

6. Calibración con dique

En ensayos realizados en una fase anterior del mismo convenio se observó que los áridos verificaban unos ciclos no cerrados de carga y descarga en función del parámetro de Iribarren. Ante la duda del efecto de la variación del talud por la acción del oleaje sobre este parámetro, se decidió que inicialmente se “calibrara” la reflexión del dique bajo distintos valores de Iribarren manteniendo el talud fijo, y así tener un valor referente. Para estabilizar el talud se utilizó un mallazo de gallinero.

6.1. Características del dique

Para la realización de los ensayos se ha llevado a cabo la construcción de un dique en talud con la geometría mostrada en la figura siguiente, con un manto principal estabilizado con un mallazo (red de gallinero). El manto principal consta de dos capas, el filtro de tres capas y el resto lo conforma el núcleo. Las características de los materiales utilizados se describen en el apartado siguiente.

La sección del dique es no simétrica, con una cota de coronación de 233.6 cm, con un talud ‘lado mar’ de 1.5H:1V y un talud ‘lado tierra’ de 1.25H:1V. Las secciones utilizadas en el resto de los laboratorios que han participado en el mismo Convenio, se corresponden geoméricamente con una escala 1/3 al modelo ensayado en el canal CIEM de la UPC.

Los elementos de la capa inferior del manto principal se han pintado de blanco. En la capa superior se emplearon cinco colores distintos: una zona central (correspondiente a la zona de mayor erosión) separada en cuatro franjas, que son en orden ascendente de color magenta, verde, rojo y azul; y dos franjas por encima y debajo de estas cuatro de colores amarillo y cian respectivamente. El objetivo de colorear las piezas era tener una mayor definición a la hora de poder registrar los movimientos y desplazamientos de los elementos durante los ensayos de estabilidad a realizarse más adelante.

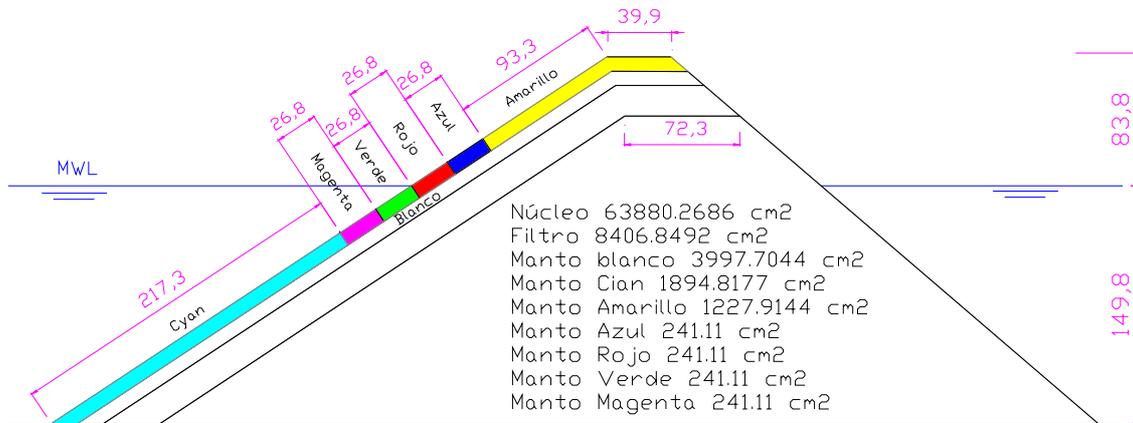


Figura 6.1. Estructura del dique de escollera natural

Todo el material es calcáreo y proviene de la cantera que posee la empresa Promsa en el Garraf, provincia de Barcelona. El núcleo ocupa aproximadamente 19.2 m³ (80% del volumen total de la obra), y se solicitó una granulometría 20/40 para su material. Para el filtro (2.5 m³) se solicitó una granulometría 40/60 mientras que para el manto (2.4 m³), la selección tuvo que hacerse manualmente de un acopio previo. Los elementos a seleccionar manualmente debían tener un peso comprendido entre 1701 y 2079 gramos aproximadamente (una variación del $\pm 10\%$ respecto a W50 = 1890 gramos). La densidad del material del manto es de 2.68 ton/m³.

El material se transportó en camión y en *big-bags* hasta el laboratorio. Una vez recibido se procedió a su análisis granulométrico a partir de pesar muestras de los materiales.

Para obtener una permeabilidad similar en todas las secciones de cada laboratorio, se adoptó considerar el número de piezas a colocar en el manto en función de una porosidad fijada en 0.4 y densidad 2.7 ton/ m³.

A continuación se muestran las granulometrías (pesos) obtenidos en la UPC, y utilizadas en la construcción del dique.

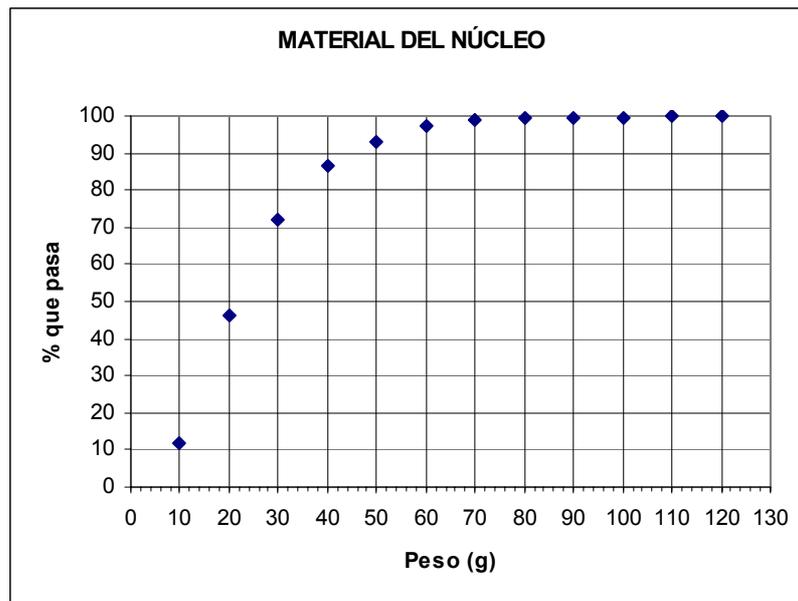


Figura 6.2. Distribución de pesos núcleo

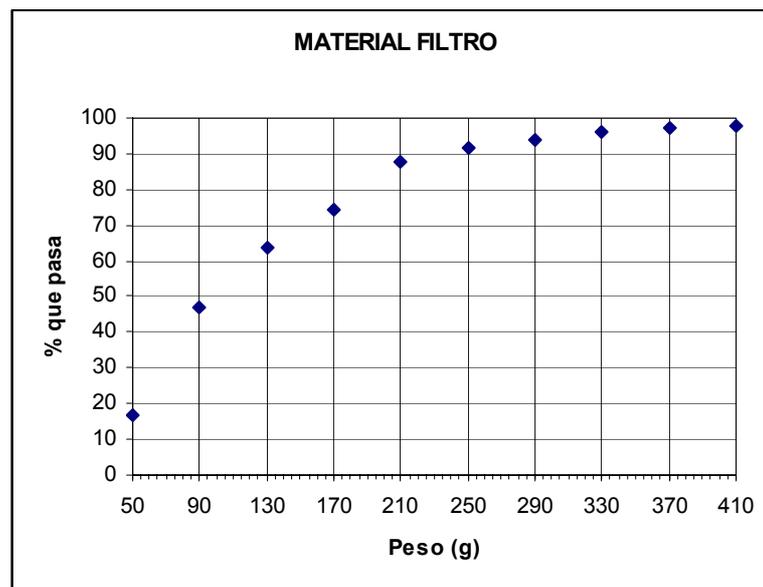


Figura 6.3. Distribución de pesos filtro

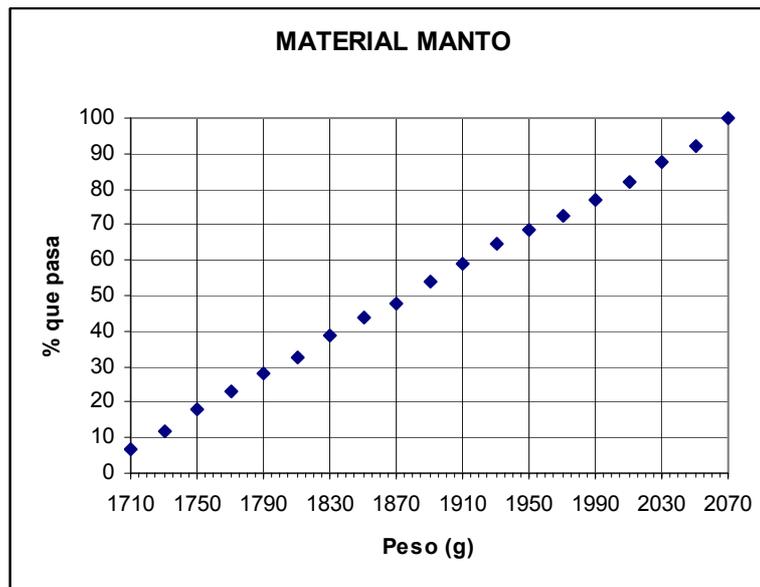


Figura 6.4. Distribución de pesos manto

El número de piezas de cada color a colocar en el manto principal se ha calculado como sigue:

$$N_{\text{elementos}} = \frac{(1-P) \cdot V_T}{D_{50}^3} \quad (6.1)$$

Siendo:

- $P=0.4$ la porosidad
- V_T volumen total del grupo de elementos
- $D_{50}^3=(W_{50}/\rho)^{1/3}$ diámetro equivalente

A partir de los volúmenes de cada grupo de elementos del manto principal expuestos en la figura 6.1 se obtiene que el número de piezas a colocar son $N_{\text{blancas}}=142$, $N_{\text{cian}}=478$, $N_{\text{amarillo}}=310$, $N_{\text{azul}}=61$, $N_{\text{rojo}}=61$, $N_{\text{verde}}=61$ y $N_{\text{magenta}}=61$.

6.2. Descripción de los ensayos para calibrar la reflexión

Durante los ensayos de estabilidad el oleaje modificará la estructura y por tanto sus coeficientes de reflexión. Es decir, la reflexión será dinámica, y dependerá del tiempo. Los valores de la reflexión y el número de Iribarren de la estructura son las principales variables con las que se buscará relacionar la estabilidad del dique. Lo que se pretende mediante estos ensayos de calibración es determinar los valores de reflexión estáticos propios del dique cuando este se mantiene inalterado. Para ello se inmovilizarán los elementos del manto mediante una

mallá. De este modo podemos tener conocimiento de la reflexión que corresponde a la estructura, determinar que método de cálculo es el que puede conseguir mejores resultados y que limitaciones tendremos.

Los ensayos a realizar constan de oleajes regulares fijados por convenio y para abarcar los diferentes valores del parámetro de Iribarren que se aplicarán a los ensayos de estabilidad.

El número de Iribarren se calcula mediante la inclinación del dique en talud y la altura y longitud de ola incidente en aguas profundas del modo que sigue:

$$I_r = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L_{0p}}}} \quad (6.2)$$

Utilizando los periodos y alturas de ola definidos como los teóricos (Iribarren teórico) y los periodos y alturas de ola $H_{1/3}$ medidas (Iribarren medido). El Iribarren mínimo se obtiene a partir de las alturas de ola máximas teóricas que la pala puede generar en las condiciones de los ensayos.

Ensayo	Valores teóricos		
	T teórica (s)	H teórica (m)	Iribarren
Rt1h1	1,73	0,231	3,00
Rt1h2	1,73	0,307	2,60
Rt1h3	1,73	0,449	2,15
Rt2h1	2,6	0,308	3,90
Rt2h2	2,6	0,458	3,20
Rt2h3	2,6	0,521	3,00
Rt2h4	2,6	0,598	2,80
Rt2h5	2,6	0,751	2,50
Rt3h1	3,46	0,296	5,29
Rt3h2	3,46	0,449	4,30
Rt3h3	3,46	0,607	3,70

Tabla 6.1. Curvas de estudio

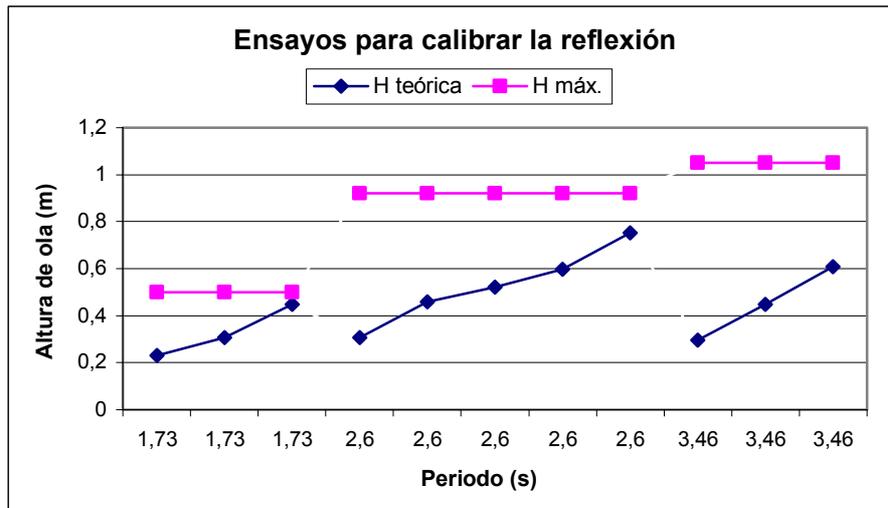


Figura 6.5. Ensayos a realizar

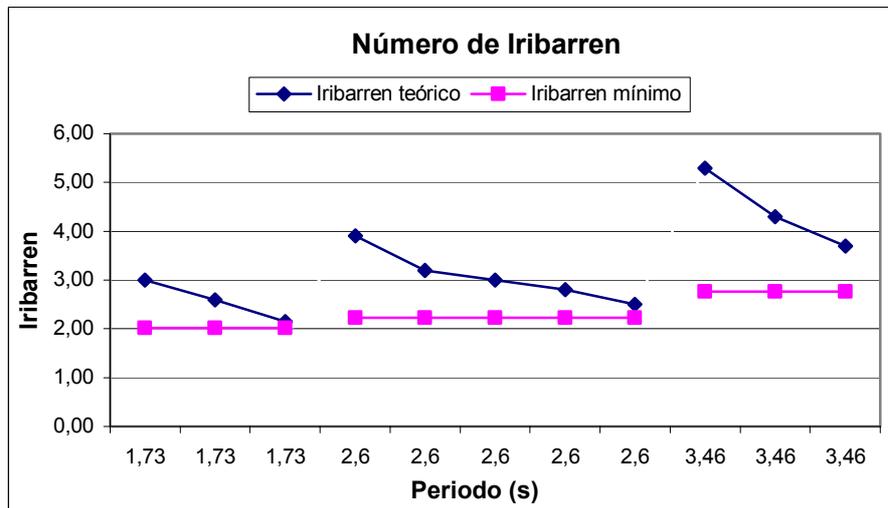


Figura 6.6. Ensayos a realizar

En los ensayos descritos no se han tenido en cuenta aquellos en los que se producía rotura del oleaje frente a la pala, debido a que esa disipación de energía repercute en una disminución de la energía del oleaje y los cálculos de la reflexión no serían fiables.

6.3. Descripción de los ensayos para analizar la resonancia

Para la detección de la resonancia es necesario realizar un nuevo ensayo. Se crea un espectro plano de oleaje, tal como se realizó en el análisis de resonancia con playa. Se genera un oleaje irregular en el que se mantiene constante la altura de ola mientras se va cambiando el periodo.

Si no aparecieran fenómenos de ondas largas, el espectro del oleaje generado tendría que ser plano (como aproximadamente 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 producido por un aumento de la altura de ola.

Una vez identificados los dos periodos (T1 y T2) que provocan resonancia, se realizarán dos ensayos de confirmación. En estos ensayos se reproducirá un oleaje regular con los periodos encontrados (T1 y T2) y con una amplitud de ola de 5 cm.

6.4. Posición de los sensores

La posición de los sensores en los ensayos con dique varía respecto a los realizados con la playa disipativa y se fijaron también según convenio. De hecho, su posición está destinada a la medición de la reflexión mediante el método de Mansard y Funke.

El calado de trabajo es el mismo que el empleado posteriormente durante los otros ensayos de estabilidad, es decir, 2.62 metros frente a la pala y 1.5 metros en la posición del dique. El sensor correntímetro se ha colocado en la misma posición que el sensor WG6.

Device Code	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
WG0	825	21	262.0
WG1	870	21	262.0
WG2	980	21	262.0
WG5	3614	21	150.0
WG6	3659	21	150.0
WG7	3769	21	150.0

Tabla 6.2. Posición de los sensores de superficie en pruebas de calibración con dique

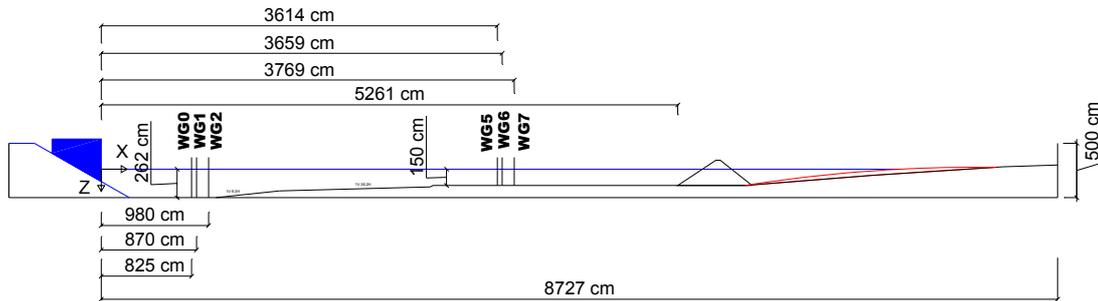


Figura 6.7. Croquis del canal con dique y sensores de superficie

6.5. Análisis del oleaje generado durante los ensayos de reflexión

El hecho de trabajar con un dique y con su consecuente reflexión, dificulta la medición de la altura de ola incidente que produce el sistema de generación. Una manera de encontrar esta altura de ola incidente, es a partir de los métodos de separación (Goda, Mansard y Funke, Hughes o método de la envolvente). Sin embargo, como se podrá comprobar, la reflexión es un dato difícil de obtener, y poco fiable. Por tanto, obtener el oleaje incidente a partir del coeficiente de reflexión puede introducir un error importante. Una manera más fiable de determinar el oleaje generado por el equipo, es analizar únicamente las olas que no han sido interferidas por la reflexión.

Cuando el oleaje empieza a generarse, se produce una zona de transición o rampa, en la que la pala genera cada vez alturas de olas mayores (debido a carreras mayores) hasta llegar a la altura de ola pedida (carrera pedida). Esta transición es de 5 crestas de ola (5 oscilaciones de la pala). Las olas producidas a partir de la quinta tienen la magnitud teórica. Más tarde, las olas generadas volverán a pasar por la posición del sensor en forma de ola reflejada.

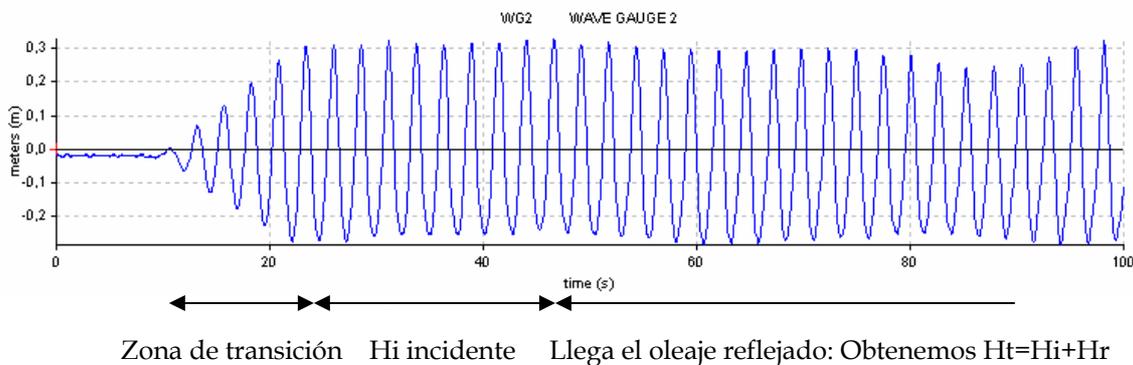


Figura 6.8. Parte inicial de un registro

Lo que se pretende con este método es calcular cuantas olas percibirán los sensores antes de que lleguen sus respectivas olas reflejadas y distorsionen así las mediciones. De este modo se puede diferenciar un grupo de olas que todavía no han sido interceptadas por el oleaje reflejado y que representan de forma precisa el oleaje incidente en la estructura.

Obtención de las olas de estudio

Para poder aplicar el método de manera correcta es fundamental medir la longitud de la ola para saber cuantas olas del registro son útiles para el análisis. Para el cálculo de la longitud de ola se utiliza la ecuación implícita siguiente:

$$g \frac{2\pi}{L} \tanh\left(\frac{2\pi}{L} h\right) = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \quad (6.3)$$

El calado frente a la pala es de 2,62m y la aceleración gravitatoria utilizada es de 9,8m/s². Los ensayos de reflexión utilizan 3 tipos de periodos. Éstos son de 1'73, 2'6 y de 3'46 segundos. Por tanto las longitudes son de 4'66m, 9'83 y 14,95 metros.

Para la medición del oleaje incidente se utilizan los sensores WG0, WG1 y WG2 que están alejados del dique a una distancia aproximada de 42,9 metros. Por tanto el número de olas validas para analizar en el inicio del ensayo son 19, 10 y 7 olas para los periodos 1'73, 2'6 y 3,46 respectivamente (número de olas = espacio a recorrer/longitud de la ola). Hay que recordar que se ha de obviar las 5 crestas de la zona de transición, y por esta razón el número final de olas que se pueden analizar es de 14, 5 y 2:

Periodo	Longitud onda	Espacio a recorrer	Nº de olas de transición	Ola inicial para análisis	Ola final para análisis
1,73 seg.	4,66 m	83,8 m	5 olas	5ª ola	19ª ola
2,6 seg.	9,33 m	83,8 m	5 olas	5ª ola	10ª ola
3,46 seg.	13,1 m	83,8 m	5 olas	5ª ola	7ª ola

Tabla 6.3. Datos para la obtención del oleaje incidente

La medición del oleaje se ha realizado mediante los sensores WG0, WG1 y WG2 debido a que los sensores WG5, WG6 y WG7 están demasiado cerca del dique. Estos tres primeros sensores están colocados cerca de la pala y con un calado de 2,62 m. Sin embargo, el dique está situado en un replano con calado de 1,5m. Esto significa que el oleaje medido por los sensores WG0, WG1 y WG2 sufrirá asomeramiento y su amplitud variará. Para poder estimar el oleaje que realmente incide en la estructura, se considerará no solo el medido por los sensores, sino también el calculado según las condiciones de asomeramiento o "shoaling"

propias del canal obtenidas a partir del Anejo I, al propagarse desde los sensores WG0, WG1 y WG2 hasta el dique.

A continuación se expone una tabla con los resultados obtenidos:

Ensayo	Valores teóricos frente a la pala			Valores medidos WG0, WG1 y WG2, cercanos a la pala			Valores corregidos cerca del dique	
	Periodo	H incidente	Iribarren	Periodo	H incidente	Iribarren	H incidente	Iribarren
Rt1h1	1,73	0,231	3,00	1,71	0,215	3,07	0,209	3,11
Rt1h2	1,73	0,307	2,60	1,71	0,287	2,66	0,280	2,69
Rt1h3	1,73	0,449	2,15	1,71	0,404	2,24	0,394	2,27
Rt2h1	2,6	0,308	3,90	2,45	0,297	3,91	0,300	3,72
Rt2h2	2,6	0,458	3,20	2,45	0,441	3,21	0,446	3,05
Rt2h3	2,6	0,521	3,00	2,45	0,502	3,01	0,508	2,86
Rt2h4	2,6	0,598	2,80	2,45	0,576	2,81	0,582	2,67
Rt2h5	2,6	0,751	2,50	2,45	0,706	2,54	0,714	2,41
Rt3h1	3,46	0,296	5,29	3,4	0,266	5,50	0,278	5,37
Rt3h2	3,46	0,449	4,30	3,4	0,411	4,43	0,429	4,32
Rt3h3	3,46	0,607	3,70	3,4	0,557	3,80	0,582	3,71

Tabla 6.4. Alturas de ola incidentes y número de Iribarren frente a la pala (calado de 2,62m) y frente al dique (calado de 1,5 m)

Estudio del oleaje incidente o generado y el número de Iribarren

Gracias a estos valores de oleaje incidente, podemos analizar las diferencias que ha habido entre la altura de ola que se quería generar, la que se generó realmente frente a la pala, y la altura de ola final que incidió contra el dique.

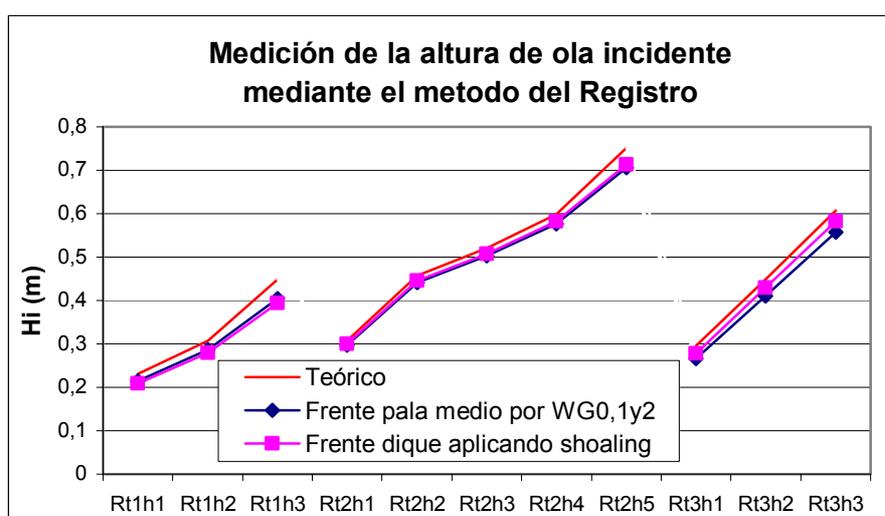


Figura 6.9. Comparación entre la altura de ola incidente teórica, la medida frente a la pala, y la transmitida frente al dique.

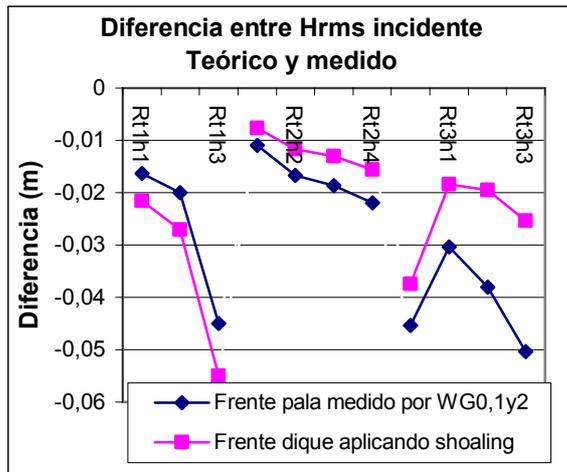


Figura 6.10

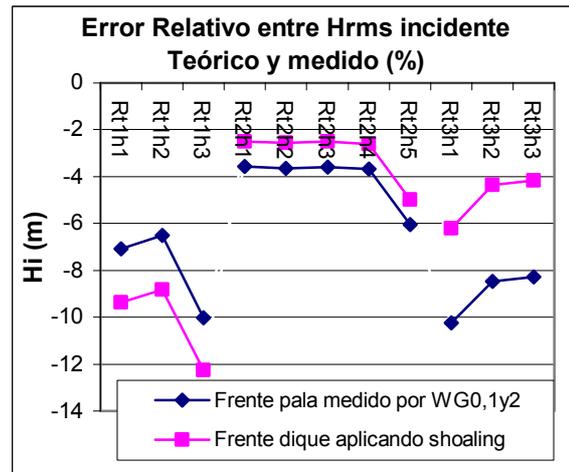


Figura 6.11

Como se puede comprobar a partir de las gráficas, las diferencias entre la altura de ola teórica y la medida en frente de la pala oscilan entre un -4% y un -10%. Estos son valores similares a los predichos en los ensayos con playa disipativa, que en el tramo de 2,5 a 3,5 segundos obtenía errores relativos comprendidos entre -8% y +8%.

Por otro lado, a medida que la altura de ola es mayor, más crece la amplitud debido al asomeramiento, y menor son las diferencias entre el oleaje teórico y el que realmente incide frente del dique.

A continuación se representa el número de Iribarren teórico respecto al medido, aplicando la formula 6.2.

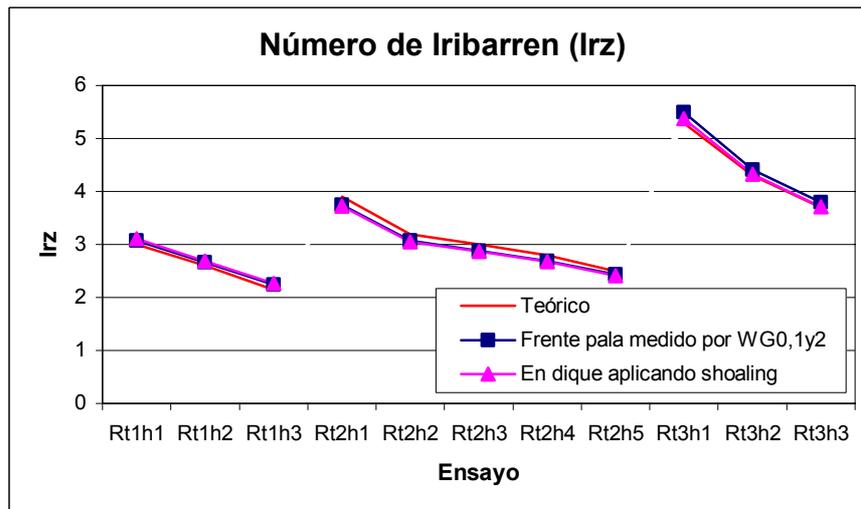


Figura 6.12. Comparación entre el número de Iribarren teórico, el medido frente a la pala, y el transmitido frente al dique

Como puede observarse, los errores están comprendidos entre el -5% y el 5%. Cabe recordar que la estabilidad del dique se hace referente al número de Iribarren. Por tanto es importante que el error entre el número de Iribarren pedido y medido sea pequeño. Aún así, los resultados finales de un ensayo siempre se basan en los medidos y no en los solicitados.

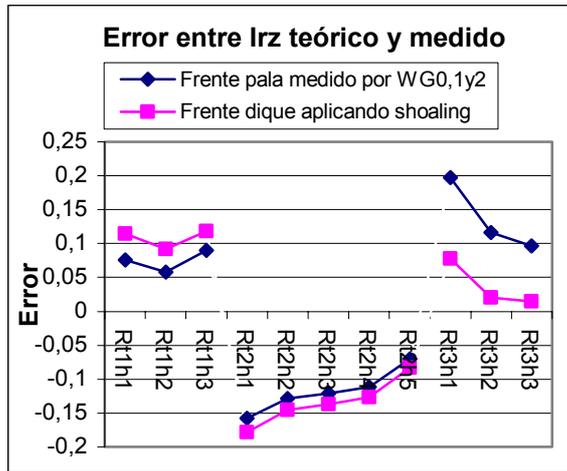


Figura 6.13

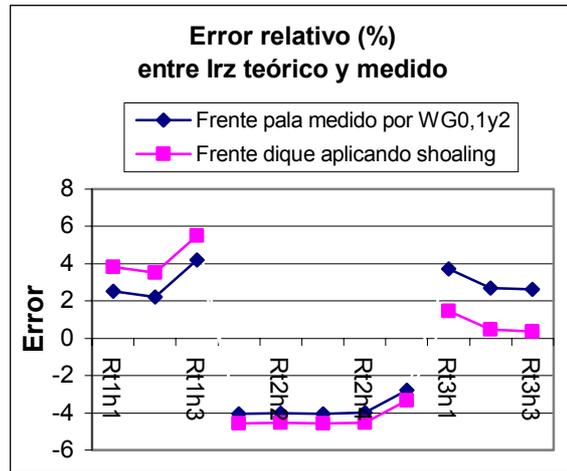


Figura 6.14

Cabe señalar que estos resultados provienen de una muestra de datos muy reducida. Solamente se ha medido la parte inicial del registro, pero no se ha podido comprobar que el resto (la mayor parte) ha seguido generando la misma altura de ola inicial. Aún así se sabe que la carrera de la pala se conserva constante y por tanto es de esperar que la H_i también lo sea. No así la H_{total} , pues aparecen ya fenómenos de reflexión.

Consideraciones sobre el oleaje generado

Lo primero que hay que destacar es que solamente se han analizado las primeras olas producidas. Pero como se comprobó en los ensayos de calibración con playa, la variabilidad es pequeña y por lo tanto se admiten los resultados.

Tal como predecían los ensayos de calibración con playa, las alturas de ola medidas han sido inferiores a las que se querían generar (alturas teóricas).

Aunque el efecto de asomeramiento (ver Anejo I) produce un aumento de la altura de ola cuando el periodo es superior a los 2 segundos, el oleaje que incide en el dique sigue siendo inferior al teórico.

De todos modos, sería conveniente corregir la señal de generación (variando la señal de voltaje) para que el oleaje generado final fuera aproximadamente un 5% superior. De este modo, el valor solicitado sería más cercano al generado.

6.6. Resultados de la medición de la reflexión

Para el cálculo de la reflexión se utilizan los métodos descritos en el apartado 4.3 de esta tesina. Estos son el método de Goda (1976), el de Mansard y Funke (1980), el de Hughes (1993) y el método de la envolvente. Cada uno de estos métodos presentan unas diferencias que pueden hacerlos más o menos convenientes para el análisis de la reflexión del oleaje en el canal CIEM. El objetivo es analizar las limitaciones y los resultados de cada uno de los métodos.

6.6.1. Medición de la reflexión mediante el método de Goda

El método de Goda utiliza solamente los datos de dos sensores de superficie. Por esta razón, se puede combinar las mediciones de los diferentes sensores de que se dispone para obtenerse diferentes cálculos de la reflexión.

De todos modos, la separación entre sensores condiciona un buen o mal resultado. Por otro lado no se obtienen los mismos resultados utilizando los datos de los sensores próximos a la pala generadora (con un calado de 2,62 metros) que los sensores cerca del dique (con un calado de 1,5 metros).

Para poder apreciar la dependencia del resultado a los sensores utilizados en la medición de la reflexión, ésta se ha calculado con tres bases de datos diferentes:

- Utilizando los datos proporcionados por los sensores WG0 y WG2
- Utilizando los datos proporcionados por los sensores WG1 y WG2
- Utilizando los datos proporcionados por los sensores WG5, y WG7

Los resultados de los cálculos se exponen en la tabla siguiente. Los valores que se expresan como “reales” son los calculados a partir del apartado 6.5 de esta tesina mediante los sensores WG0, WG1 y WG2.

	Ensayo	Valores "reales"		Sensores WG0 y WG2		Sensores WG1 y WG2		Sensores WG5 y WG7	
		T (s)	H (s)	Kr (%)	Hi (m)	Kr (%)	Hi (m)	Kr (%)	Hi (m)
Método Goda	Rt1h1	1,71	0,215	35,96	0,154	21,8	0,212	16,6	0,209
	Rt1h2	1,71	0,287	39	0,018	13,7	0,246	18,1	0,248
	Rt1h3	1,71	0,404	34,6	0,300	24,1	0,355	23,4	0,338
	Rt2h1	2,45	0,297	25,2	0,280	29,9	0,298	29,9	0,260
	Rt2h2	2,45	0,441	19,8	0,430	25,2	0,461	30,1	0,402
	Rt2h3	2,45	0,502	17,6	0,500	24	0,539	27,3	0,462
	Rt2h4	2,45	0,576	12,8	0,582	17,7	0,618	25,6	0,525
	Rt2h5	2,45	0,706	17,9	0,066	21	0,704	27	0,588
	Rt3h1	3,4	0,266	46,5	0,233	43,7	0,237	38	0,219
	Rt3h2	3,4	0,411	43,4	0,345	40	0,353	37,9	0,347
	Rt3h3	3,4	0,557	44,9	0,453	36,2	0,477	32	0,492

Tabla 6.5. Método de Goda

En la gráfica siguiente podemos apreciar no solo los resultados de la medición de la reflexión, sino también la divergencia entre los resultados, dependiendo de los sensores que se utilizan.

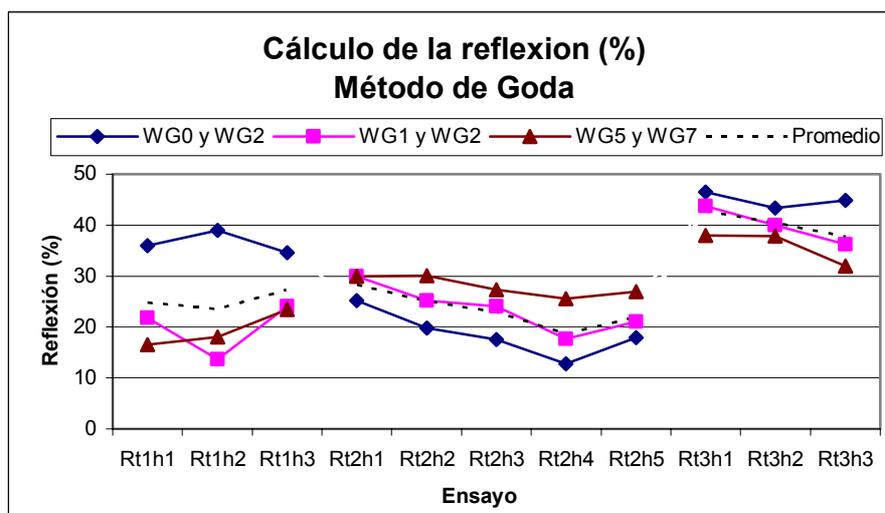


Figura 6.15. Medición de la reflexión mediante el método de Goda

A continuación se indican las alturas de ola incidentes obtenidas a partir del método de Goda, comparadas con las alturas de ola incidentes "reales" obtenidas en el apartado 6.5 a partir de los sensores WG0, WG1 y WG2. De este modo se pueden detectar cálculos de reflexión erróneos.

De todos modos cabe señalar que la altura de ola incidente obtenida mediante los métodos de cálculo de la reflexión tiene en cuenta todo el registro captado por los sensores. Es decir, incluye la zona de transición tanto inicial como final, así como el oleaje residual. Por tanto es de esperar que las alturas de ola obtenidas sean inferiores a las reales. Este error se incrementa en los ensayos con periodo de 3,4

segundos (Rt3h1, Rt3h2 y Rt3h3) debido a que el registro de los sensores incluye una franja de oleaje residual más alargada que en el resto de ensayos.

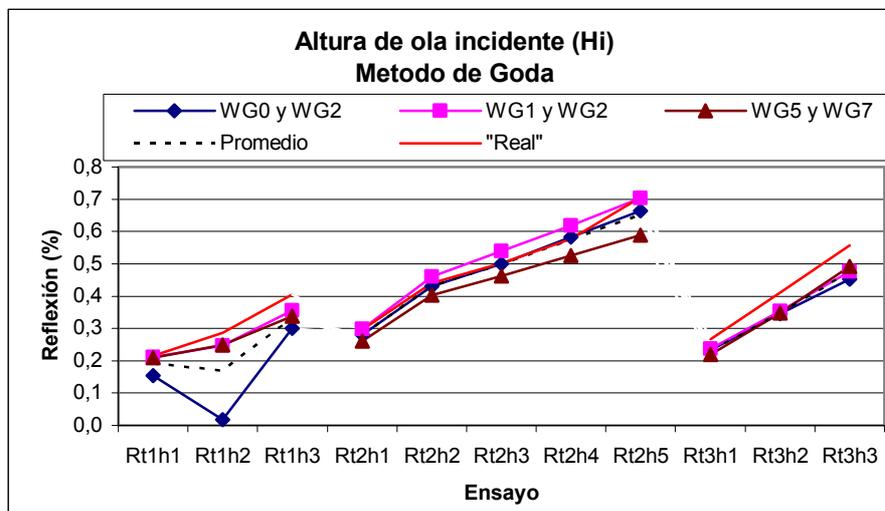


Figura 6.16. Medición de la altura de ola incidente con el método de Goda

En la gráfica 6.16 podemos comprobar como el ensayo Rt1h2 obtiene una altura de ola muy baja. Esto refleja un cálculo deficiente de la reflexión, tal como se presumía en la tabla 6.15, en donde la reflexión aumentaba respecto al ensayo anterior Rt1h1, cuando en teoría era de esperar que fuera inferior. Por otro lado, la altura de ola incidente obtenida por los sensores WG1 y WG2 en los ensayos Rt2 es demasiado elevada, con lo que es posible que la reflexión medida haya sido superior a la real.

Como puede observarse a partir de las gráficas 6.15 y 6.16, los ensayos con los sensores WG0 divergen del resto, sobretodo en el periodo 1,73 segundos (ensayos Rt1h1, Rt1h2 y Rt1h3). Por otra parte, en la figuras 5.45 y 5.46 del apartado 5.7.4 se observó que la medición con los sensores cercanos a la pala (WG0, WG1 y WG2) daban errores mayores que los alejados a ésta (WG5, WG6 y WG7). Estos datos sacan a la luz los problemas de los sensores más cercanos a la pala para obtener la reflexión. Cerca del actuador siempre se generan ondas que se disipan a medida que se alejan de (ver apartado 4.2.1, formula 4.31). Por este motivo, la reflexión de la playa disipativa queda mejor expuesta por la evaluación de los sensores WG5, WG6 y WG7.

6.6.2. Medición de la reflexión mediante el método de Mansard y Funke

El método de Mansard y Funke utiliza los datos proporcionados por 3 sensores de superficie que han de ser colocados en una zona con mismo calado. Por este motivo tenemos dos series de datos que podemos analizar con este método:

- Los datos proporcionados por los sensores WG0, WG1 y WG2; colocados en frente a la pala generadora con un calado de 2,62 metros.
- Los sensores WG5, WG6 y WG7; colocados cercanos al dique, y con un calado de 1,5 metros.

Los resultados de los cálculos se exponen en la siguiente tabla. Los valores que se expresan como “reales” son los calculados a partir del apartado 6.5 de esta tesina mediante los sensores WG0, WG1 y WG2.

	Ensayo	Valores “reales”		Sensores WG0, WG1 y WG2		Sensores WG5, WG6 y WG7	
		T (s)	H (m)	Kr (%)	Hi (m)	Kr (%)	Hi (m)
		Método Funke-Mansard (WG0, WG1 y WG2)	Rt1h1	1,71	0,215	13,6	0,194
	Rt1h2	1,71	0,287	13,4	0,226	16,9	0,249
	Rt1h3	1,71	0,404	22,7	0,338	20,5	0,336
	Rt2h1	2,45	0,297	25,9	0,286	26,7	0,261
	Rt2h2	2,45	0,441	20,5	0,439	24,4	0,404
	Rt2h3	2,45	0,502	17,9	0,512	22	0,464
	Rt2h4	2,45	0,576	13,4	0,595	18,4	0,531
	Rt2h5	2,45	0,706	17,7	0,678	23,10	0,667
	Rt3h1	3,4	0,266	45,5	0,234	38,1	0,219
	Rt3h2	3,4	0,411	42,2	0,347	37,3	0,335
	Rt3h3	3,4	0,557	42	0,460	32	0,487

Tabla 6.6. Método de Mansard y Funke.

Como podemos observar en la gráfica siguiente, en el caso de Mansard y Funke no varía mucho el resultado el hecho de utilizar los datos de los tres primeros sensores o de los tres últimos. Esto es debido a que por una parte este método escoge el valor de reflexión que minimiza el error, y por otra a que los sensores se han colocado de manera acorde a este sistema de cálculo.

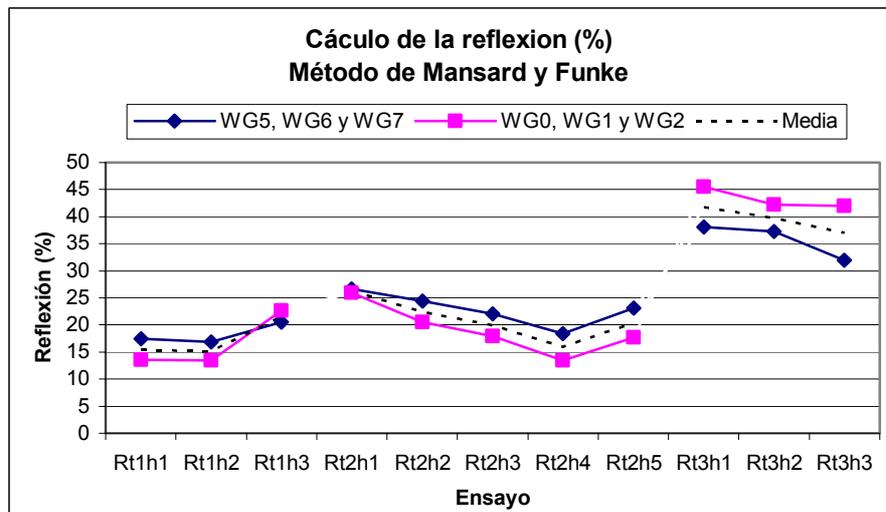


Figura 6.17. Medición de la reflexión mediante el método de Mansard y Funke

Del mismo que con el método de Goda, se exponen a continuación las alturas de ola calculadas mediante el método de Mansard y Funke con las “reales” medidas a partir del apartado 6.5 de esta tesina a partir de los sensores WG0, WG1 y WG2, con el objetivo de detectar errores.

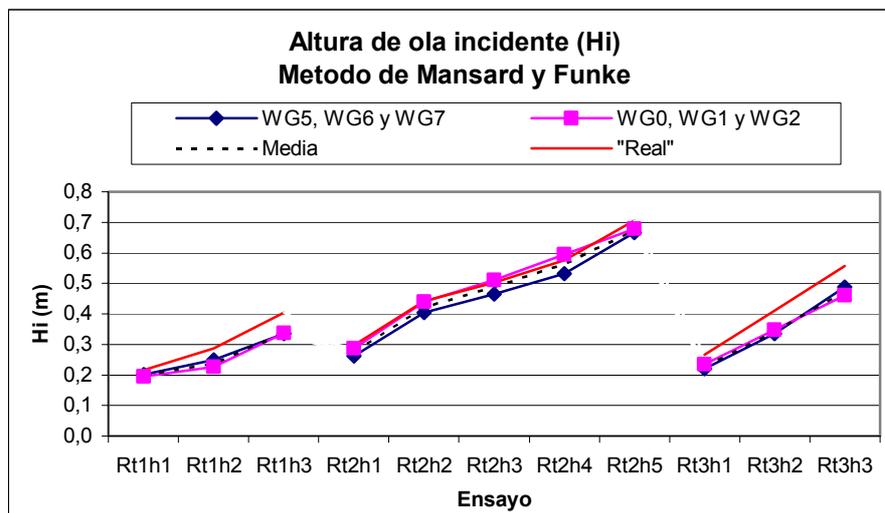


Figura 6.18. Medición de la altura de ola incidente mediante el método de Mansard y Funke

En principio puede apreciarse a partir de la gráfica 6.17 que el resultado no depende en gran medida de los sensores utilizados. Pero la figura 6.18 da a entender un error mayor en la altura de ola incidente en los ensayos con los sensores cercanos a la pala (WG0, WG1 y WG2) durante los ensayos con periodo de 2,6 segundos (Rt2). Probablemente, el error producido por el sensor WG0 detectado en el apartado anterior queda aquí “filtrado” debido a la metodología de cálculo de Mansard y Funke. Se podría deducir por tanto, que los sensores WG5, WG6 y WG7 obtienen de nuevo mejores resultados que los WG0, WG1 y WG2.

6.6.3. Medición de la reflexión mediante el método de Hughes

El método de Hughes necesita únicamente los valores percibidos por un sensor de superficie y un correntímetro. El sensor de superficie utilizado en nuestro caso es el WG6, que se encuentra a una distancia de 36,59 m de la pala generadora. El correntímetro se sitúa en la misma posición.

El hecho de utilizar solamente una posición permite colocar el sensor cerca de la estructura y actuar independientemente de que el fondo sea horizontal o no. De este modo se reduce además el error que puedan generar olas parcialmente estacionarias, en contraposición con los métodos que utilizan sensores separados.

Los resultados de los cálculos se exponen en la tabla siguiente. Los valores que se expresan como “reales” son los calculados a partir del apartado 6.5 de esta tesina mediante los sensores WG0, WG1 y WG2.

	Ensayo	Valores “reales”		Valores calculados	
		T (s)	H (m)	Kr. (%)	Hi (m)
Método de Hughes (WG6, CO)	Rt1h1	1,71	0,215	27,8	0,208
	Rt1h2	1,71	0,287	28,8	0,250
	Rt1h3	1,71	0,404	23,3	0,329
	Rt2h1	2,45	0,297	30,5	0,243
	Rt2h2	2,45	0,441	27,4	0,370
	Rt2h3	2,45	0,502	27,5	0,424
	Rt2h4	2,45	0,576	23,5	0,491
	Rt2h5	2,45	0,706	20,1	0,548
	Rt3h1	3,4	0,266	32,7	0,213
	Rt3h2	3,4	0,411	31	0,322
	Rt3h3	3,4	0,557	31,4	0,446

Tabla 6.7. Método de Hughes

Como se puede apreciar en la gráfica siguiente, los valores de reflexión oscilan entre el 20% y el 33%. Éstos son valores relativamente parecidos a los obtenidos por el método de Goda o Mansard y Funke.

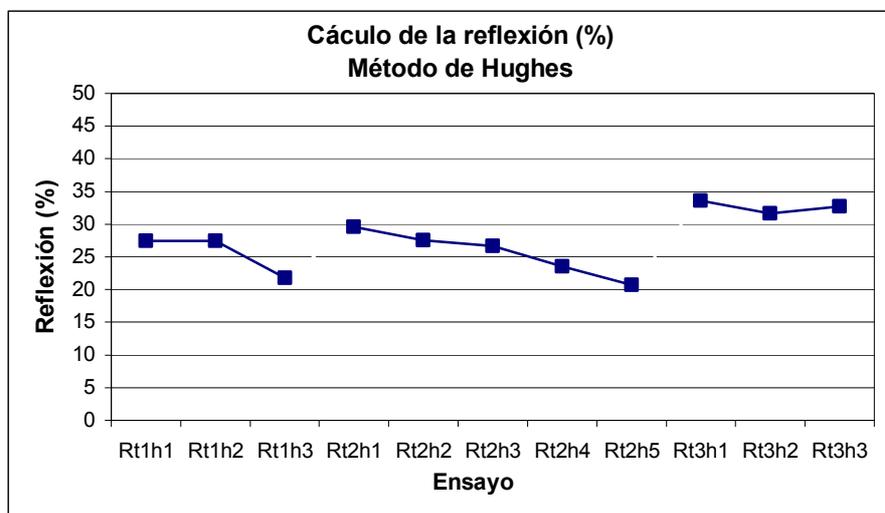


Figura 6.19. Medición de la reflexión mediante el método de Hughes

A continuación se exponen las alturas de ola calculadas mediante el método de Hughes con las “reales” medidas a partir del apartado 6.5 de esta tesina a partir de los sensores WG0, WG1 y WG2, con el objetivo de detectar errores.

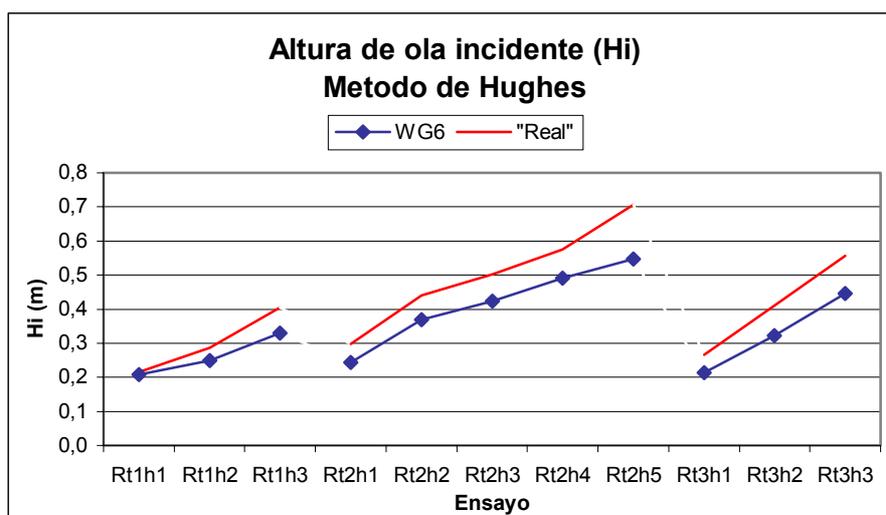


Figura 6.20. Medición de la altura de ola incidente mediante el método de Hughes

Los valores bajos de altura de ola incidente pueden ser debidos a un resultado del coeficiente de reflexión excesivo. De hecho, mediante el método de Hughes se ha obtenido una reflexión levemente superior a la calculada mediante el método de Mansard y Funke.

6.6.4. Medición de la reflexión mediante el método de la envolvente

Para aplicar el método de la envolvente son necesarios los valores de la envolvente del oleaje en tres puntos (ver apartado 4.3.4). Para ello tomaremos los valores máximos medidos por los sensores. Se ha optado por utilizar los sensores WG5, WG6 y WG7 por su posición cercana al dique.

Los resultados de los cálculos se exponen en tabla siguiente. Los valores que se expresan como “reales” son los calculados a partir del apartado 6.5 de esta tesina mediante los sensores WG0, WG1 y WG2.

	Ensayo	Valores “reales”		Valores calculados	
		T (s)	H (m)	Reflexión (%)	Hi (m)
Método de la envolvente (WG5, WG6 y WG7)	Rt1h1	1,71	0,215	20,5	0,231
	Rt1h2	1,71	0,287	17,3	0,285
	Rt1h3	1,71	0,404	23,2	0,463
	Rt2h1	2,45	0,297	26,7	0,274
	Rt2h2	2,45	0,441	21,5	0,433
	Rt2h3	2,45	0,502	22,1	0,509
	Rt2h4	2,45	0,576	14,4	0,575
	Rt2h5	2,45	0,706	13,4	0,679
	Rt3h1	3,4	0,266	14,7	0,292
	Rt3h2	3,4	0,411	10,4	0,503
	Rt3h3	3,4	0,557	15,4	0,646

Tabla 6.8. Método de la envolvente

En este caso, los valores de la reflexión obtenidos han resultado bastante más pequeños. Ronda entre el 15 y 25%. Aproximadamente entre un 20 y un 40 % menos que con los métodos utilizados anteriormente. Además, el comportamiento esperado de a mayor T, mayor K_r no se observa, y la tendencia descendente de la reflexión para un mismo periodo a medida que la altura de ola aumenta tampoco se cumple.

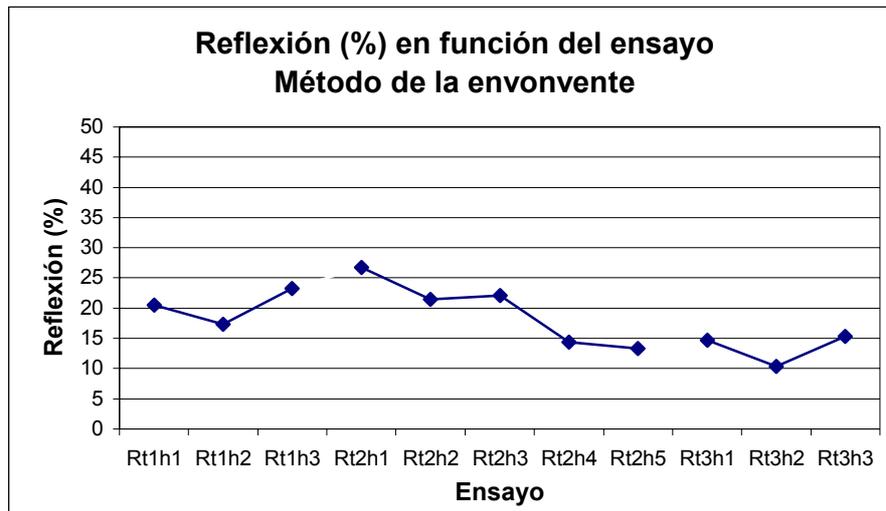


Figura 6.21. Medición de la reflexión mediante el método de la envolvente

A continuación se exponen las alturas de ola calculadas mediante el método de la envolvente con las "reales" medidas a partir del apartado 6.5 de esta tesina a partir de los sensores WG0, WG1 y WG2.

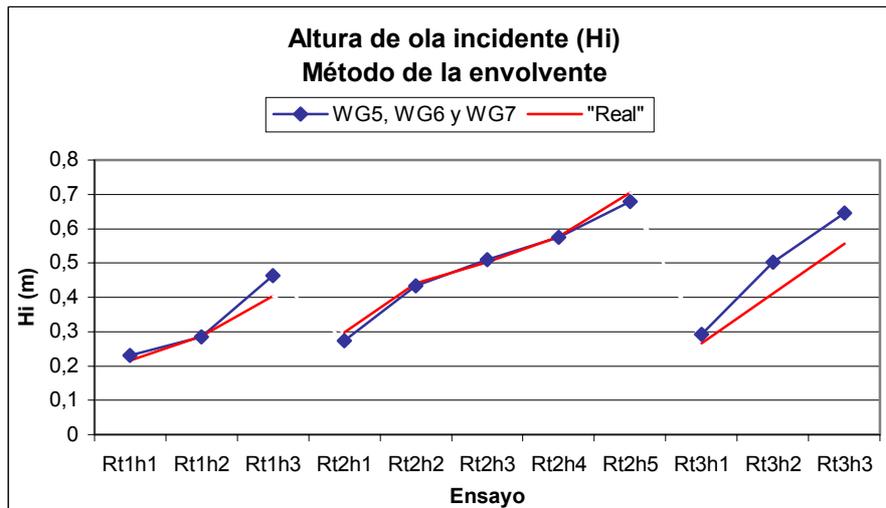


Figura 6.22. Medición de la altura de ola incidente mediante el método de la envolvente

El hecho de que en los ensayos con periodo igual a 3,46 segundos (Rt3) la altura de ola incidente obtenida mediante el método de la envolvente sea superior a la

“real” obtenida en el apartado 6.5 es posiblemente un síntoma de que las reflexiones que se obtienen son claramente inferiores a las reales. Por otro lado, ha funcionado bien en los ensayos Rt2.

El método de la envolvente se basa en calcular la reflexión mediante los puntos de la envolvente del oleaje. La limitación de este método viene dada por la gran sensibilidad que presente el método en frente a la aparición de olas parcialmente estacionarias. Pero el origen de que las reflexiones obtenidas sean tan bajas puede ser al hecho de haber tomado las alturas máximas de cada uno de los sensores con independencia del momento en que se producían. Cuando el sensor WG5 ha tomado una amplitud máxima, es posible que el sensor WG6 y WG7 estuvieran registrando unas amplitudes pequeñas. Pero como en el cálculo se han tomado las máximas alturas de ola con independencia del momento, los valores de los tres sensores han dado valores similares, y esto ha repercutido en unos valores de la reflexión bajos.

6.6.5. Método de la envolvente aplicada a una fracción del registro

Para la medición del oleaje incidente se utilizan los sensores WG5, WG6 y WG7 que están alejados del dique a una distancia aproximada de 16 metros. El número de olas validas para el análisis son de 8 y 2 para los periodos 1'73 y 2'6 respectivamente. El periodo 3,56 produce olas demasiado largas y resulta imposible encontrar una sola cresta en la que solo aparezca Hi superpuesta con su Hr sin verse interferido por la zona de transición o por otras olas re-reflejadas.

Periodo	Longitud onda	Espacio a recorrer (dique)	Espacio a recorrer (pala)	Ola inicial para análisis	Ola final para análisis
1,73 seg.	4,66 m	16 m	36,6 m	5+7=13 ^a	7+15=22 ^a
2,6 seg.	9,33 m	16 m	36,6 m	5+4=9 ^a	4+7=11 ^a

Tabla 6.9. Datos para la obtención del oleaje reflejado

Los resultados de los cálculos se exponen en la tabla siguiente. Los valores que se expresan como “reales” son los calculados a partir del apartado 6.5 de esta tesina mediante los sensores WG0, WG1 y WG2.

	Ensayo	Valores "reales"		Valores calculados	
		T (s)	H (m)	H incidente	H reflejada
Método del registro-envolvente (WG5, WG6 y WG7)	Rt1h1	1,71	0,215	0,206	0,013
	Rt1h2	1,71	0,287	0,274	0,014
	Rt1h3	1,71	0,404	0,397	0,031
	Rt2h1	2,45	0,297	0,295	0,061
	Rt2h2	2,45	0,441	0,43	0,076
	Rt2h3	2,45	0,502	0,49	0,082
	Rt2h4	2,45	0,576	0,556	0,066
	Rt2h5	2,45	0,706	0,721	0,09
	Rt3h1	3,4	0,266	---	---
	Rt3h2	3,4	0,411	---	---
	Rt3h3	3,4	0,557	---	---

Tabla 6.10. Método del registro más envolvente

La reflexión que se obtiene oscila entre el 10 y el 20 %, y es inferior a la que se obtiene si se utiliza la mayor parte del registro.

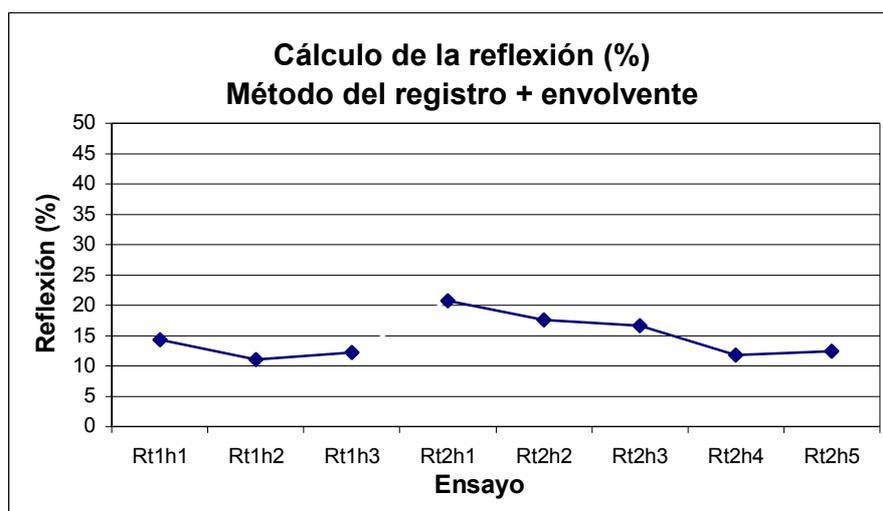


Figura 6.23. Medición de la reflexión mediante el método del registro más envolvente

A continuación se exponen las alturas de ola calculadas mediante el método de la envolvente con las "reales" medidas a partir del apartado 6.5 de esta tesina a partir de los sensores WG0, WG1 y WG2.

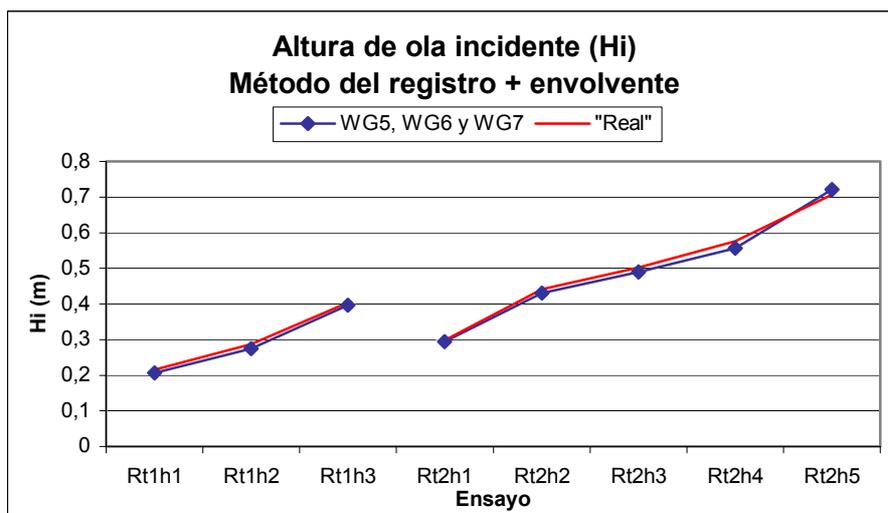


Figura 6.24. Medición de la altura de ola incidente mediante el método del registro más envolvente

Aunque como puede comprobarse en la figura 6.24 las alturas de ola incidentes calculadas coinciden con las “reales” obtenidas a partir del apartado 6.5, la realidad es que las reflexiones que se obtienen son posiblemente bajas.

6.7. Análisis de los resultados de la medición de la reflexión

A continuación se expone la comparativa entre los diferentes cálculos del coeficiente de reflexión.

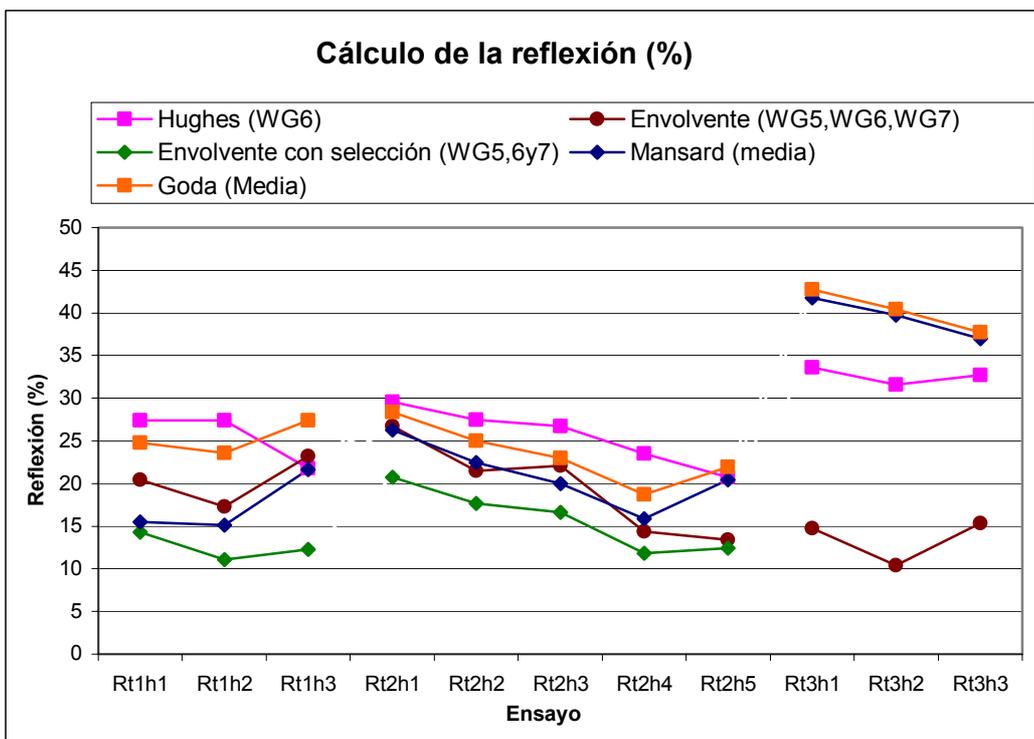


Figura 6.25. Cálculo de la reflexión

Respecto al análisis de resultados, se puede observar a partir de la figura 6.25 que la reflexión depende en gran medida de los factores siguientes:

- Para un periodo de ola constante, a medida que la altura de ola total aumenta, el coeficiente de reflexión disminuye.
- Para una altura de ola constante, a medida que el periodo aumenta, la reflexión aumenta.
- A medida que el número de Iribarren disminuye, la reflexión decrece.

Para una mayor comprensión de los datos se expone a continuación el cálculo de la reflexión dependiendo de los sensores utilizados para su análisis.

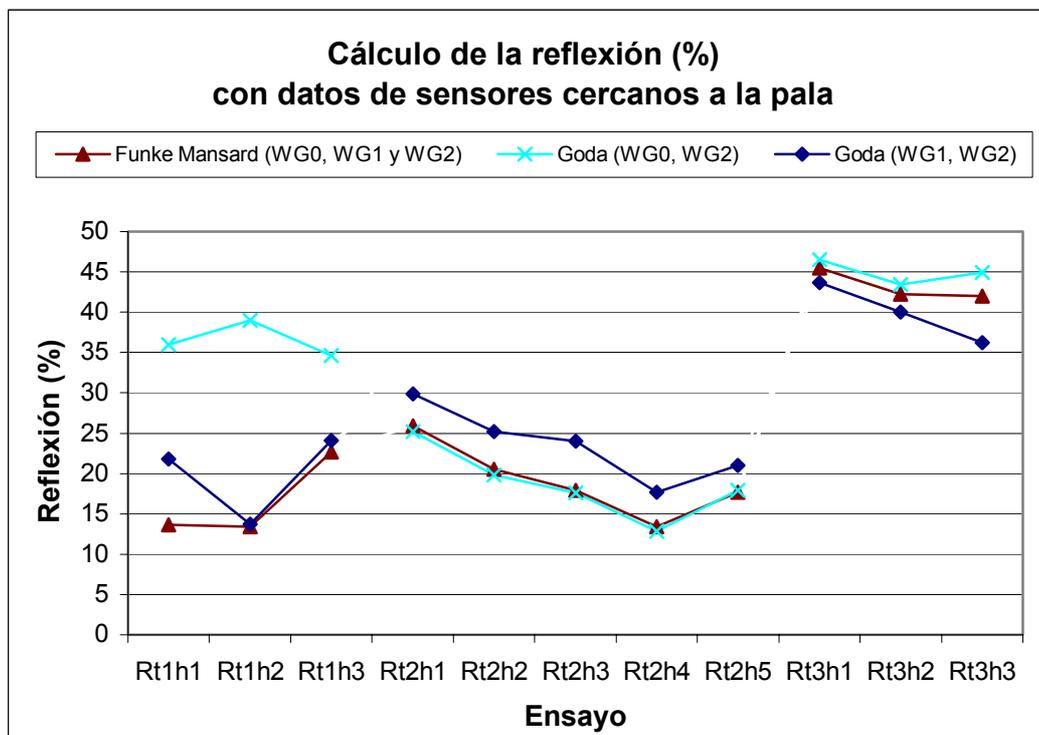


Figura 6.26. Cálculo de la reflexión mediante los sensores WG0, WG1 y WG2

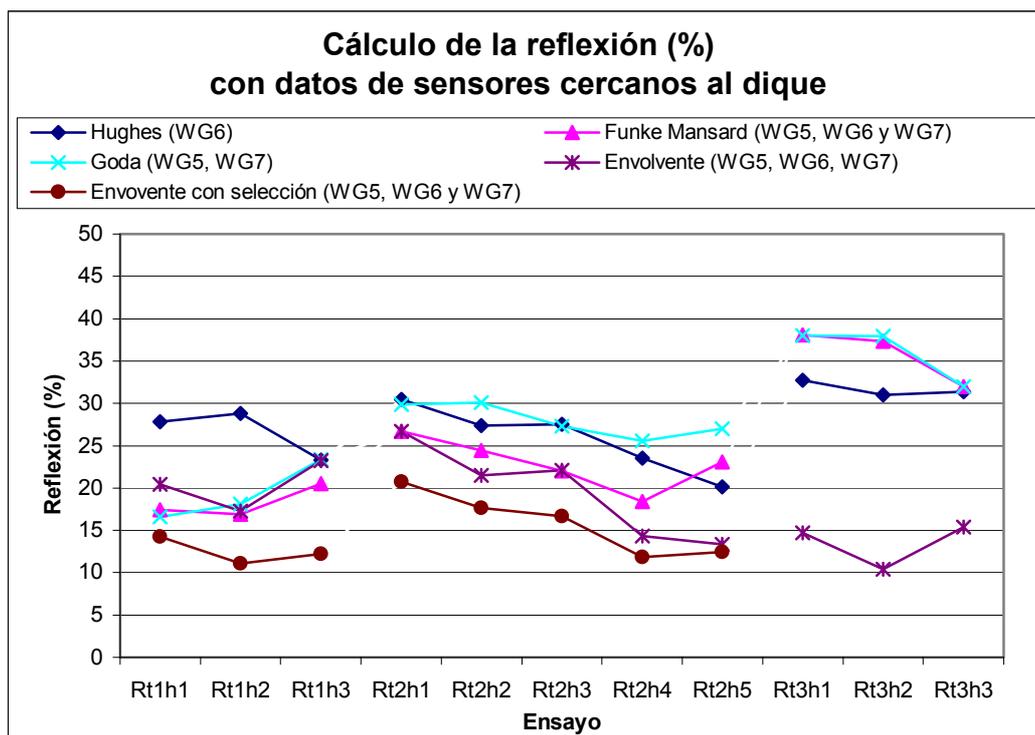


Figura 6.27. Cálculo de la reflexión mediante los sensores WG5, WG6 y WG7

La divergencia entre los resultados de los diferentes métodos es una prueba de la dificultad de medir la reflexión. Ningún método es suficientemente fiable como para predecir este fenómeno.

De todos modos, hay métodos que por su disposición de sensores y por el sistema de cálculo utilizado son más fiables que otros. A continuación se estudia la fiabilidad de cada uno de los métodos con el objetivo de valorar errores.

6.7.1. Método de de Goda

Se puede comprobar a partir de la gráfica 6.15 como el cálculo de la reflexión varía en función de los sensores utilizados; de lo que podemos deducir que el método de Goda es muy sensible no solo a la posición de éstos, sino también a la presencia de oleaje parcialmente estacionario. En nuestro caso, los sensores se han colocado según convenio de Puertos del Estado para el buen funcionamiento del método de Mansard y Funke. Pero como el criterio de colocación de los sensores es el mismo que en el caso Goda, en principio no se ha perdido fiabilidad por este motivo.

En concreto, el método de Goda pierde precisión cuando la separación entre sensores Δx es tal que $2 \cdot \Delta x / L = n$, siendo $n=0, 1, 2, \dots$

En nuestro caso tenemos las siguientes relaciones:

Sensores	$\Delta(x)$	T	L (T)	$2 \cdot \Delta(x)/L$
WG0 y WG2 (h=2,62m)	1,55 m	1,73 s	4,66 m	0< 0,66 <1
		2,6 s	9,83 m	0< 0,32 <1
		3,46 s	14,95 m	0< 0,20 <1
WG1 y WG2 (h=2,62m)	0,45 m	1,73 s	4,66 m	0< 0,18 <1
		2,6 s	9,83 m	0< 0,08 <1
		3,46 s	14,95 m	0< 0,06 <1
WG5 y WG7 (h=1,5m)	1,55 m	1,73 s	4,5 m	0< 0,68 <1
		2,6 s	8,48 m	0< 0,32 <1
		3,46 s	12,14m	0< 0,26 <1

Tabla 6.11. Fiabilidad del método de Goda

Más o menos todos cumplen la condición $\Delta x/L \neq n/2$. Los sensores WG1 y WG2 son teóricamente los peores colocados, si bien en la figura 6.8 no queda reflejado, ya que sus resultados no divergen excesivamente del resto.

De todos modos, la gran variabilidad que presenta la reflexión en función de los sensores utilizados, a pesar de los datos poco fiables del sensor WG0, puede ser un signo de que el método de Goda no obtiene datos del todo fiables.

6.7.2. Método de de Mansard y Funke

Se puede comprobar a partir de la gráfica 6.17 como el cálculo de la reflexión varía poco dependiendo de los sensores utilizados. Esto es debido al método de cálculo utiliza 3 sensores y obtiene un resultado que minimiza un error. Por otra parte, los sensores se han colocado con el objetivo de que se optimice el cálculo mediante el método de Mansard y Funke.

En concreto, el método de Mansard y Funke con 3 sensores pierde precisión cuando la separación entre dos sensores Δx_{ij} es tal que $2 \cdot \Delta x_{ij}/L = n$, siendo i y j dos sensores cualesquiera y $n=0, 1, 2, \dots$

A partir de la tabla siguiente podemos comprobar como la separación de los sensores cumplen la condición descrita.

Sensores	$\Delta(x)$	T	L (T)	$2 \cdot \Delta(x)/L$
WG0 y WG2 (h=2,62m)	1,55 m	1,73 s	4,66 m	0< 0,66 <1
		2,6 s	9,83 m	0< 0,32 <1
		3,46 s	14,95 m	0< 0,20 <1
WG1 y WG2 (h=2,62m)	0,45 m	1,73 s	4,66 m	0< 0,18 <1
		2,6 s	9,83 m	0< 0,08 <1
		3,46 s	14,95 m	0< 0,06 <1
WG0 y WG1 (h=2,62m)	1,05 m	1,73 s	4,66 m	0< 0,45 <1
		2,6 s	9,83 m	0< 0,21 <1
		3,46 s	14,95 m	0< 0,14 <1

WG5 y WG7 (h=1,5m)	1,55 m	1,73 s	4,5 m	0< 0,68 <1
		2,6 s	8,48 m	0< 0,32 <1
		3,46 s	12,14m	0< 0,26 <1
WG6 y WG7 (h=1,5m)	0,45 m	1,73 s	4,5 m	0< 0,20 <1
		2,6 s	8,48 m	0< 0,11 <1
		3,46 s	12,14m	0< 0,07 <1
WG5 y WG6 (h=1,5m)	1,05 m	1,73 s	4,5 m	0< 0,47 <1
		2,6 s	8,48 m	0< 0,25 <1
		3,46 s	12,14m	0< 0,17 <1

Tabla 6.12. Fiabilidad del método Mansard y Funke

El método de Mansard y Funke, abarca un mayor rango de periodos y obtiene un promedio de las combinaciones posibles entre los sensores. Por tanto da un resultado más “filtrado” en comparación con el método de Goda.

6.7.3. Método de Hughes

El método de Hughes utiliza los datos de un sensor de superficie y un correntímetro situados ambos a 36,59 metros de la pala generadora. Por esta razón, una de las ventajas que presenta este método en relación con el de Goda o el de Mansard y Funke es que la posición del sensor no afecta tanto al resultado. Además, de este modo se reduce el error que puedan generar olas parcialmente estacionarias, en contraposición con los métodos que utilizan sensores separados.

En contraposición, la medida que se realice con el correntímetro de la velocidad orbital, es un valor promedio de un volumen de agua y no de un punto. Los resultados mejorarían con un sensor capaz de medir en un volumen más pequeño, casi puntual, y además poco intrusivo (ya que así no se modifica el flujo que está midiendo).

Por otra parte el método de Hughes presupone que la velocidad y la superficie libre están relacionadas linealmente. Cosa que no tiene por que ser así.

6.7.4. Método de la envolvente

Como se ha podido observar a partir de la figura 6.11, los valores obtenidos son bajos en comparación con otros métodos más reconocidos como el de Goda, Mansard y Funke o Hughes. Esto nos puede dar a entender que el método de cálculo de la envolvente no funciona correctamente.

El método de la envolvente se basa en calcular la reflexión mediante los puntos de la envolvente del oleaje. La limitación de este método viene dada por la gran sensibilidad que presenta el método en frente a la aparición de olas parcialmente estacionarias. Pero el origen de que las reflexiones obtenidas sean tan bajas puede

ser al hecho de haber tomado las alturas máximas de cada uno de los sensores con independencia del momento en que se producían. Cuando el sensor WG5 ha tomado una amplitud máxima, es posible que el sensor WG6 y WG7 estuvieran registrando unas amplitudes pequeñas. Pero como en el cálculo se han tomado las máximas alturas de ola con independencia del momento, los valores de los tres sensores han dado valores similares, y esto ha repercutido en unos valores de la reflexión bajos.

Este método sería más eficiente disponiendo de un canal suficientemente largo y con un mayor número de sensores situados a mismo calado.

6.7.5. Método de la envolvente aplicado a una fracción del registro

Para este análisis hemos utilizado el método de la envolvente. Por lo tanto la hemos utilizado dos veces, una analizando la mayor parte del registro y otra analizando únicamente las primeras olas. Si comparamos ambos resultados (mirar figura 6.26) podemos observar como éste último obtiene valores de reflexión bajos.

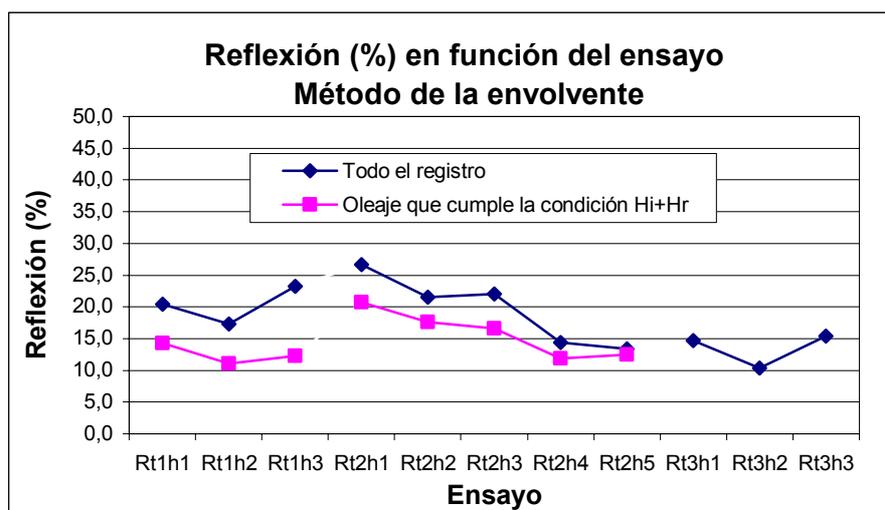


Figura 6.28. Comparación método de la envolvente con y sin tener en cuenta la parte inicial del registro

Estos valores tan bajos de la reflexión pueden ser debidos a la porosidad del dique. Cuando el dique recibe las primeras olas los huecos entre las piedras que lo componen están llenos de aire. A medida que el oleaje va incidiendo en la estructura estos huecos se llenan de agua, lo que hace disminuir su permeabilidad. Esto provoca que las primeras olas tengan una reflexión baja, pero que más tarde vaya aumentando a medida que se colmatan de agua los poros del dique.

Por tanto, la conclusión a la que se llega a partir de los datos obtenidos, es que los resultados no son del todo buenos, y por tanto se desaconseja su utilización.

6.8. Resultados de la medición de la resonancia

Cálculo teórico de la 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):

$$T_n = \frac{2l_x}{n\sqrt{gd}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (6.103)$$

Sabiendo que el canal CIEM tiene una longitud de 54,86 metros hasta el pie de la estructura, con un calado de 1.5 m, el periodo de oscilación es de $T_x=28.6s$ (para $n=1$), $T_x=14.3s$ (para $n=2$) y $T_x=9.54s$ (para $n=3$). Con esto se puede afirmar que no habrá problemas de resonancia, si se consideran periodos suficientemente diferentes.

Si se considera únicamente resonancia transversal ($n=0, n=1, 2, 3, \dots$) la fórmula que se obtiene es:

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

encontrando que el periodo de oscilación es de $T_y=1.56s$, habiendo utilizado un ancho de 3m y el calado de 1.5m.

Obtención empírica de la 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.

A la práctica, por el hecho de trabajar con periodos altos, el espectro de la carrera de la pala 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.

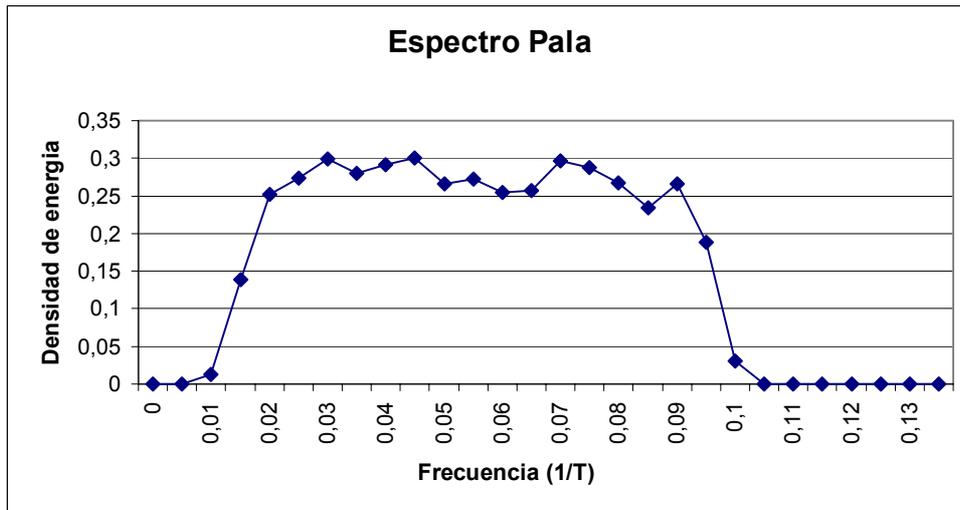


Figura 6.29. Espectro de energía de la carrera de la pala

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.

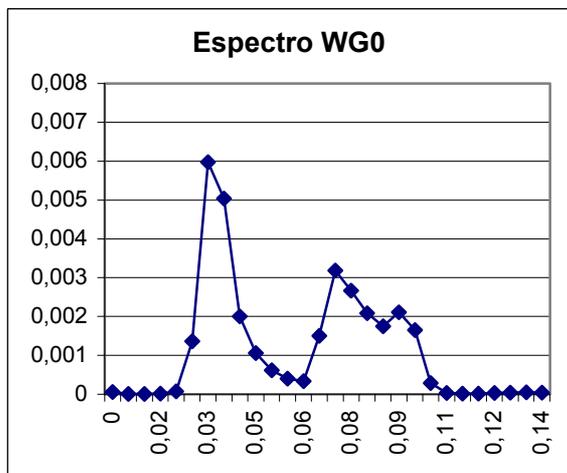


Figura 6.30.

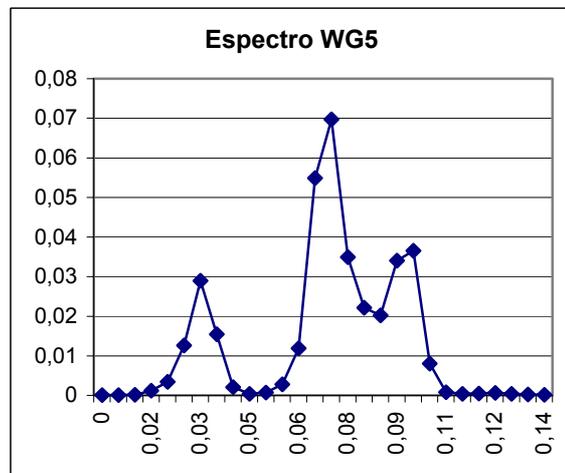


Figura 6.31.

A primera vista ya se destacan tres picos visibles en el espectro de energía del oleaje, en el periodo $T = 28,4$ s, $T = 14,25$ s y $T = 10,5$ s.

6.9. Análisis de los resultados de la medición de la resonancia

Si comparamos los resultados teóricos con los medidos observamos que se ajustan bastante:

	n=1	n=2	n=3
Cálculo teórico	28,6	14,3	9,54
Ensayo (sensor WG0)	29,26	13,65	10,78
Ensayo (sensor WG5)	29,26	13,65	10,24

Tabla 6.13. Resonancia en el canal con dique

Como los ensayos con dique utilizan periodos que no sobrepasan los 4 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 nos confirma que ésta se produce con periodos inferiores o iguales a 1,56 segundos. Como los periodos utilizados en la destrucción del dique son superiores es de prever que tampoco aparecerán problemas de resonancia transversal.

Ensayos de comprobación de la resonancia

Para comprobar que realmente se produce resonancia en los oleajes con periodos de 29,26 y 13,65 segundos se ha generado un tren de oleajes regulares con estos dos periodos. En caso de que se produjese resonancia la altura de ola registrada por los sensores tendría que ser muy superior a la generada por la pala.

- Tren oleaje regular con $T_p = 28,5$ segundos y altura de ola $H_{rms} = 0,05$ metros.

		$H_{1/10}$ (m)	$T_{1/10}$ (s)
Valor teórico de resonancia (cálculo)		-	28,6
Valor de resonancia medido (espectro)		-	29,26
Ensayo de confirmación	Valor generado por la pala	0,05	28,5
	Valor medido (sensor WG0)	0,248	28,55
	Valor medido (sensor WG5)	0,190	28,69

Tabla 6.14. Primer periodo de resonancia longitudinal.

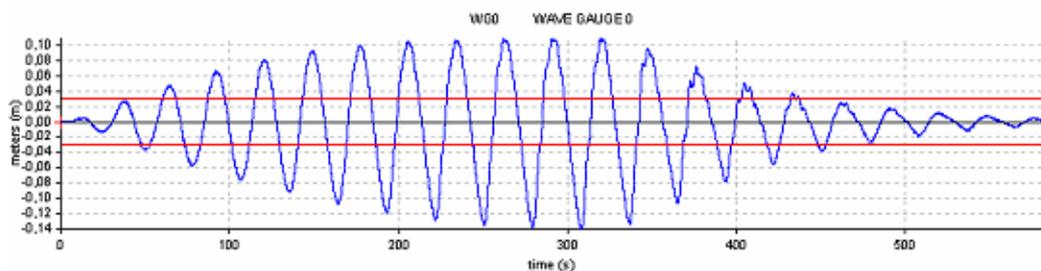


Figura 6.32. Espectro oleaje en el ensayo de resonancia. La línea en rojo representa la altura de ola pedida.

El sensor WG0 esta más cercano al antinodo de la ola estacionaria porque el valor de su altura de ola es superior.

- Tren oleaje regular con $T_p = 14,25$ segundos y altura de ola $H_{rms} = 0,12$ metros.

		$H_{1/10}$ (m)	$T_{1/10}$ (s)
Valor teórico de resonancia (cálculo)		-	14,3
Valor medido de resonancia (espectro)		-	13,65
Ensayo de confirmación	Valor generado por la pala	0,12 m	14,25
	Valor medido (sensor WG0)	0,123 m	13,42
	Valor medido (sensor WG5)	0,199 m	13,1

Tabla 6.14. Segundo periodo de resonancia longitudinal.

El sensor WG0 esta más cercano al nodo de la ola estacionaria que WG5 porque su valor de altura de ola es inferior.

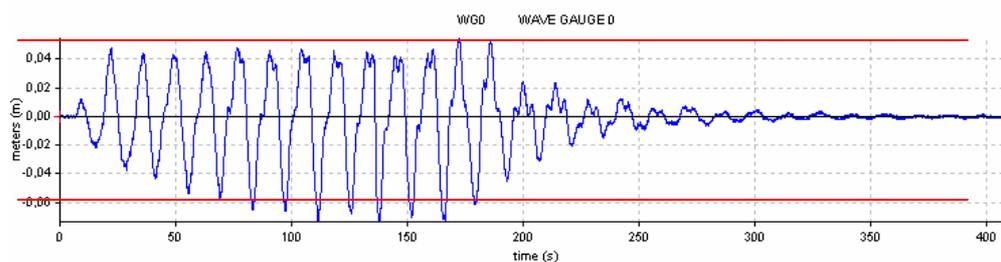


Figura 6.33. Espectro oleaje en el ensayo de resonancia medida por el sensor WG0. La línea en rojo representa la altura de ola pedida.

El sensor WG0 esta más cercano al nodo de la ola estacionaria que WG5 porque su valor de altura de ola es inferior.

Evaluación de resultados

Según el sensor que utilizemos para medir obtendremos alturas de ola máximas muy diferentes (observar tablas 6.13 y 6.14). Esto es debido a que nos encontramos con una onda estacionaria, y por lo tanto con la presencia de nodos y antinodos. El hecho de que un sensor mida menos es debido a que estará más cercano a un nodo que el otro. Por esta razón, el valor de la amplitud máxima de los sensores WG0 y WG5 no deja de ser una cota inferior del valor real de la amplitud de la onda estacionaria.

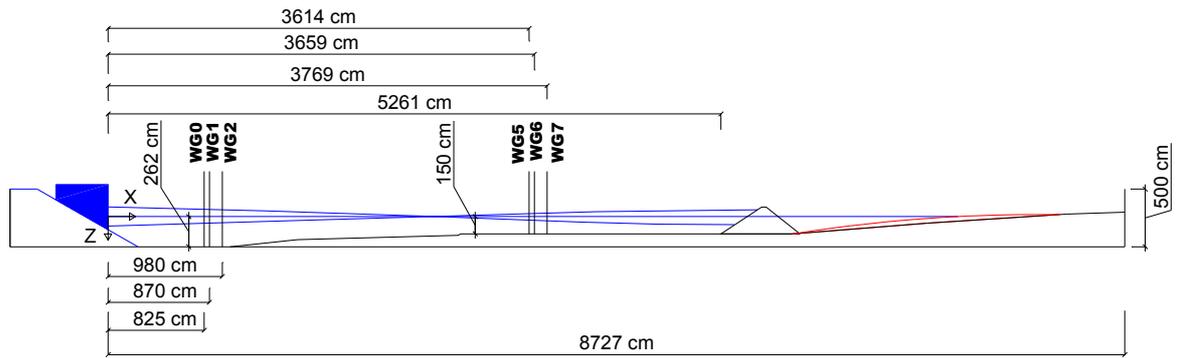


Figura 6.34. Ejemplo de resonancia con 1 nodo ($T=28,5$ s)

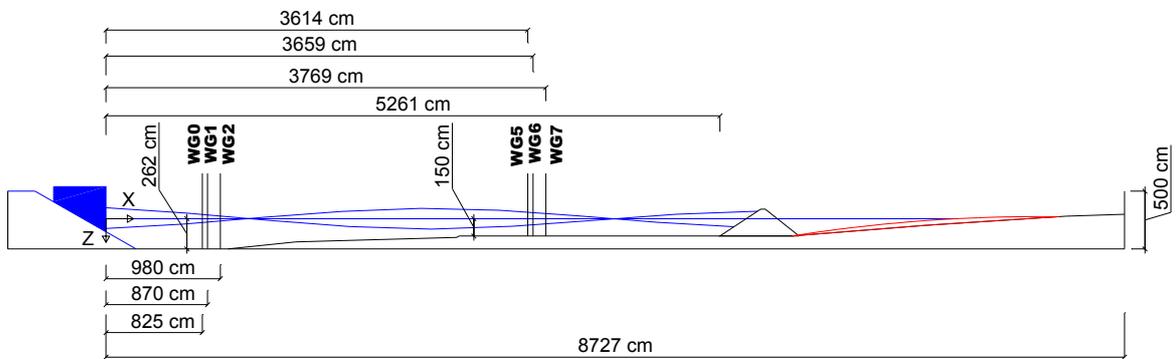


Figura 6.35. Ejemplo de resonancia con 2 nodos ($T = 14,25$ s)