

ESTUDIO DE LA SOLUCIÓN PARA LA MEJORÍA DE LA REFLEXIÓN EN EL INTERIOR DEL PUERTO DE VILA DO PORTO, AZORES.

M. G. Neves¹, E. Didier², M. Robert³, I.J. Losada⁴

1,2. NPE/DHA; LNEC, Av.do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, gneves@Inec.pt, edidier@Inec.pt

3. CONSULMAR, Rua Joaquim António de Aguiar, 27-9º Dtº 1099-062 Lisboa, Portugal, mrobert@consulmar.pt

4. Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria. Avda. Los Castros s/n Santander, Cantabria. inigo.losada@unican.es

INTRODUCCIÓN

El puerto de Vila do Porto, Azores, Portugal, es el único puerto de la Isla de Santa Maria, Figura 1, y está protegido por una estructura de aproximadamente 350 m de longitud, de tetrápodos en la zona exterior o trasdós y un muro vertical en el interior o intradós.

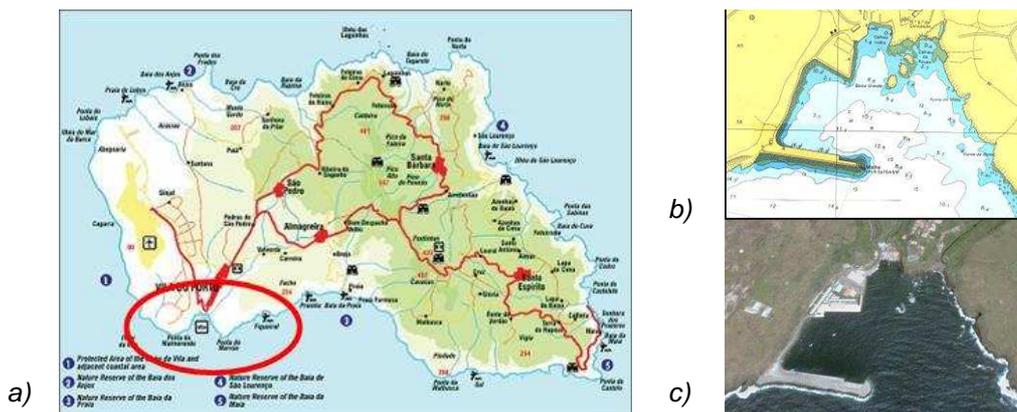


Figura 1. Puerto de Vila do Porto en la Isla de Santa Maria (a), situación inicial (b) y situación anterior a la construcción del núcleo de recreo (GoogleEarth) (c).

Recientemente se ha construido un muelle interior de atraque de los ferries que efectúan el transporte de coches y personas entre islas (Figura 1c). Posteriormente se ha construido un núcleo de recreo protegido por un muelle de Tetrápodos (Consulmar,

2006). El muelle de ferries que se ha diseñado inicialmente es una estructura vertical que queda delante del muelle principal, que es el muelle comercial y de importancia estratégica para la isla (Figura 1 c). Los estudios en modelo físico y numérico que se han hecho para apoyo al diseño del núcleo de recreo permitieron confirmar que el comportamiento del muelle para ferries no era el adecuado, lo que ha sido además verificado *in situ* (Fortes et al., 2006). Este muelle, al ser una estructura vertical muy reflectora, aumentaba mucho la agitación en la dársena y el rebase en el muelle de ferries, dificultando las operaciones en el muelle comercial (Figura 2).

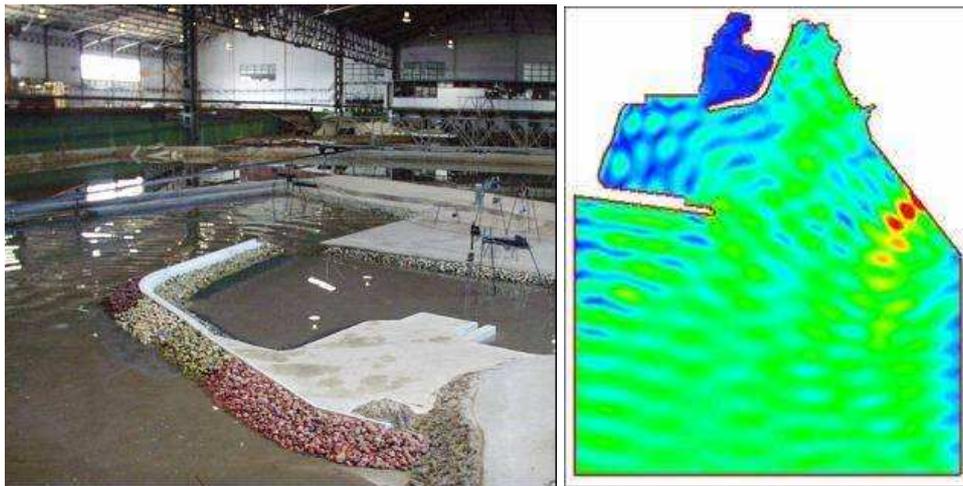


Figura 2. Ensayos en modelo físico de la solución para el Puerto de Vila do Porto en la Isla de Santa María y resultados del modelado numérico con el modelo DREAMS (Fortes et al., 2006).

Además, los navíos que harán el transporte de personas y coches entre islas han cambiado, son menores que los que se habían previsto en el proyecto y tienen desembarque lateral, lo que podría llevar a cambios en este muelle. Para reducir la agitación en el interior del puerto y adaptar el muelle a los nuevos ferries ro-ro, se ha proyectado una modificación del muelle interior de atraque de los ferries, con el objetivo de aminorar la reflexión y disminuir el rebase, sin que con eso se reduzca demasiado el área útil de la dársena portuaria. La solución propuesta por Consulmar (Consulmar, 2008) es una plataforma de forma triangular en planta apoyada en pilares cuadrangulares, bajo la cual se ha colocado un talud de escollera para disminuir la reflexión, Figura 3. La elección de esta forma de pilares se ha debido a cuestiones constructivas relacionadas con su inclusión en la plataforma y por ser ésta una forma más disipadora. Se ha reorientado el muelle y se ha adaptado a las características de los nuevos ferries, diseñando una estructura lo más transparente y disipadora posible.

Para estudiar esta nueva solución se han realizado ensayos en modelo físico de la zona del muelle interior, estudiando la agitación en el interior de la dársena, el rebase

en el muelle y presiones en la plataforma (Lemos, 2008). Como complemento a los estudios en modelo físico se realizan dos estudios en modelo numérico con dos modelos RANS: el modelo COBRAS-UC (Losada et al., 2008) y el modelo FLUENT (Fluent, 2006).

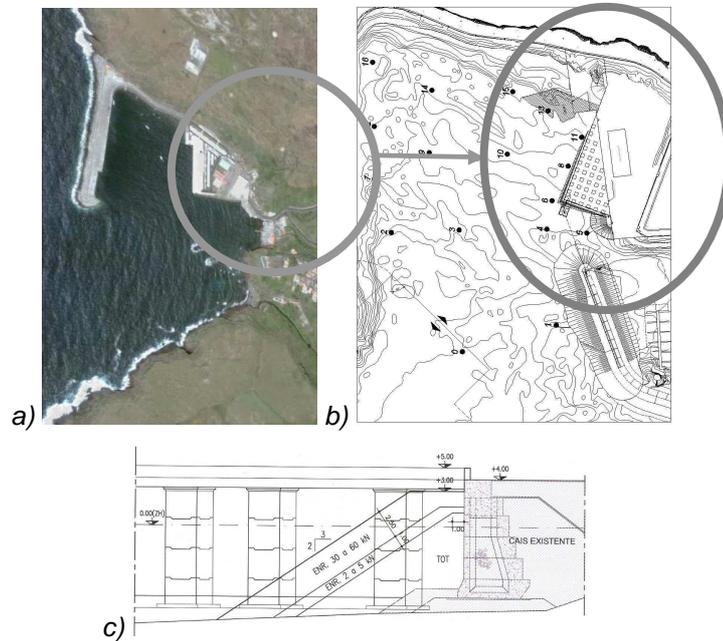


Figura 3. Puerto de Vila do Porto (GoogleEarth) en la Isla de Santa Maria (a) y proyecto del nuevo muelle en planta (b) y en sección(c).

Se presenta, a continuación, la solución recomendada en el diseño de corrección del muelle de atraque de los ferries del puerto de Vila do Porto, así como los resultados experimentales y los obtenidos con los modelos numéricos COBRAS-UC y FLUENT en lo que se refiere a presiones en la plataforma y reducción de la reflexión.

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO

Para verificar la estabilidad de la cimentación de la estructura, la disminución de la agitación en el interior del puerto y del rebase de la estructura, además de las presiones en la plataforma, se han realizado ensayos 3D en el LNEC a escala 1:35 (Lemos et al., 2008), Figura 4, de acuerdo con la ley de semejanza de Froude.

Se han hecho ensayos para dos niveles de marea (BM=0 m ZH, NM=+2 m ZH), 3 períodos de pico ($T_p=6s, 10s$ y $14s$) y alturas de ola significantes, $H_s=1\text{ m}, 2\text{ m}, 3\text{ m}$ y 4 m . Las alturas de olas que ocurren en el interior de la dársena no alcanzan los 4 m , pero se ha decidido ir a alturas extremas por razones de seguridad de la obra.

Se han medido separadamente presiones en 5 puntos en la plataforma (Figura 3 b) y niveles de agitación en 16 puntos en el interior del puerto (Figura 5a). Los resultados, que se presentan de forma resumida en la Figura 5, han mostrado que la agitación se reduce, especialmente en la zona del muelle comercial, que es la más importante para la Isla confirmando el buen funcionamiento de dicha solución.

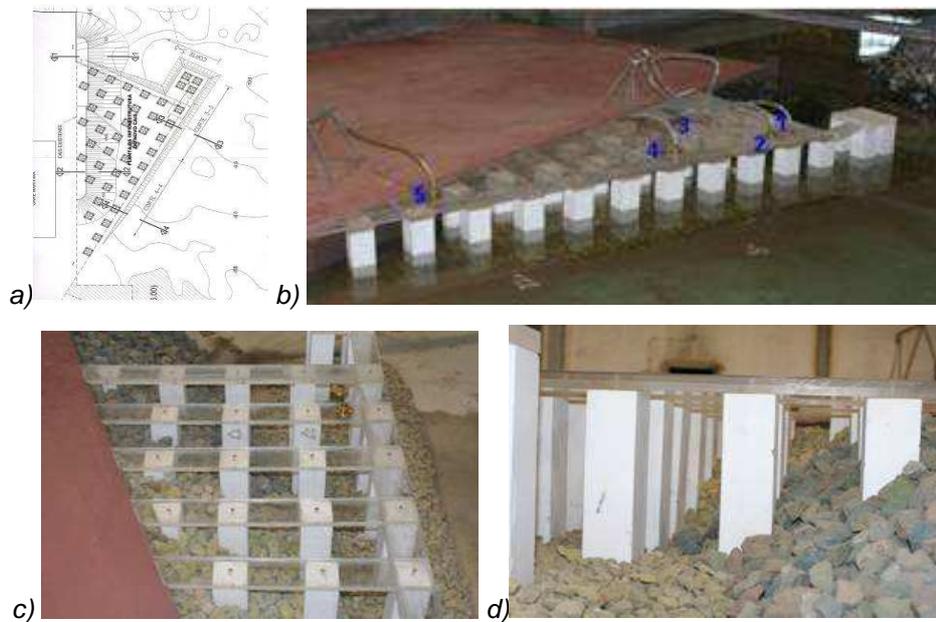


Figura 4. Detalle de la estructura ensayada y estructura ensayada con los puntos de medida de presión en los ensayos.

En cuanto al rebase en el muelle interior, aunque haya disminuido, sigue existiendo (Figura 5 b), por lo que se ha propuesto una pequeña modificación del proyecto, con la construcción de un pequeño muro en esa zona. Se ha confirmado la estabilidad de la escollera que queda por debajo de la plataforma, con menos del 2% de las piedras cayendo, lo que ocurre especialmente para los menores niveles de marea. En cuanto a las presiones en la plataforma, son mayores para el mayor nivel de marea ensayado, y para $T_p=10s$ y $H_s=4m$. Las presiones máximas ocurren en el sensor 5 (Figura 4b), con presiones máximas inferiores a 1.2 metros de columna de agua (mca). En los demás sensores, las presiones son muy semejantes y siempre inferiores a 1.0 mca.

ESTUDIO EN MODELO NUMÉRICO

Como complemento a los estudios en modelo físico, se han realizado estudios en modelo numérico con dos modelos RANS: el modelo COBRAS-UC (Losda *et al.*, 2008) y el modelo FLUENT (Fluent, 2006). Los resultados de estos modelos se

pueden comparar, aunque solo de forma cualitativa, con los resultados de los ensayos, ya que las condiciones de oleaje y geometría son distintas. Se ha elegido una sección de la estructura ensayada en modelo físico para hacer el estudio 2D en modelo numérico. Las características de la estructura y la sección elegida se presentan en la Figura 6.

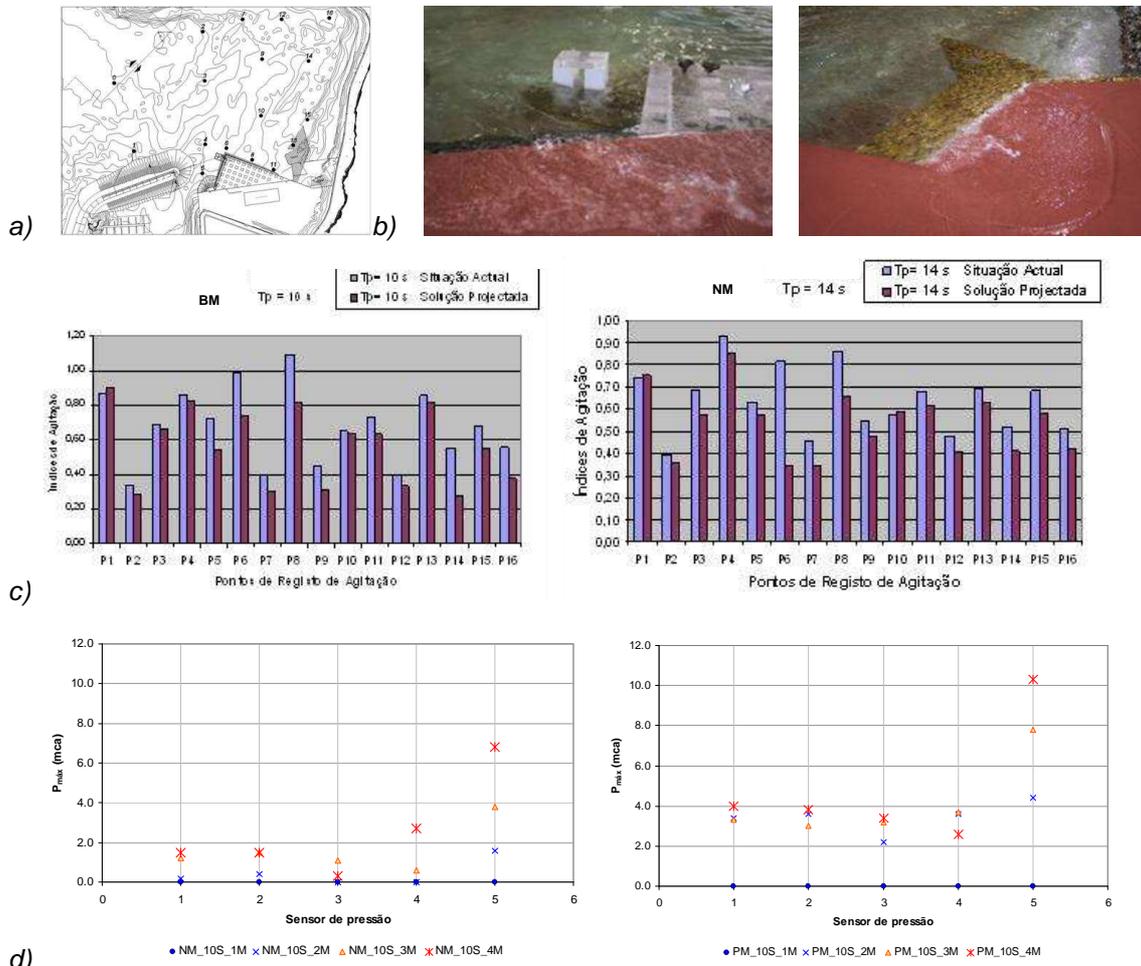


Figura 5. Resultados del modelo físico: rebase (b), agitación en el interior de la dársena (c) y presiones (d).

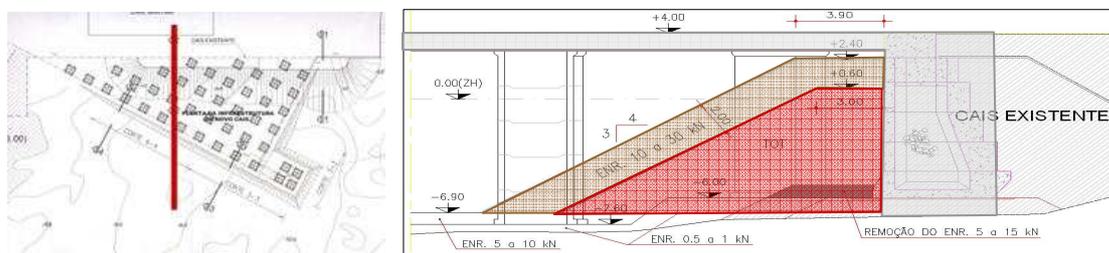


Figura 6. Sección utilizada en la aplicación de los modelos numéricos y detalle de las características de la sección.

COBRAS-UC es utilizado para verificar los resultados del modelo FLUENT 2D. Además, se ha cuantificado la reducción de reflexión obtenida por la solución elegida

para agitación perpendicular al muelle y la presión bajo la plataforma horizontal del muelle de la estructura proyectada. Para eso se ha aplicado el modelo a la nueva solución (con talud de escollera). Se ha aplicado además al caso de talud impermeable, para comparar con los resultados del modelo FLUENT.

El modelo FLUENT se ha utilizado para el análisis de la presión máxima en la plataforma, como forma de evaluar su posible aplicación al estudio de problemas en estructuras costeras en condiciones de agitación oblicua.

Los dos modelos se basan en las ecuaciones RANS y tienen implementado un modelo de turbulencia y utilizan el método VOF (Volume Of Fluid), para el modelado de la superficie libre, simulando agitación regular o irregular. En cuanto al modelo COBRAS-UC, es un modelo 2D, no comercial, que utiliza una malla de diferencias finitas rectangular, con espaciamiento regular o irregular, desarrollado para estudios de interacción ola-estructura y ha sido validado en varios casos de estructuras marítimas, porosas e impermeables. El modelo FLUENT es un modelo comercial 2D y 3D, que utiliza una malla de volúmenes finitos no estructurada (triangulares o rectangulares en 2D). Ha sido desarrollado para estudios de hidrodinámica en general, especialmente para casos donde la interfaz aire-agua es importante. Para generar oleaje u obtener series temporales de superficie libre en un punto hay que programar la generación, ya que el modelo no lo hace directamente. Este modelo solamente puede ser aplicado a pequeñas áreas, con estructuras impermeables y para oleaje regular. Ha sido ya aplicado al estudio de un arrecife artificial sumergido (Voorde *et al.*, 2007) y a estructuras de protección costera (Didier *et al.*, 2007). Hasta el momento no se conocen ejemplos de validación del modelo a estructuras costeras, ni a estructuras porosas. Así, en este caso, la verificación de sus resultados en 2D será hecha por comparación con los resultados del modelo COBRAS-UC.

El dominio de cálculo del modelo COBRAS-UC es de 8.5m por 0.5m, con una frontera de entrada que simula una pala que puede tener absorción activa de reflexión. La malla es de 6mm por 4mm en la zona de interés (zona de la plataforma), con una malla total de 1250 por 141 puntos (Figura 7). Se ha simulado los casos de estructura porosa e impermeable, como se ha referido anteriormente.

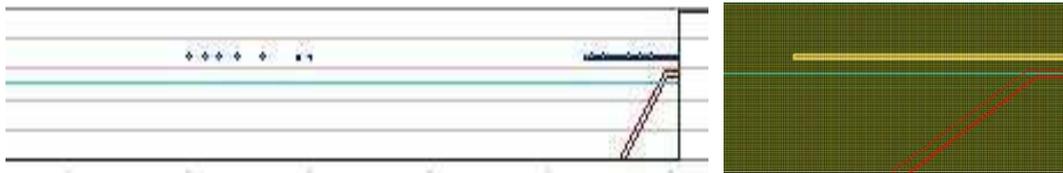


Figura 7. Malla de diferencias finitas utilizada en el modelo COBRAS-UC.

El dominio de cálculo del modelo FLUENT es de la misma dimensión del modelo COBRAS-UC (8.5m por 0.5m), con una frontera de entrada que simula una pala sin absorción activa de reflexión. La malla es de 3mm por 3mm en la zona de interés (zona de la plataforma), con una malla total de 60 300 elementos en 2D (Figura 8). Para el caso 3D se ha simulado la misma dimensión de canal con 0.458 m de anchura con talud impermeable. Se han simulado dos casos; mientras que en el primer caso no tiene los pilares y la malla es de 100 000 elementos, en el segundo caso sí tiene los pilares y la malla es de 296 600 elementos (Figura 8b).

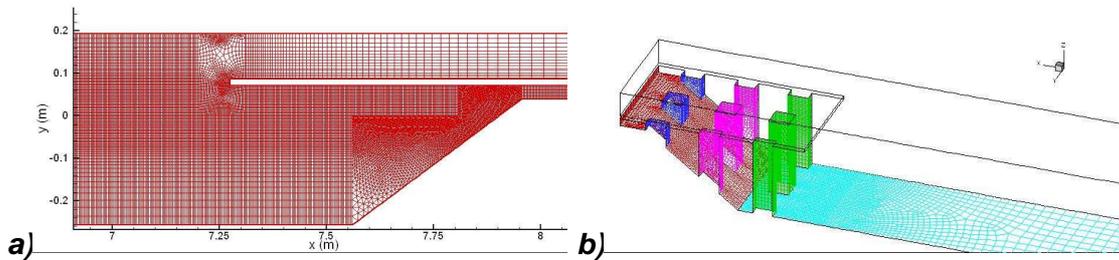


Figura 8. Mallas de elementos finitos utilizadas en el modelo FLUENT: a) 2D, b) 3D.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos con los modelos numéricos COBRAS-UC y FLUENT en lo que se refiere a presiones en la plataforma y reducción de la reflexión se presentan en este apartado.

Con el modelo COBRAS-UC se han obtenido series temporal de elevación de superficie libre y presión en diferentes puntos donde se han colocado sondas numéricas. Para ilustrar los resultados, se presenta en la Figura 9 un aspecto de la superficie libre para dos condiciones de cálculo (bajamar, $T_p=10s$ y $14s$), donde se puede ver el agua actuando en la plataforma y gotas que se desprenden de la masa de agua, muestra de la complejidad de la superficie libre a modelar.



Figura 9. Aspecto de la superficie libre calculada con el modelo COBRAS-UC.

Se ha determinado la reflexión de la estructura por medio del cálculo del coeficiente de reflexión, aplicando el método de Mansard y Funke (1980) a las series temporales de tres sondas numéricas colocadas frente a la estructura. Los valores del coeficiente de reflexión obtenidos eran variables entre 0.5 y 0.7, siendo los mayores valores obtenidos para nivel medio y $T_p=14s$, lo que significa una reducción fuerte de reflexión. En cuanto a las presiones en la plataforma, P , variaban entre $-0.01mca < P < 0.10 mca$, que son valores muy semejantes a los obtenidos en los ensayos en modelo físico en los sensores 1 a 4 (Figura 4b), aunque ahí las condiciones fueran distintas, ya que el estudio era 3D y la estructura tenía pilares. El tiempo de cálculo del modelo ha sido de aproximadamente $0.5h/T$.

Se ha ejecutado además un caso con agitación regular para $T=10s$ y $H=3m$ y nivel medio de marea, considerando el talud bajo la plataforma como impermeable y sin considerar absorción activa de reflexión en la pala, para poder comparar los resultados con los del modelo FLUENT 2D. Se han comparado la superficie libre y las presiones máximas en la plataforma. Las presiones en la plataforma, P , calculadas con el modelo FLUENT variaban entre $-0.04mca < P < 0.10 mca$, que son valores muy semejantes a los obtenidos con el modelo COBRAS-UC y en los ensayos en modelo físico en los sensores 1 a 4 (Figura 4b). En cuanto a la superficie libre, aunque el período y la amplitud se conservan en la propagación, ha habido problemas de divergencia que ha hecho cambiar el esquema de integración en el tiempo de segundo orden para el de primer orden. Así mismo se ha verificado la difusión de la fracción de volumen y dispersión numérica. En la Figura 10 se presenta un ejemplo de la superficie libre obtenida con el modelo FLUENT 2D.

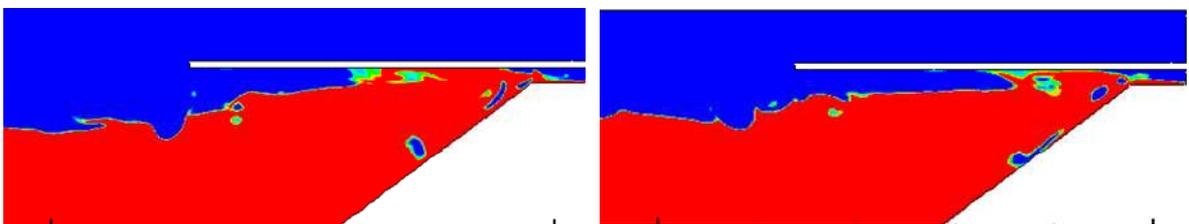


Figura 10. Aspecto de la superficie libre calculada con el modelo FLUENT (2D).

Se ha ejecutado el mismo caso con el FLUENT 3D, una zona con la plataforma y con la estructura por debajo impermeable, pero con dos configuraciones distintas, sin pilares y con pilares y con agitación frontal. En la Figura 11 se presenta un ejemplo del resultado de superficie libre y presión en estos dos casos y en la figura 12 se presenta la serie temporal de presiones obtenida para los dos casos.

Se ha observado que las presiones máximas se reducen para el caso con pilares, obteniéndose valores en la plataforma del orden de los 0.10 mca, valor igual que el obtenido en los ensayos de laboratorio, aunque ahí la agitación era oblicua e irregular y se ensayaba todo el dominio. El tiempo de cálculo ha sido de $1,5h/T$ para el caso sin pilares y de $8,5h/T$ con pilares.

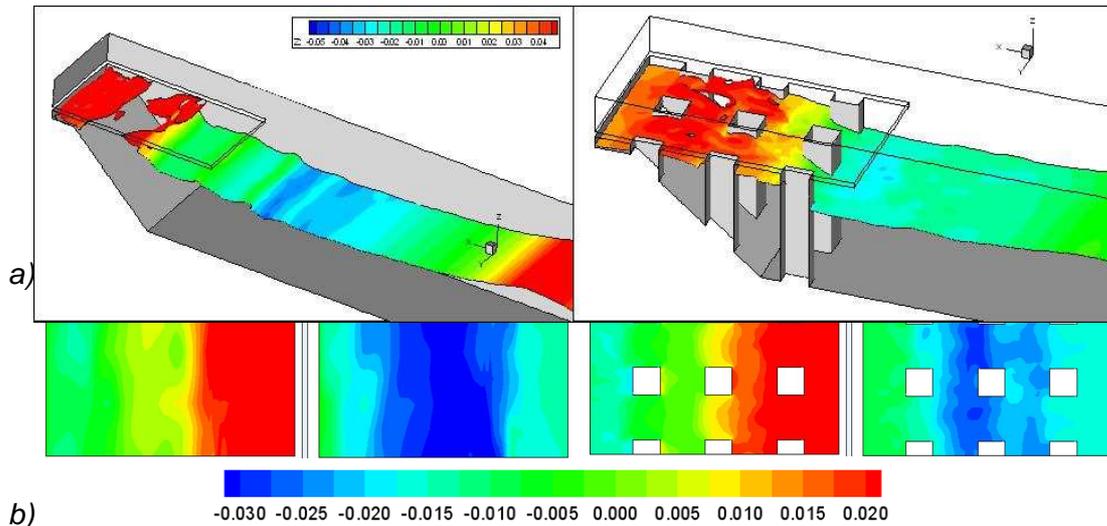


Figura 11. Aspecto de a) la superficie libre, b) presión, calculada con el modelo FLUENT (3D).

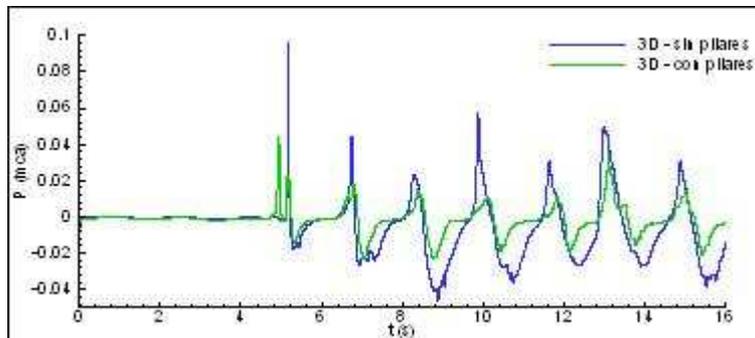


Figura 12. Serie temporal de presiones en la plataforma calculada con el modelo FLUENT (3D) considerando la geometría con y sin pilares.

CONCLUSIONES

En esta ponencia se ha presentado la solución de proyecto para la corrección del muelle de atraque de los ferries del puerto de Vila do Porto. La estructura, que tiene como principal objetivo disminuir la agitación y el rebase en la dársena sin ocupar demasiado espacio, está compuesta de una plataforma horizontal asentada en pilares rectangulares por encima de un talud de escollera. Se presentan los resultados de ensayos en modelo físico 3D y los obtenidos con dos modelos numéricos RANS en

lo que se refiere a presiones en la plataforma y reducción de la reflexión: el modelo COBRAS-UC y el FLUENT.

El modelado físico permitió verificar el comportamiento de la estructura: la agitación y el rebase son ahora menores en toda la dársena, o sea, entre el muelle comercial y la zona de atraque del Ferry, y las presiones máximas y la estabilidad han sido verificadas. En cuanto al modelado numérico, el modelo FLUENT (2D), que se encuentra todavía en validación para aplicaciones de estudios de interacción ola-estructura, se ha comparado con los resultados del modelo COBRAS-UC y se ha verificado que presenta problemas de convergencia cuando se usa un esquema de integración en el tiempo de segundo orden y difusión numérica de la fracción de volumen cuando se usa un esquema de primer orden (aunque resuelva los problemas de divergencia). El FLUENT 3D presenta, además, un elevado tiempo de cálculo, particularmente en 3D.

REFERENCIAS

Consulmar. 2006. Projecto de Execução da Empreitada de Construção das Obras Marítimas do Porto de Recreio de Vila do Porto, na Ilha de Sta. Maria.

Consulmar. 2008. Projecto de Execução da Empreitada de Reequacionamento do Cais para Ferries e das Infra-estruturas Terrestres do Porto de Recreio de Vila do Porto.

Didier, E., Neves, M.G., Gil, L. 2007. Modelação numérica da interacção entre uma onda e uma estrutura marginal costeira porosa. Proc. 5as jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, PIANC (versión electrónica).

Fortes, C.J.E.M., Pinheiro, L., Sousa, I. A., Silva, L.G.P., Neves, M.G. 2006. Estudos de Agitação no Porto de Vila do Porto. Proc. 8º Congresso da Água. APRH (versión electrónica).

Fluent Incorporated, FLUENT 6.3 User's Guide, (2006).

Losada, I.J., Lara, J.L., Guanche, R., Gonzalez-Ondina, J.M. (2008). Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. Coastal Engineering, ELSEVIER, Vol 55 (1), 47-62.

Lemos, R., Silva, L. G., Neves, M.G. 2008. Correção do Cais para Ferries do Porto de Vila do Porto (Ilha de Santa Maria – Açores). Ensaios em modelo reduzido. Relatório 236/08-NPE, LNEC, 63 pp.

Mansard, E.P.D., Funke, E.R. 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method, Proc. 17th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 154-172.