

5. Calibración con playa disipativa

5.1. Playa de disipación

Previamente a la realización del modelo físico (el dique), es necesario llevar a cabo la calibración del sistema de generación. Para ello, se ha construido una playa artificial disipativa, con el objetivo de hacer que el oleaje creado durante las pruebas de calibración no se vea afectado por las características limitantes de un canal. Esta playa tiene la propiedad de no permitir la reflexión de las olas, ya que al incidir, éstas se disipan.

Para el diseño de una rampa disipadora de energía es necesario basarse en una hipótesis principal de partida que permita, localmente, asumir un fondo horizontal (teoría de ondas de forma constante). Esta hipótesis obliga a cumplir que el cambio en las propiedades de la onda en propagarse sobre un fondo con profundidad variable sea suficientemente suave. Hablar de suavidad comporta hacer uso de expresiones donde aparece el concepto de derivada. El parámetro escogido para describir el grado de suavidad del fondo responde a la relación entre el incremento de profundidad en una longitud de onda i la profundidad, de manera que se sabe que la pendiente es suave si este parámetro se mantiene pequeño. Si es del orden de la unidad, la reflexión puede estar por debajo del 5%, por lo que la energía reflejada es del orden del 0,25% de la energía incidente (Dalrymple, 1985)

$$\delta = \frac{\Delta h_L}{h} = \frac{|h_x|L}{h} \ll 1 \quad (5.1)$$

La solución de la ecuación diferencial planteada es una parábola de la forma:

$$h = \frac{\delta^2}{4T^2 g} x^2 = Ax^2 \quad (5.2)$$

a la que se llega si se resuelve la ecuación analíticamente, operación que solo es factible si se suponen condiciones de aguas someras, ($L = T\sqrt{gh}$), y considerando la condición de contorno que asegura una tangente horizontal en el origen.

Teniendo en cuenta que la solución encontrada depende del periodo del oleaje, no sorprende el hecho de que, manteniendo constante la profundidad del canal, la distancia a la que la parábola corta el fondo (suponiendo el origen de coordenadas en el extremo de la tangente horizontal) también dependa. Esta distancia aumenta de manera lineal al hacerlo el periodo, tal y como se puede comprobar directamente en la expresión analítica.

Considerando un periodo de $T=3s$ (valor medio del rango con el que se trabaja normalmente con la pala generadora durante los ensayos con dique) y un valor de $\delta=2$, la playa toma la forma siguiente:

- Profundidad de origen: $-0.15m$ (referente al nivel medio)
- Profundidad en el fondo del canal: $1.50m$
- Longitud de la parábola: $20 m$
- D_{50} de la piedra granítica que lo compone: $10cm$

Uno de los condicionantes a la hora de elegir los valores también ha sido el volumen y la distancia que abarca la playa. La elección de estos valores debe tenerse presente a la hora de valorar la reflexión que ésta produce.

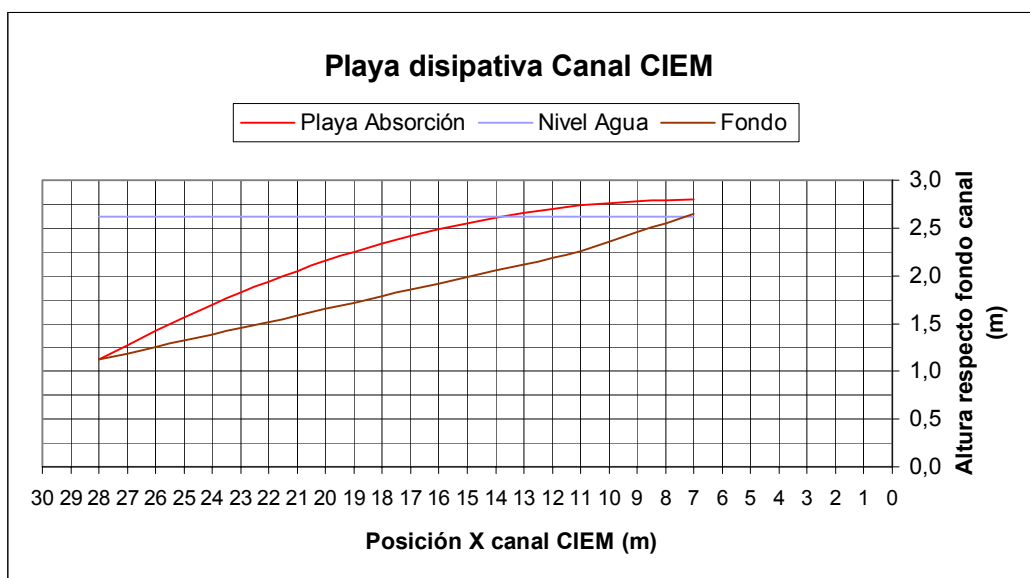


Figura 5.1. Perfil de la playa disipativa

El volumen ocupado por la playa es de $37 m^3$. El material utilizado para la construcción de la playa es una piedra granítica de $D_{50}=10cm$ y de $0.5kg$ de peso. Esto significa que se trata de una rampa porosa, hecho que supone que la altura de onda sobre la rampa puede disiparse sin romper.

Por otro lado, se tiene que tener en cuenta que la disipación del oleaje, ya sea por rotura o por disipación en medio poroso, provoca una sobreelevación del nivel medio que es máxima al final de la rampa. Es por esta razón que el origen de esta se sitúa ligeramente por encima del nivel medio, tal y como se representa en el perfil de la playa de la figura (5.1)

Cabe destacar que, en el proceso de determinación de las mejores condiciones bajo las que se pretende trabajar, son necesarias diferentes hipótesis i simplificaciones. Escogiendo grado de suavidad $\delta=2$, se intenta abarcar el máximo número de periodos posibles de oleaje generados, de manera que no provoque cambios en los

resultados. De hecho, esta decisión no provoca cambios substanciales para el cumplimiento del objetivo de la playa disipativa ya que la energía reflejada en este caso sigue siendo reducida y por tanto el coeficiente de reflexión aceptable. La mayor incidencia de este factor acaba siendo sobre la longitud de rampa de playa, diseño para el que se ha tenido que presuponer un periodo y una profundidad fijados. Por lo que le corresponde al periodo, analizando la capacidad generadora del canal i la estabilidad del oleaje creado, $T=3s$ corresponde al máximo de la relación entre H y T , y entonces a un valor característico del canal. Por lo que le corresponde a la profundidad, el canal no representa un fondo horizontal, pero tratar la formulación utilizada añadiendo este factor no representa un beneficio claro. Esta simplificación es obligada tanto para la realización de la playa como también para la valoración de la resonancia longitudinal y transversal.

5.2. Descripción de los ensayos de calibración

El objetivo marcado por el Convenio fue calibrar la reflexión para unos periodos y alturas de ola fijas. En concreto se efectuaban dos series de ensayos, cada una de ellas con una carrera de pala fija:

- $S = 2e = 0,262 \text{ m}$ ($2e/h=0,1$)
- $S = 2e = 0,786 \text{ m}$ ($2e/h=0,3$)

Fijadas estas dos carreras, se realizan los ensayos para periodos que van desde los 2 segundos hasta los 8, en intervalos de medio segundo. El calado es de 2.62 metros frente a la pala y 1.5 metros en la posición del dique. Con estos datos y con las formulas expuestas en el apartado 4.2 de esta tesina se obtienen las alturas de ola teóricas para cada ensayo.

Ensayo	Valores teóricos		Ensayo	Valores teóricos	
	T (s)	H (m)		T (s)	H (m)
01CAL20	2	0,35	03CAL20	2	0,618
01CAL25	2,5	0,2486	03CAL25	2,5	0,744
01CAL30	3	0,182	03CAL30	3	0,546
01CAL35	3,5	0,142	03CAL35	3,5	0,427
01CAL40	4	0,117	03CAL40	4	0,351
01CAL45	4,5	0,0992	03CAL45	4,5	0,2988
01CAL50	5	0,087	03CAL50	5	0,2606
01CAL55	5,5	0,077	03CAL55	5,5	0,231
01CAL60	6	0,0692	03CAL60	6	0,2084
01CAL65	6,5	0,063	03CAL65	6,5	0,1896
01CAL70	7	0,058	03CAL70	7	0,174
01CAL75	7,5	0,0536	03CAL75	7,5	0,161
01CAL80	8	0,05	03CAL80	8	0,15

Tabla 5.1. Curvas de estudio

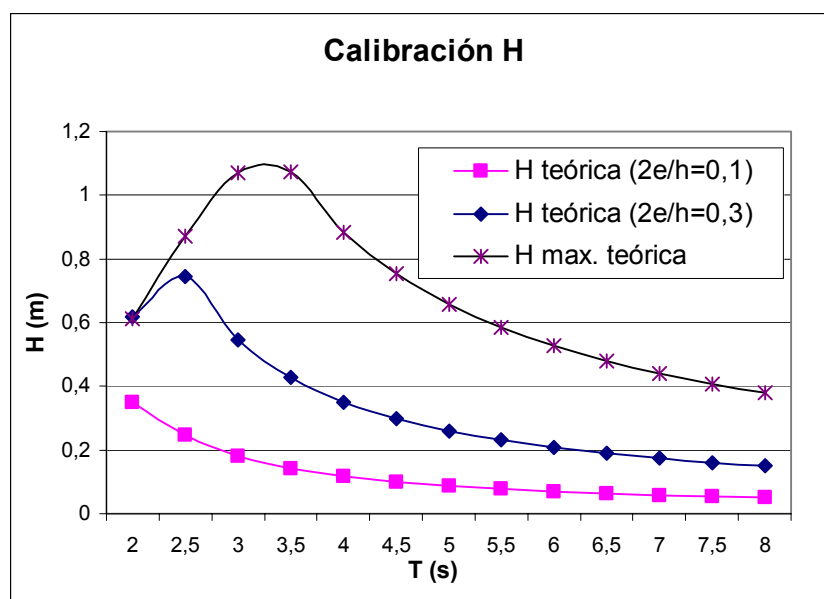


Figura 5.1. Curvas de estudio

5.3. Descripción de los ensayos para analizar la resonancia

Para la detección de la resonancia es necesario realizar un segundo ensayo. Para ello se crea un espectro plano de oleaje. Es decir, se genera un oleaje irregular en el que se mantiene constante la altura de ola mientras se va cambiando el periodo en el rango de ondas largas.

Si no aparecieran fenómenos de ondas largas, el espectro del oleaje generado tendría que ser plano. En caso de que para un período determinado se produzca resonancia, se producirá un pico en el espectro de oleaje, símbolo de un aumento de la energía producido por un aumento de la altura de ola.

5.4. Posición de los sensores

Se dispuso de un total de 6 sensores de nivel tipo resistivo para medir el oleaje generado (WG's). Se midió también la señal del desplazamiento del actuador ordenado por el programa SAWAS (DEMMOD) y su desplazamiento real (FEEDBACK).

La posición de los sensores se fijó según el convenio para optimizar el cálculo de la reflexión mediante el método de Mansard y Funke. La disposición de los sensores WG1, y WG6 se mantuvo invariante en su posición, mientras que los sensores WG0, WG2, WG5 y WG7 variaron en función del periodo del oleaje generado.

El calado es de 2.62 metros frente a la pala y 1.5 metros en la posición del dique.

Device Code	Card & Channel	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
DEMAND	CIO 0	0	----	----
DEMMOD	CIO 1	0	----	----
FEEDBACK	CIO 2	0	----	----
ERROR	CIO 3	0	----	----
WG0	CIO 4	825	21	228.0
WG1	CIO 5	870	21	223.0
WG2	CIO 6	980	21	211.5
WG5	CIO 7	5380.5	21	150.0
WG6	CIO 8	5425.5	82	150.0
WG7	CIO 9	5535.5	21	150.0

Tabla 5.2. Posición de los sensores de nivel para periodos de 2 a 5 segundos

Device Code	Card & Channel	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
DEMAND	CIO 0	0	----	----
DEMMOD	CIO 1	0	----	----
FEEDBACK	CIO 2	0	----	----
ERROR	CIO 3	0	----	----
WG0	CIO 4	810	21	229.5
WG1	CIO 5	870	21	223.0
WG2	CIO 6	1020	21	207.0
WG5	CIO 7	5365.5	21	150.0
WG6	CIO 8	5425.5	82	150.0
WG7	CIO 9	5575.5	21	150.0

Tabla 5.3. Posición de los sensores de nivel para periodos de 5,5 a 8 segundos

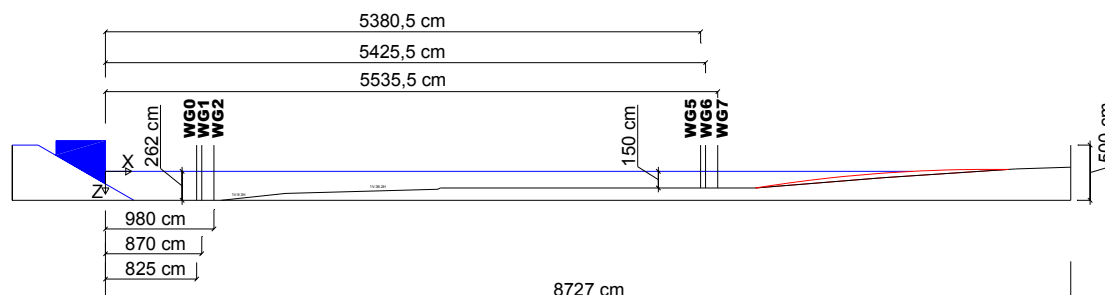


Figura 5.2. Croquis del canal con playa disipativa y sensores de superficie para periodos comprendidos entre los 2 y los 5 segundos

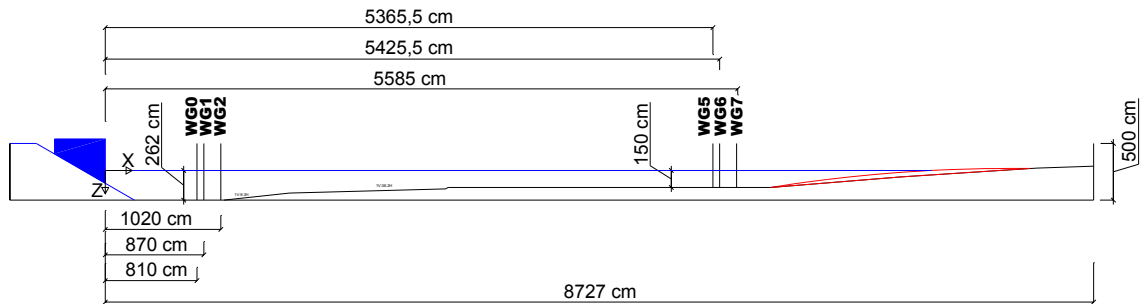


Figura 5.3. Croquis del canal con playa disipativa y sensores de superficie para periodos comprendidos entre los 5.5 y los 8 segundos

5.5. Adquisición de datos

Para visualizar y obtener información estadística de los datos recogidos por los sensores es necesario efectuar previamente un tratamiento.

El primer paso es traducir la señal recibida, adquirida por el ordenador correspondiente con una frecuencia de captación de 20 Hz y almacenada en un fichero en forma binaria.

Análisis estadístico

El segundo paso entra directamente en el cálculo de los parámetros estadísticos que permiten la extracción de conclusiones sobre el funcionamiento de la instalación. De estos cálculos se encarga un programa propio (*NewVerCanal*) que se basa en el método del paso por cero descendente (*zero-down crossing análisis*). La altura de ola se puede referir a la media aritmética de todas las olas del registro

($H_{mean} = \sum_{i=1}^n H_i / N$), a la media cuadrática ($H_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^n H_i^2 / N}$), a la media del tercio

de olas máximas ($H_{1/3}$), i también a la media de la decena parte de las olas con más altura ($H_{1/10}$). Los periodos se calculan de modo que estén asociados al método de análisis de la altura de ola correspondiente. Así se pueden obtener los periodos Tz_{mean} , Tz_{rms} , $Tz_{1/3}$ y $Tz_{1/10}$ respectivamente. No obstante, también se tiene acceso a otros parámetros estadísticos más comunes como la mediana, el máximo, el mínimo, la varianza o la desviación; así como el número de ola completas contabilizadas en la señal correspondiente.

Análisis espectral

De nuevo el programa *NewVerCanal* es el programa encargado de hacerlo. Recoge los datos almacenados en los sensores en forma binaria y realiza un análisis espectral.

El análisis espectral es esencial para la obtención de los periodos que generan resonancia. De hecho, una punta en el espectro de energía simboliza un aumento de la altura de ola. Dicho de otra manera, expresa un periodo o frecuencia del espectro en la que se ha generado resonancia.

Zonas de transición

Para cada periodo generado, antes de alcanzar una altura de ola constante se produce una zona de transición, tanto al inicio como al final del ensayo. Para evitar la distorsión de datos, se utiliza como medida la altura de ola significativa ($H_{1/3}$). De esta manera, se desprecian los 2/3 de olas más pequeñas, y con esto las zonas de transición.

El hecho de trabajar con altura de ola significativa, puede generar la idea de que se trabaja con datos inadecuados, ya que el oleaje regular se suele medir con la media cuadrática (H_{rms}). Pero en los ensayos en los que se ha eliminado la zona de transición se ha obtenido un valor prácticamente idéntico de H_{rms} y H_s . Por este motivo se han aceptado como buenos los valores de $H_{1/3}$, aunque el oleaje medido haya sido regular.

Cálculo de la reflexión

Para la medición de la reflexión se toman los valores relacionados a la altura de ola media cuadrática (H_{rms}). Para obviar las zonas de transición, los datos necesarios para calcular la reflexión tendrían que pertenecer a la zona estacionaria del registro. Pero se ha comprobado que utilizar los valores de toda la muestra prácticamente no modifica los resultados del cálculo final de la reflexión (ver Anejo III), y además facilita el manejo de datos. Por esta razón se ha obviado la zona de transición y se ha operado con todos los datos medidos por los sensores.

La formulación utilizada para la obtención del espectro de oleaje total, y su posterior descomposición en espectro de oleaje incidente y reflejado, se ha expuesto en el apartado 4.3.

5.6. Resultados de la calibración con playa disipativa

Como ya se ha comentado, se ha trabajado con dos carreras diferentes impuestas por convenio y establecidas entre los laboratorios participantes, y se han hecho

ensayos para los periodos que van desde los 2 segundos hasta los 8 con un intervalo de 0,5 segundos.

- $S = 2e = 0,262 \text{ m}$ ($2e/h=0,1$)
- $S = 2e = 0,786 \text{ m}$ ($2e/h=0,3$)

Las alturas de las olas consideradas se corresponden a la media de las alturas proporcionadas por los sensores WG0, WG1 y WG2 mediante el análisis de cero por paso descendente. Los datos de los sensores WG5, WG6 y WG7 se desprecian debido a su posición lejana al actuador y a que su valor puede verse aumentado o disminuido debido al asomeramiento. Este asomeramiento es producido por el desnivel que presenta el canal entre los dos grupos de sensores (ver figura 5.2 y 5.3 y anejo I de esta tesina).

La siguiente figura muestra los valores medidos frente a la pala, comparados con los valores teóricos esperados según la función de transferencia teórica para una pala tipo *wedge*. Tanto la altura teórica originada por la carrera y el periodo fijados, como la altura máxima teórica, se han calculado a partir de las formulas expuestas en los apartados 4.2.2 y 4.2.3).

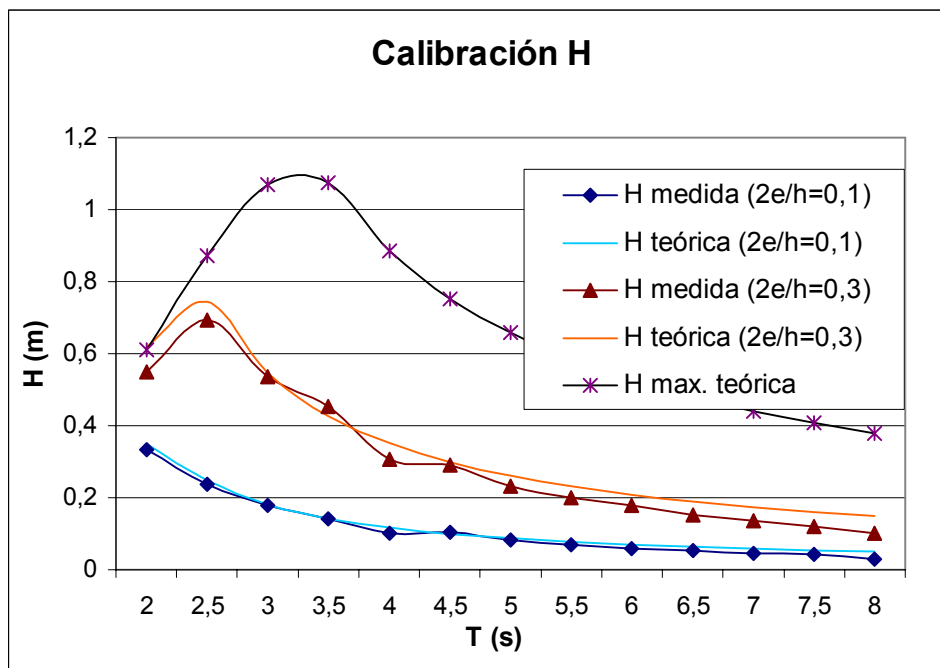


Figura 5.4. Resultados calibración canal CIEM de la UPC

A continuación se exponen los errores en la generación del oleaje. El error considerado es la diferencia entre el valor que se debería generar a partir de la función de transferencia teórica y la medida mediante los sensores de superficie WG0, WG1 y WG2.

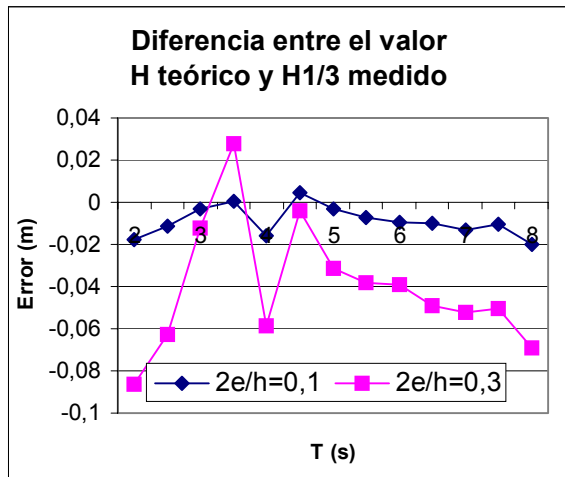


Figura 5.5

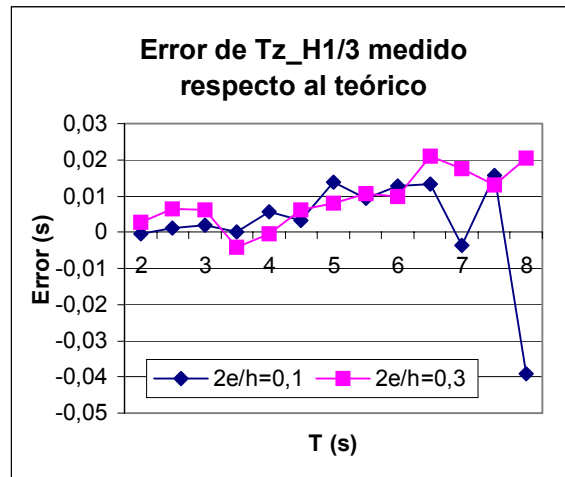


Figura 5.6

El error relativo también se ha calculado mediante los valores teóricos y medidos, y se ha expresado en tanto por ciento.

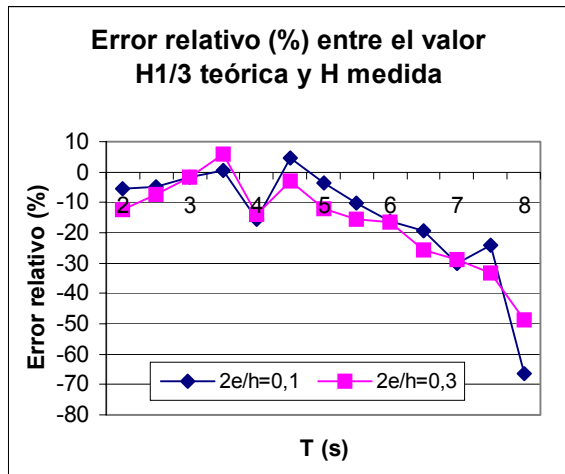


Figura 5.7

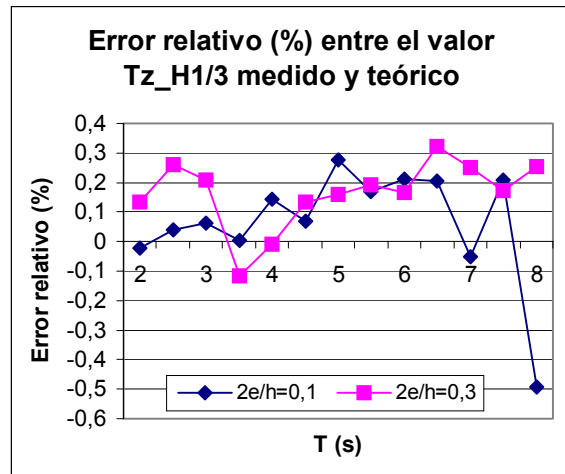


Figura 5.8

En primer lugar, puede observarse un anomalía en el ensayo con período $T=4s$, que se repite en ambas configuraciones ($2e/h=0,1$ y $2e/h=0,3$).

A mayor carrera (mayor altura de ola a generar) los errores absolutos aumentan. Para $2e/h=0,1$ se trabaja con un error comprendido entre 0 y 2 cm, que a partir del período 4 s aumenta de forma "lineal". Para $2e/h=0,3$ se llega a errores de hasta 9 cm, si bien el error no supera los 4 cm para períodos igual o inferiores a los 6s.

Existe un comportamiento anómalo en el período de 8 segundos y $2e/h=0,1$. Esto se explica a que se está intentando generar una altura de ola de 5cm con un período de 8 segundos moviendo una pala de 3 toneladas muy lentamente a lo largo de una carrera horizontal de 26,2 cm. El diseño del actuador de la pala (servoválvula, control de posicionamiento, ajuste de respuesta, ...) se comporta

bien para ciertos rangos de velocidad y carrera, que se traducen a unos rangos de periodos bajos y alturas de ola elevadas.

El error relativo de la altura de ola aumenta con los periodos y es similar en ambas configuraciones ($2e/h=0,1$ y $2e/h=0,3$). Esto es debido a que a medida que el periodo crece, la altura decrece, y el relativo aumenta notablemente. En el caso del periodo los errores relativos rondan el 0,3%. En la altura de ola los errores relativos rondan el 10 %, pero a partir de $T=6s$ se elevan hasta llegar a un 40% en $T=8s$.

En principio podríamos pensar que este error nos deja del lado de la inseguridad. Esto es cierto cuando la altura de ola generada es pequeña. Pero cuando la pala genera oleajes con gran amplitud el error puede dejar tanto del lado de la seguridad como de la inseguridad (ver grafica 5.5 y 5.7). De todos modos, se suele trabajar con los oleajes medidos, no con los teóricos.

Como primera conclusión se expone que el rango adecuado de trabajo del sistema de generación está por debajo de periodos de ola de 6 segundos. En este rango el error absoluto se mantiene aproximadamente por debajo del 15%.

Es por esto, que a pesar de observar grandes errores relativos en la parte final de los ensayos, solamente la parte inicial es la que se adapta más a los que posteriormente se realizan en el dique, caracterizados por periodos relativamente bajos (inferiores a los 4 segundos) y por alturas de ola más bien grandes.

Cabe señalar que estos errores incluyen no sólo el error de generación, sino también los errores de medida de los sensores entre otros. Las diferentes causas de error son analizadas en el apartado 5.7.

5.7. Análisis de los resultados de la calibración con playa disipativa

En el apartado anterior se ha observado como las curvas teóricas son levemente superiores a las medidas. A continuación se analizarán los datos provenientes de los sistemas de la generación del oleaje y de los equipos de medición, con el objetivo de valorar errores y encontrar explicación a los resultados obtenidos.

Los aspectos a estudiar son los siguientes:

- Errores en el movimiento de la pala (diferencias entre las carreras teóricas y las reales)

- Errores en las mediciones de los sensores de superficie (variación entre los datos proporcionados por una parte por los sensores WG0, WG1, WG2 y por otra por los sensores WG5, WG6 y WG7)
- Repetitividad de los ensayos realizados (variación entre los resultados de un ensayo y los resultados de su repetición)
- Posibles distorsiones debidas a la resonancia.
- Posible presencia de ondas largas.
- Errores derivados del modelo de oleaje.

5.7.1. Error en el movimiento de la pala

A continuación se expone la carrera teórica de la pala (la que se introdujo en el programa SAWAS), la carrera que se le ordenó a la pala (la que envió el programa SAWAS), y la carrera real (la medida por el programa FEEDBACK).

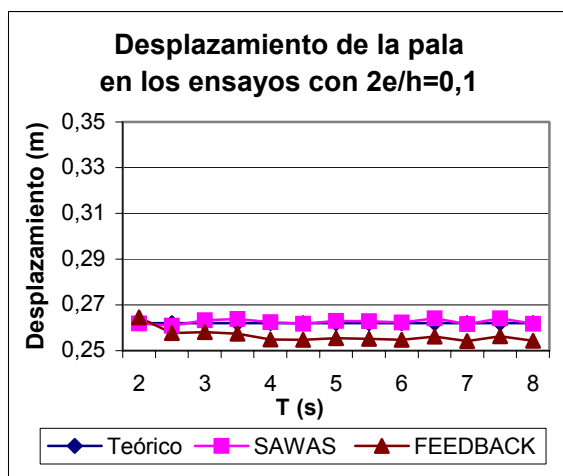


Figura 5.9

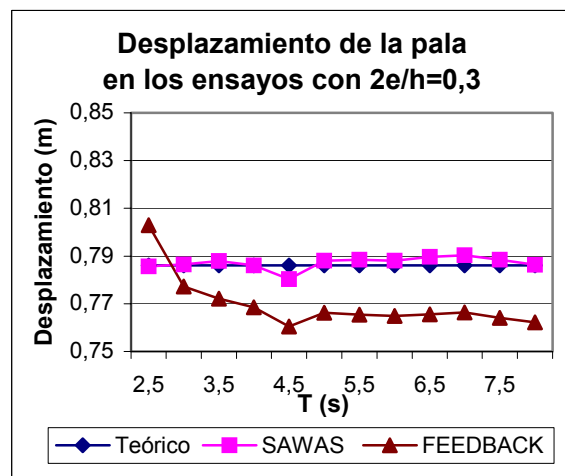


Figura 5.10

Cabe señalar, que en la configuración $2e/h=0,3$ y para el período $T=2s$, la carrera de la pala no es la teórica debido a que por condiciones de peralte la ola es inestable. Por este motivo no se incluye en el análisis.

Los errores se calculan a partir de los valores teóricos y los medidos. El error relativo de la carrera de la pala ronda el -3% (ver figuras 5.11 y 5.12). El hecho que la carrera de la pala hay sido inferior a la teórica es posiblemente uno de los causantes de que la altura de ola generada también haya sido inferior.

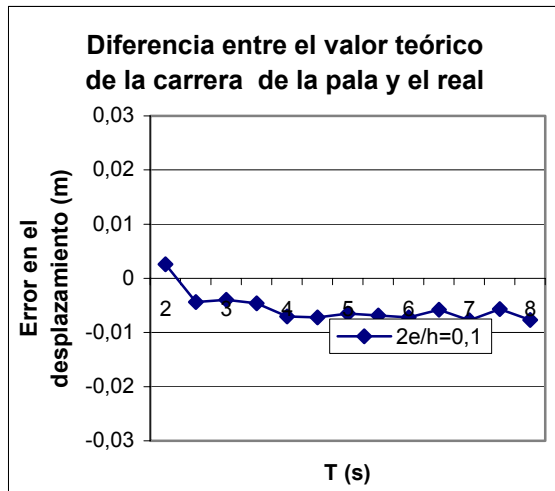


Figura 5.11a

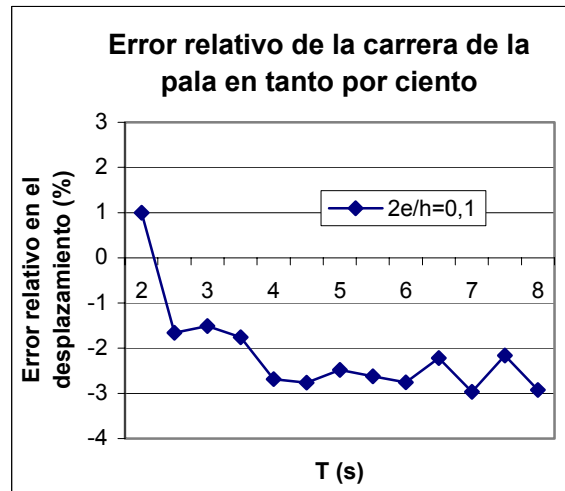


Figura 5.12a

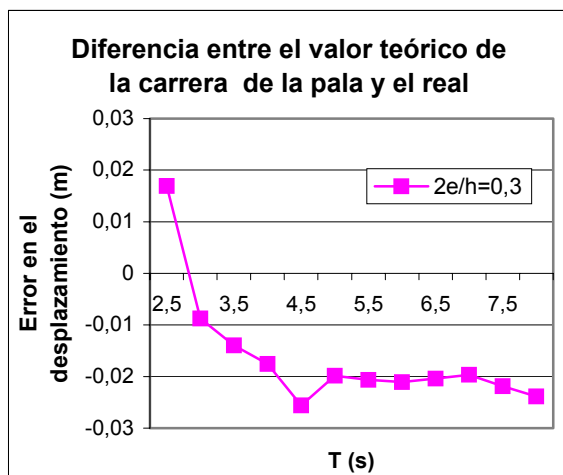


Figura 5.11b

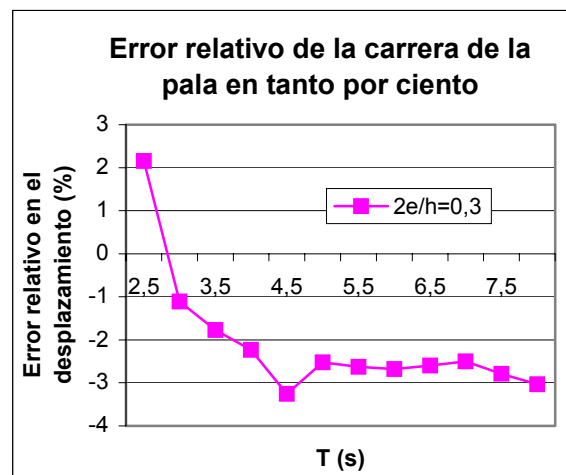


Figura 5.12b

La cuestión ahora, es averiguar cuanto ha afectado este error de la carrera de la pala a la altura de ola generada. Para esto, se han calculado las alturas de ola que se tendría que haber generado aplicando la función de transferencia teórica según se exponen en el apartado 4.2. De este modo, se puede comparar la altura de ola que se quería generar, con la altura de ola que se tendría que haber generado para la carrera que realmente se produjo, y con la altura de ola que realmente se midió.

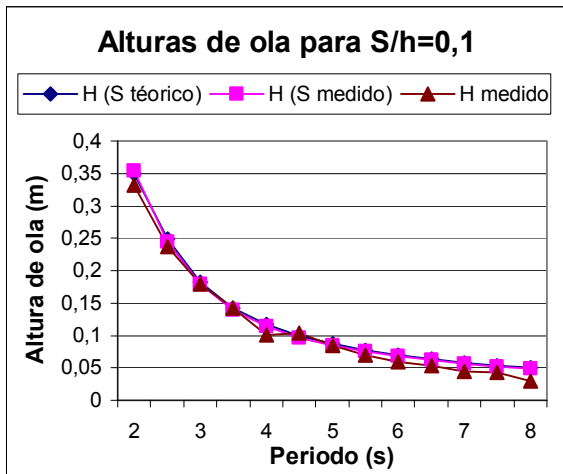


Figura 5.13

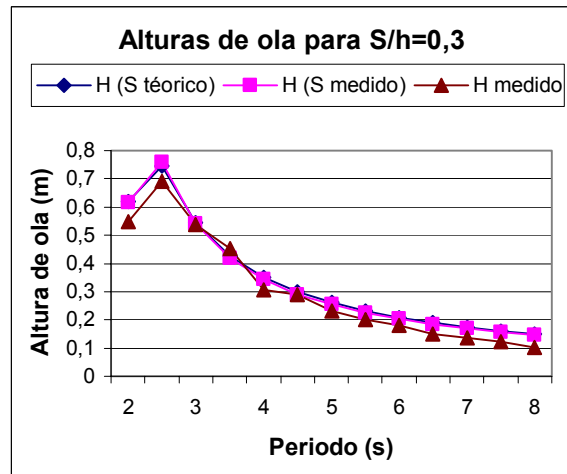


Figura 5.14

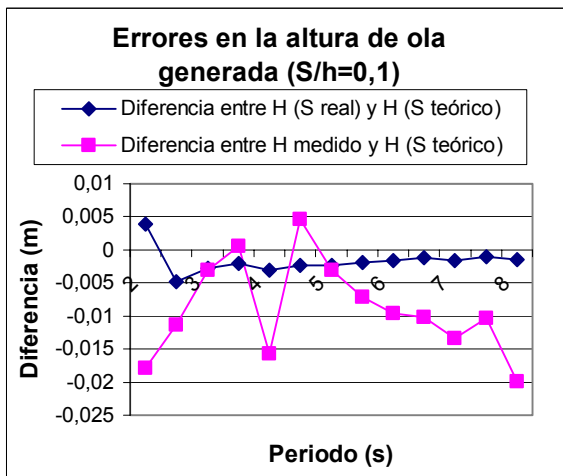


Figura 5.15

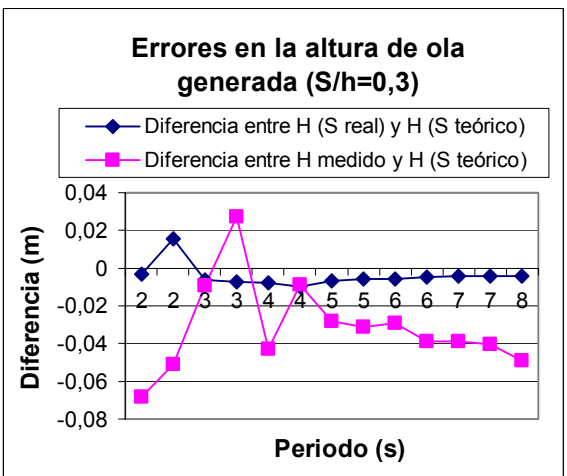


Figura 5.16

Como se ha podido comprobar en las figuras 5.15 y 5.16, la existencia de un error relativo del -3% con respecto al valor teórico en el posicionamiento de la pala, transmite un error a la altura de ola en general despreciable.

En conclusión puede decirse que aunque la pala responde suficientemente bien (cumple el desplazamiento pedido), el motivo principal por el cual la altura de ola medida no se corresponde con el valor teórico es debido a que la función de transferencia utilizada no es la real propia del sistema utilizado (ver apartado 4.2). De hecho ésta debe entenderse como una aproximación. Dicha función de transferencia teórica debería acomodarse para la pala del canal CIEM.

5.7.2. Error en la medición de los sensores

Los sensores situados frente a la pala (calado $h=2,62m$): WG0, WG1 y WG2

El valor de la altura y periodo del oleaje generado se ha calculado haciendo la media de los valores de los tres sensores más cercanos a la pala (WG0, WG1 y WG2). En condiciones ideales (suponiendo reflexión nula) los tres sensores tendrían que medir las mismas alturas de ola, pero esto no es así. Seguidamente se expone la diferencia que ha habido entre la medida de cada sensor y la media de los tres para cada ensayo. Esto nos da una idea del error de medición de los sensores. A continuación se exponen los errores en las mediciones de la altura de ola $H_{1/3}$, tanto en las carreras de $2e/h=0,1$ como en $2e/h=0,3$, para cada uno de los ensayos realizados, en todo su registro y mediante el método del paso por cero descendente:

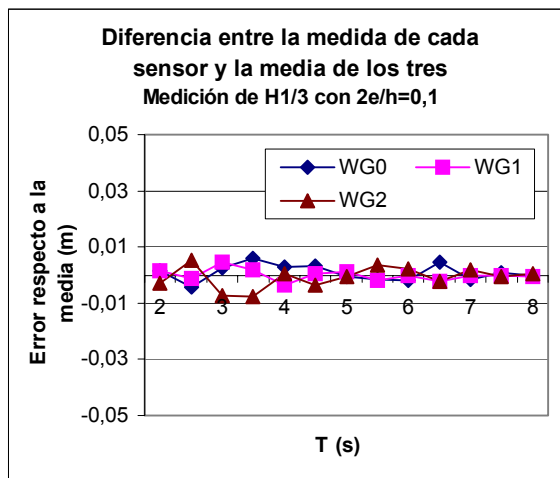


Figura 5.17

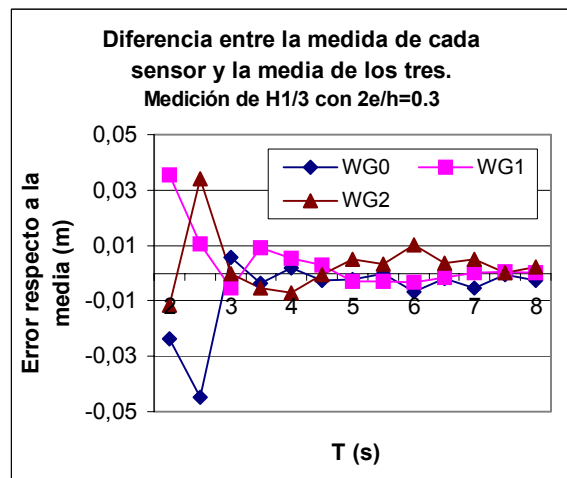


Figura 5.18

Errores en las mediciones de los periodos, tanto en las carreras de $2e/h=0,1$ como en $2e/h=0,3$, para cada uno de los ensayos realizados:

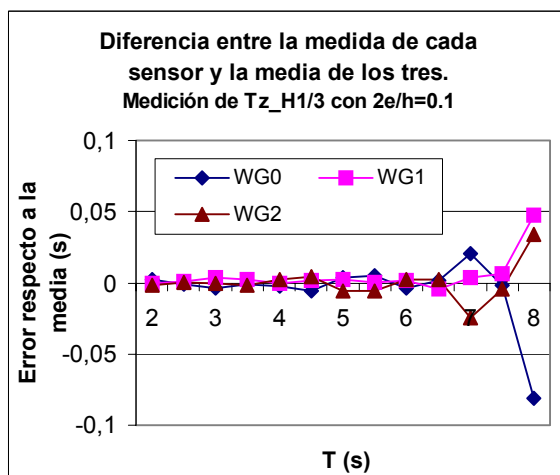


Figura 5.19

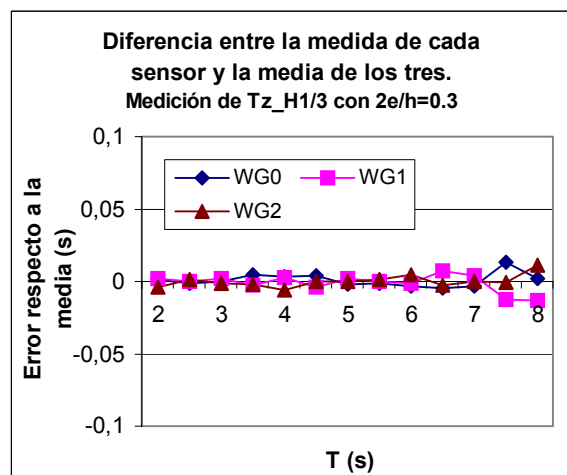


Figura 5.20

Errores relativos -de las mediciones de la altura de ola- de cada sensor respecto a la media de los tres, tanto en las carreras de $2e/h=0,1$ como en $2e/h=0,3$, para cada uno de los ensayos realizados:

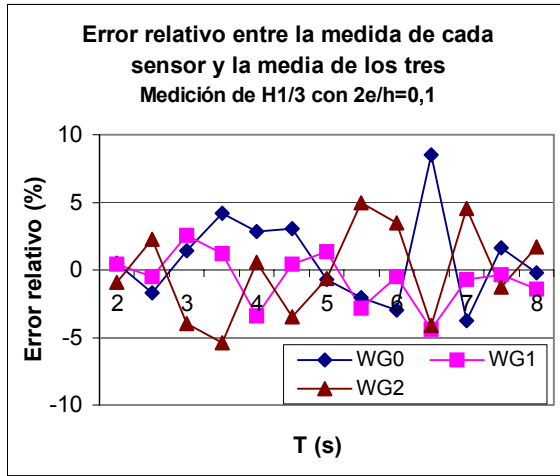


Figura 5.21

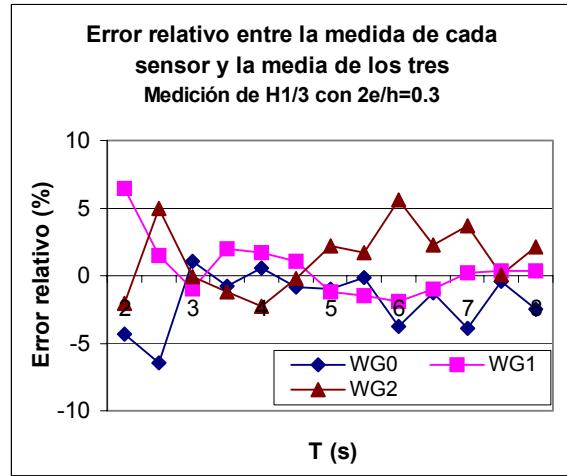


Figura 5.22

Errores relativos -de las mediciones de los periodos- de cada sensor respecto a la media de los tres, tanto en las carreras de $2e/h=0,1$ como en $2e/h=0,3$, para cada uno de los ensayos realizados:

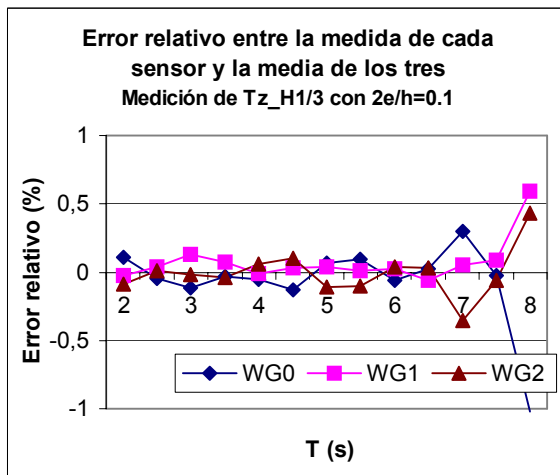


Figura 5.23

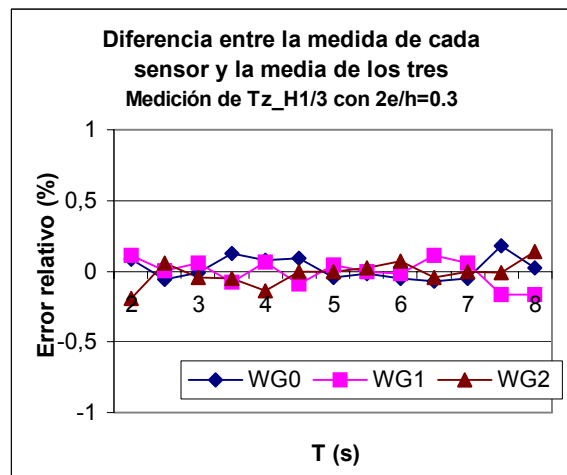


Figura 5.24

De nuevo, los resultados (figuras 5.17-5.24) confirman que la capacidad de trabajo de la pala se comporta mejor para periodos de oleaje por debajo de los 6 segundos, especialmente si se pretende generar alturas de ola muy pequeñas (ver anejo IV).

Existe una variabilidad en la medida de la altura de ola entre los sensores WG0, WG1 y WG2 de un $\pm 5\%$. Esta variabilidad es debida al propio sensor, al sistema de adquisición, a la calibración de cada sensor, a las irregularidades del canal (fondo, paredes) y a la posible existencia de reflexión. De todos modos, aunque la reflexión esté presente, esta pequeña variabilidad es un indicador de que la reflexión es pequeña.

Por otro lado, como era de esperar, la medición del periodo entre los sensores prácticamente no varía. Éstos resultados podían ser previsibles a partir de las figuras 5.5 y 5.6, donde la diferencia entre los valores teóricos y medidos era mayor en la medición de los periodos que en la de las alturas de ola.

Los sensores situados lejos de la pala (calado 1,5m): WG5, WG6 y WG7

Para comprobar el funcionamiento de los otros tres sensores de superficie, se ha elaborado el mismo estudio para WG5, WG6 y WG7.

Errores en las mediciones de la altura de ola, tanto en las carreras de $2e/h=0,1$ como en $2e/h=0,3$, para cada uno de los ensayos realizados:

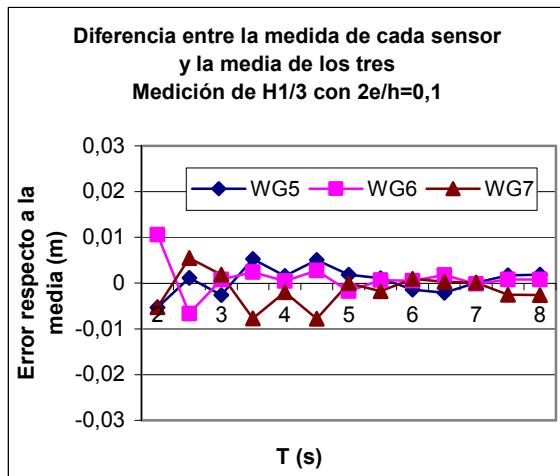


Figura 5.25

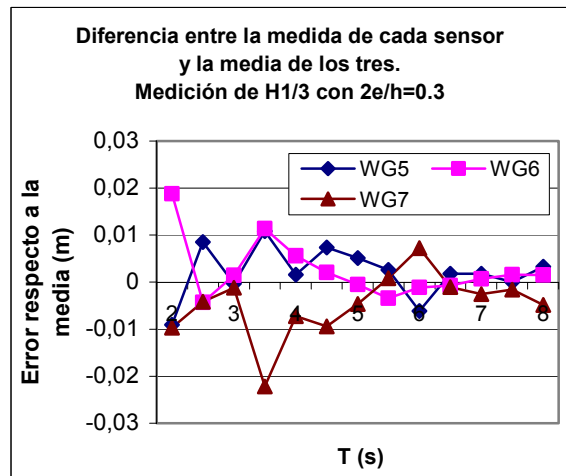


Figura 5.26

Errores en las mediciones de los periodos, tanto en las carreras de $2e/h=0,1$ como en $2e/h=0,3$, para cada uno de los ensayos realizados:

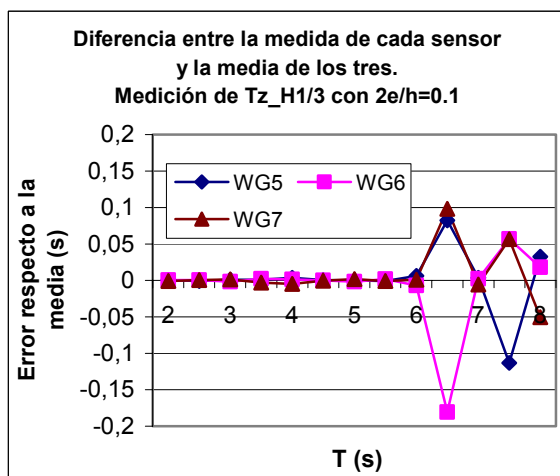


Figura 5.27

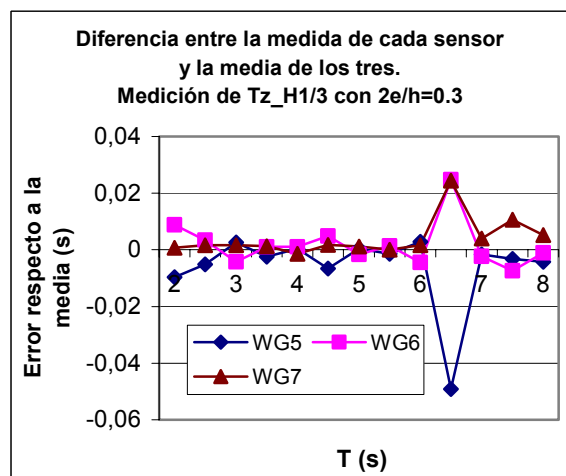


Figura 5.28

Errores relativos -de las mediciones de la altura de ola- de cada sensor respecto a la media de los tres, tanto en las carreras de $2e/h=0,1$ como en $2e/h=0,3$, para cada uno de los ensayos realizados:

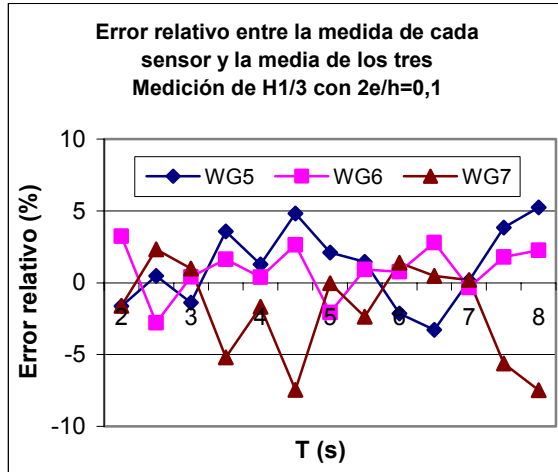


Figura 5.29

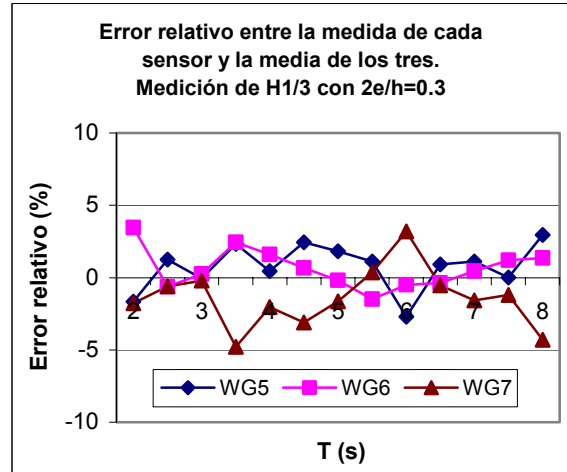


Figura 5.30

Errores relativos -de las mediciones de los periodos- de cada sensor respecto a la media de los tres, tanto en las carreras de $2e/h=0,1$ como en $2e/h=0,3$, para cada uno de los ensayos realizados:

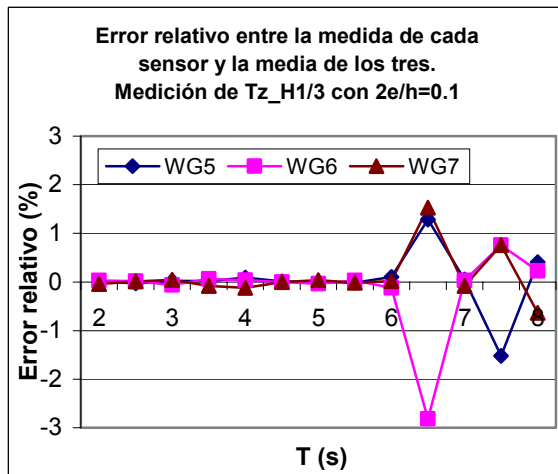


Figura 5.31

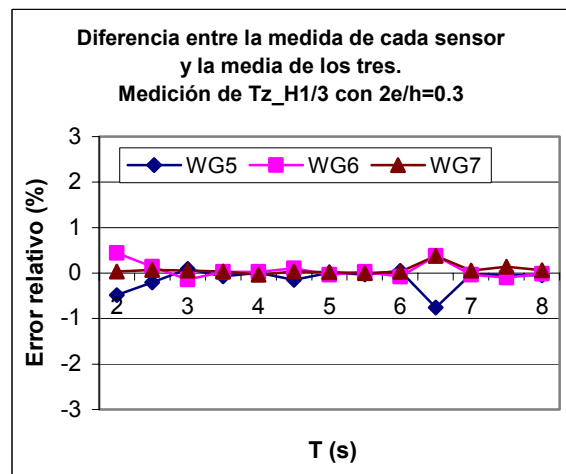


Figura 5.32

Como en el caso de los sensores WG0, WG1 y WG2, para condiciones inferiores a 6 segundos la medición del periodo entre los sensores WG5, WG6 y WG7 prácticamente no varía. En cambio, las mediciones de las alturas de ola que perciben los sensores varían entre si también en este caso un $\pm 5\%$. Estos errores son muy próximos a los medidos en los sensores WG0, WG1 y WG2.

Cabe destacar que para periodos superiores a los 6 segundos aparecen errores significativos en la medición del periodo. Como en el ensayo 01CAL65, donde el periodo del sensor WG6 diverge de la media algo menos de 0,2 segundos. Esto es

provocado por los errores que acarrea trabajar con amplitudes muy pequeñas en una pala como la del canal CIEM y con periodos elevados. La reflexión actúa con más fuerza y la ola se deforma (Ver Anejo IV). Entonces el sistema de análisis de paso por cero descendente puede dar valores ligeramente erróneos. De todos modos, este ensayo utiliza una carrera muy pequeña junto a un periodo elevado, características que no se dan en los ensayos con dique, y se considera como un error puntual y fuera del rango de trabajo.

5.7.3. Repetitividad de los ensayos

A continuación se analiza la fiabilidad de los ensayos. En condiciones ideales, si se repitieran varias veces un ensayo, éste tendría que obtener siempre los mismos datos. Pero en la realidad no es así. Para este análisis se repitió 5 veces el ensayo 01CAL30, que corresponde a una carrera de $2e/h=0.1$ y a un periodo de oleaje constante de 3.0 segundos. Los 5 ensayos se han nombrado con las siglas S, A, B, C y D. Cabe destacar que el ensayo S fue realizado por la mañana, mientras que los ensayos A, B, C y D fueron realizados seguidamente por la tarde, después de efectuar una parada del sistema al mediodía. En ambos casos se utilizó la misma calibración.

Los sensores situados frente a la pala: WG0, WG1 y WG2

A continuación se exponen las mediciones de los sensores WG0, WG1 y WG2 para cada una de las repeticiones (S, A, B, C y D), y para la media total de los 5 ensayos.

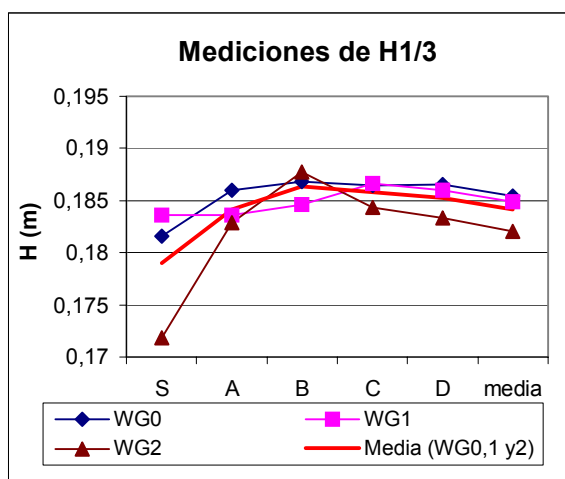


Figura 5.33

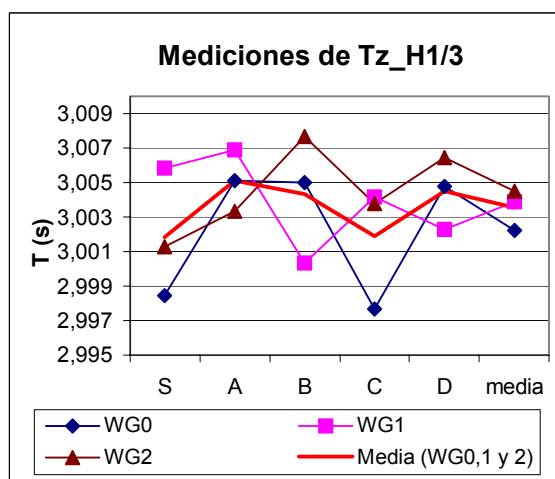


Figura 5.34

En la figura 5.33 se aprecia una anomalía en el comportamiento del sensor WG2 durante el ensayo S. Se ha decidido arrastrar esta anomalía aun conociendo a priori que efectuará negativamente al resultado pero, en contraposición, será un resultado más realista con las condiciones experimentales en general.

Lo que interesa en este apartado es ver como varia la medida de cada ensayo respecto a la media de los 5. La medida de cada ensayo se calcula como la media de WG0, WG1 y WG2.

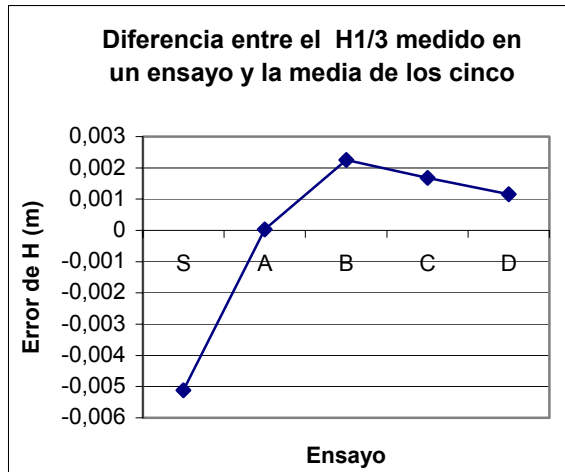


Figura 5.35

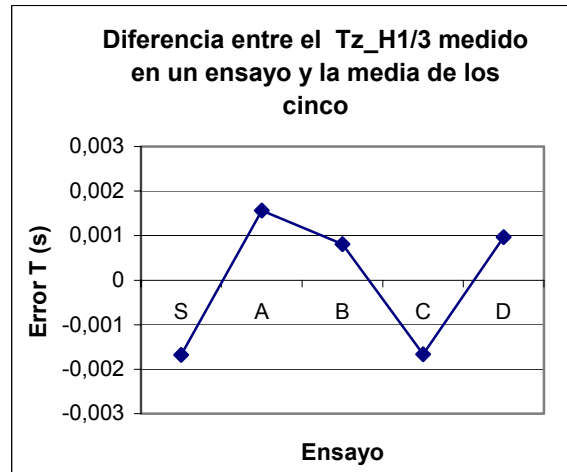


Figura 5.36

A continuación se exponen los errores relativos de la medición de cada ensayo (S, A, B, C, D) respecto a la media de los cinco.

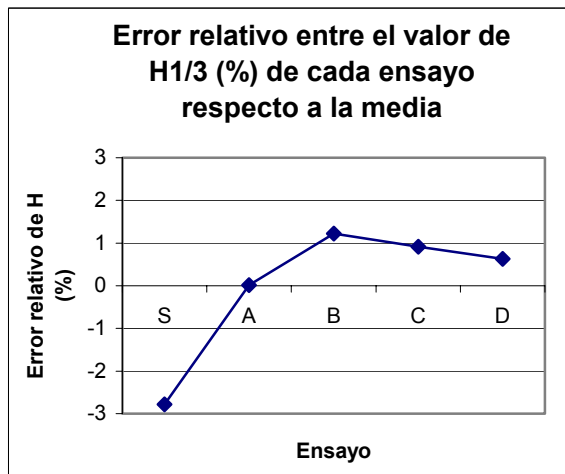


Figura 5.37

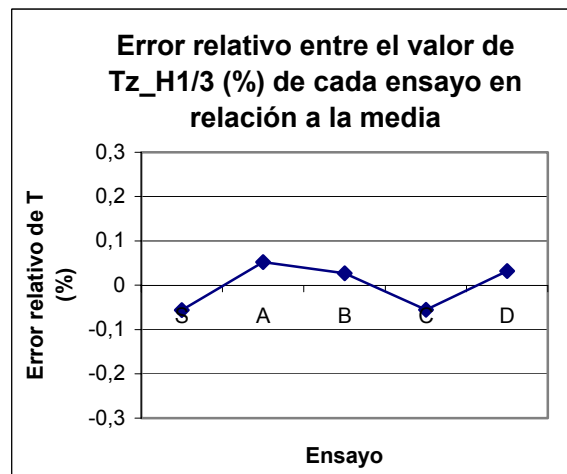


Figura 5.38

En la medición de la altura de ola, los resultados de los ensayos no difieren entre si más de un 4 %, aunque sin contar el caso de la anomalía (ver figura 5.33, sensor WG2 del ensayo S) se estaría por debajo del 1%. Por tanto, sin la anomalía la diferencia entre ensayos repetidos estaría por debajo de los 2mm. En el caso de la medición de los periodos, los resultados no difieren entre ellos más de un 0,1%.

Los sensores situados frente al dique: WG5, WG6 y WG7

A continuación se exponen las mediciones de los sensores WG5, WG6 y WG7 para cada una de las repeticiones (S, A, B, C y D), y para la media total de los 5 ensayos.

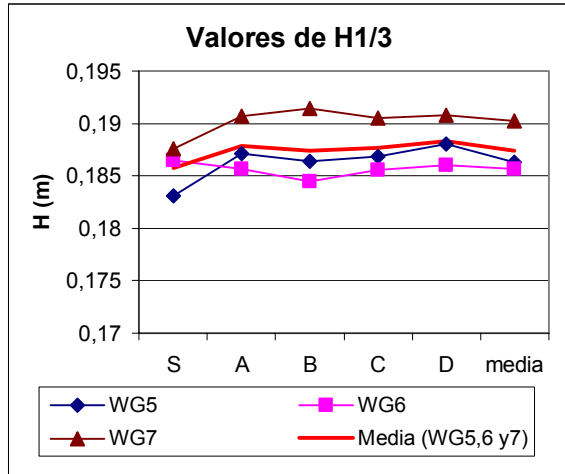


Figura 5.39

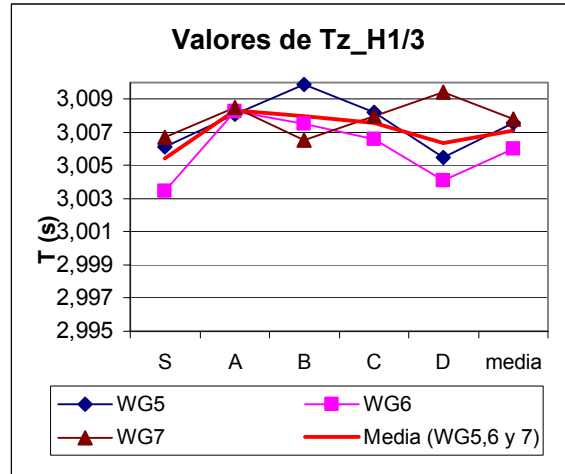


Figura 5.40

Lo nos interesa en este apartado es ver como varia la medida de cada ensayo respecto a la media de los 5. La medida de cada ensayo se calcula como la media de WG5, WG6 y WG7.

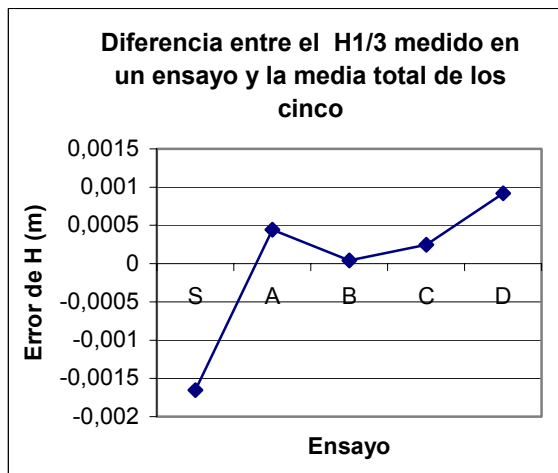


Figura 5.41

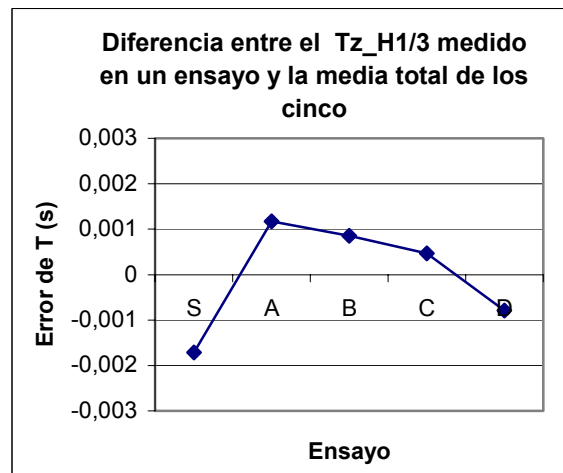


Figura 5.42

A continuación se exponen los errores relativos de la medición de cada ensayo (S, A, B, C, D) respecto a la media de los cinco.

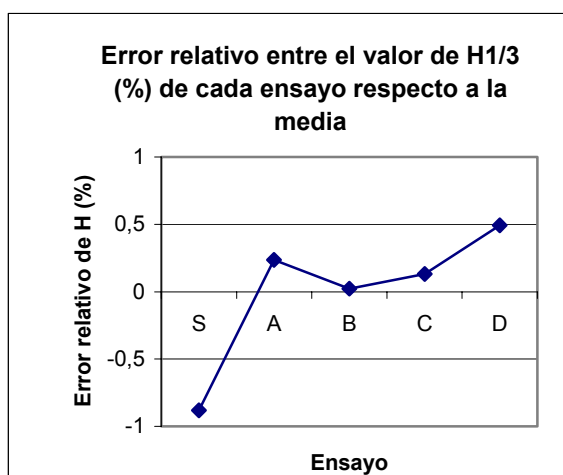


Figura 5.43

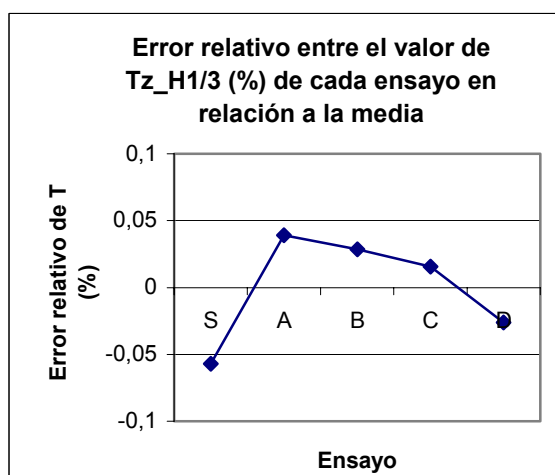


Figura 5.44

Lejos de la pala, en la medición de la altura de ola, los resultados de los ensayos no difieren entre sí más de un 2 %. En el caso de la medición de los periodos, los resultados no difieren entre ellos más de un 0,1%. Con estos datos puede comprobarse que la variabilidad de los datos de los sensores alejados de la pala generadora es menor que en los situados cerca de ésta.

En las gráficas anteriores se ha podido comprobar que el ensayo S difiere más del resto, y que los ensayos A, B, C y D obtienen resultados muy parecidos entre ellos. Esto es debido al hecho de que por un lado se realizó primeramente el ensayo S, y por otro lado debido al comportamiento anómalo del sensor 2 en este ensayo S. Posteriormente al ensayo S, y tras una parada operativa del sistema, se efectuaron seguidamente los ensayos A, B, C y D.

5.7.4. Error producido por la reflexión en la playa

Los ensayos con playa disipativa tienen la función de comprobar la fiabilidad del sistema de generación y medición del oleaje. El hecho de la utilización de la playa es minimizar al máximo los efectos de la reflexión. Esto es necesario ya que se está midiendo la fiabilidad de la pala y de los sensores mediante un oleaje que se considera como el incidente en la estructura.

En este apartado se pretende medir mediante el método de Mansard y Funke (1980) la reflexión en la playa para comprobar que realmente ésta cumple su función; y que los datos registrados pueden ser considerados como los de un oleaje incidente, y no como la superposición de un incidente con un reflejado.

El método de Mansard y Funke necesita los datos de tres sensores de superficie. Como el canal CIEM dispone de seis, se han obtenido dos cálculos de la reflexión, uno mediante los datos proporcionados por los sensores WG0, WG1 y WG2 (cerca de la pala generadora y en una zona del canal con calado de 2,62 metros) y otro

proporcionado por los sensores WG5, WG6 y WG7 (cerca de la playa disipativa y con un calado de 1,5 metros). La ventaja de los datos de los sensores cercanos a la pala es que el oleaje generado puede ser más regular y preciso debido a que la fricción por fondo no ha tenido tanto tiempo para actuar. Pero por otro lado los sensores cercanos al dique registran de una manera más fiable el oleaje que realmente incide contra la estructura (un oleaje que puede aperiarse y sufrir asomeramiento a medida que se acerca al dique, tal y como puede comprobarse en el anejo I).

Ensayo	Valores teóricos		Cálculo reflexión (WG0, WG1 y WG2)		Cálculo reflexión (WG5, WG6 y WG7)	
	T teórica	H teórica	Kr (%)	Desfase	Kr (%)	Desfase
01CAL20	2	0,35	6,8	4,75	8,2	5,14
01CAL25	2,5	0,2486	3,6	4,9	1,4	4,95
01CAL30	3	0,182	2	6,15	5,4	4,99
01CAL35	3,5	0,142	7,3	6,25	4,1	6,18
01CAL40	4	0,117	1,9	6,14	4	6,08
01CAL45	4,5	0,0992	8,6	5,16	4,6	6,03
01CAL50	5	0,087	5,1	4,16	5,1	5,52
01CAL55	5,5	0,077	3,6	6	7,2	4,2
01CAL60	6	0,0692	8,5	4,11	6,3	3,29
01CAL65	6,5	0,063	3,3	4,19	3,9	4,29
01CAL70	7	0,058	14,8	4,42	5,2	6,22
01CAL75	7,5	0,0536	9,8	5,95	10,7	5,58
01CAL80	8	0,05	11,1	4	16,7	5,02

Ensayo	Valores teóricos		Cálculo reflexión (WG0, WG1 y WG2)		Cálculo reflexión (WG5, WG6 y WG7)	
	T teórica	H teórica	Kr (%)	Desfase	Kr (%)	Desfase
03CAL20	2	0,618	8,7	4,39	9,5	5,04
03CAL25	2,5	0,744	5,4	4,77	8,5	4,84
03CAL30	3	0,546	1,8	6,15	7,1	5,66
03CAL35	3,5	0,427	7,1	6,25	6,5	6,1
03CAL40	4	0,351	2,4	6,19	4,5	6,19
03CAL45	4,5	0,2988	7,1	5,33	3,5	5,87
03CAL50	5	0,2606	4,4	4,67	3,5	5,74
03CAL55	5,5	0,231	1,1	5,93	4,3	4,46
03CAL60	6	0,2084	6,5	4,15	6,3	3,29
03CAL65	6,5	0,1896	6,2	4,13	1,4	5,65
03CAL70	7	0,174	12,3	4,62	4	5,85
03CAL75	7,5	0,161	5,5	5,79	8,6	5,12
03CAL80	8	0,15	9,4	3,8	12,3	4,74

Tabla 5.4. Medición flexión mediante el método de Mansard y Funke

Como puede observarse, los datos de la reflexión no coinciden a la perfección. Esto es una prueba más de la dificultad de obtener un valor fiable, y a las limitaciones de la metodología y su implementación en un programa informático. Por tanto, estos valores deben interpretarse como orientativos y no exactos.

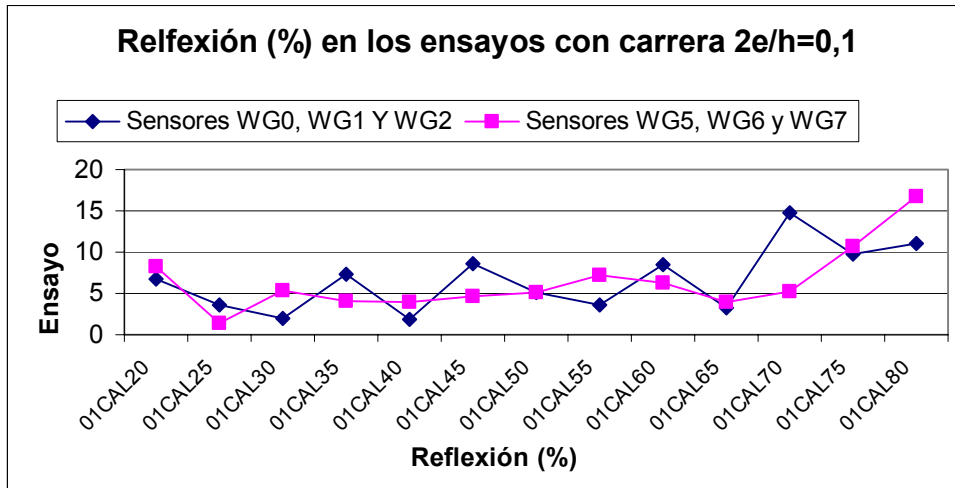


Figura 5.45. Reflexión según Mansard y Funke para los ensayos con carrera 2e/h=0.1

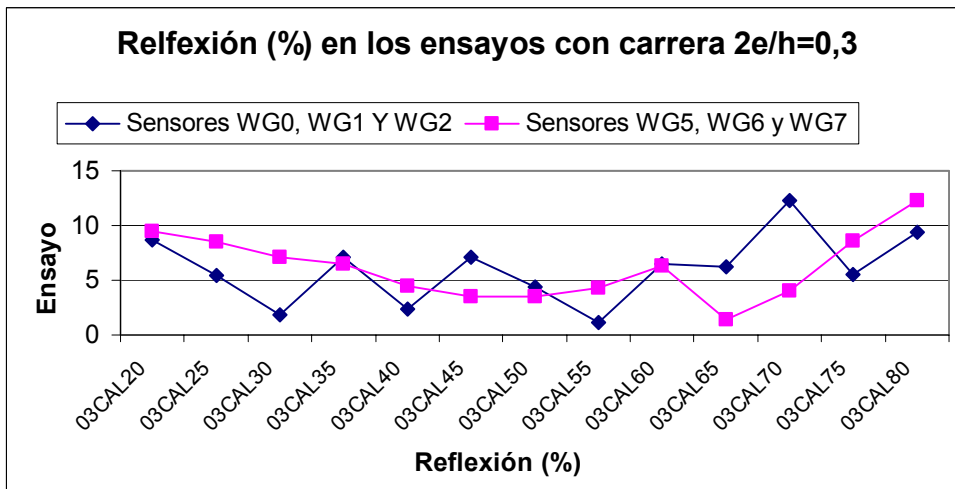


Figura 5.46. Reflexión según Mansard y Funke para los ensayos con carrera 2e/h=0.3

En primer lugar, tanto la figura 5.45 como 5.46 deben ser interpretadas en el rango por debajo de los 6 segundos de periodo, por las observaciones ya efectuadas en apartados anteriores.

Bajo esta premisa, de las figuras 5.45 y 5.46 se observa por un lado una mayor variabilidad en los sensores cercanos a la pala, que en los alejados. Cerca de la pala siempre se generan ondas que se disipan a medida que se alejan del actuador (ver apartado 4.2.1, página 20, formula 4.31). De este modo, la reflexión de la playa

disipativa queda mejor expuesta por la evaluación de los sensores WG5, WG6 y WG7.

La reflexión obtenida es en general relativamente baja, y en consonancia con lo esperado teóricamente, siempre por debajo del 10% y como media entorno al 5%.

Para el rango de ensayos con periodos superiores a 6 segundos, debe tenerse en cuenta además que:

- Se produce un gran aumento en el error relativo de las mediciones, pero no en el absoluto. En los últimos 3 ensayos (01CAL70, 01CAL75, 01CAL80) los sensores WG0, WG1 y WG2 registraron aplicando Mansard y Funke una altura de la ola reflejada de 0'002, 0'004 y 0'005 metros que debido a la pequeña altura de ola incidente se traducían en reflexiones de 5'2, 10'7 y 16 por ciento. Evidentemente un error de milímetros en la medición de un sensor repercute enormemente en el valor de la reflexión calculada.
- Otra posible causa del aumento de la reflexión es debido a que la playa disipativa se calculó para periodos relativamente bajos ($T < 3$ segundos), y por esta razón cuando los periodos aumentan la reflexión también lo hace.

5.7.5. Comprobación de la resonancia

La resonancia es el proceso por el cual la amplitud de una onda estacionaria o casi-estacionaria se ve aumentada debido al efecto de la reflexión. El objetivo de este apartado es comprobar que los periodos utilizados durante la calibración con playa disipativa están alejados de los periodos de resonancia del canal.

Para comprobar la existencia de problemas de resonancia en el canal durante los ensayos de calibración, se ha realizado un pequeño cálculo teórico que luego se ha comprobado con un ensayo.

Cálculo teórico del periodo de resonancia

En un canal de oleaje, si se considera que solamente hay presencia de resonancia longitudinal, entonces se utiliza la siguiente expresión (ver apartado 4.4 de esta tesina):

$$T_n = \frac{2l_x}{n\sqrt{gd}} \quad (4.103)$$

Sabiendo que el canal CIEM tiene una longitud de 72,96 metros hasta donde la superficie del agua en reposo intersecta con la playa disipativa, con un calado de

1.5 m, el periodo de oscilación principal es de $T_x=38,1s$ (para $n=1$) y $T_x=19,0s$ (para $n=2$) y $T_x=12,7$ (para $n=3$).

En el caso de resonancia transversal, los periodos T_m se pueden expresar con $m = 1, 2, 3, \dots$ como:

$$T_m = \frac{2l_y}{m\sqrt{gd}} \quad (4.104)$$

Con lo que se obtiene que el periodo de oscilación principal es de $T_y=1.56s$, habiendo considerado un ancho de 3m y el calado de 1.5m.

Obtención por medio de ensayo del periodo de resonancia

Para la detección de la resonancia se crea un espectro plano de oleaje. Es decir, se genera un oleaje irregular en el que se mantiene constante la altura de ola mientras se va cambiando el periodo.

Por otro lado, el espectro de la carrera de oleaje también tendría que resultar prácticamente plano. Lo que se pretende con la grafica siguiente es comprobar si el espectro de la pala tiene esta forma, y así verificar que el oleaje generado es el adecuado.

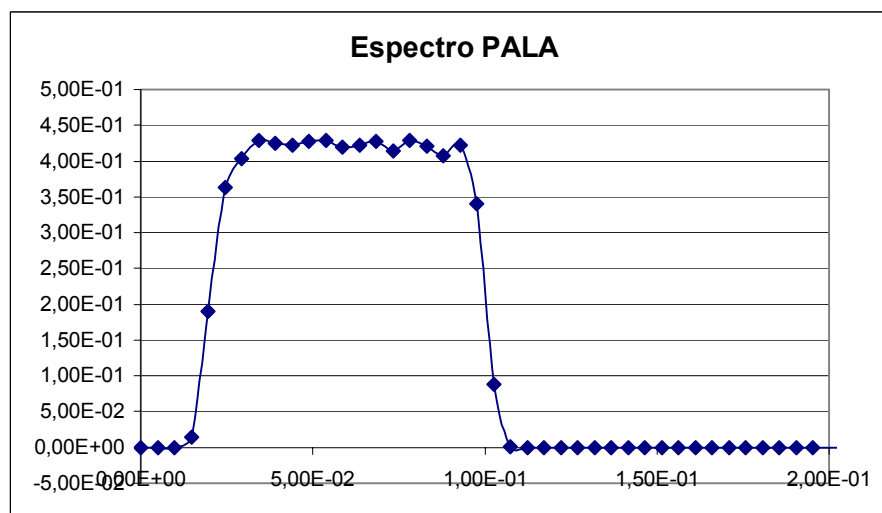


Figura 5.47. Espectro de la carrera de la pala

Gracias a la carrera de la pala se origina un oleaje de altura constante. Si no aparecieran fenómenos de ondas largas, el espectro del oleaje generado tendría que ser plano (como el espectro de la pala). En caso de que se produzca

resonancia, se producirá un pico en el espectro de oleaje, símbolo de un aumento de la energía debido a la resonancia.

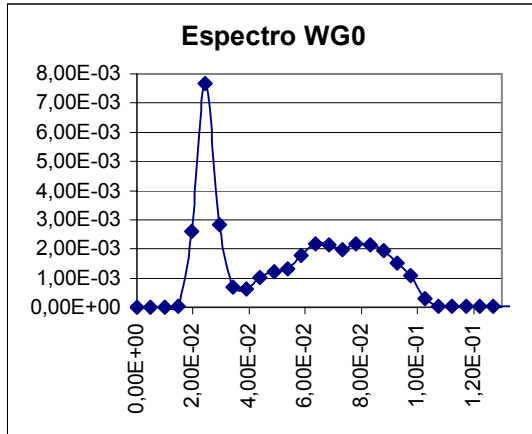


Figura 5.48

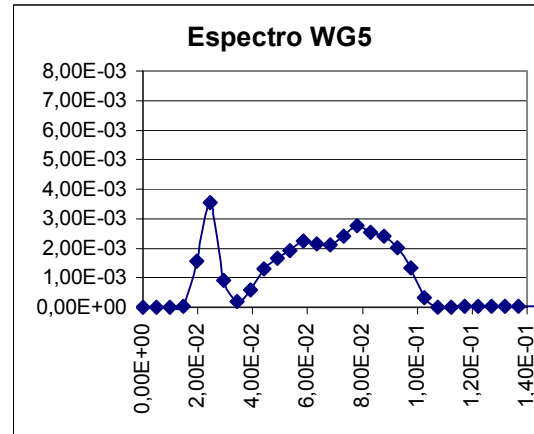


Figura 5.49

A primera vista ya se destaca un pico (el más alto) en el espectro de energía del oleaje, en el periodo $T = 40,9$ segundos. Esta energía tan alta no tiene sentido si no fuera por el fenómeno de la resonancia, ya que con periodos de 40,9 segundos el oleaje generado por la pala tendría que ser de una amplitud pequeña.

Otro segundo pico se produciría en $T = 16,4$ segundos y un tercero en $T = 12,8$ segundos pero con una menor trascendencia.

Conclusiones

Si se compara los resultados teóricos con las simplificaciones adoptadas, con los medidos observamos que se ajustan bastante:

	n=1	n=2	n=3
Cálculo teórico	38,1	19,0	12,7
Ensayo (sensor WG0)	40,9	15,8	12,8
Ensayo (sensor WG5)	40,9	17,0	12,8

Tabla 5.5. Medición de la resonancia

Como los ensayos de calibración con playa disipativa utilizan periodos que no sobrepasan los 8 segundos, es de suponer que no ha habido problemas de consideración de resonancia longitudinal.

Por lo que respecta a la resonancia transversal, el cálculo teórico confirma que ésta se produce con periodos inferiores o iguales a 1,56 segundos. Como los periodos utilizados en la calibración son superiores a 2 segundos también se puede asegurar que no han aparecido problemas de resonancia transversal.

5.7.6. Fiabilidad de la teoría lineal del oleaje.

Hasta ahora se ha supuesto que la teoría que gobierna el comportamiento del oleaje en el canal es la teoría lineal o de pequeña amplitud. Esto es visible en la formulación utilizada para generar el oleaje (apartado 4.2) o en la utilizada para calcular la reflexión (apartado 4.3). Pero la situación que se reproduce en el canal es de aguas intermedias, con lo que la teoría lineal puede alejarse de la realidad, y ser necesarias otras teorías de transmisión y propagación del oleaje.

Por este motivo, se ha considerado oportuno evaluar la validez de la teoría lineal, con el fin tener conocimiento de los errores que ésta puede haber generado.

Evaluación teórica

A partir de la figura 5.50 se puede caracterizar el oleaje generado en cada ensayo, dependiendo de su altura de ola H , su periodo T y su calado d . Es decir, puede conocerse de antemano qué modelo de oleaje es el que mejor se adapta a las condiciones de cada uno de los ensayos:

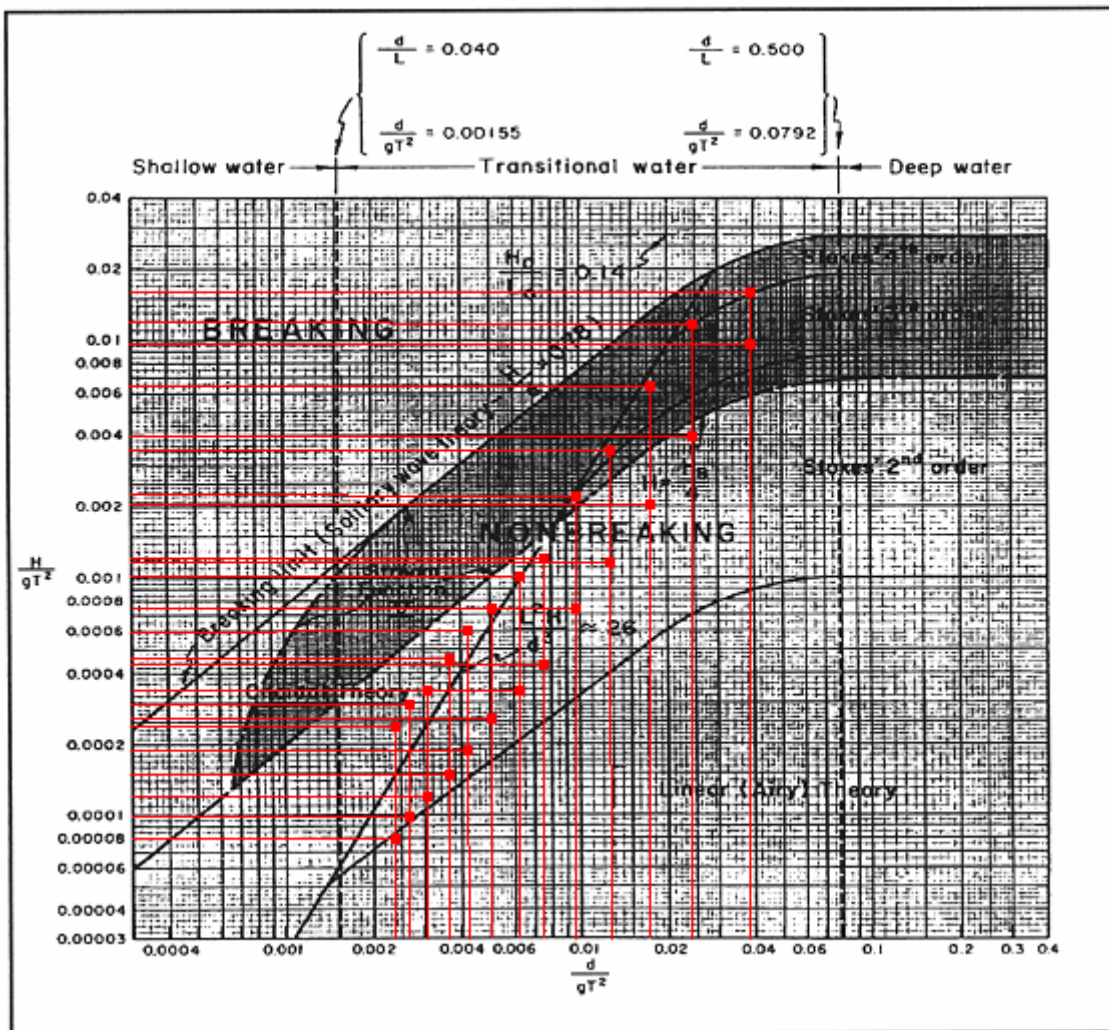


Figura 5.50. Representación matemática solicitada en los ensayos de calibración con playa, para un calado de 1,5 m.

Como puede observarse a partir la gráfica anterior, el oleaje generado en los ensayos de calibración mediante el canal CIEM requiere un modelo no lineal. De hecho, el que mejor se adapta es el de Stokes de segundo, tercer o cuarto orden, dependiendo de la altura de ola ensayada.

Evaluación empírica

La manera más fiable de comprobar la validez de la teoría lineal del oleaje en frente a otras teorías no lineales es comparar la medición de la superficie libre con la teóricas de ambos modelos. Para poder evaluar cada uno de los ensayos se exponen en el anejo IV de esta tesina todos los registros del movimiento de la pala (FEEDBACK) y de la superficie libre del oleaje (sensor WG5) para los ensayos de calibración con playa.

Como ejemplo explicativo, se expone a continuación el registro del ensayo 03CAL25, que permite dar una idea de las divergencias de la teoría lineal en las condiciones de aguas intermedias propias del canal CIEM.

El movimiento de la pala se ha programado para que la ola generada cumpla la teoría lineal (ver apartado 4.2). Por lo tanto, según esta teoría, si el movimiento de la pala es sinusoidal el oleaje también tendría que serlo. Para poder comprobar que realmente el movimiento de la pala ha sido el pedido se ha comparado la medición del desplazamiento de la pala (FEEDBACK), con el movimiento teórico pedido, suponiendo una onda sinusoidal:



Figura 5.51 Fragmento de la carrera de la pala en el ensayo 03CAL25

El resultado que se obtiene es que la traza de la pala cumple la teoría lineal para la que se le ha programado en todos los ensayos de calibración (apartado 4.2).

A 8,20 metros de la pala se encuentra el sensor WG0, que mide el desplazamiento de la superficie libre del agua. El calado en este punto es de 2,62 metros. Unos 53 metros más delante y en una zona del canal con calado de 1,5 metros se encuentra el sensor WG5 (Ver figuras 5.2 y 5.3). A medida que la ola recorre el canal, ésta

siente la fricción del fondo, sufre una elevación por encima del nivel medio y su cresta se agudiza. Cuanto mayor es la altura de ola y menor el calado más diverge la realidad de la teoría lineal. Una teoría no lineal que describe bien el comportamiento del oleaje en estas situaciones es la teoría de Stokes. Ésta teoría no lineal funciona bien el canal CIEM porque las condiciones son de aguas intermedias, y no de profundas como presupone la teoría lineal. Si las condiciones de aguas intermedias fueran más cercanas a las someras sería necesario aplicar la teoría del oleaje cnoidal (ver apartado 4.1.4).

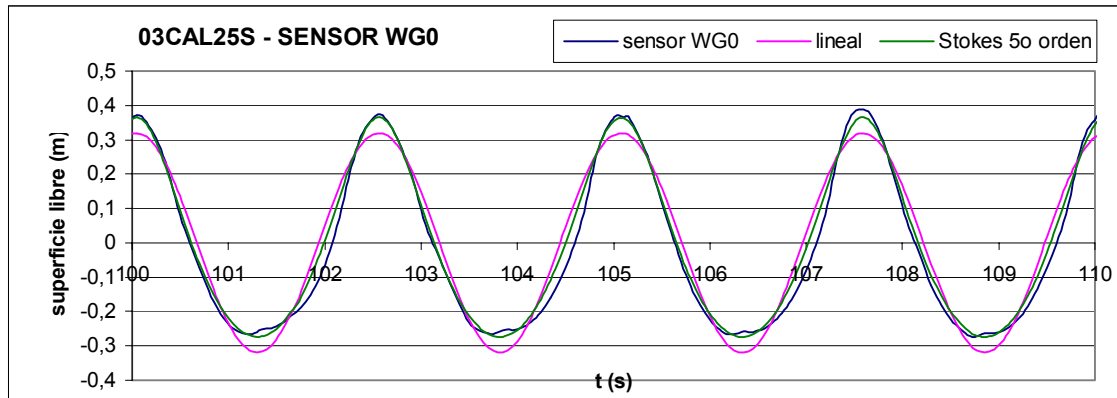


Figura 5.52. Fragmento del registro del ensayo 03CAL25 medido por WG0

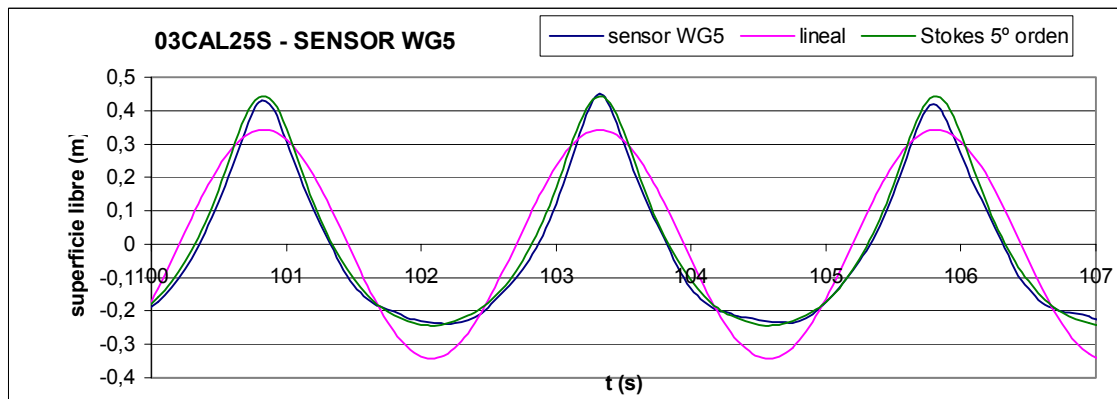


Figura 5.53. Fragmento del registro del ensayo 03CAL25 medido por WG5

A partir de las figuras 5.52 y 5.53 se puede comprobar cómo el oleaje no es simétrico respecto al nivel medio del agua, que a medida que la ola avanza su cresta se agudiza y el seno de ésta se alarga.

Conclusiones

Viendo el resto de ensayos expuestos en el anejo IV se confirma que a medida que la altura de ola del ensayo disminuye más sinusoidal es su superficie libre. Pero por otra parte, los ensayos representativos de los ensayos de destrucción de dique en talud corresponden al oleaje de amplitud grande, y por tanto su

comportamiento está mucho más cercano al descrito por la ecuación de Stockes de 3er orden que a la teoría lineal. Pero, ¿como puede afectar esto a los ensayos y a la generación?

La generación no tiene porque verse afectada. Se puede proponer realizar una generación que cree oleaje mediante la teoría de Stockes. Pero como se puede comprobar a partir de las gráficas 5.52 y 5.53, el oleaje enseguida se modifica y adquiere la forma típica de Stockes de 3er orden, aunque la generación se haya diseñado para una superficie libre típica del oleaje lineal. Por lo tanto prácticamente no se ganaría gran cosa respecto a generar un oleaje más cercano a las condiciones propias del canal. Lo que quizá se lograría es aumentar la fiabilidad de la altura de ola.

A partir del Anejo IV puede observarse cómo las olas de amplitud pequeña y periodo largo pierden la forma y el registro adquiere cierta forma de sierra, seguramente por estar fuera del rango de trabajo de la pala. Esto provoca que el método de análisis por paso por cero descendente genere errores, tanto en la medición de la altura de ola como en la del periodo.