



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## PROJECTE O TESISINA D'ESPECIALITAT

### Títol

**Monitorización y análisis de agitación portuaria.**

**Un caso práctico.**

**711-TES-CA-5515**

### Autor/a

**Xavier Tous Clots**

### Tutor/a

**Francesc Xavier Gironella i Cobos; Joan Pau Sierra Pedrico;**

**Tutor externo: Joaquim Sospedra Iglesias**

### Departament

**Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental**

### Intensificació

**Enginyeria Marítima**

### Data

**Juliol de 2012**



# **Monitorización y análisis de agitación portuaria. Un caso práctico.**

Autor: Tous Clots, Xavier

Tutores: Gironella i Cobos, Francesc Xavier; Sierra Pedrico, Joan Pau

Tutor externo: Sospedra Iglesias, Joaquim

**Palabras clave:** agitación portuaria, diferencias finitas, oleaje, Port Fòrum, modelo tipo Boussinesq.

La agitación portuaria es un fenómeno que consiste en la oscilación de ondas que se encuentran dentro de un puerto. Cobra importancia cuando el oleaje incidente tiene una elevada altura, o una frecuencia cercana a la que tienen las dársenas del puerto. Este fenómeno que afecta a escala global, puede producir movimientos oscilatorios violentos del agua semi-cerrada. Las consecuencias pueden ser daños en las estructuras y embarcaciones, o pueden generar problemas en la operatividad del puerto, llevando a pérdidas económicas. Teniendo en cuenta las predicciones del mar, y de la agitación en los puertos, se pueden evitar daños, y garantizar la seguridad de los usuarios.

En esta tesina se presenta un sistema pre-operacional de predicción del estado de agitación del Port Fòrum de Barcelona. El trabajo se realiza mediante un modelo numérico en diferencias finitas, del tipo Boussinesq. Dicho modelo puede simular los principales fenómenos físicos que ocurren cuando llega el oleaje al puerto y a su interior, con un bajo coste computacional.

Para la resolución del modelo mediante diferencias finitas, se requiere la creación de una malla, mediante la discretización del dominio y la batimetría de la zona de estudio, requiriendo el calibrado de varios parámetros del puerto, y del oleaje incidente. Se ha utilizado los datos recogidos por una boya direccional delante del dominio de estudio, determinando a partir de ellos un abanico de casos a estudiar.

Los resultados han sido validados mediante la comparación con los datos recogidos por tres lectores de nivel ubicados en puntos estratégicos del interior del puerto. Se han obtenido resultados parecidos, con un nivel de error aceptable.

Finalmente, una vez calibrado el modelo, se ha procedido a proponer 2 alternativas para reducir la agitación interior.



# **Monitoring and analysis of harbour agitation. A case study.**

Author: Tous Clots, Xavier

Thesis Directors: Gironella i Cobos, Francesc Xavier;  
Sierra Pedrico, Joan Pau

Foreign Director: Sospedra Iglesias, Joaquim

**Key Words:** harbor agitation, finite differences, waves, Port Fòrum, Boussinesq-type model.

Harbour agitation is a phenomenon consisting on the oscillation of waves found inside a harbor. It becomes important when the incident waves have a big height, and a frequency close to that of the harbor basins. This phenomenon, that affects harbors around the world, can generate violent oscillatory movements of the semi-closed waters. Consequences can be damage to structures or boats, and operativity problems, generating important economic losses. Working with the wave predictions, together with the harbor agitation predictions, we can avoid damage, as well as guarantee the user's safety.

In this graduation thesis, a pre-operational system for the harbor agitation of Port Fòrum of Barcelona is presented. The system works through a finite difference numerical model, of the Boussinesq type. This model can simulate the principal physical phenomena that occur when waves arrive to and into the harbor, with a low computational cost.

To resolve this model in finite differences, the creation of a mesh is required, by defining the bathymetry and domain of the study area. In addition, it requires to be calibrated comparing their results with measurements, recorded by a directional buoy located in front of the study domain. From the buoy data a number of cases have been selected.

Model results have been compared with data recorded these wave gauges, located at strategic points inside the harbour. The model results show a reasonable level of agreement with the measurements.

Finally, once the model has been calibrated, two solutions have been proposed and tested, in order to reduce the agitation within the harbour.



# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>3. Propagación del Oleaje</b>	<b>3</b>
<b>3.1 Refracción</b> .....	<b>3</b>
<b>3.2 Asomeramiento</b> .....	<b>4</b>
<b>3.3 Resultados</b> .....	<b>5</b>
<b>4. Metodología</b>	<b>7</b>
<b>4.1 Sistema de Medidas</b> .....	<b>7</b>
4.1.1. Descripción del sistema propuesto.....	7
4.1.2. Medidas interiores.....	9
4.1.3. Medidas exteriores.....	11
4.1.4. Recepción, acceso y diseminación.....	14
<b>4.2 Modelo Numérico</b> .....	<b>15</b>
4.2.1. Precedentes.....	15
4.2.2. Descripción del modelo de agitación.....	15
<b>5. Análisis de Datos</b>	<b>17</b>
<b>5.1 Datos medidos</b> .....	<b>17</b>
5.1.1. Medidas exteriores.....	17
5.1.2. Medidas interiores.....	19
<b>5.2 Correlaciones y tendencias</b> .....	<b>22</b>
5.2.1. Sensor de nivel 1.....	22
5.2.1.1. <i>Relación de <math>K_{a1}</math> con la dirección de propagación del oleaje</i> .....	22
5.2.1.2. <i>Relación de <math>K_{a1}</math> con el periodo medio</i> .....	23
5.2.1.3. <i>Relación de <math>K_{a1}</math> con la altura significativa del oleaje</i> .....	23
5.2.1.4. <i>Conclusiones</i> .....	24
5.2.2. Sensor de nivel 2.....	24
5.2.1.1. <i>Relación de <math>K_{a2}</math> con la dirección de propagación del oleaje</i> .....	25
5.2.1.2. <i>Relación de <math>K_{a2}</math> con el periodo medio</i> .....	25
5.2.1.3. <i>Relación de <math>K_{a2}</math> con la altura significativa del oleaje</i> .....	26
5.2.1.4. <i>Conclusiones</i> .....	26
5.2.3. Sensor de nivel 3.....	27
5.2.1.1. <i>Relación de <math>K_{a3}</math> con la dirección de propagación del oleaje</i> .....	27
5.2.1.2. <i>Relación de <math>K_{a3}</math> con el periodo medio</i> .....	28
5.2.1.3. <i>Relación de <math>K_{a3}</math> con la altura significativa del oleaje</i> .....	28
5.2.1.4. <i>Conclusiones</i> .....	29
5.2.4. <i>Conclusiones</i> .....	29

<b>6. Calibración del Modelo</b>	<b>30</b>
6.1 Sectores.....	30
6.2 Calibrado preliminar.....	30
6.2.1 Tormentas de calibrado.....	30
6.2.2 Rendimiento del modelo y estadísticas.....	31
6.2.2.1 <i>Sensor de nivel 1</i> .....	32
6.2.2.2 <i>Sensor de nivel 2</i> .....	33
6.2.2.3 <i>Sensor de nivel 3</i> .....	34
6.2.2.4 <i>Conclusiones</i> .....	35
<b>7. Simulación Numérica</b>	<b>36</b>
7.1 Situación actual.....	36
7.2 Alternativa 1.....	44
7.3 Alternativa 2.....	52
<b>8. Conclusiones</b>	<b>61</b>
8.1 Conclusiones de la tesina.....	61
8.2 Trabaj futuro.....	62



# Índice de figuras

1.1	Vista aérea de Port Fòrum. Imagen sacada de [1].....	1
3.1	Direcciones límite que afectan al Port Fòrum. Fuente: [1].....	3
4.1.1	Topología del sistema utilizado. Elaboración propia.....	8
4.2	Localización de los puntos de medida interiores. Fuente: [1].....	9
4.3	Tubo de soporte del aparato 2.....	10
4.4	Posición de la boya de oleaje Besós. Fuente: [1].....	11
4.5	Boya de oleaje Besós.....	11
4.6	Cadena estabilizadora, y 2 grilletes “Datawell.”.....	12
4.7	Hilo de caucho con su cabo de seguridad.....	12
4.8	Boyarines que levantan el hilo de poliéster.....	12
4.9	Boyarines que levantan la cadena.....	13
4.10	Boya de oleaje Besós.....	13
4.11	Localización de la estación receptora. Fuente: [1].....	14
5.1	Direcciones límite que afectan al Port Fòrum. Fuente: [1].....	17
5.2	Orientación de la línea de costa (azul), y direcciones límite (rojo).....	18
5.3	Alturas de ola significativa respecto el tiempo en la boya de oleaje Besós.....	18
5.4	Evolución de la altura de ola significativa respecto al tiempo en el punto (2).....	19
5.5	Evolución de la altura de ola significativa respecto al tiempo en el punto (3).....	20
5.6	Evolución de la altura de ola significativa respecto al tiempo en el punto (1).....	20
5.7	Evolución del periodo de pico respecto al tiempo en el punto (1).....	21
5.8	Evolución del periodo de pico respecto al tiempo en el punto (2).....	21
5.9	Evolución del periodo de pico respecto al tiempo en el punto (3).....	21
5.10	Relación de la dirección del oleaje con $K_{a1}$ .....	22
5.11	Relación del periodo medio del oleaje con $K_{a1}$ .....	23
5.12	Relación la altura significativa del oleaje con $K_{a1}$ .....	23
5.13	Relación de la dirección del oleaje con $K_{a2}$ .....	25
5.14	Relación del periodo medio del oleaje con $K_{a2}$ .....	25
5.15	Relación de la altura significativa del oleaje con $K_{a2}$ .....	26
5.16	Relación de la dirección del oleaje con $K_{a3}$ .....	27
5.17	Relación del periodo medio del oleaje con $K_{a3}$ .....	28
5.18	Relación de la altura significativa del oleaje con $K_{a3}$ .....	28
6.1	Sectores de Port Fòrum considerados en el análisis.....	29
6.2	Relación entre $K_{a1}$ medido, y $K_{a1}$ previsto por el modelo.....	32
6.3	Relación entre $K_{a2}$ medido, y $K_{a2}$ previsto por el modelo.....	33
6.4	Relación entre $K_{a3}$ medido, y $K_{a3}$ previsto por el modelo.....	34
7.1	Situación actual; $T_p = 6s$ , $\theta = 60^\circ$ .....	36
7.2	Situación actual; $T_p = 6s$ , $\theta = 90^\circ$ .....	37
7.3	Situación actual; $T_p = 6s$ , $\theta = 120^\circ$ .....	37
7.4	Situación actual; $T_p = 6s$ , $\theta = 150^\circ$ .....	38
7.5	Situación actual; $T_p = 6s$ , $\theta = 180^\circ$ .....	38
7.6	Situación actual; $T_p = 9s$ , $\theta = 60^\circ$ .....	39
7.7	Situación actual; $T_p = 9s$ , $\theta = 90^\circ$ .....	39
7.8	Situación actual; $T_p = 9s$ , $\theta = 120^\circ$ .....	40
7.9	Situación actual; $T_p = 9s$ , $\theta = 150^\circ$ .....	40
7.10	Situación actual; $T_p = 9s$ , $\theta = 180^\circ$ .....	41
7.11	Situación actual; $T_p = 12s$ , $\theta = 60^\circ$ .....	41

7.12	Situación actual; $T_p = 12s, \theta = 90^\circ$ .....	42
7.13	Situación actual; $T_p = 12s, \theta = 120^\circ$ .....	42
7.14	Situación actual; $T_p = 12s, \theta = 150^\circ$ .....	43
7.15	Situación actual; $T_p = 12s, \theta = 180^\circ$ .....	43
7.16	Planta de la alternativa 1.....	44
7.17	Alternativa 1; $T_p = 6s, \theta = 60^\circ$ .....	44
7.18	Alternativa 1; $T_p = 6s, \theta = 90^\circ$ .....	45
7.19	Alternativa 1; $T_p = 6s, \theta = 120^\circ$ .....	45
7.20	Alternativa 1; $T_p = 6s, \theta = 150^\circ$ .....	46
7.21	Alternativa 1; $T_p = 6s, \theta = 180^\circ$ .....	46
7.22	Alternativa 1; $T_p = 9s, \theta = 60^\circ$ .....	47
7.23	Alternativa 1; $T_p = 9s, \theta = 90^\circ$ .....	47
7.24	Alternativa 1; $T_p = 9s, \theta = 120^\circ$ .....	48
7.25	Alternativa 1; $T_p = 9s, \theta = 150^\circ$ .....	48
7.26	Alternativa 1; $T_p = 9s, \theta = 180^\circ$ .....	49
7.27	Alternativa 1; $T_p = 12s, \theta = 60^\circ$ .....	49
7.28	Alternativa 1; $T_p = 12s, \theta = 90^\circ$ .....	50
7.29	Alternativa 1; $T_p = 12s, \theta = 120^\circ$ .....	50
7.30	Alternativa 1; $T_p = 12s, \theta = 150^\circ$ .....	51
7.31	Alternativa 1; $T_p = 12s, \theta = 180^\circ$ .....	51
7.32	Planta de la alternativa 2.....	52
7.33	Alternativa 2; $T_p = 6s, \theta = 60^\circ$ .....	52
7.34	Alternativa 2; $T_p = 6s, \theta = 90^\circ$ .....	53
7.35	Alternativa 2; $T_p = 6s, \theta = 120^\circ$ .....	53
7.36	Alternativa 2; $T_p = 6s, \theta = 150^\circ$ .....	54
7.37	Alternativa 2; $T_p = 6s, \theta = 180^\circ$ .....	54
7.38	Alternativa 2; $T_p = 9s, \theta = 60^\circ$ .....	55
7.39	Alternativa 2; $T_p = 9s, \theta = 90^\circ$ .....	55
7.40	Alternativa 2; $T_p = 9s, \theta = 120^\circ$ .....	56
7.41	Alternativa 2; $T_p = 9s, \theta = 150^\circ$ .....	56
7.42	Alternativa 2; $T_p = 9s, \theta = 180^\circ$ .....	57
7.43	Alternativa 2; $T_p = 12s, \theta = 60^\circ$ .....	57
7.44	Alternativa 2; $T_p = 12s, \theta = 90^\circ$ .....	58
7.45	Alternativa 2; $T_p = 12s, \theta = 120^\circ$ .....	58
7.46	Alternativa 2; $T_p = 12s, \theta = 150^\circ$ .....	59
7.47	Alternativa 2; $T_p = 12s, \theta = 180^\circ$ .....	59

## **Agradecimientos**

Agradezco la predisposición, las ganas de trabajar, y el trato que he recibido por parte de mis tutores Joan Pau Sierra y Xavier Gironella. Gracias a ellos mi pasión por el mar se ha extendido hasta campos ingenieriles, y he disfrutado en la propagación y agitación de este trabajo.

Gracias también a todos aquellos que me han apoyado, y siguen apoyando, en todos los momentos de mi vida:

A mi hermana Marina, con quién he compartido momentos malos y de euforia, sufriendo nuestros vecinos las consecuencias en ocasiones.

A Cris, por creer en mí más de lo que yo mismo creo, por ser un referente como persona perseverante y trabajadora, y por hacerme sentir especial.

A Ricardo por las innumerables horas de estudio entre Kardhu con coca-cola, y subrayadores voladores.

A Eloisa por apuntarse a un bombardeo tras otro, y por su interminable paciencia para escuchar.

A mi padre, por ser mi referente como ingeniero.

