

# ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS Y ACELERACIONES PROVOCADOS POR LAS ACCIONES DEL OLEAJE Y DE LOS BUQUES EN EL DIQUE DE BOTAFOC (IBIZA)

**JOSÉ LUIS ALMAZÁN GÁRATE**

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos  
Universidad Politécnica de Madrid

**ERIC IRIBARREN LASCONATEGUY**

Ing. de Caminos, Canales y Puertos  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

**ÁNGEL MATÍAS MATEOS**

Ing. de Caminos, Canales y Puertos  
Director de la Autoridad Portuaria de Baleares

**JOSÉ RAÚL GARCÍA MONTES**

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

**M. CARMEN PALOMINO MONZÓN**

Dra. CC. Físicas  
Universidad Politécnica de Madrid

**ARMANDO PARADA GONZÁLEZ**

Ing. de Caminos, Canales y Puertos  
Autoridad Portuaria de Baleares

**JORGE MARTÍN JIMENEZ**

Ing. de Caminos, Canales y Puertos  
Autoridad Portuaria de Baleares

**JOSÉ RAMÓN AMORÓS SERRET**

Ing. de Caminos, Canales y Puertos  
Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX. Ministerio de Fomento)

## RESUMEN

El reciente desarrollo de la instrumentación diseñada para proporcionar datos de aceleraciones y movimientos del cajón número 8 del dique Botafoc (Ibiza), perteneciente a la Autoridad Portuaria de Baleares (Puertos del Estado), en conjunción con datos procedentes de una instrumentación compuesta por sensores de presión existente en el paramento vertical, proporciona un novedoso medio para analizar la respuesta estructural del cajón, no sólo ante la acción del oleaje, sino también ante los efectos producidos por las maniobras de los buques en el muelle.

Como la medición de estas aceleraciones y velocidades angulares se hace a altas frecuencias (de hasta 400 Hz), podemos proporcionar datos válidos acerca del comportamiento estructural y de los movimientos reales del cajón, tratando de correlacionar este comportamiento con los resultados obtenidos por el grupo de trabajo PROVERBS (Probabilistic design of vertical breakwaters, MAST III EU Programme), y generando una base de datos estadística de movimientos que deben considerarse para enriquecer los conocimientos en este ámbito.

Además, la posibilidad de registrar los efectos causados por las maniobras de atraque-desatraque-estancia de los buques, abre un nuevo punto de vista al diseño estructural de un dique-muelle, siendo también de gran interés para los diseñadores de obras marítimas y para la correcta definición de las maniobras del buque en el muelle.

**Palabras Clave:** instrumentación, dique vertical, cajón, oleaje, sensor de presión, aceleración, movimiento, buque, solicitaciones estructurales, respuesta estructural.

**Title: MOVEMENTS AND ACCELERATION ANALYSIS DUE TO WAVES AND SHIP MOORING AT BOTAFOC SEAWALL (IBIZA)**

**ABSTRACT**

The recent deployment of new instrumentation designed to provide accelerations and angular velocities from caisson #8 at Botafoc seawall, Ibiza, along with an existing pressure sensor instrumentation at the vertical wall, provides a way to record and process data of the structural response, not only to waves, but also to effects caused by ship mooring operations at Botafoc seawall.

As the measurement of these angular speeds and accelerations is programmed with sampling frequencies up to 400 Hz, and by integrating all data through time we may provide suitable data of the structural behaviour of the caisson. This behaviour is tried to be correlated with the PROVERBS working group achievements (Probabilistic design of vertical breakwaters, MAST III EU Programme), generating a statistical movement database that must be used to improve knowledge on this subject.

Also the possibility to record the effects caused by the different ship mooring operations is a new point of view of the complete structural design of a seawall-wharf, which is considered an interesting matter for coastal designers as well for a correct ship mooring processes definition.

**Keywords:** instrumentation, vertical seawall, caisson, wave, pressure sensor, acceleration, movement, ship, structural requirements, structural response.

## **1. INTRODUCCIÓN.**

El dique de Botafoc, construido en el año 2002, se plantea para crear una nueva dársena de mayor calado en el Puerto de Ibiza, abrigando mas el puerto preexistente, y creando una serie de nuevos atraques. Este dique parte del Faro del mismo nombre con orientación Sureste y está constituido por cajones fondeados a la cota -19.50 m.

Durante su construcción se previeron alojamientos para instrumentar dos secciones idénticas en el cajón número ocho con el objetivo inicial de comprobar los coeficientes de seguridad al vuelco y deslizamiento del dique, y en un segundo estadio, desarrollar teorías que ligen las fuerzas actuantes sobre el dique con los movimientos reales del cajón.

La instrumentación instalada en el Dique de Botafoc en el año 2002 cuenta con dos secciones idénticas. En cada una de las secciones instrumentadas se instalaron doce sensores de presión y subpresión, ubicados en los tres paramentos en contacto con el agua a diferentes cotas, tal y como se muestra en la figura 1, 7 sensores en el paramento vertical entre las cotas -12,00 m. y +5,00 m., 4 sensores de subpresión, y otro sensor adicional en el paramento abrigado y a cota -4,00 m. para medir la presión hidrostática real y de la eventual agitación interior presente en la dársena abrigada.

Además, y para registrar los movimientos sufridos en el cajón, se instaló en una de las secciones un sistema de medida totalmente independiente y autónomo del anterior, capaz de medir los movimientos angulares del cajón y sus aceleraciones en torno a los tres ejes cartesianos, reconstituyendo los seis grados de libertad que presenta el cajón en su movimiento como sólido

rígido. En esencia, este sistema consta de tres inclinómetros de alta precisión en montaje triaxial y tres acelerómetros en montaje ortogonal. Este instrumento de medida móvil y transportable diseñado por Almazán Ingenieros, estudia los seis grados de libertad de movimientos para cualquier elemento rígido susceptible de desplazamientos y giros, en ingeniería marítima.



Figura 1. Situación del cajón instrumentado en el Dique de Botafoc (A.P de Ibiza).

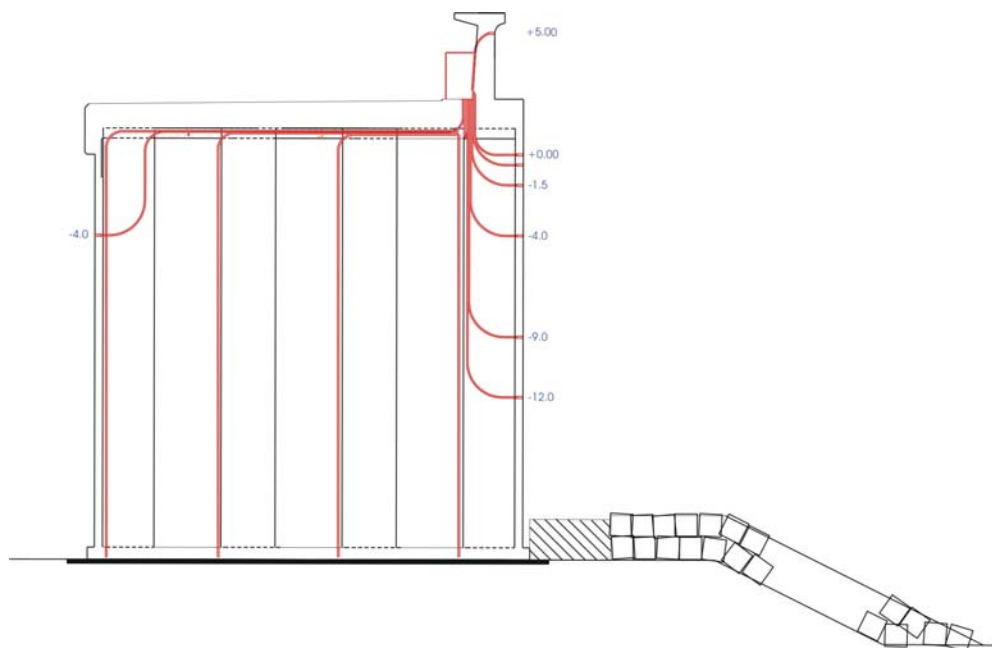


Figura 2. Sección instrumentada con doce sensores de presión y subpresión.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA.

Como ya se ha dicho, la segunda caseta (la más alejada del Faro de Botafoc) situada sobre el Dique de Botafoc, además de los sensores de presión para esa sección, dispone de un sistema de medida capaz de registrar tanto los giros como las aceleraciones que sobre él se produzcan y, por tanto, de los posibles movimientos del cajón.

Para comprender mejor los resultados dados por el sistema, que se muestran a continuación, es necesario tener en cuenta el convenio adoptado sobre la nomenclatura de sus ejes de referencia y de los sentidos de los giros alrededor estos últimos. En el gráfico siguiente, además de las medidas físicas del equipo, se puede observar el sistema de ejes y de sentidos de giro.

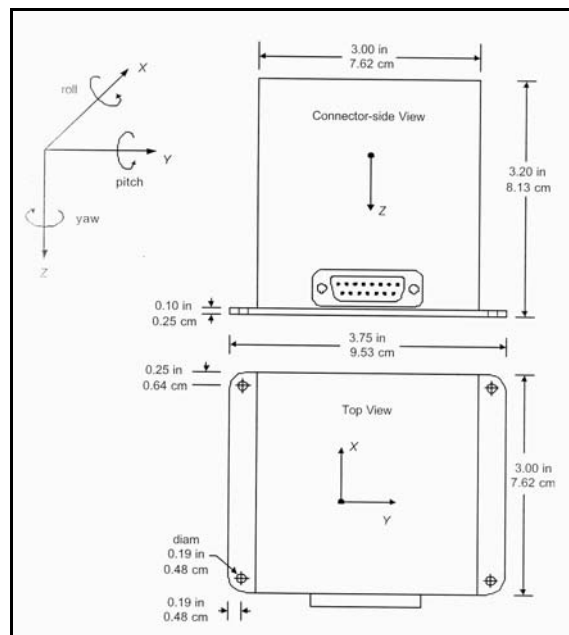


Figura 3. Sistema de ejes y de sentidos de giro.

Como podemos apreciar, las aceleraciones serán positivas cuando estén orientadas según la parte positiva del eje correspondiente y los giros serán positivos cuando se cumpla la ley del sacacorchos.

El Sistema se instaló con su eje X hacia el mar y perpendicularmente al eje longitudinal del dique, con su eje Y paralelamente al dique hacia el morro, y con el eje Z según la vertical hacia abajo.

## 3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESADO DE DATOS.

Entre los recientes desarrollos de éste equipo de investigación en relación con la instrumentación de Botacoc, destaca el software desarrollado recientemente para el análisis de los datos proporcionados por el sistema inercial para periodos largos de tiempo. El referido software trata las ingentes cantidades de datos suministrados por este sistema, que toma datos de los seis parámetros medidos a más de 200 Hz.

Gracias a este nuevo desarrollo, se pueden calcular, al igual que se hace con los datos de presiones medidos en los tres paramentos del cajón en contacto con el agua, estadísticas sobre las medidas del sistema inercial para un periodo largo de tiempo, siendo además posible comparar las estadísticas realizadas sobre los sensores de presión con los movimientos registrados en el cajón.

El procesado de datos calcula, para una muestra correspondiente a un cierto periodo de medida, la media, el calor máximo y el valor mínimo para el paramento elegido entre los seis que mide el sistema.

#### **4. ESTADÍSTICAS DE LOS DATOS RECOGIDOS POR EL SISTEMA INERCIAL.**

En los gráficos que se incluyen a continuación se muestra la gráfica de máximos y mínimos para el mes de abril de 2008 (tomado como ejemplo para esta comunicación), obtenidos a partir de muestras de 90 segundos de duración (aproximadamente 18000 registros) del parámetro “aceleración sobre el eje X”, eje éste sobre el que los movimientos están menos coartados.

En ella se observan perfectamente varios estados:

- Existe una banda de “ruido electrónico” que corresponde a la situación en la que el dique no se mueve debido a la no existencia de oleaje suficiente (por ejemplo el día 25).
- Se aprecian periodos en los que el oleaje mueve el dique de forma apreciable por encima del umbral de movimiento del mismo, reflejando en el gráfico valores por encima de la banda de ruido electrónico (por ejemplo los días 11, 17 y 18).
- Por ultimo, existen periodos muy cortos en los que se registran movimientos por encima del umbral de ruido, que, probablemente, parecen corresponder con acciones de barcos que están atracando o permanecen en éste muelle (por ejemplo, y como se verá con mas detalle a continuación, el día 9).

El gráfico referido se muestra a continuación como figura 4.

#### **5. CORRELACIÓN ENTRE OLEAJE Y MOVIMIENTOS REGISTRADOS EN EL CAJÓN.**

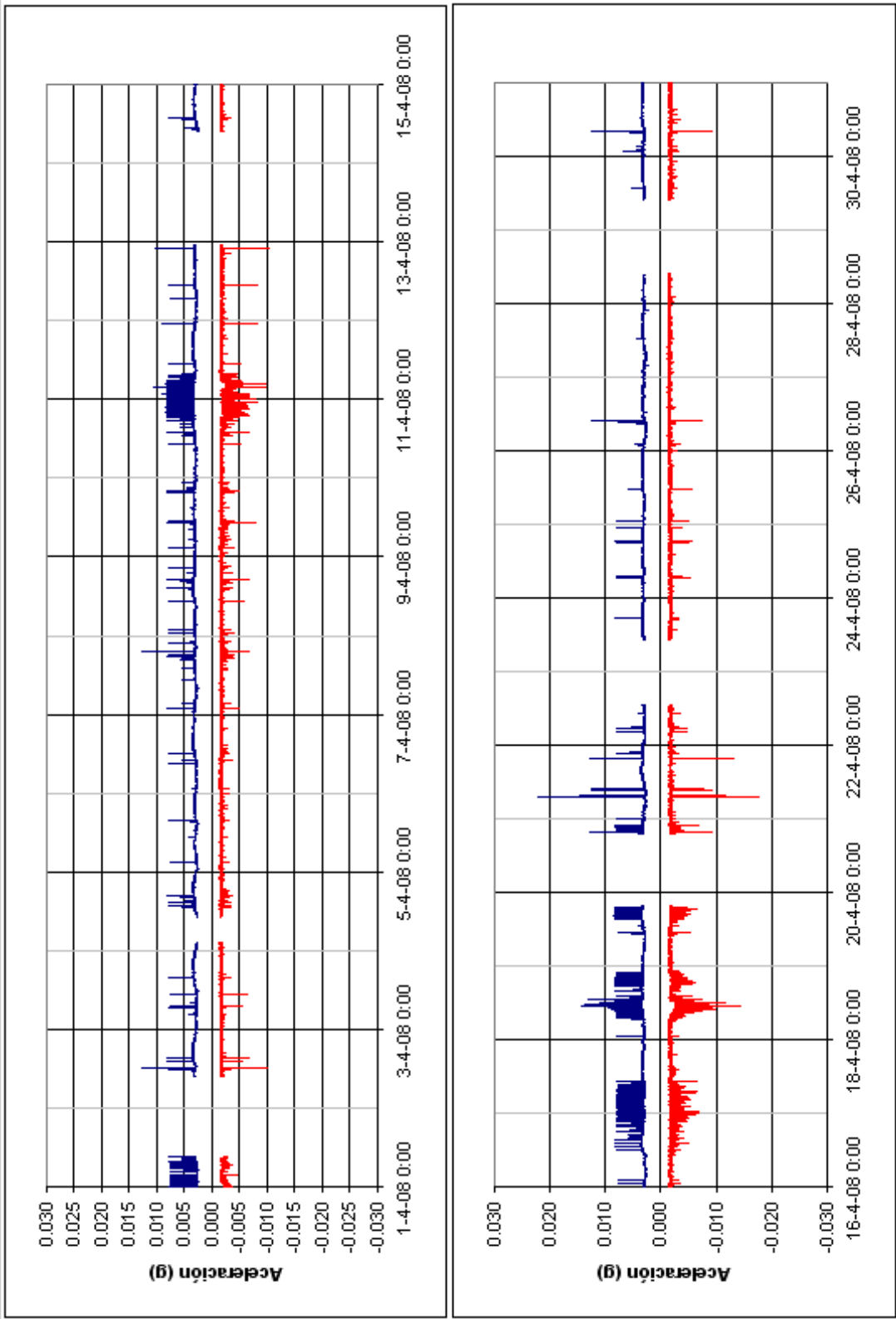
El oleaje presente en el dique de Botafoc en abril de 2008, presenta una serie de máximos a lo largo del mes, en los días 2, 4, 7-8, 10-11, 16-17, 18, 20, y 29, que se muestran en el siguiente gráfico (figura 5) junto con la altura de ola significativa (deducida a partir de las presiones registradas por el sensor número 2) y el periodo de pico (tomado promediando los periodos medidos en Capdepera y Mahón por las boyas de Puertos del Estado) de cada uno de estos periodos.

Por otra parte, y a la vista del gráfico de estadísticas obtenido para el parámetro “aceleración en el eje X”, y a efectos de movimientos en el cajón, se observa como existen periodos en los que el oleaje mueve el dique de forma apreciable por encima del umbral de ruido electrónico.

Esto ocurre los días 1, 10-11, 16-17, 18, y 19-20, teniendo en cuenta además que no se dispone de registro en alrededor de los días 2, 13, 20, 23 y 25.

En la figura 6 se muestra el gráfico de estadísticas obtenido para el parámetro “aceleración en el eje X” junto con la altura de ola significativa (deducida a partir de las presiones registradas por el

sensor número 2) y el periodo de pico (tomado promediando los periodos medidos en Capdepera y Mahón por las boyas de Puertos del Estado) de cada uno de estos periodos.



Máximos (azul) y mínimos (rojo) obtenidos de muestras de 90 segundos extraídas del parámetro "aceleración en X"

Figura 4

Valor (Máximo-Mínimo) obtenido de las estadísticas cada 90 segundos del registro del sensor 5 de la sección 2 del 1/4/08 al 1/5/08

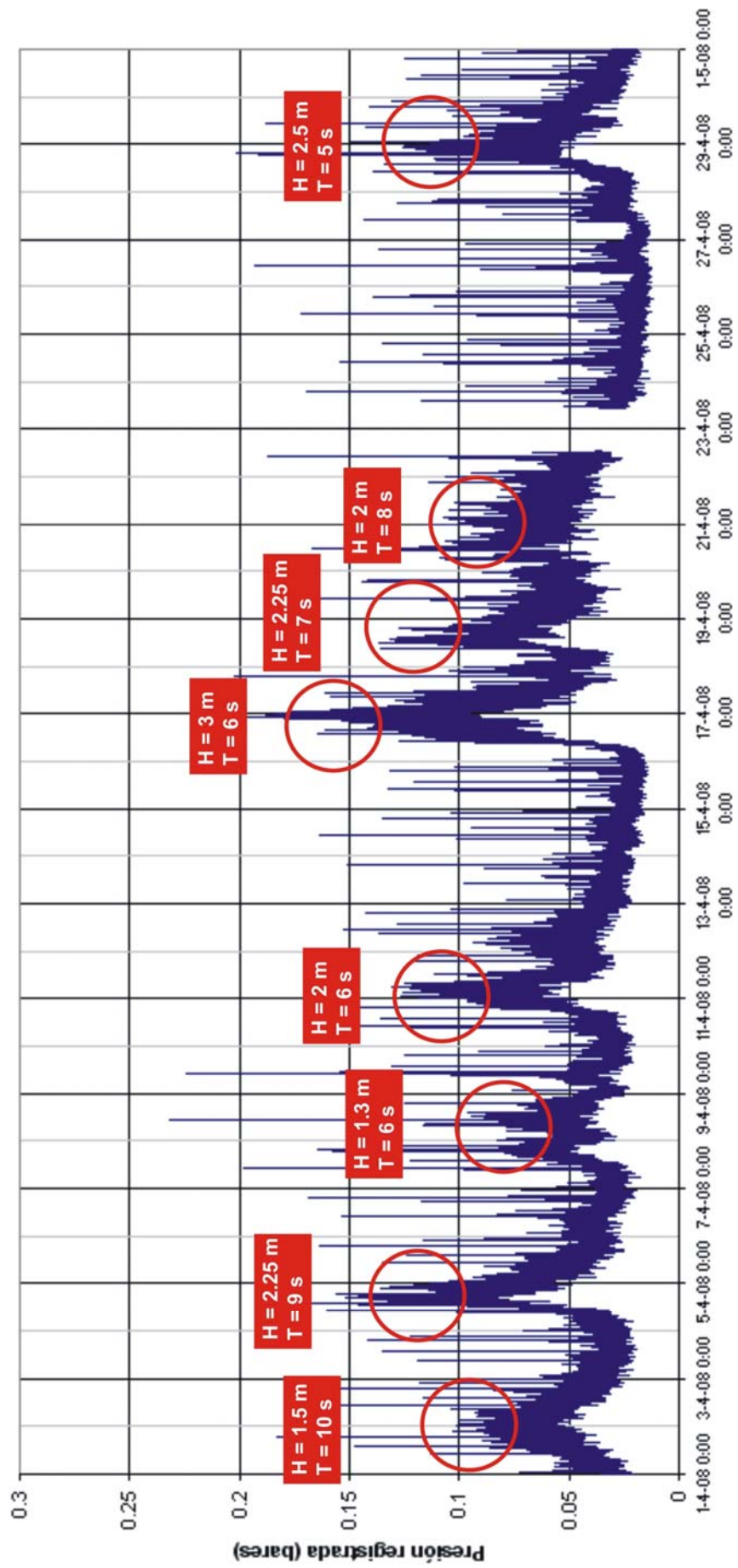


Figura 5



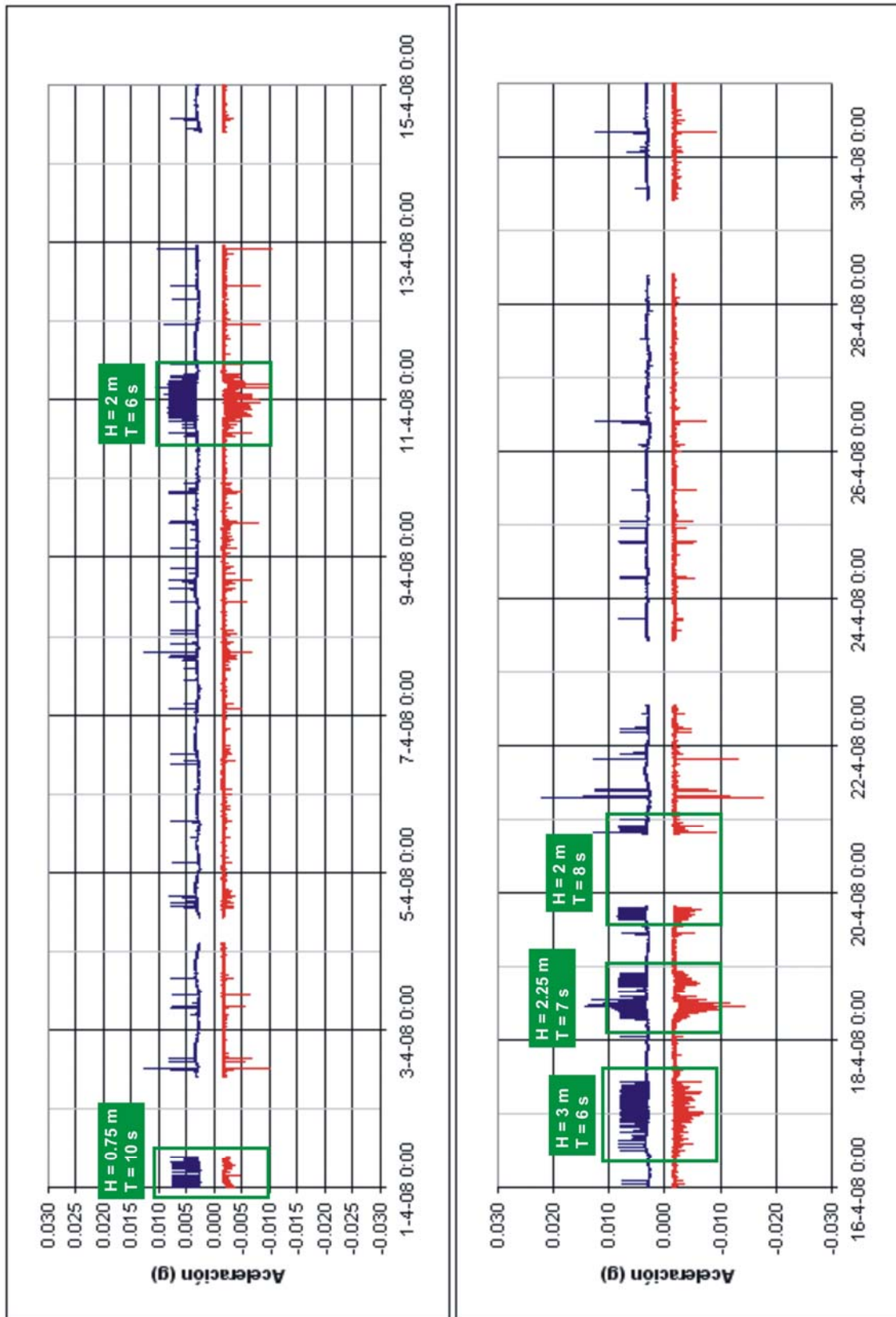


Figura 6



Estudiando la correlación entre ambos gráficos se puede construir la siguiente tabla:

Evento destacado registrado el día	H (m)	T (s)	Se refleja en las estadísticas de presiones	Se refleja en las estadísticas de movimientos
1	0.75	10	NO	SI
2	1.50	10	SI	No hay datos
4	2.25	9	SI	NO
7-8	1.30	6	SI	NO
10-11	2.00	6	SI	SI
16-17	3.00	6	SI	SI
18	2.25	7	SI	SI
19-20	2.00	8	SI	SI (Registro parcial)
29	2.50	5	SI	No hay datos

A la vista de la tabla anterior se intuye que existe un “umbral de oleaje” a partir del cual el dique se mueve, pudiéndose estimar este valor de oleaje en el exterior del dique que produce movimiento en unos 2 metros de altura de ola. Esto es cierto en la mayor parte de los casos estudiados excepto en el evento registrado el día 1 por el sistema inercial, el cual registra movimiento con un oleaje de tan solo 0.75 metros.

Estos resultados deben ser interpretados con cautela ya que, actualmente, no se dispone de un instrumento de medida directa del oleaje en el exterior del dique de Botafoc que mida los tres parámetros fundamentales para este tipo de estudios (altura de ola, periodo y dirección de incidencia del oleaje sobre el dique).

Además, al igual que es posible (aunque aproximado) deducir, tanto la altura de ola en el exterior del dique a partir de los datos de los sensores de presión, como el periodo a partir de los datos de las boyas de Capdepera y Mahón, no se conoce en absoluto la dirección de incidencia del oleaje sobre el dique, parámetro éste que puede hacer que el dique se mueva con un oleaje de poca altura de ola pero que incida frontalmente haciendo que el dique entre en un proceso de “resonancia” (pudiendo ser ésta la causa del movimiento registrado el día 1 de abril de 2008), o que un oleaje de gran altura de ola incidiendo de forma muy oblicua no produzca ningún movimiento en el dique.

## **6. CORRELACIÓN ENTRE ATRAQUE-ESTANCIA DE BUQUES Y MOVIMIENTOS REGISTRADOS.**

A la vista de los gráficos de estadísticas mostrados anteriormente para el parámetro “aceleración en el eje X”, se observa como existen periodos muy cortos en los que se registran movimientos por encima del umbral de ruido.

Estos movimientos puntuales parece que se producen por las acciones del buque sobre el cajón, bien en el momento de su atraque-desatraque o bien durante el tiempo que permanece amarrado.

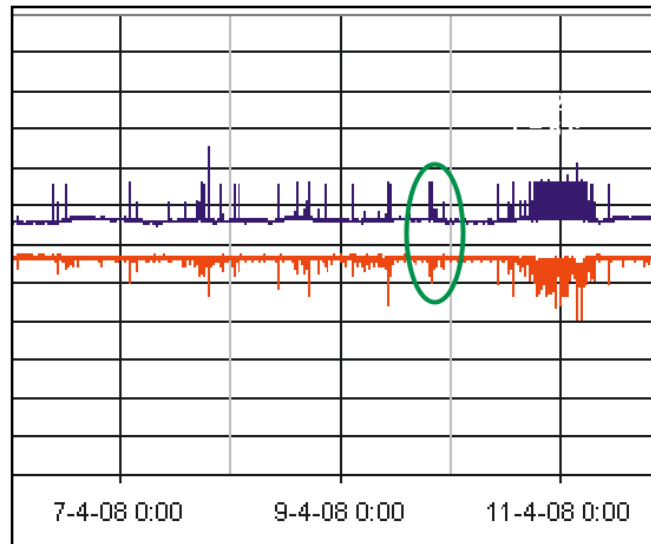
Debido a que no se dispone en la actualidad de ningún sistema de medida de la tensión en las amarras, pero si se dispone de un registro de atraques-desatraques de barcos en el Dique de Botafoc, se ha centrado el análisis en estos últimos, si bien resulta evidente que cuando un barco está atracado y existe un cierto oleaje en el interior de la dársena se producen, como así lo muestran los registros del sistema inercial, tiros en estas amarras que provocan movimientos en el dique.

Para el mes de abril de 2008, el registro de entradas-salidas de barcos en el Dique de Botafoc es el siguiente:

PTO	AÑO	MES	DESCRIPCION BUQUE	ESL	CAL	DIAENTRADA	DIASALIDA	HORAE	HORAS	MUELLE	N1	N2
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	01/04/2008	01/04/2008	2:15	3:45	I083	6	12
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	01/04/2008	01/04/2008	14:45	16:00	I083	6	12
I	2008	4	MAR ROCIO	114,4	5	02/04/2008	02/04/2008	0:40	12:15	I083	14	21
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	02/04/2008	02/04/2008	3:05	4:40	I083	6	12
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	02/04/2008	02/04/2008	15:00	16:40	I083	6	12
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	03/04/2008	03/04/2008	3:30	4:45	I083	6	12
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	03/04/2008	03/04/2008	15:30	16:40	I083	6	12
I	2008	4	PAU CASALS	180	6,50	03/04/2008	03/04/2008	6:45	10:55	I083	6	13
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	04/04/2008	04/04/2008	15:10	16:20	I083	6	12
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	04/04/2008	04/04/2008	3:00	4:15	I083	6	12
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	05/04/2008	06/04/2008	23:50	1:30	I083	6	12
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	05/04/2008	05/04/2008	2:55	4:20	I083	6	12
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	05/04/2008	05/04/2008	15:35	20:25	I083	6	12
I	2008	4	MERCEDES DEL MAR	141	6,2	06/04/2008	06/04/2008	9:10	12:15	I083	6	13
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	06/04/2008	06/04/2008	13:10	14:12	I083	6	12
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	07/04/2008	07/04/2008	1:40	3:10	I083	6	12
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	07/04/2008	07/04/2008	14:10		I083	6	12
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	08/04/2008	08/04/2008	1:50	3:15	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	08/04/2008	08/04/2008	13:25	15:45	I083	6	10
I	2008	4	CASTILLO DE TRUJILLO	182,14	11,37	09/04/2008	11/04/2008	19:40	11:00	I083	10	21
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	09/04/2008	09/04/2008	2:45	4:05	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	09/04/2008	09/04/2008	15:00	16:45	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	10/04/2008	10/04/2008	3:20	4:50	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	10/04/2008	10/04/2008	15:50	17:25	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	11/04/2008	11/04/2008	18:10	19:45	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	11/04/2008	11/04/2008	4:45	6:35	I083	6	10
I	2008	4	SKLEDROS	145,88	8,7	11/04/2008	12/04/2008	23:05	22:10	I083	14	21
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	12/04/2008	12/04/2008	19:00	20:15	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	12/04/2008	12/04/2008	6:50	8:05	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	13/04/2008	13/04/2008	0:40	2:00	I083	14	20
I	2008	4	MERCEDES DEL MAR	141	6,2	13/04/2008	13/04/2008	9:05	12:15	I083	6	12
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	13/04/2008	13/04/2008	13:25	14:45	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	14/04/2008	14/04/2008	1:10	2:30	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	14/04/2008	14/04/2008	13:25	14:40	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	15/04/2008	15/04/2008	1:00	2:20	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	15/04/2008	15/04/2008	13:10	13:40	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	16/04/2008	16/04/2008	1:10	2:15	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	16/04/2008	17/04/2008	13:25	14:45	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	18/04/2008	19/04/2008	1:05	16:30	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	20/04/2008	20/04/2008	3:40	14:05	I083	6	10
I	2008	4	MULTITANK BADENIA	99,90	6,80	20/04/2008	21/04/2008	21:30	7:20	I083	14	20
I	2008	4	MURILLO	180,5	6,5	20/04/2008	20/04/2008	13:00	19:35	I083	6	14
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	21/04/2008	21/04/2008	15:05	16:50	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	21/04/2008	21/04/2008	2:00	3:45	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	22/04/2008	22/04/2008	4:10	5:40	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	22/04/2008	22/04/2008	16:40	18:35	I083	6	10
I	2008	4	BRO SINCERO	146,05	9,25	23/04/2008	24/04/2008	17:00	6:55	I083	13	21
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	23/04/2008	23/04/2008	5:55	13:45	I083	6	10
I	2008	4	CORAL	148,11	5,88	24/04/2008	24/04/2008	18:10	23:00	I083	6	12
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	24/04/2008	24/04/2008	0:40	2:25	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	24/04/2008	24/04/2008	7:05	14:00	I083	6	10
I	2008	4	WIND SURF	187,2	5	25/04/2008	26/04/2008	11:05	0:20	I083	10	21
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	25/04/2008	25/04/2008	13:30	14:45	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	25/04/2008	25/04/2008	1:10	2:40	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	26/04/2008	26/04/2008	1:35	3:10	I083	6	10
I	2008	4	RIA DE VIGO	68	5,88	26/04/2008	30/04/2008	10:00	8:00	I083	15	20
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	26/04/2008	26/04/2008	14:20	20:20	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	27/04/2008	27/04/2008	1:40	13:30	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	28/04/2008	28/04/2008	12:55	14:20	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	28/04/2008	28/04/2008	0:30	2:00	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	29/04/2008	29/04/2008	13:25	14:40	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	29/04/2008	29/04/2008	1:10	2:30	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	30/04/2008	30/04/2008	13:50	15:00	I083	6	10
I	2008	4	CARMEN DEL MAR	101,6	5	30/04/2008	30/04/2008	1:30	2:50	I083	6	10

Se ha centrado el análisis en el ataque del buque de mayor eslora que ha registrado su entrada en el Dique de Botafoc, el Castillo de Trujillo.

En el estadillo de estancias en el Dique de Botafoc la entrada del Castillo de Trujillo aparece a las 19:40 del 9 de abril de 2008. A la vista del gráfico de estadísticas del parámetro “aceleración en el eje X” vemos que existe un evento puntual, mas o menos, a esa hora. En la figura 7 se muestra este evento:



**Figura 7**

Realizando un muestreo estadístico de detalle alrededor de este máximo, el gráfico resultante se muestra a continuación en la figura 8..

Suponiendo que el ataque del barco corresponde al primero de los picos, el producido a las 19:35, se muestra en la figura 9 el registro completo en el momento del impacto de ataque para las tres aceleraciones medidas.

Este ataque, debido probablemente a la gran eslora del Castillo de Trujillo, es ha debido de ser realizado con la ayuda de remolcadores y una velocidad muy baja.

En cuanto a la magnitud de la aceleración producida durante los ataques con respecto a la que se produce en temporal, se puede afirmar que, durante el mes de abril de 2008, son del mismo orden.

Por otra parte, hay que remarcar que las aceleraciones mas fuertes sufridas durante el ataque de un buque se producen a lo largo de un corto periodo de tiempo, en algunos casos estudiados en meses anteriores de unos 40 segundos, mientras que en el caso de las aceleraciones sufridas por el oleaje las aceleraciones se producen de forma pulsante al paso de cada ola, y ésta situación se prolonga durante muchas horas.

En cualquier caso, el sistema inercial instalado en Botafoc ha registrado ataques mucho mas violentos que este, por ejemplo el producido el 18 de diciembre de 2007. A continuación, en la figura 10, se muestra el registro de las tres aceleraciones medidas. Este registro aparece en dos fases, un primer impacto de la popa o la proa contra el dique que produce sobre todo aceleraciones sobre el eje Y (longitudinal al dique), y otro impacto posterior en el que toda la

banda lateral del barco se apoya en el dique, siendo en esta segunda fase en la que se registran los mayores movimientos.

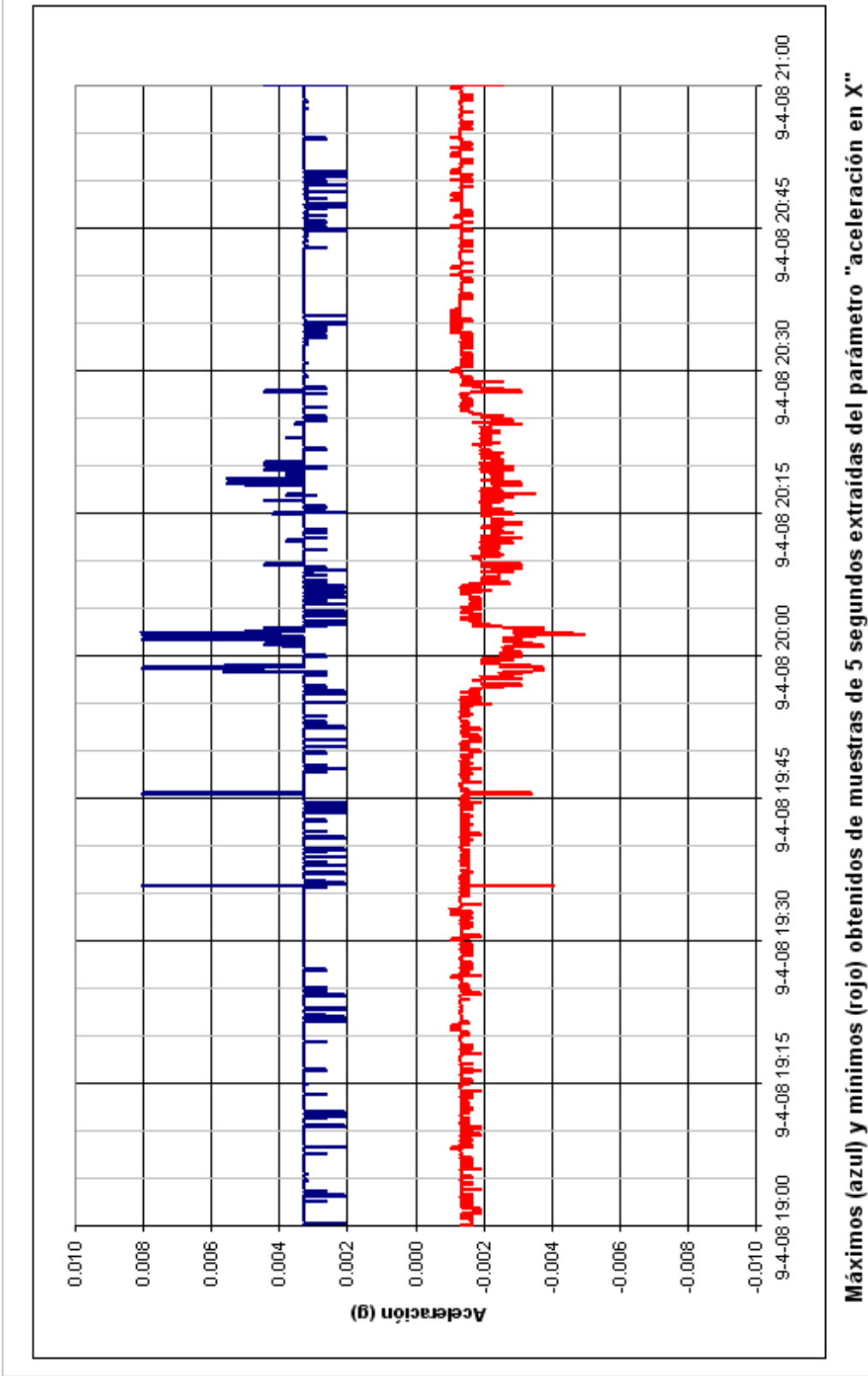


Figura 8

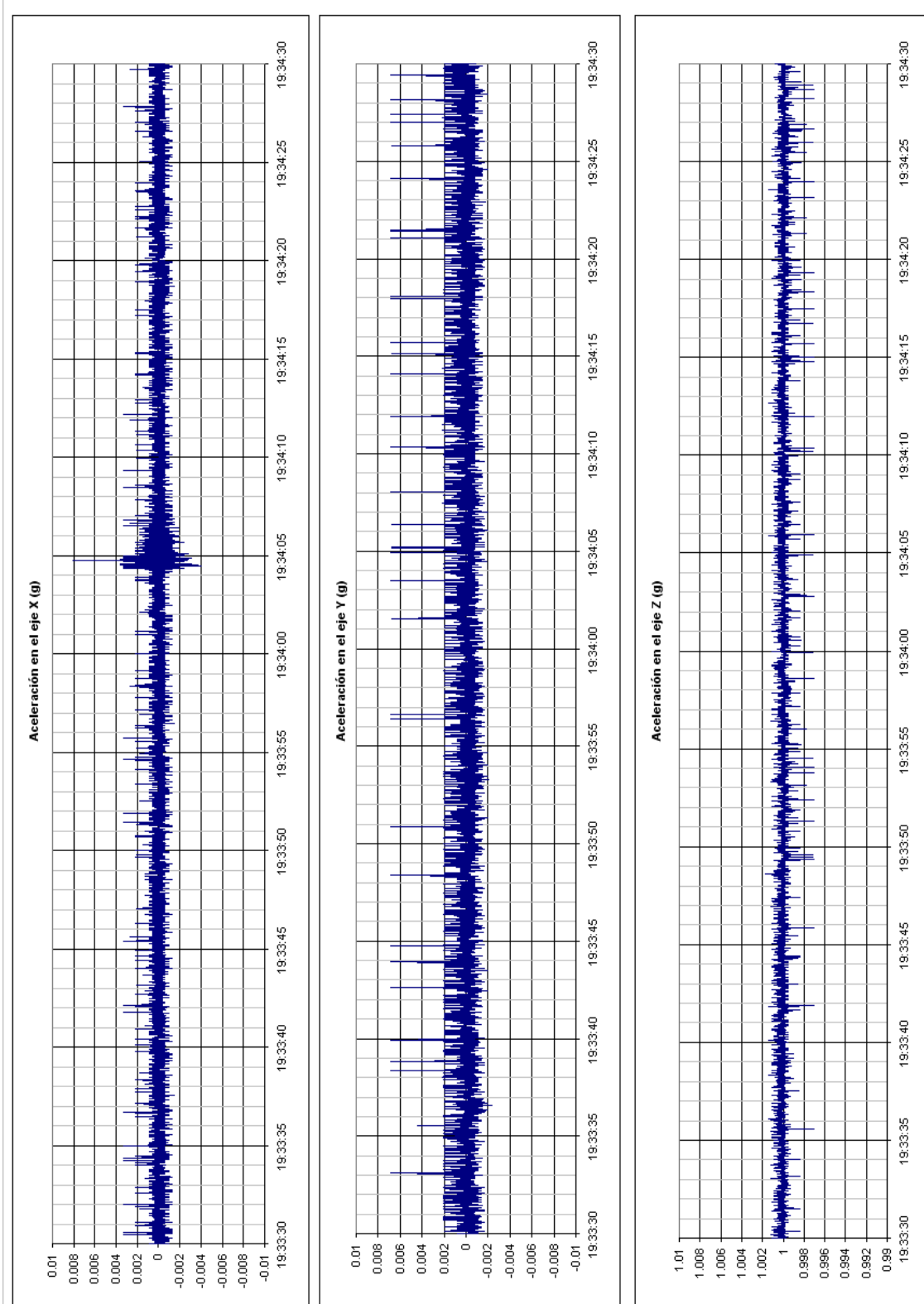


Figura 9

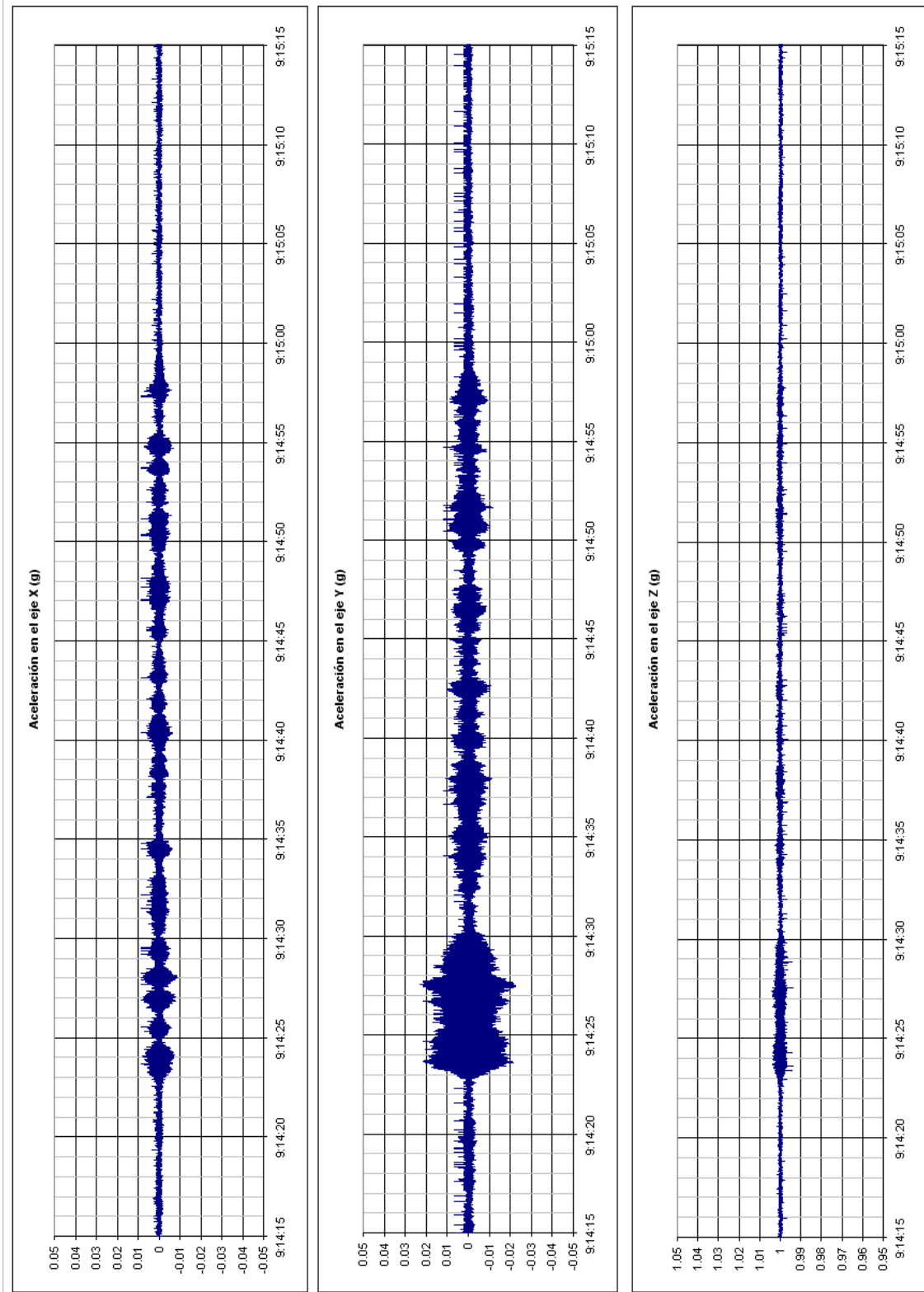


Figura 10 (a)

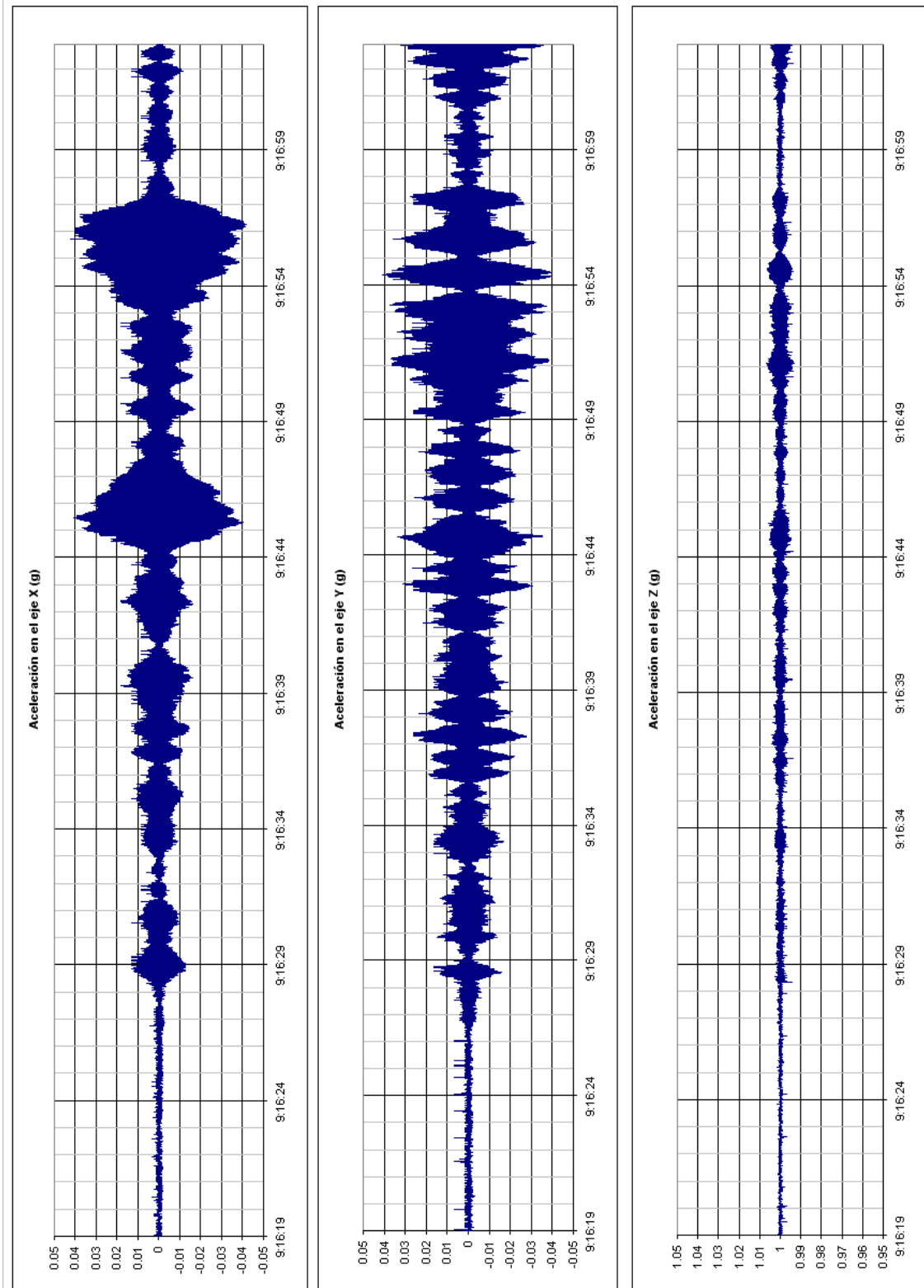


Figura 10 (b)



## **7. MOVIMIENTOS PRODUCIDOS POR LA MAYOR OLA REGISTRADA.**

Se han analizado también los movimientos registrados en el momento en que los sensores de presión han registrado el paso de la mayor ola en el mes de abril de 2008 (registrada por la sección 2 el día 16 a las 23:51:30).

A continuación, como figura 11, se muestra el registro de las tres aceleraciones medidas, en el que se observa un movimiento mas fuerte de lo normal en el eje X a las 23:50:46, 44 segundos antes de la ola registrada por la sección 2.

Esta no simultaneidad apreciada entre la llegada de las mayores olas registradas (por la sección 2) y los movimientos del cajón induce a pensar que el cajón (o mejor dicho el conjunto constituido por el cajón número 8, los cajones adyacente, la superestructura y el espaldón, y la banqueta) se mueva de forma muy compleja y discordante con las pulsaciones ejercidas por un oleaje, en general, que incide de manera oblicua.

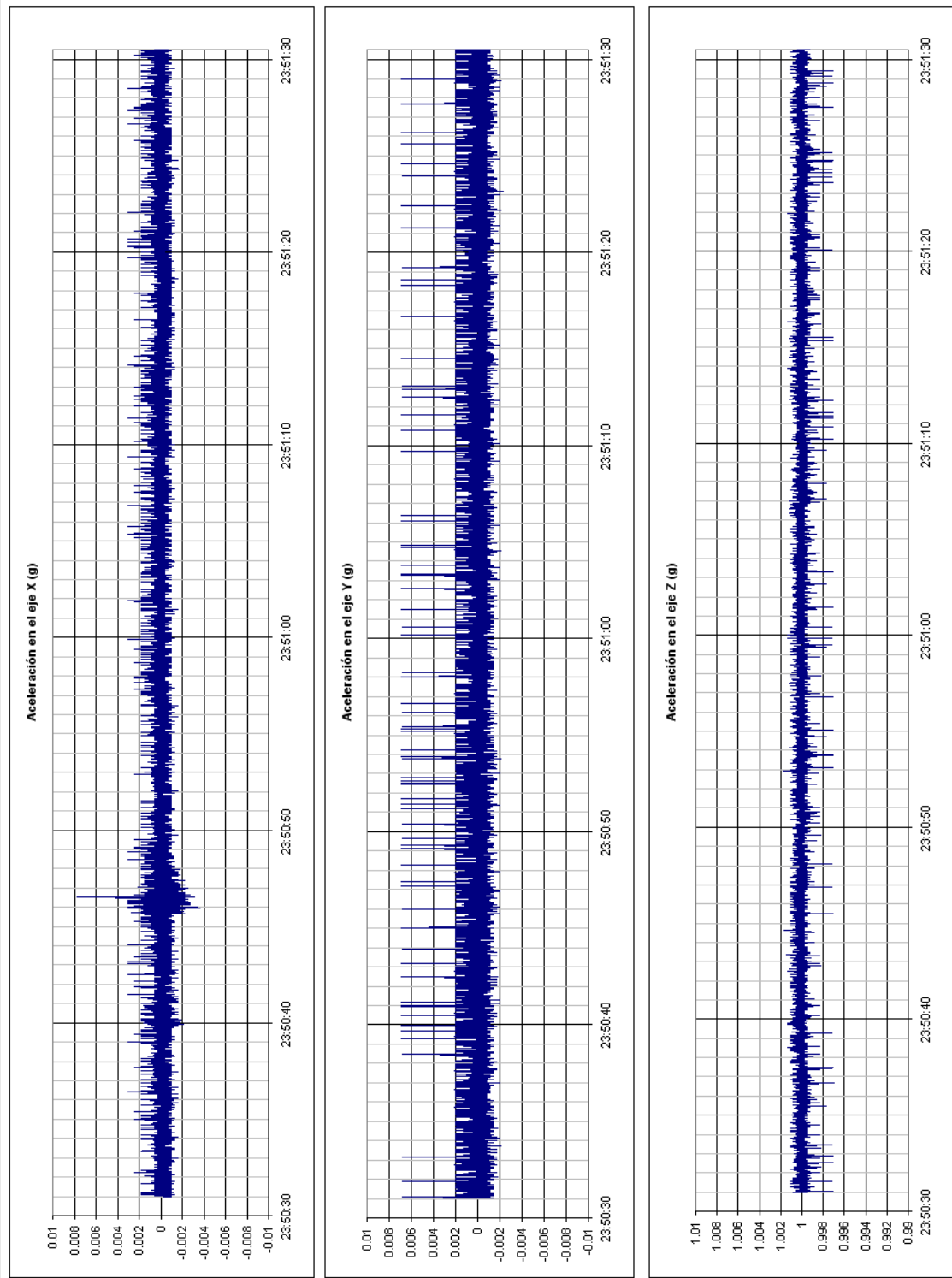


Figura 11

## 8. ANÁLISIS DEL EVENTO QUE HA PRODUCIDO MAYORES MOVIMIENTOS.

Para completar este exhaustivo análisis de los movimientos registrados por el cajón en el mes de abril de 2008 se ha procedido a estudiar el mayor evento registrado en el mes, correspondiente al máximo puntual que aparece el día 21 en el gráfico de estadísticas del parámetro “aceleración en el eje X”. En la figura 12 se muestra este evento:

Realizando un muestreo estadístico de detalle alrededor de este máximo, el gráfico resultante se muestra en la figura 13.

Se observa como existe un evento puntual (probablemente el desatraque del Multitank Badenia que aparece en el estadillo a las 7:20) sobre un cierto oleaje (oleaje frente al dique de aproximadamente 2 metros de altura y 8 segundos de periodo).

En la figura 14 se muestra el registro completo en el momento del desatraque para las tres aceleraciones medidas.

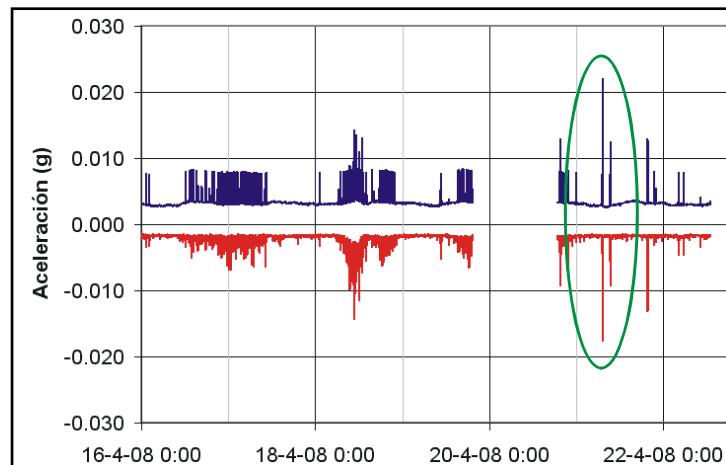
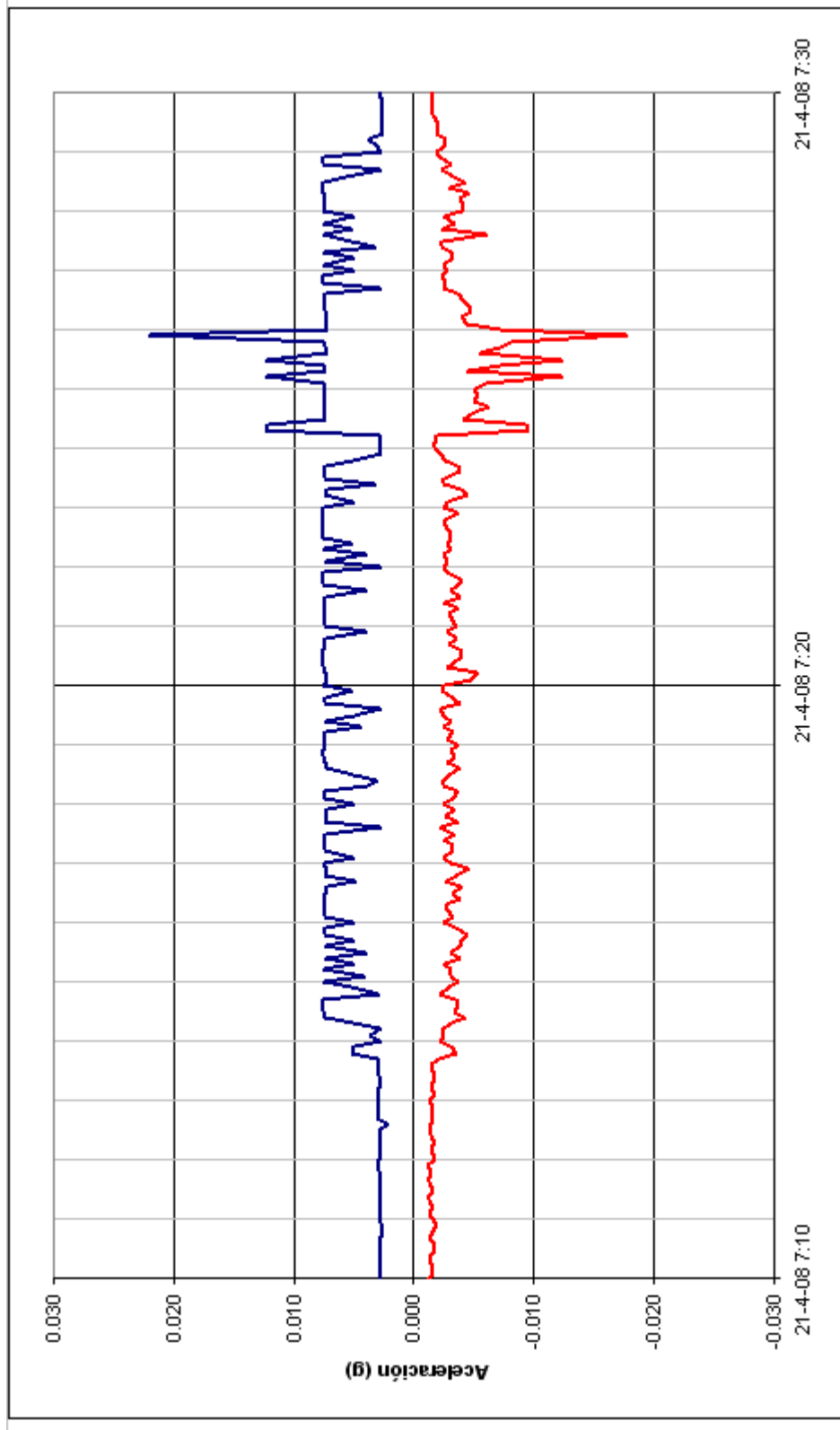


Figura 12



**Máximos (azul) y mínimos (rojo) obtenidos de muestras de 5 segundos extraídas del parámetro "aceleración en X"**

Figura 13

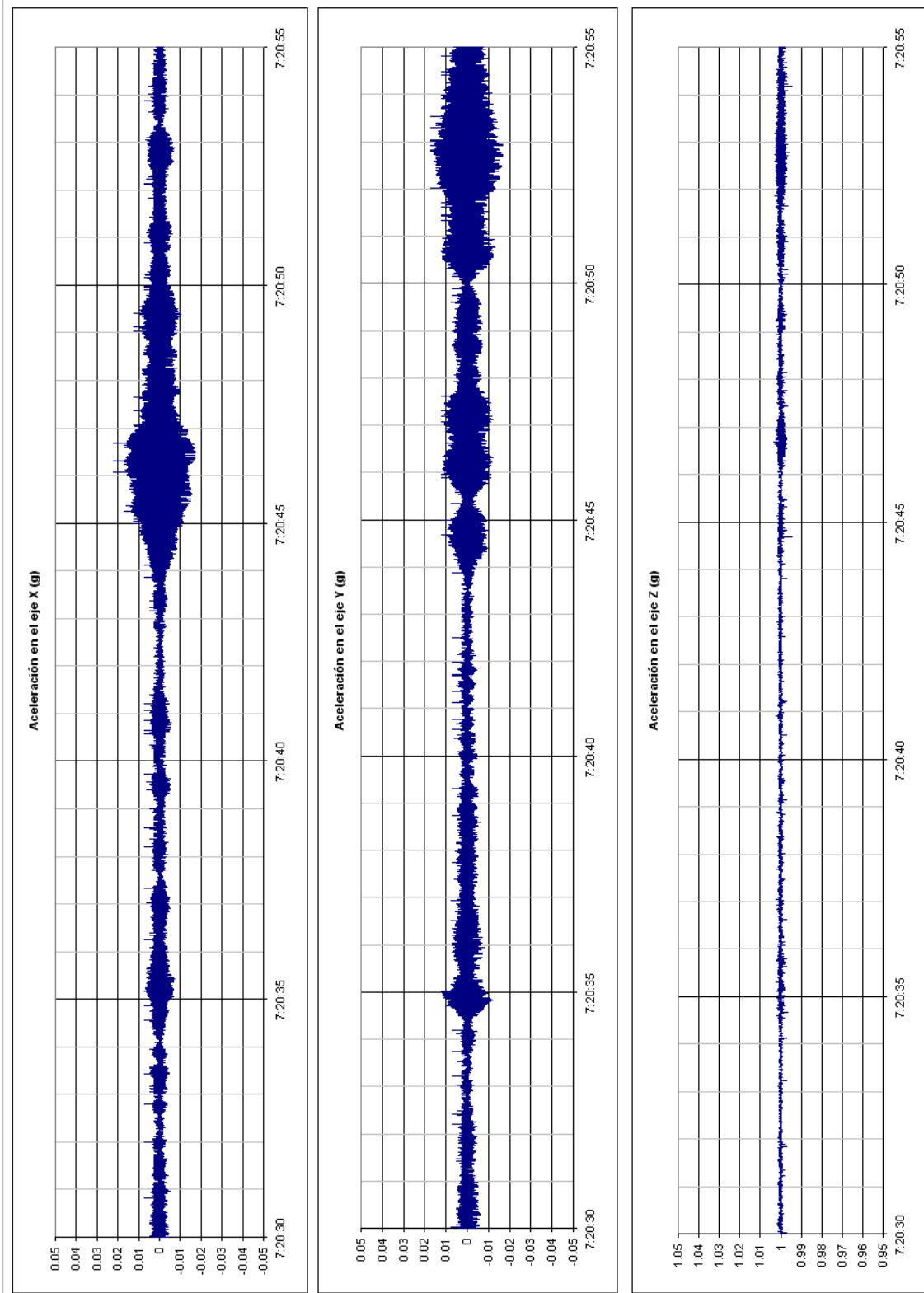


Figura 14

## 9. CONCLUSIONES.

Es necesario medir el oleaje en el exterior del dique para correlacionar correctamente presiones y movimientos, y encontrar el “umbral de oleaje” que produce movimientos en el cajón, entendiendo por umbral de oleaje una serie de combinaciones altura-periodo-dirección.

No existe una simultaneidad entre la llegada de las mayores olas registradas y los movimientos del cajón, lo que induce a pensar que existe un movimiento complejo del cajón (o mejor dicho del conjunto constituido por el cajón número 8, los cajones adyacente, la superestructura y el espaldón, y la banqueta) que hace que éste se mueva de forma muy compleja y discordante con las pulsaciones ejercidas por un oleaje, en general, que incide de manera oblicua.

El atraque de los barcos puede producir importantes movimientos puntuales en el cajón en el momento del atraque, mayores incluso que los producidos por un oleaje fuerte. En cualquier caso, hay que remarcar que las aceleraciones mas fuertes sufridas durante el atraque de un buque se producen a lo largo de un corto periodo de tiempo, mientras que en el caso de las aceleraciones sufridas por el oleaje las aceleraciones se producen de forma pulsante al paso de cada ola, y ésta situación se prolonga mucho mas en el tiempo.

Por otra parte, para evaluar los movimientos provocados por el buque durante el atraque es imprescindible monitorizar las tensiones en las amarras.

Además, para evaluar los efectos producidos por los barcos, sería muy conveniente visualizar la forma en que se produce el atraque.

## 10. AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo se está desarrollando en estrecha colaboración con la Autoridad Portuaria de Baleares, por lo que queremos dejar constancia de nuestro expreso reconocimiento por su apoyo y sus valiosas aportaciones.

Además, agradecemos la gran ayuda prestada a todas las personas que de forma directa o indirecta han intervenido y están actualmente trabajando en el mantenimiento y la explotación de datos de la instrumentación del cajón numero ocho del Dique de Botafoc en el Puerto de Ibiza, pertenecientes a la Universidad, a la Autoridad Portuaria de Baleares y al Ente Público Puertos del Estado.

## 11. BIBLIOGRAFÍA.

**J.L. Almazán Gárate, A. Matías Mateos (2007):** Fenomenología y experimentación a escala natural de diques de abrigo verticales: la instrumentación del Dique de Botafoc (Puerto de Ibiza). Revista Ingeniería Civil. CEDEX. Marzo 2007.

**J.L. Almazán Gárate, A. Matías Mateos, M.C. Palomino Monzón, J.R. García Montes, J.R. Amorós Serret (2008):** Tratamientos masivos de datos procedentes de La instrumentación del Dique de Botafoc (Ibiza). Revista Ingeniería Civil. CEDEX. Número 149/2008.

**R. Archetti, L. Martinelli, P. Frigaard, A. Lamberti (2000):** Horizontal coherence of wave forces on vertical wall breakwaters, Proc. 27th ICCE, Sydney.

**R.A. Bagnold, (1939):** Interim report on wave pressure results. Journal Inst. Civil Engr., Vol 12, London, England.

**D.D. Barkan (1962):** Dynamic of bases and foundation. Mc Graw Hill.

**J.A. Battjes, & Janssen, J.P.F.M. (1978):** Energy loss and set-up due to breaking in random waves. Proc. 16<sup>o</sup> Coastal Engr. Conf., Hamburg, Germany.

**E. Benassai (1975):** The stability against sliding of breakwaters under action of breaking waves. PIANC, Vol II, n<sup>o</sup>21

**M. Calabrese, D. Vicinanza (1999):** Prediction of wave impact occurrence on vertical and composite breakwaters. Excerpta, Vol 13, Pagg 91-123

**W.R. Dally, Dean R.G. & Dalrymple, R.A. (1985):** Wave height variation across beaches of arbitrary profile. J. Geophys. Res., 90 (C6), pp.11917-11927.

**H. Goldstein (1950):** Classical Mechanics. Addison Wesley Publishing Company. 2nd Ed: 1980

**Y. Goda (1985):** Random seas and maritime structures. University of Tokyo Press.

**Y. Goda (1994):** Dynamic response of upright breakwaters to impulsive breaking wave forces. Coastal Engr. Vol 22., Special Issue on Vertical Breakwaters, Elsevier.

**Y. Goda, Y. (1974):** A new method of wave pressure calculation for the design of composite breakwaters. Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng., Copenhagen, pp. 1702-1720

**T. Hayashi & Hattori, (1958):** Pressure of the breaker against the vertical wall. Coastal Engr. in Japan.

**T. Hayashi (1965):** Virtual mass and the damping factor for the breakwater during rocking, and the modifications by their effect on the expression of the thrusts exerted upon breakwater by the action of breaking waves. Coastal Engr. in Jpn., Vol 8.

**Kortenhaus, A. and Oumeraci, H. (1995):** Simple numerical models for caisson breakwater motions under breaking wave impacts. Final Proceedings, MAST II, MCS-Project: Monolithic (Vertical) Coastal Structures

**Kortenhaus, A. and Oumeraci, H. (1998):** Classification of wave loading on monolithic coastal structures. Proceedings of the 24th international coastal engineering conference, vol. 2, pp. 1284-1297

**N.T. Kottegoda & Rosso R. (1997):** Statistics, Probability and Reliability Methods for Civil and Environmental Engineering. Mc Graw Hill

**Löffler, H. Oumeraci, A. Kortenhaus, L. Martinelli (2000):** Pressure Distribution at the Front Face and the Bottom of a Vertical Breakwater in Multidirectional Seas, Proc. 27th ICCE, Sydney.

**Lamberti, L. Martinelli (1998):** Prototype measurements of the dynamic response of caisson breakwaters. Proc. 26th ICCE, Copenhagen, Denmark.

**Lamberti, L. Martinelli (2000):** Dynamic response of caisson breakwaters: guidelines for static equivalent analysis. Proc. 27th ICCE, Sydney.

**V.N. Loginov (1958):** Dynamic analysis of the stability of harbour protective structures under the action of wave impacts. Tr. SNIIMF, Vol 19 (in Russian)

**J.G. Marinski & H. Oumeraci (1992):** Dynamic response of vertical structures to breaking wave forces. Review of the CIS design experience. Proc. 23rd ICCE.

**L. Martinelli, H.G. Voortman, J.K. Vrijling, A. Lamberti (1999):** Application of probabilistic design tools for vertical breakwaters, Coastal Structure99, 7-10 June 1999, Santander, Spain.

**S. Nagai (1973):** Wave forces on structures, in "Advances in Hydroscience", Ven Te Chow Ed., Vol. 9, Academic Press.

**H. Oumeraci (1994):** Review and analysis of vertical breakwater failures - lesson learned. Coastal Engr. Vol 22., Special Issue on Vertical Breakwaters, Elsevier.

**H. Oumeraci & A. Kortenhaus (1994):** Analysis of the dynamic response of Caisson Breakwaters. Coastal Engr. Vol 22., Special Issue on Vertical Breakwaters, Elsevier.

**H. Oumeraci, N.W.H. Allsop, M.B. de Groot, R. Crouch, J.K. Vrijling, A. Kortenhaus, H.G. Voortman (2000a):** Probabilistic design tools for vertical breakwaters, Volume I. Rotterdam: Balkema. (Forthcoming)



**H. Oumeraci, A. Kortenhuis, N.W.H. Allsop, M.B. de Groot, R. Crouch, J.K. Vrijling, (2000b):**

Probabilistic design of caisson breakwaters and sea walls - present status & perspectives. Proc. 27th ICCE, Sydney.

**V.I. Petrashen (1956):** Action of breaking waves on vertical structures. Sbornik Trudov VNIIGs, 7, pp. 75-110 (In russian)

**G.N. Smirnov & L.R. Moroz (1983):** Oscillation of gravity protective structures of a vertical wall type. Proc. 20th IAHR.

**K. Shimosako, S. Takahashi & K. Tanimoto (1994):** Estimating the sliding distance of composite breakwaters due to wave forces inclusive of impulsive forces. Proc. 24th ICCE.

**K. Shimosako, S. Takahashi (2000):** Application of expected sliding distance method for composite breakwaters design. Proc. 27th ICCE, Sydney.

**T. Stevenson (1874):** The design and construction of harbours. 2nd ed. Edimburgh.

**S. Takahashi (1996):** Design of vertical breakwaters. Short course attached to 25th ICCE , Orlando, Florida.

**S. Takahashi, K. Tanimoto and K. Shimosako (1994):** A proposal of impulsive pressurecoefficient for the design of composite breakwaters. Proc. Int. Conf. Hydro-Technical Eng. Port and Harbour Construction, Yokosuka, pp. 438-457

**T. Takayama, N. Ikeda (1992):** Estimation of sliding failure probability of present breakwaters for probabilistic design. Report of the Port and Harbour research institute, Vol 31, N° 5.

**T. Takayama, S. Ikesue, K. Shimosako (2000):** Effect of directional occurrence distribution of extreme waves on composite breakwater reliability in sliding failure. Proc. 27th ICCE, Sydney.

**J.W. Van der Meer; K. d'Angremond & J. Juhl (1994):** Uncertainty on Goda Formula. Proc. 24Th ICCE Kobe

**H. G. Voortman, P.H.A.J.M. Van Gelder, J.K. Vrijling (1999):** Reliability analysis of the dynamic behaviour of vertical breakwaters. Proceedings of European Safety and Reliability Conference, (ESREL), Munich, 1999