto de tormentas de gran energía, las ondas mareales que junto con las ondas largas producidas por actividad sísmica o Tsunamis, cubren periodos entre 12 y 24 horas. Y finalmente, con una presencia más concentrada en zonas costeras, se manifiestan las ondas de borde (*edge waves*), con gran influencia en las bocanas portuarias y en la dinámica de la zona de rompientes.

2.3.1 Ondas largas vinculadas a grupos

Munk (1949) y Tucker (1950), estudiaron y posteriormente definieron el fenómeno conocido como *surfbeat*, que ocurre cuando se presentan interacciones no lineales en el oleaje de onda corta, y que eventualmente en el tren de olas, se llega a producir una oscilación de baja frecuencia que se observa en la zona costera. Además de los importantes efectos morfodinámicos que genera en las playas, el fenómeno del *surfbeat* puede también generar excitaciones resonantes aunque con menor ocurrencia dentro de instalaciones portuarias.

Como resultado de estos estudios, se siguieron investigando diversos modelos generadores de oscilaciones de baja frecuencia. Biéssel (1951), y por otro lado Longet-Higgins & Stewart (1960), presentaron un mecanismo para la generación de olas de baja frecuencia por interacción no lineal del oleaje. Estos autores se limitaron a estudiar la generación de la onda larga sobre fondos horizontales. Symonds *et al.* (1982) propuso un modelo para la generación de oleaje de baja frecuencia sobre fondos variables, en este caso, considerando que el mecanismo generador se debe al movimiento del punto de rotura. Posteriormente Schäffer & Svendsen (1988), realizaron mejoras de este concepto tomando el punto inicial de rotura fijo y lo combinaron con el punto de rotura móvil para la posterior generación de ondas largas.

Sand (1982), fue uno de los primeros en aplicar los estudios de las oscilaciones de largo periodo al fenómeno de resonancia portuaria. Partiendo de la observación de los grupos de olas de onda corta, el autor logró verificar la vinculación de una onda larga dentro de dichos grupos. Longet-Higgins & Stewart (1962), mostraron que la generación del oleaje de baja frecuencia vinculado a los grupos se produce por el mecanismo del tensor de radiación que trabaja en la dirección de propagación del oleaje. El tensor de radiación es una fuerza compresiva intensa que es proporcional al cuadrado de la altura de ola. Es por esto que las ondas cortas más energéticas inducen un seno de la onda larga asociada, y los grupos de olas con menos peralte producen las correspondientes crestas. Las oscilaciones resultantes de largo periodo son de características no lineales y están vinculadas a los grupos que las generan, por lo tanto, los periodos de la onda larga heredan los periodos de los grupos que la generan, y viajan con la celeridad de grupo.

Las amplitudes del oleaje de onda larga no lineal vinculado a los grupos es del orden de centímetros, suficientes para generar respuestas resonantes en las dársenas portuarias.

Bowers (1977) menciona que de forma natural, el agrupamiento del oleaje de onda corta, genera ondas largas que conservan el periodo de los grupos involucrados, y que las ondas largas se generan por las depresiones del nivel medio (*setdown*) derivadas de los grupos, y pueden quedar liberadas si la energía de alta frecuencia del oleaje se disipa por rotura del oleaje, por la liberación de la onda larga de los grupos de olas cortas sobre fondos irregulares según lo propuesto por Mei & Bennoua (1984), y/o debido a la acción de alguna estructura natural o artificial por difracción alrededor de obstáculos y en las entradas de las bocanas de los puertos como lo propone Biéssel (1963).

La observación, simulación y análisis de las ondas cortas agrupadas ha sido tradicionalmente resuelto con el planteamiento de algoritmos lineales. Rye (1982) y posteriormente Goda (1983), realizaron validaciones basadas en hipótesis lineales de datos de oleaje agrupado medido en campañas de campo en zonas con calados mayores a 10 metros. Las observaciones realizadas por Battjes & Vledder (1984) corroboraron las hipótesis lineales que hasta ese momento se planteaban tradicionalmente. Sin embargo, actualmente se sabe que existe una fuerte interacción no lineal entre las olas de onda corta involucradas en los grupos, que lamentablemente en la mayor parte de los estudios existentes, estas hipótesis no se han llegado a plantear.

En la tabla 2.1 se presenta un resumen sobre las diversas técnicas y metodologías, junto con algunas referencias para analizar el agrupamiento del oleaje, y que a pesar de no ser competencia de esta investigación doctoral, se considera que es importante su revisión y estudio a la hora de analizar los posibles elementos forzadores del fenómeno de resonancia portuaria.

Función de correlación	Cadenas de Markov	H ² (t) SIWEH	H (t) Envolvente	Run lengths	Referencias
					Goda (1970)
					Nolte & Hsu (1972)
					Ewing (1973)
					Rye (1974)
					Goda (1976)
					Arhan & Ezraty (1978)
					Funke & Mansard (1979)
					Kimura (1980)
					Rye (1982)
					Goda (1983)
					Battjes & Vledder (1984)
					Elgar <i>et al.</i> (1984)
					Longet-Higgins (1984)
					Thomson & Seeling (1984)
					Mase & Iwagaki (1986)
					Medina & Hudspeth (1987)
					Hudspeth & Medina (1988)

Tabla 2.1 Funciones y metodologías utilizadas para caracterizar el agrupamiento del oleaje.

Estos métodos han ayudado a resolver problemas dentro de la Ingeniería Marítima con aplicaciones variadas como son: el análisis del *surfbeat* y el estudio del *setup* y *setdown* en playas; (Tucker (1950); Bowers (1977); Rye (1982); Sand (1982); Mase & Iwagaki (1986); Battjes (1988); Bowers (1988)); el estudio de las oscilaciones en dársenas y fuerzas en los amarres de las embarcaciones en puertos; (Hsu & Blenkarn (1970); Johnson *et al.* (1978); Kimura (1980); Brunn (1985)); el daño en embarcaciones; (Ewing (1973); Goda (1976)); la estabilidad de diques de escollera, *runup* y rebase en el diseño de estructuras marítimas; (Rye (1982); Brunn (1985)); modelación física en laboratorio Sand (1982), y resonancia portuaria; (Bowers (1977); Rye (1982); Sand (1982); Brunn (1985) y Bowers (1988)).

2.3.2 Ondas largas atmosféricas

La Ingeniería Marítima enfocada al estudio de resonancia portuaria, muestra cada vez más interés en los procesos asociados a la generación de ondas de baja frecuencia, debido a cambios atmosféricos locales.

En la literatura se define el término de *seiche* como una oscilación en el nivel medio del agua en reposo, desde un lado de un cuerpo de agua hacia el otro, ya sea por cambios rápidos en la intensidad y dirección del viento, o bien por cambios locales en la presión atmosférica.

Una vez comenzadas las oscilaciones, éstas pueden permanecer por varios ciclos antes de desaparecer bajo la influencia de factores de fricción que disipan la energía y por la gravedad que trabaja como fuerza restauradora que intenta llevarla al nivel medio de reposo inicial. El término *seiche*, originalmente fue aplicado a la observación de las oscilaciones rítmicas en el lago Génova, Suiza que en ocasiones ha llegado a exponer zonas del lecho que normalmente se encuentran sumergidas, y experimentando oscilaciones extraordinarias por más de 73 minutos.

Además de los *seiches* en lagos, el fenómeno se observa comúnmente en instalaciones portuarias, bahías, y golfos. Pudiendo llegar a ser un verdadero problema en la gestión costera, por la generación de corrientes energéticas e impredecibles, poniendo en peligro la navegabilidad de las embarcaciones que entran y salen de los puertos, y también por los daños considerables en las que se encuentren amarradas dentro de las dársenas.

Los *seiches* u oscilaciones en los puertos se deben de tomar en cuenta para el diseño en la altura de los diques, el movimiento y protección de las embarcaciones, y en la definición de la operatividad portuaria.

Gomis *et al.* (1993), denominan a las oscilaciones atmosféricas que comúnmente ocurren en verano en la zona del oeste mediterráneo, con el nombre de “rissaga”.

Presentando amplitudes que alcanzan de 1 a 2 metros y periodos cercanos a 10 minutos. Oscilaciones similares se han observado en diversos puntos del mundo, y en ocasiones vienen documentadas con campañas intensivas de medición del oleaje, y series temporales atmosféricas.

Okihiro & Guza (1996), analizaron las amplificaciones observadas en tres puertos, forzados por oscilaciones o *seiches* atmosféricos, definiendo a los *seiches* como ondas largas que coinciden con los periodos naturales de oscilación de los puertos. Los autores realizaron extensas campañas de campo con la finalidad de caracterizar *seiches* de 0.5 a 30 minutos, en distintos puntos en el interior de las dársenas portuarias. Se lograron verificar amplificaciones resonantes dentro de los puertos, mostrando una clara tendencia decreciente en las amplificaciones desde el modo principal de oscilación hasta los modos resonantes secundarios. Los resultados medidos en el exterior e interior del puerto fueron comparados, encontrando una baja correlación para las oscilaciones de 0.001 a 0.002 Hertz, correspondiendo naturalmente a fenómenos meteorológicos, o a efectos generados por tsunamis únicamente. Mientras que para una banda de frecuencia mayor a 0.002 Hertz, que corresponde a oleaje tipo swell, las comparaciones mostraron altas correlaciones, concluyendo que este tipo de oleaje actúa como principal elemento forzador de las sobre-amplificaciones oscilatorias dentro de las dársenas portuarias y que es posible vincular características físicas del oleaje exterior con los episodios de resonancia dentro de las dársenas.

Según indica De Joung & Battjes (2004), los *seiches* son generados por la sobre-elevación inducidas por el movimiento que las celdas de convección atmosféricas sufren por el paso de frentes fríos, debido a inestabilidades térmicas. Estas celdas se estudian como fenómenos atmosféricos de meso-escala con longitudes de entre 30 y 100 Km. Se presentan observaciones realizadas de seiches importantes sucedidos en ciertas instalaciones en el puerto de Róterdam. Se estudiaron simultáneamente las series de estados del oleaje con las cartas meteorológicas, encontrando que los pasos de baja presión y los frentes fríos coinciden completamente con los eventos de oscilación. Las fluctuaciones atmosféricas mostraron periodos de entre 20 a 260 minutos, generando seiches no solo en las dársenas elegidas para el estudio, si no en todas aquellas que llegaban a coincidir en el modo resonante natural de oscilación. Estos autores son de los pocos o los únicos que en la literatura actual que proponen principios de teledetección y

adquisición remota de datos con satélites, enfocados al estudio de la resonancia portuaria, en parte debido a la dificultad de filtrar el ruido de alta frecuencia generado por la transformación del oleaje de onda corta a lo largo de su propagación, o bien al no poder medir mayores extensiones o zonas de estudio, o en parte debido a la poca duración de los episodios resonantes y a que en ocasiones no se cuentan con los instrumentos de medición adecuados, o tal vez por que las series registradas no son lo suficientemente largas para ser representativas del fenómeno.

Uno de los últimos estudios al respecto, es el que plantea Marcos *et al.* (2004) con la observación y análisis de series de presión, y de superficie libre para eventos de rissaga localizados en el oeste mediterráneo, específicamente en la Isla de Menorca. El autor revisa los estudios al respecto plantea una metodología basada en la aplicación de un modelo analítico para examinar las oscilaciones de un sistema de bocanas que trabaja acopladamente.

2.4 ESTUDIOS DE LABORATORIO SOBRE EL ANÁLISIS DE LA RESONANCIA PORTUARIA

En este apartado se realiza una recopilación de los trabajos más significativos, que se dedican al estudio de la generación de ondas largas en laboratorio vinculadas a grupos en la mayoría de los casos, y posteriormente al estudio del fenómeno de resonancia portuaria a través de modelaciones físicas en laboratorio.

Bowers (1988), realizó comparaciones entre predicciones teóricas y simulaciones experimentales, utilizando grupos de ondas para evaluar la onda larga asociada. Los experimentos fueron realizados en un canal de oleaje con una playa absorbente en un extremo. Además de trabajar con un oleaje bicromático para asegurar la vinculación de una onda larga, el autor trabajó con oleaje irregular, siendo uno de los primeros en utilizar este tipo de oleaje enfocado al estudio de las ondas largas vinculadas a grupos. Esta experimentación además de arrojar buenos resultados comparativos entre su formulación matemático y los datos medidos, mencionó un tipo de oscilaciones que aparentemente correspondían a una onda secundaria residual generada por la pala de oleaje, y que podía ser minimizada con la incorporación de un movimiento oscilatorio similar en la pala generadora de oleaje.

Observaciones similares con respecto a la liberación de ondas largas vinculadas a grupos, fueron realizadas por Ottesen Hansen *et al.* (1980). Encargándose de analizar los errores de escala existentes en la liberación de la onda larga, a la hora de trasladar las magnitudes del oleaje agrupado prototipo hacia el modelo físico, encontrando errores en la magnitud energética de baja frecuencia. El autor denominó este fenómeno de escala como “ondas parásitas”, que pueden llegar a magnificar los efectos de resonancia y agitación portuaria en el laboratorio. Al igual que Bowers (1988), el estudio propone la eliminación de este tipo de ondas a través de la imposición de oscilaciones de baja frecuencia que logren reproducir el setdown natural en la pala generadora. En el mismo año, Goring (1978), presentó un estudio enfocado a la generación adecuada de onda larga en laboratorio de características similares al generado por Tsunamis, a través de una onda solitaria cnoidal, e intentando minimizar las oscilaciones de onda corta que aparecen en la “cola” de la onda larga simulada, utilizando técnicas de adecuación mecánica en los movimientos oscilatorios de la pala.

La importancia de este estudio, al igual que los descritos anteriormente es que se proponen ciertas recomendaciones para generar oleaje de onda larga en laboratorio, y así poder realizar simulaciones adecuadas.

Shemer *et al.* (1998), realizaron una serie de experimentaciones para el estudio de grupos de olas no lineales en aguas intermedias, utilizando un tanque de oleaje y realizando simulaciones para fondo constante con distintos calados, aplicados al estudio práctico de la propagación de grupos de oleaje sobre la plataforma continental hacia la zona costera. Se estudiaron los diversos efectos no lineales involucrados, así como los procesos dispersivos de la propagación de grupos. El estudio confirmó la tendencia a contar con una dispersión energética más uniforme del oleaje conforme éste se propaga hacia aguas relativamente poco profundas, en contraste para las propagaciones sobre aguas indefinidas donde ocurre lo contrario. La investigación demostró que dos grupos de olas idénticos que inicialmente coinciden en la forma de sus envolventes pero con diferente conformación espectral, evolucionan completamente diferente al propagarse. Específicamente, los grupos conformados de espectros con características bimodales conservan ésta característica durante su propagación y el cambio relativo en su envolvente es bajo, mientras que para un grupo de envolvente inicial pero que se conforma de un espectro con una distribución frecuencial amplia, tiende a desvanecer sus grupos a lo largo de su propagación. Por lo que la posible vinculación de onda larga, puede llegar a diferir considerablemente de un grupo a otro dependiendo del génesis energético que los grupos guarden en aguas profundas.

Continuando con el estudio en laboratorio de grupos de oleaje con componentes bicromáticas, Westhuis *et al.* (2001) presentaron experimentos en instalaciones hidráulicas de más de 200 metros para asegurar la adecuada representación de oleaje bicromático. Las observaciones realizadas indican que la estabilidad de las envolventes de los grupos dependen tanto de las diferencias existentes entre las frecuencias como de la interacción entre las distintas amplitudes involucradas.

Son pocos los trabajos que se dedican a diseñar campañas de laboratorio relacionadas *ex profeso* a la generación de efectos resonantes en instalaciones portuarias. De Girolamo (1996) menciona que el fenómeno de resonancia portuaria se produce básicamente por la acción oleaje regular (swell y tsumanis), y por oleaje de viento, siendo este segundo factor el que mayor presencia tiene en el mundo y por esto las experimentaciones existentes se enfocan básicamente al uso de oleaje irregular de onda corta, oleajes bicromáticos y grupos de oleas, mientras que existe relativamente poca difusión para aquellos experimentos que utilizan oleaje regular de onda larga.

Nakamura (1975), muestra resultados experimentales relativos al estudio de la generación de ondas de borde (*edge waves*), para verificar las diferentes formas de manifestación de dichas ondas a lo largo de un modelo portuario formado con dos diques separados por una bocana, construidos sobre un tanque de oleaje unidireccional. El autor simuló varios estados de mar considerando oleaje monocromático, encontrando que para ciertos periodos singulares, la onda de borde generada mostraba deformaciones de características no lineales, similares a las ondas cnoidales y que presentaba sobre-elevaciones importantes en el sistema. El autor no fue concluyente con las sobre-amplificaciones observadas en sus resultados, y simplemente indicó la posibilidad de que la interacción no lineal de las ondas de borde, era capaz de liberar energía coincidente con las frecuencias naturales de oscilación del tanque de oleaje.

El trabajo experimental realizado por De Girolamo (1996), que analiza los efectos resonantes y la transferencia frecuencial de energía dentro de un puerto, comparando diferentes tipos de oleaje, oleaje regular de onda larga libre, onda larga vinculado a grupos y oleaje irregular, como elementos forzadores del sistema. La configuración geométrica de los experimentos partía de un canal inicial de propagación de fondo constante, conectado en uno de sus lados con una bahía rectangular estrecha con la posibilidad de cambiar su longitud en dos posiciones diferentes, de tal forma que el oleaje se aproxima en dirección normal a su eje longitudinal. Una rampa de disipación de oleaje se dispuso al fondo del canal, disponiendo playas de pendiente constante hechas de grava. Las longitudes del puerto se seleccionaron según la teoría lineal de Mei (1983), para representar el primer y segundo modos de oscilación respectivamente.

Al analizar las diferentes respuestas resonantes para los tres diferentes oleajes simulados, comparando los diagramas de amplificación para las dos longitudes portuarias, y graficando el oleaje irregular vs. oleaje regular de onda larga, y oleaje irregular vs. onda larga asociada a grupos. Se observó que cuando el modo resonante del puerto se ve forzado por el armónico fundamental de una onda larga libre regular, éste presenta amplificaciones mayores que el caso forzado con una onda larga de segundo orden vinculada a grupos, mostrando diferencias de entre el 40 a 50% menores, en parte debido a las pérdidas de energía por interacciones no lineales entre armónicos, además de las pérdidas energéticas en los contornos y los efectos de bocana. Por otra parte, cuando las oscilaciones eran forzadas por oleaje irregular, todos los modos de resonancia del puerto se amplificaban, coincidiendo con los datos del modelo analítico y lineal de Mei (1983).

Nakamura & Morita (2000), plantean una serie de experimentos para el diseño de resonadores rectangulares basados en la teoría del filtrado de ondas, presentando el diseño de diferentes configuraciones geométricas para los resonadores instalados en las bocanas de los puertos que a su vez fueron dispuestos sobre un tanque de oleaje multidireccional. La finalidad de este estudio experimental reside en el poder maximizar la tranquilidad de las oscilaciones en los puertos, con la construcción de estructuras y así también evitar en la manera de lo posible, los efectos de agitación por resonancia portuaria. El diseño del resonador parte del símil de un circuito eléctrico que se encarga de filtrar cualquier frecuencia dada. Dos adaptaciones geométricas de resonadores fueron presentados por los autores, que consisten en dos diques normales a la bocana del puerto rectangular con profundidad constante, los primeros unidos a la bocana y los segundos exentos. Los datos experimentales para oleaje con incidencia normal al puerto, muestran que la geometría del resonador con los diques unidos a la bocana, mejora de manera sustancial a la configuración tradicional de diques exentos. Mientras que para oleaje oblicuo, el resonador exento presenta agitaciones menos agresivas bajo efectos de resonancia.

Finalmente, un interesante trabajo presentado por Kofoed-Hansen *et al.* (2000), presenta un completo estudio que se encarga de diseñar simulaciones en laboratorio a detalle, para el estudio de los efectos de agitación por presencia de *seiches* vinculados a oleaje tipo swell en una marina situada al Oeste de Beirut, Líbano. Oscilaciones de largo periodo de alrededor 50 a 80 segundos, se presentaron y estudiaron de manera experimental con la construcción de un modelo físico tridimensional conservando una escala no distorsionada 1:60, con la capacidad de modelar agitaciones de onda corta y larga y observación de la liberación de onda larga por procesos de rotura, de establecer las relaciones entre condiciones de oleaje incidente y la cantidad de energía e baja frecuencia, y para optimizar el diseño de un puerto pesquero en construcción. Una simulación para encontrar las frecuencias resonantes utilizando un forzamiento equivalente a un espectro de ruido blanco (*white noise*), de 20 a 1000 segundos con una energía constante de $0.01\text{m}^2/\text{s}$ fue realizada, además de diversas simulaciones de espectros tipo JONSWAP buscando la generación de episodios de resonancia portuaria. Los resultados fueron comparados con datos simulados en un modelo numérico avanzado de oleaje, basado en las ecuaciones de Boussinesq, encontrándose resultados similares y adecuada simulación en la descomposición no lineal de energía sobre un bajo artificial existente, siendo esta característica batimétrica, la mayor causante de la liberación de onda larga y por ende del factor forzador de las oscilaciones observadas.

En resumen, el asomeramiento, rotura, y difracción de los trenes de onda corta, desencadenan procesos no lineales complejos que se traducen en interacciones cuadráticas entre armónicos en aguas poco profundas sobre relativamente distancias cortas, así como se presenta una transporte energético hacia sub-armónicos y super-armónicos vinculados a grupos de onda corta. Por esto, y por el poco desarrollo existente en la modelación física hacia los procesos que atañen a la resonancia portuaria, es prácticamente obligatorio el realizar una revisión del estado del conocimiento sobre los modelos numéricos de oleaje que, debido a sus características particulares pueden llegar a ser de gran ayuda para representar y entender los diferentes procesos involucrados en las oscilaciones portuarias extraordinarias, seiches atmosféricos, y agrupamiento del oleaje en zonas costeras.

2.5 MODELACIÓN NUMÉRICA DEL FENÓMENO DE RESONANCIA PORTUARIA

Un gran número de modelos matemáticos se han desarrollado a fin de simular la propagación, y transformación de oleaje tanto en zonas costeras como en instalaciones portuarias. Los diferentes modelos están basados en diferentes hipótesis, lo cual los limita a ser aplicados en zonas a priori definidas.

Existen modelos de generación espectral viento-oleaje aplicados a zonas abiertas donde el forzador energético es el viento, y el asomeramiento y la refracción son dominantes, modelos parabólicos basados en la ecuación de la pendiente suave que se aplican de forma general a grandes zonas costeras en donde el efecto de la reflexión se puede despreciar, modelos basados en la ecuación de Helmholtz para agitación portuaria y resonancia sobre fondos constantes, modelos basados en las ecuaciones elípticas de la pendiente suave comúnmente encontrados en las aplicaciones de problemas de agitación, interacción oleaje estructura y resonancia portuaria, y finalmente los modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq que resuelven la interacción no lineal de los efectos combinados asomeramiento-refracción-difracción en aguas poco profundas, la agitación portuaria y la resonancia no lineal del oleaje.

2.5.1 Modelos de oleaje aplicados a la agitación portuaria

Partiendo de la necesidad de conocer las características físicas de las oscilaciones del oleaje dentro y fuera de las estructuras costeras artificiales o naturales, la ingeniería portuaria ha sido capaz de desarrollar modelos matemáticos que logran simular la agitación del oleaje que interactúa con dichas estructuras, pudiendo en ocasiones llegar a simular los procesos de disipación y transformación del oleaje con gran detalle como los son los procesos de rotura y su turbulencia asociada, así como los fenómenos relacionados con oscilaciones que involucran grandes gradientes de agitación como lo es el fenómeno de resonancia portuaria.

Los primeros trabajos que se encargaron de estudiar el modelado de las oscilaciones portuarias, se enfocaron en el diseño de modelos analíticos basados en la resolución de los autovalores de las ecuaciones lineales de onda a través de métodos numéricos clásicos. McNown (1952), es uno de los primeros autores que proponen un modelo conceptual capaz de interpretar adecuadamente las oscilaciones que se presentan en los puertos, el autor trabajó sobre las posibles características de respuesta de un puerto circular con una pequeña entrada bajo efectos resonantes, asumiendo que siempre se presenta un antinodo de la onda en el punto de la bocana de entrada, para que posteriormente Kravtchenko & McNown (1955), ampliaran sus observaciones para geometrías más complejas y así establecieron un catálogo de los diferentes modos de oscilación para diferentes geometrías preestablecidas. Miles & Munk (1961), ampliaron el estudio proponiendo una extensión del problema al conectar la bocana de entrada de un puerto con geometría arbitraria con el mar abierto, planteando la formulación del problema como una integral en términos de la función de Green, situación que llevó a los autores a simplificar su geometría hacia un puerto rectangular debido a la dificultad de resolver la función de Green para geometrías arbitrarias, estableciendo que entre más estrecha sea la bocana del puerto mayor será la oscilación resonante dentro del puerto, situación conocida en la literatura como “paradoja portuaria”. Estos autores fueron precursores en la implementación de un modelo analítico para resolver la agitación portuaria en puertos con geometrías simplificadas.

Ippen & Goda (1963), analizaron el comportamiento de las oscilaciones resonantes en un puerto rectangular, implementando un modelo matemático que igualaba en la bocana los valores promediados de la amplitud del oleaje de la zona exterior, con los de la zona interior del puerto, resolviendo la zona interna del puerto con el método de separación de variables y la zona exterior con el método de la transformada de Fourier, los autores realizaron además una serie de experimentos y encontraron resultados satisfactorios.

Posteriormente, Lee (1970) publica un estudio que versa sobre la modelación de las oscilaciones en puertos con profundidad constante y geometrías variables, con validaciones experimentales. El autor planteó una metodología basada en la resolución de las ecuaciones de Helmholtz aplicando la solución de Weber en ambas zonas de estudio, la interior y la exterior del puerto, para posteriormente igualar las amplitudes en

ambas zonas justo en la frontera definida por la bocana. El autor conceptualizó perfectamente el problema al estudiar de forma separada las regiones externa e interna de la zona portuaria, además de subdividir las funciones generales en funciones de oleaje incidente, funciones de oleaje reflejado y funciones de oleaje irradiado hacia el exterior, logrando separar las características físicas individuales del estudio, además de presentar las curvas resultantes de respuesta de oscilación para diversas geometrías circulares, rectangulares y reales aplicado al las dársenas Este y Oeste del puerto de Long Beach en California.

Loomis (1972) realizó la adaptación numérica para aplicar las ecuaciones de aguas poco profundas (*shallow water equations*) con validaciones en instalaciones portuarias reales, el modelo no asume a priori el comportamiento de la refracción, asomeramiento, difracción, y oscilaciones naturales ya que se limita a obedecer las ecuaciones de momentum y de continuidad de Navier-Stokes y considera que las fenómenos asociados son una consecuencia necesaria, el modelo asume irrotacionalidad e incompresibilidad, que las velocidades se conservan constantes a lo largo de una línea vertical desde la superficie hasta el fondo y que la proporción de cambio de la superficie libre es pequeña con respecto a la profundidad, incluye el factor de fricción por fondo propuesto originalmente por Leendertse (1967), el cual es dependiente del coeficiente de rugosidad de Chezy y débilmente dependiente de la profundidad.

En los últimos 20 años, se ha observado un vertiginoso desarrollo en los modelos numéricos de agitación que buscan simular la totalidad de las características dinámicas del oleaje, su transformación y disipación, cada uno enfocado a resolver de forma particular problemas específicos dentro de la Ingeniería de Costas. En la actualidad se pueden establecer dos clases generales de modelos numéricos de oleaje según Liu & Losada (2002), los modelos que resuelven la fase, que están basados en las ecuaciones de balance de masa y momentum dependientes del tiempo e integradas en vertical, y los modelos que resuelven el promedio de fase que se basan en la ecuación de balance de energía espectral. Particularmente para el estudio de las oscilaciones resonantes, la propagación del oleaje en aguas poco profundas, y los efectos combinados de difracción, refracción y reflexión, los modelos numéricos integrados en vertical

derivados de las ecuaciones de pendiente suave (*mild slope equation*) han tenido especial protagonismo.

Esta clase de modelos basados en la ecuación de la pendiente suave fueron propuestos inicialmente por Berkhoff *et al.* (1982); Berkhoff (1976). Los cuales se pueden dividir en dos grandes grupos:

- a) Los que utilizan la aproximación parabólica (*parabolic mild-slope equation*) para simular completamente la refracción y el asomeramiento, y débilmente la difracción, para dominios computacionales de dimensiones considerables, inicialmente Kirby & Dalrymple (1983) plantearon una aproximación parabólica de la ecuación de la pendiente suave considerando el movimiento del oleaje en una sola dirección dominante. Las aplicaciones ingenieriles de este planteamiento recaen sobre amplias zonas costeras y en problemas específicos cálculo de oleaje en aguas profundas. La ecuación parabólica propuesta se basó en las aproximaciones de Liu & Mei (1976), que estudiaron el asomeramiento del oleaje en una playa con pendiente constante con interacción de un dique exento paralelo a la línea de costa, así como del trabajo de Mei & Tuck (1980), mostrando un estudio del oleaje difractado por presencia de estructuras de protección esbeltas. Alternativamente, Radder (1979) planteó un método para obtener ecuaciones parabólicas conjuntas para resolver la transformación del oleaje hacia delante y hacia atrás de la dirección dominante, partiendo de una matriz truncada derivada de la ecuación elíptica propuesta por Berkhoff (1972), bajo esta misma tónica Tsay & Liu (1983) describieron una metodología a través de un proceso iterativo, utilizando ecuaciones parabólicas conjuntas similares a las obtenidas por Radder (1979).

- b) La segunda familia de modelos basados en las ecuaciones de la pendiente suave, son los que resuelven las ecuaciones diferenciales elípticas (*Elliptic mild-slope equation*) propuestas inicialmente por Berkhoff (1972) para zonas costeras considerando batimetrías con cambios graduales, Kirby (1986) extendió las ecuaciones para poder incluir cambios batimétricos bruscos, así como

Chamberlain & Porter (1995) propusieron el uso del método de auto-funciones de Galerkin y el principio varacional para derivar las ecuaciones extendidas de la pendiente suave incluyendo términos adicionales proporcionales a la curvatura del fondo y al cuadrado de la pendiente, y finalmente Lee *et al.* (1998) mostraron la derivación temporal de la forma hiperbólica de la ecuación extendida de la pendiente suave. Booij (1983) introdujo factores de disipación tales como la fricción por fondo, y Dalrymple *et al.* (1984); Chen (1986); Battjes & Janssen (1978); Dally *et al.* (1985), propusieron diferentes técnicas para simular la disipación de energía por efectos de rotura. Los límites físicos de aplicabilidad de la ecuación elíptica de la pendiente suave son por un lado la ecuación lineal para aguas poco profundas (*shallow water equation*) para ondas largas, y por el otro lado se reduce a la ecuación de Helmholtz ya sea para cuando se trabaja sobre profundidad constante o bien para cuando se cuente con oleaje de onda corta sobre fondo somero.

Las aplicaciones hacia la agitación portuaria de la ecuación de la pendiente suave que se han publicado en la última década, radican en el desarrollo de modelos con ecuaciones modificadas, Massel (1993), Chamberlain & Porter (1995), y Kirby & Dalrymple (1994), que consideran los términos de segundo orden que originalmente Berkhoff (1972) descartó. Esto lleva a poder contar con agitaciones con geometrías complejas, fondos variados y descartar finalmente la restricción de fondo suave.

En 1989 el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria (GIOC), desarrolló un modelo numérico bidimensional basado en las ecuaciones elípticas modificadas de la pendiente suave que se resuelve sobre una malla en elementos finitos triangulares no estructurados, con la capacidad de incluir el término de disipación por fricción en el fondo, generación de oleaje monocromático o espectral, y absorción parcial en los contornos basado en el trabajo publicado por Engquist & Majda (1977). El modelo desarrollado por el GIOC obtiene además de las agitaciones del oleaje y sus transformaciones debidas a la interacción onda corta – estructura, las respuestas de amplificación o frecuencias resonantes coincidentes con los modos naturales de oscilación para cualquier geometría propuesta, obteniéndose resultados satisfactorios y validados con datos de campo.

2.5.2 Modelos de oleaje basados en las ecuaciones de Boussinesq

La habilidad para predecir con precisión la transformación del oleaje desde aguas indefinidas hasta aguas poco profundas es de vital importancia para entender los procesos costeros en su totalidad.

Conforme el oleaje se propaga hacia la línea de playa, existe una combinación de procesos de asomeramiento, refracción y difracción que modifican la forma del oleaje. Los efectos no lineales inducen la transferencia de energía hacia las ramas de baja y alta frecuencia del espectro, traduciéndose por un lado en la generación de oscilaciones de baja frecuencia que pueden inducir sobre elevaciones del nivel medio en la playa (*surf-beat*) o el fenómeno de resonancia portuaria, y por otro en la generación de armónicos de orden superior del oleaje.

Existen dos parámetros de gran importancia asociados a las ecuaciones de Boussinesq, la no linealidad $\varepsilon=a/h$, representado por la relación de la amplitud a , y la profundidad h , y la dispersión $\mu=h/L$, representada por la relación entre la profundidad h y la longitud de onda L . Las ecuaciones de Boussinesq que incluyen los efectos de orden menor de no linealidad y dispersividad han mostrado en la literatura una buena descripción de la evolución del oleaje en las zonas costeras, siempre que la teoría sea aplicada dentro de los límites de validez de cada aproximación en particular.

Las primeras ecuaciones que aplicaron los estudios de mecánica de fluidos de Boussinesq (1872) hacia el campo de la Ingeniería Marítima, fueron las derivadas por Peregrine (1967), denominadas ecuaciones clásicas de Boussinesq (*standard Boussinesq equations*), Mei & Le Méhauté (1966), Madsen & Mei (1969), las cuales utilizan como variables dependientes, al desplazamiento de la superficie libre η , y a la velocidad horizontal promediada en la vertical \bar{U} . Las ecuaciones de Boussinesq en su forma clásica se limitan a una dispersión μ débil, así como una no linealidad ε débil, asumiendo que ε y μ^2 son del mismo orden. Esta hipótesis representa el balance entre el orden menor orden de dispersión y no linealidad, resolviendo un oleaje similar en forma a las ondas cnoidales. Otras formulaciones, Dingemans (1973), incluyen un orden de dispersión y no linealidad mayores $O(\mu^4)$, manteniendo $O(\varepsilon\mu^2)$. Físicamente este tipo de ecuaciones están restringidas a profundidades relativamente pequeñas, obligando a que

la profundidad h , debe de ser menor que un quinto de la longitud de onda L , para conservar errores en la fase de menos del 5%.

Estudios posteriores, Murray (1989), Madsen *et al.* (1991), se encargaron de extender el rango de aplicabilidad de las ecuaciones clásicas de Boussinesq hacia aguas más profundas al mejorar las características dispersivas en la ecuación basándose en el excelente comportamiento de la aproximación de Padé [2,2], Witting (1984) en la relación de dispersión lineal de la teoría de Airy, introdujo un término adicional de tercer orden en la ecuación de momentum. Dicho término de tercer orden se derivó directamente de las ecuaciones de onda larga (*long wave equations*) el cual tiende a cero conforme se aproxima a aguas poco profundas.

Nwogu (1993) presentó un estudio determinante en el desarrollo histórico de las ecuaciones de Boussinesq, proponiendo una forma alternativa de las ecuaciones bidimensionales de Boussinesq derivadas de la ecuación de continuidad y de las ecuaciones de movimiento de Euler, para transformación del oleaje sobre batimetrías reales, fijando la velocidad horizontal a una distancia desde la superficie libre en lugar de utilizar la velocidad promediada en vertical que tradicionalmente se había usado, a fin de mejorar el valor de la dispersión. Esta hipótesis definió un nuevo grupo de ecuaciones denominadas ecuaciones modificadas de Boussinesq (*modified Boussinesq equations*) que son capaces de simular adecuadamente la propagación del oleaje desde aguas intermedias, $kh=0.5$, hasta aguas poco profundas. Conservando las propiedades dispersivas hasta un rango de $0 < h/L_0 < 0.5$ y las propiedades no lineales hasta $0 < h/L_0 < 0.3$.

Adicionalmente a las ecuaciones modificadas de Boussinesq que realizaron mejoras sustanciales en la dispersividad del oleaje, existe un tercer escalón dentro del desarrollo de las ecuaciones de Boussinesq en afán de mejorar sus características no lineales y ampliar su rango de aplicabilidad. Las ecuaciones extendidas de Boussinesq (*extended Boussinesq equations*), desarrolladas por Wei *et al.* (1995), Gobbi & Kirby (1999), que implementaron modificaciones en las ecuaciones que mejoran el comportamiento no lineal del oleaje con órdenes de $O(k^4 h^4)$, coincidiendo perfectamente con la solución de Stokes en el comportamiento de las funciones de transferencia de superarmónicos sobre zonas de hasta $kh < \pi$, pero con una pobre correlación con respecto a la solución exacta

para el comportamiento de las funciones de transferencia de los subarmónicos cuando $kh > 1.5$. Madsen *et al.* (1996), desarrollaron dos ecuaciones de Boussinesq de orden superior, la primera expresada en términos del promedio de la profundidad con la dispersión equivalente a la expansión de Padé [4,4] y la no linealidad del orden $O(\varepsilon^5 \mu^4)$. El error es de aproximadamente el 35% para la función de transferencia del segundo armónico, cuando $kh=3$. Li *et al.* (1999), presentaron una serie de ecuaciones de orden superior con $O(\mu^4)$ en dispersión y $O(\varepsilon \mu^2)$ en no linealidad, a través de extender la derivación de las ecuaciones clásicas de Boussinesq al tercer orden, para posteriormente transformar las derivadas espaciales de cuarto orden en derivadas espaciales de segundo orden dentro de los términos dispersivos, resultando en unas ecuaciones completamente no lineales $O(\mu^2)$. La función de transferencia de las ecuaciones conserva una excelente correlación con un error del 8% con respecto a la solución exacta, para $0 < h/L_0 < 0.5$. Para la función de transferencia del superarmónico conserva un error similar para $h/L_0 < 0.15$.

En resumen, el desarrollo de las diferentes aproximaciones depende del orden en que los términos dispersivos, (lineales y no lineales) se incluyen en las formulaciones, pero no solamente se obtiene la precisión de las ecuaciones al ir aumentando el orden de la ecuación, también se ha visto, Madsen & Schäffer (1999) que factores tales como la elección de un adecuado esquema de integración temporal y espacial pueden condicionar el desempeño de las diferentes formulaciones.

Las adaptaciones matemáticas e ingenieriles de las ecuaciones de Boussinesq dentro del desarrollo de moldeos de oleaje es un tema extenso y altamente desarrollado, sin embargo en forma general se pueden agrupar las aplicaciones de las ecuaciones de Boussinesq en dos grandes familias, con base en las técnicas de resolución de las ecuaciones de gobierno, en primer lugar las ecuaciones de Boussinesq que son resueltas directamente en el dominio del tiempo por el uso de esquemas de diferencias finitas con mallas estructuradas, y en segundo lugar por la aplicación de técnicas de elemento finito sobre mallas triangulares no estructuradas, teniendo aplicaciones ingenieriles variadas y diversas adaptaciones a problemas específicos.

a) Modelos de Boussinesq en diferencias finitas.

Dentro del primer grupo se pueden mencionar los siguientes trabajos y aplicaciones realizados por los autores más destacados. Madsen *et al.* (1997a), plantean en su investigación un modelo para oleaje regular modificado de Boussinesq que resuelve la zona de rompientes en una dimensión, con la inclusión de rotura para olas que rompen en descrestamiento, utilizando una técnica de determinación geométrica de la estabilidad de la ola o técnica *roller*, y la adaptación de una zona de ascenso-descenso a través de una línea de costa móvil (*moving shoreline*), Madsen *et al.* (1997b), continúan su estudio proponiendo la aplicación del modelo de oleaje esta vez a la simulación de grupos de olas y oleaje irregular, prestando especial atención al fenómeno de asomeramiento y la modelación de surf-beats. Las ecuaciones de Boussinesq y el modelo tienen la capacidad inherente de simular la interacción mutua entre oleaje de onda corta y oleaje de onda larga, permitiendo el intercambio de energía entre frecuencias.

Sørensen *et al.* (1998) realizan una tercera aplicación integrando todos los fenómenos unidimensionales antes mencionados, para llevarlos al plano bidimensional, corroborando la capacidad adicional inherente por parte de las ecuaciones de la generación de corrientes inducidas por el oleaje. Arrojando resultados satisfactorios, aplicados a ejemplos de generación de corrientes de retorno en playas (*rip-currents*) y circulaciones en la zona protegida de un dique exento paralelo a la playa, tanto para oleaje regular como para oleaje irregular multidireccional.

Chen *et al.* (1999) aplicaron el modelo de oleaje propuesto por Wei *et al.* (1995), basado en las ecuaciones de Boussinesq completamente no lineales, para la investigación de la transformación de la superficie libre del oleaje en la zona de rompientes y la generación de corrientes inducidas por la rotura del oleaje. La modelación de la disipación de energía debido a la rotura del oleaje fue realizada a través de la inclusión de un término de viscosidad de remolino (*eddy-viscosity*) en las ecuaciones de momentum, con la viscosidad fuertemente localizada en la cara frontal de la ola en proceso de rotura. Los autores proponen un esquema en

diferencias finitas de tercer orden para resolver las ecuaciones de gobierno y comparan sus resultados con los datos de laboratorio de Haller *et al.* (1998)

Cruz *et al.* (1997) enfocaron sus esfuerzos en desarrollar un modelo bidimensional, también en diferencias finitas, dependiente del tiempo e integrado en vertical, capaz de modelar el fondo poroso, basado en las ecuaciones clásicas de Boussinesq. Los rangos de aplicación de las ecuaciones básicas, que limitan a un comportamiento débilmente dispersivo, fueron extendidos al añadir términos de dispersión en las ecuaciones de momentum, encontrando una relación de dispersión que posteriormente sería calibrada con la correspondiente relación para teoría lineal y fondo poroso. Se observaron y validaron diversos fenómenos relacionados con interacción oleaje-estructura porosa como lo es la reducción del oleaje que se propaga sobre fondo poroso constante, la transformación del oleaje sobre un fondo con pendiente y porosidad constantes, y los fenómenos combinados de refracción, difracción, asomeramiento y reducción alrededor de un dique poroso sumergido con una entrada.

Kennedy *et al.* (2000), y Chen *et al.* (2000), realizaron estudios detallados en el temas de ascenso-descenso de la playa, runup y rotura del oleaje, simulados con un modelo extendido de Boussinesq, comparando los resultados con datos de laboratorio para situaciones 1D y 2D, e incluyendo en la física diversas consideraciones: la simulación de la rotura del oleaje con la técnica de conservación de momentum a través de la viscosidad de remolino, la simulación de la línea de playa con la técnica denominada *slot method* desarrollado por Tao (1994), que modifica la solución de las ecuaciones en la línea de playa, activando la solución de las ecuaciones para fondo poroso cuando el oleaje tiende a mermar en esa zona, la simulación de la disipación del oleaje por fricción en el fondo utilizando una ley cuadrática en función del coeficiente de Chezy, y finalmente la simulación de los remolinos y efectos de sub-escala turbulenta Mason (1994), Ghosal *et al.* (1995), asociados a los efectos de rotura del oleaje, originalmente descritos por Smagorinsky (1963). Los autores presentan una serie de validaciones y conclusiones con base en los datos experimentales de Berkhoff *et al.* (1982) para oleaje que se propaga y difracta sobre fondo elíptico y variable, posteriormente con Chawla & Kirby (1996) para verificar los efectos de rotura del oleaje que se mueve sobre un

bajo circular, y finalmente con los datos de laboratorio de Briggs *et al.* (1994), que simularon físicamente el runup que se presenta alrededor de una isla cónica.

Dentro del grupo de modelos de Boussinesq que se resuelven bajo el esquema de mallas en diferencias finitas estructuradas, existe un modelo que aventaja a los demás en cuanto a la adaptabilidad de la malla que utiliza, Shi *et al.* (2001), proponen una adaptación para coordenadas curvilíneas de las ecuaciones completamente no lineales de Boussinesq Wei *et al.* (1995), tradicionalmente resueltas para coordenadas cartesianas. Tomando un esquema en diferencias finitas de orden superior con mallas adaptativas y utilizando la técnica de contravarianza para trabajar las variables dependientes de velocidad en lugar de utilizar las coordenadas cartesianas para dicha variable. Los autores aplican el modelo en cuestión, a casos de simulación que involucran un mallado curvilíneo, mostrando por ejemplo el caso de propagación del oleaje en un canal circular con profundidad constante, que arroja una buena correlación con respecto a la solución analítica Dalrymple *et al.* (1994).

b) Modelos de Boussinesq en elementos finitos

La complejidad geométrica que comúnmente se encuentra en las zonas costeras y portuarias, y considerando que el cambio la longitud de onda del oleaje que se propaga de aguas profundas a aguas reducidas es generalmente rápido, hacen que el uso de modelos de oleaje que trabajan con mallas estructuras y uniformes se torne en ocasiones problemático. Una malla que se conserva constante en todo el dominio computacional tiende a sobre-evaluar los resultados en aguas profundas y a subestimarlos en aguas poco profundas, o bien, cuando el mecanismo forzador del modelo es de origen espectral, es muy probable que el coste computacional sea excesivamente elevado si es que se busca evaluar correctamente las zonas más bajas en calado dentro del dominio.

La resolución local de los elementos para una malla estructurada que intente adaptarse a geometrías como son las zonas Inter-maréales o puertos, es muy difícil de adecuar con una malla estructurada, por lo que se hace innegable el uso de mallas

adaptativas que concentren sus elementos localmente en función de la geometría y física del oleaje.

Las mallas no estructuradas en elementos finitos muestran una gran flexibilidad al adaptarse de forma natural a los contornos que constituyen geometrías complejas, sin embargo el uso tales esquemas de resolución implica una mayor complejidad matemática que los métodos en diferencias finitas, que se presentan de manera más abundante dentro de los modelos de oleaje que se fundamentan en las ecuaciones de Boussinesq. Los métodos basados en mallas no estructuradas triangulares en elemento finito se han utilizado tradicionalmente en la modelación numérica a gran escala, para la simulación de problemas oceanográficos que involucran las ecuaciones de aguas poco profundas, así como para el modelado de los procesos costeros y estuarinos, con el uso de mallas auto-adaptativas para resolver contornos móviles en el tiempo.

Como se mencionó anteriormente, la literatura arroja un menor número de estudios relacionados con el desarrollo de modelos de oleaje que utilicen las ecuaciones de Boussinesq a través de esquemas en elemento finito. Li *et al.* (1999) plantean un modelo numérico basado en las ecuaciones de Boussinesq desarrolladas por Beji & Nadaoka (1996) débilmente no lineales y débilmente dispersivas, que se resuelven bajo un esquema de elemento finito con elementos lineales, rectangulares no estructurados con una discretización temporal que se basa en la técnica predictor-corrector de Adams-Bashforth-Moulton similar a la utilizada por Wei *et al.* (1995). Los autores mostraron una serie de comparaciones numéricas contrastadas con experimentaciones físicas clásicas, que arrojaron buenos resultados, partiendo del problema clásico de una onda solitaria propagándose en un canal con profundidad constante, el caso de asomeramiento del oleaje debido a formas rítmicas en la batimetría Whalin (1971), difracción del oleaje por presencia de un dique de abrigo y el runup del oleaje en una pila circular.

Posteriormente, el turno para el desarrollo de esquemas en elemento finito para la resolución de las ecuaciones de Boussinesq fue para Sorensen & Sorensen (2000), y Sørensen *et al.* (2004), proponiendo un modelo bidimensional discretizado en el espacio usando una técnica en elementos finitos, capaz de resolver fenómenos

altamente no lineales en la zona de rompientes con mallas adaptativas. La malla propuesta a lo largo del dominio corresponde a una malla triangular no estructurada basada en la técnica de triangulación de Delaunay, que garantiza la máxima flexibilidad alcanzada en mallas en elemento finito, y que no solamente se adapta a las condiciones geométricas arbitrarias del dominio, si no que condiciona la longitud de sus elementos en función de las características físicas del oleaje que se propague en cada zona. La formulación de las ecuaciones de Boussinesq corresponde a la presentada por Madsen & Sørensen (1992), con una discretización basada en el método en elemento finito de Galerkin. Uno de los mayores problemas a la hora de resolver las ecuaciones de Boussinesq en el marco del elemento finito es la aparición de derivadas espaciales de orden superior, por lo que se deben de plantear variables alternativas de ordenes inferiores y ecuaciones algebraicas auxiliares. En la integración temporal se utilizó un método predictor corrector de cuarto orden. La validación del modelo fue realizada mostrando la transformación de oleaje regular sobre una barra sumergida, basado en los experimentos de Luth *et al.* (1994), mostrando una buena correlación de los registros de superficie libre en puntos antes y sobre la barra sumergida, mientras que en la zona posterior de la misma, los valores de superficie libre modelados se alejaron de las series de laboratorio debido a la insuficiencia por parte de la relación de dispersión de evaluar tales características del oleaje transformado. Posteriormente, al comparar las series modeladas de superficie libre con las medidas en los experimentos propuestos por Whalin (1971), para oleaje regular sobre batimetría cóncava, los autores muestran que el modelo es capaz de simular adecuadamente la transferencia de energía hacia armónicos de orden superior.

Finalmente, Woo & Liu (2004a) presentan un modelo bidimensional basado en las ecuaciones modificadas de Boussinesq bajo un esquema de diferencias finitas, en este caso enfocado al estudio del fenómeno de resonancia portuaria. Los autores proponen una técnica de mallado triangular no estructurado similar a Sørensen & Sørensen (2000), basada en la técnica geométrica de triangulación adaptativa de Delaunay que a su vez se fundamenta en los polígonos de Voronoi, la cual permite un diseño que concentra elementos triangulares de acuerdo con los requerimientos físicos del oleaje en cada zona, mejorando así la eficiencia computacional

sustancialmente. Las ecuaciones modificadas de Boussinesq que se utilizan en el modelo corresponden a las propuestas por Nwogu (1993) y Chen & Liu (1995), con contornos 100% reflejantes y una zona de absorción de energía que se encarga de disipar el oleaje reflejado e irradiado desde los contornos. El esquema numérico de discretización se basa en la técnica de Galerkin para elemento finito, la matriz se resuelve con un algoritmo de descomposición LU debido a que es el que presenta el mejor desempeño cuando se trabaja con un gran número de nodos (>5000). El esquema de integración temporal es el mismo del que utilizan los autores anteriormente mencionados. El modelo es capaz de generar oleaje regular e irregular (espectros JONSWAP), como elementos forzadores dentro del dominio buscando así, asegurar el buen comportamiento de las oscilaciones resultantes de la interacción ola-estructura, del oleaje reflejado, del oleaje generado y del irradiado. El método de generación de oleaje dentro del dominio computacional fue originalmente presentado por Wei *et al.* (1999) y consiste en añadir directamente una función Gaussiana y cíclica en el tiempo, dentro de la ecuación de continuidad.

Woo & Liu (2004b) muestran las aplicaciones hacia el campo de la resonancia portuaria realizando comparaciones numéricas contrastadas con datos de laboratorio. En primer lugar, se presenta un problema clásico de resonancia portuaria que discurre en una bocana rectangular y estrecha, Lee (1970), que resuena bajo la presencia de una onda con longitud superior a la del puerto, y cuya amplitud con respecto al fondo constante es muy pequeña (problema lineal), encontrando una buena correlación en los valores de amplificación para todos los kL , con pequeñas variaciones para la frecuencia resonante principal debido probablemente a que en los experimentos de laboratorio presenta grandes disipaciones de energía en las inmediaciones de la bocana que no puede considerar el modelo numérico.

Una segunda validación para este modelo se realiza con base en los experimentos de Jeong (1999), para un puerto circular resonante que al igual que con el experimento de Lee (1971), las amplificaciones simuladas en todo el dominio de la frecuencia se conservaron similares a las medidas. De esta forma los autores se convierten en pioneros de la simulación del fenómeno de resonancia portuaria no lineal, a través de un modelo modificado de Boussinesq que además de contemplar de manera inherente las interacciones energéticas entre frecuencias, simula adecuadamente la

no linealidad y la dispersión del fenómeno de oscilación resonante dentro de un puerto rectangular.

Nuevas validaciones estudian el trabajo de Rogers & Mei (1978), consistiendo en diseñar un puerto rectangular y estrecho con tres longitudes que corresponden a priori con los tres primeros modos de oscilación, los resultados obtenidos demostraron la excelente modelación del fenómeno de resonancia no lineal de cada puerto, reflejando transferencias de energía del primer armónico (cercano a la frecuencia del oleaje incidente), hacia armónicos de orden superior, tal y como lo registraron Rogers & Mei (1978), especialmente cuando el segundo y tercer armónico legan a ser más energéticos que el primero.

Para concluir, una última validación fue realizada buscando simular la resonancia portuaria forzada por la onda infragravitatoria vinculada a un oleaje bicromático agrupado, Bowers (1977). La esencia del experimento es hacer coincidir la frecuencia de la onda vinculada al grupo de ondas con la frecuencia resonante del puerto rectangular, forzando así al sistema a sufrir un episodio de resonancia debido a la descomposición energética del tren de olas. Se obtuvieron buenos resultados que mostraron una clara amplificación de los subarmónicos al fondo del canal, comparados con los correspondientes al oleaje en la zona exterior.

Se pudo ver que en la literatura, que los avances y las aplicaciones de los modelos de oleaje que se basan en las ecuaciones de Boussinesq han aumentado en precisión, mejoras en la física de los resultados y efectividad numérica. Las aplicaciones se han enfocado básicamente en la propagación del oleaje hacia zonas costeras, y la simulación de los procesos asociados a la zona de rompientes, obteniéndose una gama de resultados de impresionante similitud con la realidad. Mientras que el campo de estudio de la interacción oleaje-estructura simulada con éste tipo de modelos es relativamente nueva, siendo una asignatura pendiente ya sea debido a los pocos experimentos de laboratorio que aparecen en la bibliografía, o bien por la dificultad y posible coste de la realización de campañas de campo que arrojen resultados aplicables a validaciones numéricas de esta índole. En capítulos posteriores, se mencionarán algunas de las pocas validaciones de modelos de oleaje de Boussinesq realizadas con datos reales medidos en campo que la literatura ofrece.

2.6 CONCLUSIONES

En este capítulo se ha realizado una recopilación de los trabajos más importantes sobre el estudio del fenómeno de resonancia portuaria. La revisión bibliográfica se realizó desde tres vías generales, la atención hacia los elementos físicos forzadores del fenómeno (ondas largas), la recopilación de los trabajos referentes a las experimentaciones físicas enfocadas a la resonancia portuaria, y los modelos numéricos que históricamente se vienen aplicando a la simulación de la agitación portuaria y a sus posibles efectos resonantes.

En general los trabajos que se encargan de definir y estudiar las características de generación de las ondas de baja frecuencia, coinciden en que los elementos forzadores más relevantes que atañen al fenómeno de resonancia portuaria son las ondas largas vinculadas a grupos de ondas, y las ondas largas cuyo factor de generación son las perturbaciones atmosféricas. Dentro del estudio de los grupos de ondas, la literatura arroja un sinnúmero de técnicas de observación, medición, y experimentación, proponiendo metodologías para descomponer las diferentes bandas de energía atrapada dentro los grupos, además de los posibles factores de liberación de la energía de baja frecuencia. En contraste, el estudio de las perturbaciones atmosféricas como factor de generación de ondas largas aplicadas a la agitación portuaria, se enfocan casi en su totalidad con estudios de medición y análisis de series temporales recabadas en campañas de campo.

Los trabajos experimentales en su mayoría se encargan del estudio de los factores de generación de onda larga, la descomposición frecuencial de oleaje irregular, bicromático y en algunas ocasiones multidireccional. En particular el oleaje de onda larga proveniente del agrupamiento del oleaje es el más invocado en laboratorio, aplicado sobre todo a la zona de rompientes y al estudio del fenómeno de *surfbeat* sobre playas y estructuras de protección. Dentro de los pocos experimentos físicos aplicados al fenómeno de resonancia portuaria, se puede comentar que debido a la gran complejidad que conlleva realizar una simulación portuaria tridimensional, y a la limitación física en las instalaciones de laboratorio (tanques y canales de oleaje), en general las simulaciones se ven sometidas a considerar hipótesis simplificadoras de escala y

geometría, con resultados que se ciernen a problemas muy concretos, perdiendo así su carácter de aplicación universal.

Los modelos numéricos que tradicionalmente se han utilizado para la simulación de agitaciones portuarias, han evolucionado favorablemente hacia la consideración de un mayor número de variables que intervienen en los procesos asociados al fenómeno, así como a la inclusión de factores y parámetros de disipación cada vez más fundamentados en valores experimentales (rotura, fricción, turbulencia).

Actualmente los modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq abren un interesante panorama para la simulación numérica del fenómeno de resonancia portuaria especialmente debido a la capacidad inherente de las ecuaciones de poder simular interacciones no lineales del flujo, el intercambio natural energía en todo el rango de frecuencias, y la adecuada simulación de la dispersividad del oleaje. Además de la capacidad de poderse adecuar hacia cualquier geometría portuaria, generando a un dominio computacional apoyado en las últimas técnicas de mallado en elemento finito.

En el capítulo siguiente se realiza un planteamiento del problema a estudiar en esta investigación doctoral, basándose en las debilidades del estado de conocimiento que se pudieron observar.

