

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 9
CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE TRABAJO

9.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo 3 de esta Tesis se presentaron los objetivos generales planteados tras la revisión del estado del arte, para el estudio integral del fenómeno de la agitación y resonancia portuaria.

En la revisión bibliográfica se abordaron tres vías principales, en primer lugar se revisaron los trabajos referentes a los elementos físicos forzadores del fenómeno de resonancia en puertos (ondas largas). En segundo lugar, se recopilaron los trabajos referentes a las experimentaciones físicas enfocadas al estudio de la resonancia portuaria y, finalmente, se estudiaron los modelos numéricos que tradicionalmente se aplican a la simulación de la agitación portuaria y a sus posibles efectos resonantes.

En primer lugar, se observó que los elementos forzadores más relevantes del fenómeno de la resonancia portuaria son las ondas largas vinculadas a grupos de ondas, y las ondas largas generadas por perturbaciones atmosféricas.

Para el estudio de los grupos de ondas, la literatura cuenta con numerosas técnicas de observación, medición y experimentación, proponiendo múltiples metodologías para identificar los diferentes paquetes de energía para cada banda de frecuencia dentro del espectro. Sin embargo, los estudios de ondas largas vinculadas a perturbaciones atmosféricas, se han abordado, generalmente, mediante el análisis de series temporales de superficie libre medidas en campo.

Se puede concluir, por tanto, que aunque el proceso de **generación** es conocido, no se encuentra bien caracterizado ni integrado en los estudios de resonancia portuaria.

Con base en esta información, se propuso establecer dentro del primer objetivo de esta Tesis, una técnica para la caracterización de las oscilaciones de onda larga, asociadas a oleaje (onda corta) a partir de registros de oleaje obtenidos en campañas de campo. Esta información se utiliza para alimentar el modelo numérico MANOLO.

Se ha observado en la revisión del estado del arte, que los trabajos experimentales enfocados al estudio de resonancia portuaria, generalmente se han visto limitados por las condiciones físicas de los laboratorios en donde éstos se realizan, siendo común que las simulaciones se vean sometidas a la consideración de fuertes hipótesis simplificadoras de escala y geometría.

Los resultados que arrojan las modelaciones física en laboratorio, generalmente carecen de un carácter de aplicación a casos reales de agitación y resonancia portuaria, y limitan el análisis conjunto de los procesos, sirviendo únicamente para la observación de procesos aislados, o bien para obtener series de datos para poder realizar el trabajo de validación de los modelos numéricos.

De hecho, la mayor parte del trabajo experimental existente, se ha destinado a conocer los coeficientes de respuesta de dársenas individuales de diferentes geometrías sometidas a distintos forzamientos.

Por ello, se puede decir que la mayor parte de la información experimental existente provee de una limitada información relativa a la **no linealidad** del problema, y prácticamente ninguna información relativa a la **transitoriedad** del proceso o a las modificaciones en la respuesta cuando se produce el **acoplamiento geométrico** entre dársenas.

Más aún, durante la revisión de la literatura, se ha visto que los modelos numéricos que se basan en las ecuaciones extendidas de Boussinesq, han sido los únicos que han evolucionado favorablemente hacia la consideración de un mayor número de procesos y variables que intervienen en los procesos asociados al fenómeno. Son estos los únicos que pueden contribuir a un mejor conocimiento y capacidad predictiva del proceso resonante.

Por ello, el segundo objetivo de esta Tesis, se destina en gran medida, a la creación de una buena base de datos experimental y al desarrollo y validación de un modelo numérico de última generación.

Por último, y con el fin de integrar todo el trabajo realizado y obtener un fruto que pueda ser directamente transferido a la comunidad científico-técnica, se diseña una metodología para atacar cualquier estudio general de agitación portuaria, que englobe las técnicas que ofrece la literatura, y las herramientas de análisis y numéricas propuestas en esta Tesis.

En este último capítulo, se presentan las conclusiones asociadas a los tres objetivos propuestos en el capítulo 3, y a la metodología seguida para su consecución.

9.1.1 Conclusiones sobre la caracterización de los elementos forzadores

La técnica propuesta en el capítulo 4 para caracterizar las series temporales de superficie libre, utilizando las medidas en las campañas de campo de Lastres y Gijón, permite al técnico contar con una herramienta de análisis sencilla y práctica para identificar los posibles elementos forzadores de la agitación portuaria, y el fenómeno de resonancia dentro de las dársenas.

La caracterización de los elementos forzadores se basa en una técnica estadística y espectral, que ofrece la visualización de los paquetes de energía de onda larga vinculados a los registros de oleaje, en el dominio de las frecuencias, y en el dominio del tiempo a través de la técnica wavelet.

La técnica presentada, ha sido validada únicamente para la bocana de Gijón y para el puerto de Lastres, requiriéndose un mayor número de mediciones en diferentes puertos para poder establecer conclusiones generales. Sin embargo, se ha visto que los resultados obtenidos son consistentes con los correspondientes a otros autores, mostrando correlaciones coincidentes entre parámetros de onda corta y onda larga.

Por esto se puede decir que la técnica expuesta es extrapolable a cualquier punto del litoral español, planteando con esto una herramienta práctica de fácil obtención, y utilización directa, que enriquece el estado del arte sobre la identificación de las oscilaciones de onda larga.

Esta técnica permite al técnico contar con información de la energía, y frecuencias de los posibles elementos forzadores que actúan en las instalaciones portuarias. Además de ofrecer la posibilidad de alimentar los modelos numéricos de agitación portuaria con la información obtenida a través de esta técnica de análisis.

Por otro lado, la técnica wavelet abre una puerta muy importante al estudio y análisis de la transitoriedad del problema, no solo para los datos medidos en campo, si no además para analizar las series que se obtengan numéricamente y de forma experimental en el laboratorio.

9.1.2 Conclusiones sobre el trabajo experimental y la modelación numérica

Se ha diseñado y presentado una fase experimental en modelo físico, llevada a cabo en el laboratorio del grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria, enfocada a la observación, estudio del fenómeno de resonancia, y a la obtención de una extensa base de datos para validar modelos numéricos.

Los ensayos, su geometría, el forzamiento incidente y la instrumentación de los casos han sido diseñados con la finalidad de obtener la mayor información posible para analizar la transitoriedad, no linealidad y acoplamiento geométrico en la resonancia portuaria.

Los datos obtenidos son de gran utilidad para mejorar nuestro conocimiento del proceso, y forman una base fundamental de referencia para validar el modelo numérico MANOLO expuesto los capítulos 6, 7 y 8, y para desarrollar la metodología de aplicación que se expuso en el capítulo 9 de esta Tesis.

En cuanto al modelo numérico MANOLO presentado, se ha podido verificar que las ecuaciones que éste resuelve, contemplan de forma inherente la interacción entre ondas cortas y ondas largas y las transformaciones entre éstas, en un dominio bidimensional y transitorio, por lo que son adecuadas para obtener resultados con características no lineales, transitorias y dispersivas del flujo.

Se concluye que los modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq en general y el modelo MANOLO en particular, suponen un gran avance frente a los modelos que tradicionalmente se han utilizado para el estudio de la agitación y resonancia portuaria.

En primer lugar, el modelo ha sido validado para algunos de los casos teóricos más representativos que la literatura ofrece, tanto para casos de propagación de oleaje sobre fondos variables como para estudios de resonancia en dársenas rectangulares, obteniéndose resultados sumamente satisfactorios.

Después de esta primera fase de comprobación, se presentó una validación del modelo con los datos experimentales obtenidos en laboratorio, especialmente diseñados para considerar efectos no lineales, transitorios y acoplamiento geométrico, en la resonancia portuaria.

La validación del modelo con diversos casos de laboratorio, mostró las capacidades y ventajas del modelo numérico MANOLO para llevar a cabo estudios de resonancia portuaria, presentando resultados excelentes.

Se ha demostrado que la utilización de una malla en elementos finitos triangulares, con características adaptativas, es la óptima para llevar a cabo las simulaciones numéricas, especialmente para aquellas zonas en donde el oleaje sufre graves transformaciones, como lo es en la bocana de entrada de los canales portuarios mostrados y/o en las zonas batimétricas de especial complejidad.

Los casos no resonantes simulados numéricamente mostraron un ajuste muy bueno, para un puerto trabajando en solitario, así como para la interacción de dos puertos no resonantes trabajando de forma acoplada, encontrándose que la energía modelada para el primer y segundo armónico principales, se corresponde con los valores señalados por las series experimentales.

Todos los casos resonantes mostraron una buena correlación para la energía del primer armónico, con errores medios por debajo del 5%, y un adecuado comportamiento para los valores obtenidos para el segundo armónico en ocasiones con un error medio del 10% y en ocasiones con errores menores al 4%, situación que se repite para el tercer armónico.

Se debe señalar que es muy importante poder contar con un modelo bidimensional, que considere la transferencia energética del flujo que ocurre entre bocanas portuarias, y los posibles efectos de acoplamiento en los patrones de oscilación bajo efectos resonantes debido a la interacción y transferencias energéticas entre cuerpos de agua adyacentes. Un ejemplo claro lo ha constituido la generación de onda transversal por efectos asimétricos en los contornos, dentro y fuera de los puertos.

En el capítulo 8 de esta Tesis se demostró que la aplicación del modelo no solo se limita a resolver situaciones idealizadas y/o simplificadas como se observó en los capítulos 6 y 7. Se ha demostrado la viabilidad de su aplicación a una problemática real que incluye complejas geometrías en los contornos y batimetrías; diversas características del ondas largas incidentes medidas en campo, e importantes episodios de transformación resonante de las oscilaciones dentro y fuera del puerto de Ciutadella y la cala de Platja Gran, las cuales presentan interesantes trasferencias de energía, disipación, acoplamiento y no linealidad en el flujo dentro del dominio y a lo largo del tiempo.

Se ha demostrado que el nuevo modelo es capaz de ejecutar forzamientos complejos, con series temporales de larga duración, y con tiempos de ejecución razonables sobre mallas grandes y complejas.

Asimismo, se ha mostrado que la utilización del modelo numérico MANOLO en las simulaciones de un caso real de agitación y resonancia portuaria, permite la definición adecuada de la superficie libre, velocidades y presiones de manera directa en cualquier punto del dominio computacional, resolviendo grandes zonas de estudio.

En el trabajo previo de calibración del modelo para el caso real de Ciutadella y Platja Gran, se observó que el modelo únicamente requiere la determinación de los parámetros que controlan los procesos de disipación de energía por fricción en el fondo. Es necesario prestar especial cuidado a las características de la batimetría utilizada y el nivel de marea asignado.

La reproducción numérica de los casos simulados en el puerto de Ciutadella y Platja Gran, presentaron una buena reproducción de las medidas de superficie libre, especialmente para el caso de resonancia dentro del puerto de Ciutadella por rissaga, sin duda, el caso más complejo.

La aplicación del modelo presentado representa un cambio sustancial y un avance de gran importancia en el análisis de la resonancia portuaria dado que integra una serie de procesos, hasta ahora no considerados o abordados de forma independiente por diferentes modelos. Más aún, el modelo presentado permite afrontar una serie de aplicaciones hasta ahora no consideradas en los problemas de agitación y resonancia portuaria, como se muestra en el Anejo referente a la metodología de aplicación.

9.1.3 Conclusiones sobre la metodología integral de estudios de agitación portuaria

Se ha presentado una metodología integral para llevar a cabo estudios de agitación y resonancia portuaria, a través de la propuesta de una serie de pasos ordenados para abordar diferentes problemáticas.

Se han evaluado las fuentes de información existentes, para posteriormente a través de un análisis cualitativo, ponderar su utilización en función del tipo de estudio, y se ha

redactado un resumen sobre las base de datos de partida necesarios para realizar cualquier estudio de agitación y resonancia portuaria, mencionando las bases de datos visuales, las bases instrumentales (boyas) y las bases provenientes de retro análisis tipo HIPOCAS.

Se ha incluido en la metodología las técnicas para la caracterización de los elementos forzadores que actúan sobre los puertos, el estudio de los valores característicos de los grupos de ondas, y la determinación empírica de los parámetros de onda larga a partir de registros de onda corta realizados en campo.

Se ha relacionado en una tabla el tipo de forzamiento existente, con el tipo de estudios a realizar, los datos de entrada que éstos requieren y los datos de salida que arrojan, en función de los objetivos que comúnmente se busca cumplir para cada estudio específico.

La metodología de aplicación de las herramientas numéricas se ha diseñado con el objetivo que el técnico, pueda seleccionar fácilmente aquellas herramientas necesarias para llevar a cabo de forma eficiente y fiable, cualquier estudio de agitación portuaria.

La metodología integral plantea el uso de una herramienta analítica para la identificación de los modos naturales de oscilación para dársenas con geometría simples, un modelo parabólico para transmitir el oleaje desde aguas profundas hasta la zona de estudio, un modelo elíptico de propagación para obtener los modos resonantes, y los patrones de agitación dentro y fuera de los puertos, y un modelo no lineal basado en las ecuaciones de Boussinesq que ofrece información detallada de los procesos del flujo asociados a la agitación y resonancia portuaria.

El tratamiento de los resultados obtenidos con la metodología presentada, aporta un conocimiento fundamental para el técnico, para poder gestionar los resultados, interpretarlos y aplicarlos a diferentes problemas asociados a la resonancia y la agitación portuaria.

Finalmente, la aplicación de la metodología al puerto de Lastres, ha corroborado que la metodología se puede aplicar fácilmente y de forma directa a un caso de agitación portuaria real, obteniendo resultados fiables que consideran los procesos no lineales,

transitorios y acoplados que se manifiestan de forma natural dentro y fuera de los puertos reales, especialmente bajo condiciones de agitación resonante.

9.2 FUTURAS LINEAS DE TRABAJO

Tras las conclusiones presentadas, se plantean las siguientes líneas de trabajo para el futuro.

En cuanto a la técnica de análisis y caracterización de las series de datos medidas en campo planteada en esta Tesis, cabe mencionar que se deben de obtener nuevas constantes que alimenten las ecuaciones de correlación para altura de ola significativa y periodo de pico de onda larga para nuevos puntos del litoral español. Para ello se propone la realización de nuevas campañas de campo, y posteriormente el diseño de un catálogo de los parámetros de onda larga vinculados a los registros de oleaje irregular.

Dichas relaciones empíricas se deben obtener para, al menos, dos fases estacionales en el año, ya que los estados de mar varían de manera importante entre los registros de invierno y verano. Este trabajo se puede realizar con las series históricas calibradas que ofrece el proyecto HIPOCAS.

En cuanto a la técnica wavelet, se deben de obtener nuevas relaciones empíricas que proporcionen las características fundamentales de las ondas largas vinculadas a los registros de oleaje medidos en campo. Para ello, se debe considerar la temporalidad de los paquetes de energía de onda larga dentro de dichos registros, y relacionarlos con la localización temporal de los paquetes de oleaje agrupado de onda corta.

En cuanto al modelo MANOLO, se han observado diversas limitaciones y elementos que deben ser optimizados de cara a la mejora en su manejo, utilización, e implementación dentro del bagaje de herramientas de que dispone el técnico.

Se deben de optimizar los tiempos de simulación computacional que presenta actualmente el modelo, buscando obtener resultados en periodos de tiempo menores.

Esto evolucionará con la mejora de las tecnologías en el campo de la informática así como con la paralelización del código.

El modelo MANOLO debe de ser validado para los valores que arroja el modelo sobre las velocidades bidimensionales, por lo que se requieren la realización de una serie de experimentaciones y campañas de campo que incluyan medidas de velocidades para diferentes condiciones de agitación portuaria.

De igual forma, el modelo numérico MANOLO, necesita ser validado para los procesos de rotura que se presentan en las playas adyacentes a los puertos. Este trabajo se debe de realizar apoyado con datos de laboratorio y campañas de campo. Esta información será muy útil para estudiar la generación de resonancia debida a la onda larga liberada en el proceso de rotura en playas próximas o interiores.

Asimismo, se está trabajando en la integración en el modelo de unas ecuaciones de flujo en medios porosos con el fin de modelar más adecuadamente el flujo a través de estructuras de escollera.

Finalmente, el modelo requiere mejorar las características del mallado en elementos finitos, para que el diseño de los elementos triangulares se realice considerando los fuertes estrechamientos geométricos con fondos someros, tal como es el caso de las bocanas en algunos puertos reales. Esto permitirá una mejor definición de la transformación del oleaje hacia frecuencias más altas dentro de las bocanas portuarias.

En cuanto a la metodología integral para realizar estudios de agitación y resonancia en puertos propuesta, se debe de mejorar la técnica de generación de casos de agitación resonante a través del espectro JONSWAP + onda larga, debido a que la forma espectral de la energía de onda vinculada a los grupos de onda corta, es un problema aún por resolver en la literatura.

Por esto, la técnica expuesta dentro de la metodología para alimentar al modelo MANOLO se debe tomar con reserva, y considerando en todo momento que se trata del

diseño de casos hipotéticos de agitación portuaria, únicamente destinados a evaluar los procesos de agitación y transformación de oleaje dentro y fuera de los puertos, para un sinnúmero de escenarios artificiales.

