



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

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESINA DE ESPECIALIDAD

Título

**VIABILIDAD DE UNA ESTRUCTURA SUMERGIDA EN EL
LITORAL CATALAN PARA LA PRACTICA DEL SURF**

711-TES-CA-2955

Autor

GARCIA MARQUEZ, XAVIER

Tutor

GRACIA GARCIA, VICENTE

Tutor externo

CACERES RABIONET, IVAN

Departamento

INGENIERIA HIDRAULICA, MARITIMA Y AMBIENTAL

Intensificación

INGENIERIA MARITIMA

Fecha

JULIO de 2009

RESUMEN

En las últimas décadas el surf se ha convertido en uno de los deportes en auge. La buena práctica del surf requiere una serie de factores que no se reúnen en todas las playas. Por esta razón la ingeniería marítima ha desarrollado un conjunto de estructuras que favorecen este tipo de condiciones y que son utilizadas por miles de surfistas.

Los arrecifes artificiales son las construcciones utilizadas en la actualidad para abordar la misión de mejorar determinadas cualidades de las olas para convertirlas en surfeables. Este tipo de construcción se inspira en la observación de los arrecifes naturales, muchos de los cuales producen, de forma regular, sesiones de surf con buenas características.

La costa catalana posee pocos lugares en los cuales se puedan encontrar los factores necesarios para poder surfear olas de una forma regular y en condiciones satisfactorias. Por esta razón y con el propósito de aprovechar los conocimientos y experiencias ya desarrolladas, se plantea la redacción del presente documento.

La construcción de una estructura sumergida, tipo arrecife artificial, en el litoral catalán podría mejorar la calidad de las olas incidentes en algún punto de la costa, pudiendo aportar un uso más a nuestras playas y dotando así de una protección a la costa adyacente.

En este documento se estudian los parámetros que intervienen en el proceso de formación, propagación y rotura de ola. A partir de un repaso al estado del arte actual de arrecifes artificiales a nivel mundial y después de analizar el oleaje catalán, se establece una estructura modelo aplicable a la costa catalana.

Tal estructura modelo es simulada numéricamente en diferentes situaciones con el objetivo principal de evaluar/opinar sobre la "viabilidad de una estructura sumergida en el litoral catalán para la práctica del surf", título del documento.

Esta tesina consiste, además, en un análisis exhaustivo del comportamiento de los modelos para comprobar su eficacia cuando representan situaciones reales. En definitiva, este trabajo tiene como objeto proporcionar nuevas herramientas para el diseño de estructuras sumergidas con la finalidad de mejorar las condiciones de surf.

ABSTRACT

In the last decades surf has become one of the sports at its peak. Good practice of surf requires of a series of factors which are not met in all of the beaches. Therefore maritime engineering has developed a collection of structures that favour these kind of conditions and that are being used by thousands of surfers.

Artificial reefs are structures used in the present to deal with the mission of improving certain wave features to make them surfable. These types of constructions are inspired by the observation of natural reefs, many of which produce regularly surf sessions with good characteristics.

There are a small number of places in the Catalan coast where the factors are met to be able to surf waves on a regular basis and with satisfactory conditions. For this reason and with the intention of taking advantage of the existent knowledge and experiences, this essay has been composed.

The construction of a submerged structure, artificial reef type, on the Catalan coast could improve the quality of the waves that come into contact with some point of the coast, adding another use to our beaches and providing this way protection to the adjacent coast.

In this document the parameters that take part in the wave formation, propagation and break. Starting with a review of the present day state-of-the-art for artificial reefs worldwide and after having analyzed the Catalan swell, a model structure is established applicable to the Catalan coast.

Such model structure is simulated numerically in different situations with the primary objective of evaluating/judging the "viability of a submerged structure on the Catalan coast for surf practice", title for the document.

This dissertation consists, moreover, of an exhaustive analysis of the behaviour of the models in order to prove their efficacy when representing real situations. Finally, the aim for this work is to provide new tools for the design of submerged structures with the purpose of improving the surf conditions.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERAL	1
1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	2
1.3 ESQUEMA DE LA TESINA	2

CAPÍTULO 2

LA PRÁCTICA DEL SURF	5
2.1 HISTORIA	5
2.2 CONCEPTOS PARA LA PRÁCTICA DEL SURF	6
2.2.1 TIPOS DE ROTURA	8
2.2.2 ÁNGULO DE DESCRESTAMIENTO ("Peel angle")	10
2.3 RECORRIDO DEL SURFISTA	13
2.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	13

CAPÍTULO 3

ESTRUCTURAS – ESTADO DEL ARTE	15
3.1 HISTORIA	15
3.2 CONSTRUCCIONES EN FUNCIONAMIENTO	16
3.3 CONSTRUCCIONES O PROYECTOS EN DESARROLLO	20
3.4 RESUMEN	26

CAPÍTULO 4

LOCALIZACIONES TIPO – AGENTES IMPULSORES	27
4.1 INTRODUCCIÓN	27
4.2 MORFOLOGIA BATIMÉTRICA	30
4.2.1 FORMAS TIPO DE ISOBATAS	30
4.2.2 DISTANCIA MÍNIMA A PRESERVAR PARA LA NO AFECTACIÓN	31
4.2.3 PERFIL DE PLAYA	32
4.3 MORFOLOGIA DE LA ESTRUCTURA	34
4.3.1 CORRIENTES DE SUPERFICIE	36
4.4 ESTIMACION DE LA EROSION	38
4.5 OLAS	39
4.5.1 ESTUDIO DEL OLEAJE DE DISEÑO	39
4.5.2 CLIMA DE SURF EN CATALUNYA	49
4.6 CONCLUSIONES PARA EL DISEÑO SEGÚN EL OLEAJE CATALÁN	51

CAPÍTULO 5

SIMULACIÓN NUMÉRICA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
5.1 MODELIZACIÓN	53
5.2 ESCENARIOS	55
5.3 LOCALIZACIONES ESTUDIADAS	56
5.4 PARAMETROS DE ANÁLISIS	57
5.5 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	58
5.6 ANÁLISIS DE LA LOCALIZACIÓN TIPO	59

5.6.1 OLAJE PERPENDICULAR	59
5.6.2 OLAJE OBLICUO	60
5.7 ANÁLISIS DE LA LOCALIZACIÓN REAL, TOSSA DE MAR	61
5.7.1 OLAJE PERPENDICULAR	61
5.7.2 OLAJE OBLICUO	62
5.8 ANÁLISIS DE LA LOCALIZACIÓN REAL, MALGRAT DE MAR	63
5.8.1 OLAJE PERPENDICULAR	63
5.8.2 OLAJE OBLICUO	64
5.9 RECOPIACIÓN GRÁFICA DEL ANALISIS REALIZADO	65
5.10 CALIDAD DE SURF	65
5.11 CONCLUSIONES	67
CAPÍTULO 6	
RESUMEN Y CONCLUSIONES	69
CAPÍTULO 7	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERAL

Se entiende por ingeniería la profesión en la cual los conocimientos de las ciencias físicas y matemáticas adquiridas mediante el estudio, la experiencia y la práctica se aplican al desarrollo de medios para aprovechar económica y ambientalmente los materiales y las fuerzas de la naturaleza para la creciente prosperidad de la humanidad.

De acuerdo con esta definición la ingeniería se ha aplicado no sólo a la mejora de las infraestructuras y la tecnología, sino también con fines recreativos. Así es precisamente como esta disciplina se ha puesto al servicio del surf en las últimas décadas.

El surf es un deporte que requiere unas características determinadas de oleaje. Por este motivo, tradicionalmente sólo ha sido posible surfear en lugares donde se reuniesen las condiciones necesarias de forma natural. Recientemente la ingeniería marítima ha desarrollado un conjunto de estructuras que favorecen este tipo de condiciones y que son utilizadas por miles de surfistas. Dichas estructuras permiten crear puntos de surf artificiales.

Nuestra sociedad le da una gran variedad de usos a las playas, entre ellos cabe destacar los lúdicos y los comerciales. Esto ha llevado a la construcción de numerosas estructuras multifuncionales en las costas, como las citadas anteriormente. Si bien es de interés para el presente estudio su función de mejorar las condiciones de surf, cabe mencionar que su función principal puede considerarse la de protección de costas.

En la actualidad, se invierten grandes recursos para proteger la costa y ofrecer playas anchas a la población. La protección de costas es un trabajo laborioso y complejo en nuestras playas, debido a que el litoral presenta una erosión importante de la zona emergida tras ser afectadas por temporales (se recuerda que esta es zona de protección y en épocas veraniegas se ve sometida a una importante carga recreativa fundamental en la economía local).

Los colectivos minoritarios como los surfistas no suelen estar considerados en estos proyectos de protección de costas, aunque el número creciente de personas que practica este deporte está cambiando la actitud de las administraciones. Por otro lado, los temporales que se aprovechan para practicar el surf suelen ser los mayores causantes de la erosión de las playas y las estructuras de protección se diseñan precisamente para amortiguarlos o eliminarlos.

Dadas las circunstancias se hace cada vez más frecuente el diseño de arrecifes artificiales con el doble propósito de proteger la costa y mejorar las condiciones de surf. Esto último se logra mejorando determinadas cualidades de las olas para convertirlas en surfables. Este tipo de construcción se inspira en la observación de los arrecifes naturales.

La combinación de surf y la protección de la costa es ya una realidad. Empresas como ASR Ltd. de Nueva Zelanda se dedican a diseñar y construir arrecifes multifuncionales por todo el mundo.

Los arrecifes artificiales sólo pueden mejorar las condiciones naturales de ola. Las condiciones de surf son un producto de diferentes características de ola en aguas someras y de su rotura, que son procesos físicos complejos en un ambiente altamente variable.

Cataluña posee un oleaje principalmente de tipo SEA, régimen caracterizado por la formación del oleaje mediante la fuerza liberada por el viento sobre la lámina de agua. Este régimen, un tanto irregular, aporta unas condiciones que permiten la práctica del surf con menor frecuencia que en otras partes del mundo. Sin embargo, el número de días de surf al año es suficiente como para mantener una fuerte cultura del surf en esta zona.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo principal de esta Tesina es analizar la viabilidad de una estructura sumergida, tipo arrecife artificial, en la costa catalana. Para ello, las tareas básicas que componen el trabajo realizado son:

- recopilación de datos del oleaje en la costa catalana
- definición del clima del oleaje en términos de peralte
- caracterización de las condiciones de ubicación idóneas
- simulación y análisis de diferentes casos de estudio
- conclusiones finales

1.3 ESQUEMA DE LA TESINA

El documento se ha dividido en capítulos para facilitar la lectura y ordenación de los temas tratados. Se recomienda seguir el orden de capítulos propuesto al leer la Tesina dado que cada capítulo contiene conceptos introducidos en los precedentes. El contenido de esta tesina se presenta de acuerdo con la estructura siguiente:

- Capítulo 2. Resumen de los aspectos científicos/técnicos principales sobre el surf, desde aspectos básicos hasta conceptos determinantes para caracterizar las roturas surfeables.
- Capítulo 3. Se presentan las distintas estructuras artificiales construidas en todo el mundo hasta la fecha. También se introducen en el mismo capítulo proyectos en curso o en fase de diseño.
- Capítulo 4. Dedicado al estudio de los agentes impulsores y de las localizaciones tipo.

- Capítulo 5. Análisis de la modelización numérica realizada para las diferentes localizaciones: una localización teórica establecida a partir del capítulo 4 y dos localizaciones reales (Tossa de Mar y Malgrat de Mar) escogidas.
- Capítulo 6. Se dedica a exponer de forma ordenada las conclusiones resultantes de los capítulos anteriores. Éstas determinan parcialmente las directrices básicas a respetar si se plantea una estructura artificial en litoral catalán para promover la práctica del surf.
- Capítulo 7. Finalmente se incluyen las referencias bibliográficas que han servido de base para la redacción del documento.

CAPÍTULO 2

LA PRÁCTICA DEL SURF

2.1 HISTORIA

Los polinesios fueron los primeros, en sus constantes travesías entre islas, en dar a conocer la costumbre de deslizarse sobre las olas. Cuando el capitán James Cook, en 1778, se acercó a las actuales islas de Hawaii fue recibido por los habitantes locales que se aproximaron hasta el barco braceando en objetos flotantes. En sus cuadernos de bitácora se narra: *"el arrojo y la destreza con que los vi realizar maniobras complicadas y peligrosas fue completamente asombroso y difícil de creer"*. Durante el proceso de colonización, los europeos entraron en conflicto con las creencias autóctonas y prohibieron el acto del surf, llevándolo prácticamente a la desaparición. Según Henríquez (2004), en el verano de 1907 George Freeth, un irlandés-hawaiano, introdujo el surf en los Estados Unidos. Un poco más tarde, en 1914, Duke Kahanamoku, conocido como "el padre del surf moderno", hizo lo mismo en Australia. Después de la Segunda Guerra Mundial, Bob Simmons utilizó una combinación de fibra de vidrio y espuma ("*foam*") para desarrollar nuevas tablas más ligeras y así reemplazar los grandes troncos de madera pesada. Esto provocó una revolución en este deporte. El surf se ha convertido en un deporte de gran y rápido crecimiento, practicado actualmente por aproximadamente veinte millones de personas.

El estudio de los procesos físicos relacionados con la práctica del surf fueron estudiados por primera vez a principios de los setenta, en el caso concreto de las rompientes de Hawai (Walker y Palmer, 1971; Walker et al., 1972; Walker, 1974). Durante años posteriores numerosas publicaciones recogían las directrices marcadas en las referencias anteriores, hasta los años 90. Una nueva visión más técnica la dio Dally (1990), con modelos de predicción del clima a largo término para la práctica del surf, siempre basado en los parámetros definidos en los trabajos de Walker. El Programa de Arrecifes Artificiales de la Universidad de Waikato en Nueva Zelanda representa un gran avance en el conocimiento de las características del surf con artículos y trabajos de diferentes autores (Andrews, 1997; Hutt, 1997; Mead, 2001; Moores, 2001; Sayce, 1997; Scarfe, 2002).

En España, Gómez Pina et al. (1993) introducían la componente de adaptabilidad de la playa para la práctica del surf en el proyecto de la regeneración de la playa de La Zurriola.

2.2 CONCEPTOS PARA LA PRÁCTICA DEL SURF

La práctica del surf requiere unas condiciones particulares de oleaje incidente sobre la costa, además de otras características como pueden ser el grado de dominio del practicante. Con el objetivo de establecer las condiciones necesarias y óptimas para la práctica del surf, se presenta el siguiente capítulo proporcionando una base con un cierto rigor científico. En este estudio es importante comprender algunos principios básicos de surf, leyes y transformaciones que rigen el proceso de formación de la ola, así como la propia interacción de la ola con la batimetría costera.

Para caracterizar un oleaje es necesario conocer su período T , altura de ola H y orientación θ . Principalmente se habla de zona "offshore" y zona litoral. La zona litoral se divide a su vez en diversas zonas que dependen ligeramente del autor consultado. En el Coastal Engineering Manual (CEM) se representa la siguiente figura con la debida zonificación (figura 2.1).

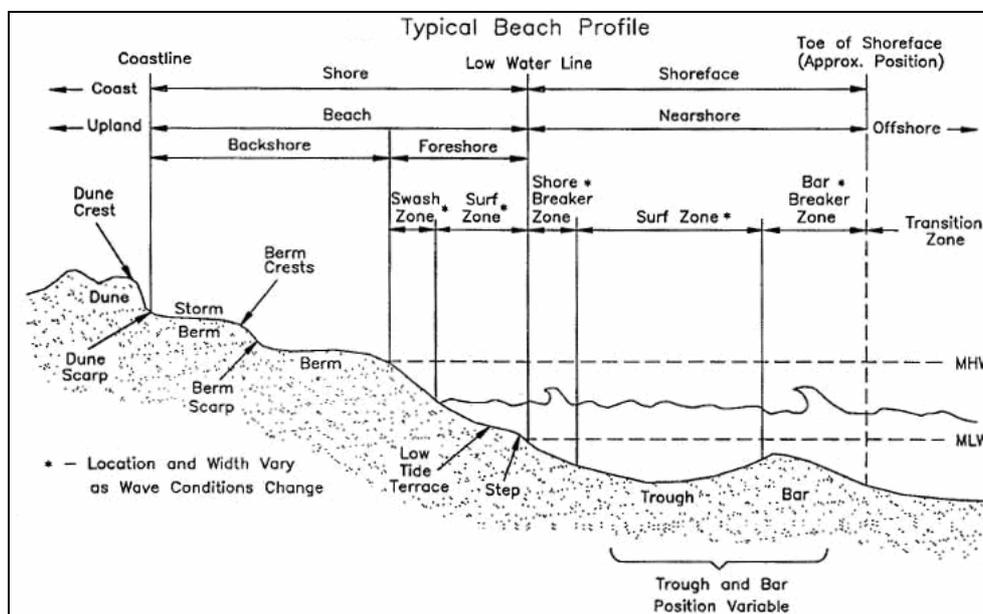


Figura 2.1 Perfil de playa típico, Coastal Engineering Manual (U.S. Army Corps of Engineers, 2002).

Esta representación del espacio litoral es la más aceptada en la literatura científica. Se admite que una ola se propaga en aguas de transición entre profundas y someras cuando el cociente entre la profundidad (d) y la longitud de onda (L) se encuentra entre $1/2$ y $1/20$, a partir de tal límite se consideran aguas someras. Contrariamente a lo que ocurre lejos de la costa, la influencia de los fondos marinos (naturaleza, forma, etc.) sobre la propagación de la onda es de gran importancia. Cuando una ola se encuentra en aguas someras o en aguas de transición, el movimiento del agua es restringido por la parte inferior, produciendo una reducción de la velocidad de ola función de la profundidad. Véase la fórmula que relaciona la velocidad o celeridad con la profundidad y longitud de onda:

$$c = \sqrt{\frac{g \cdot L}{2\pi} \tanh\left(2\pi \frac{d}{L}\right)}$$

Durante el paso del frente de olas por aguas de transición, también llamadas aguas intermedias, se produce el asomeramiento o “*shoaling*”. El asomeramiento consiste en que la velocidad de la ola disminuye manteniendo el periodo constante, provocando así una disminución de la longitud de onda y teóricamente la altura de ola aumenta debido a la conservación de la energía transportada por la propia ola. A través de este proceso de asomeramiento interviene el fenómeno de la refracción causado por la batimetría del fondo. El fenómeno de refracción tiene una consecuencia principal: la reorientación de las líneas de crestas tendiendo a tomar una dirección paralela a las isóbatas. Este fenómeno se explica bien con la ecuación de conservación de la energía transportada por ondas. Esta ecuación se escribe en el caso más general como:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \text{div}(c \cdot E) = P$$

Donde E representa la energía de la ola, c su celeridad y P un volumen final de producción. En el caso de una evolución estacionaria simple, en una dimensión y despreciando aportaciones de energía (perfectamente concebible cerca de la costa), la ecuación anterior se reduce a:

$$\frac{\partial(c \cdot E)}{\partial x} = 0 \rightarrow c \cdot E = \text{cte}$$

Considerando que la velocidad c disminuye con la profundidad (olas notan el fondo) y como la energía E ha de aumentar para mantener el producto constante, la altura de las olas H también aumenta (dada la proporcionalidad de $E \approx H^2$). Se produce un gradiente de alturas en función de la profundidad, provocando velocidades distintas a lo largo de la cresta. Así es como se orienta finalmente con las líneas batimétricas, véase la figura 2.2.

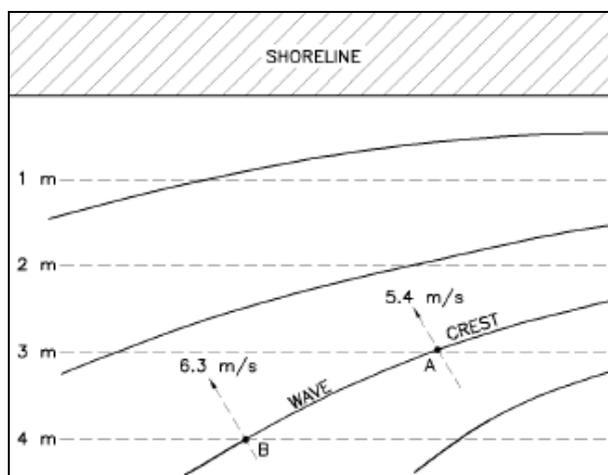


Figura 2.2 Representación del basculamiento debido a la refracción, Coastal Engineering Manual (U.S. Army Corps of Engineers, 2002).

Una vez en aguas someras, se diferencian tres grandes zonas cerca de la costa (“*nearshore*”): la zona de rotura (“*breaker zone*”), la zona de surf (“*surf zone*”) y la zona de batida (“*swash zone*”). Véase de nuevo figura 2.1.

Ya en zona de rotura empieza el ámbito del surf como bien describe el esquema presentado por Moffat y Nichol (1981), figura 2.3. Aunque un tanto simple, representa bien las diferentes partes que configuran un punto o “*spot*” de surf. El esquema empieza en la zona de “*take-off*”, conocida en castellano como zona de cogida de ola. Dependiendo de si el descrestamiento es hacia la izquierda o hacia la derecha

(siempre desde el punto de vista del surfista, sentido hacia la playa) señala dos “*riding zone*”, que aquí se traduce como zona de recorrido del surfista. El surfista según el esquema adjunto (ver figura 2.3.) vuelve a la zona de cogida por el exterior. Actualmente esto está cambiando con la modelización de los canales de retorno como se explica en capítulos posteriores.

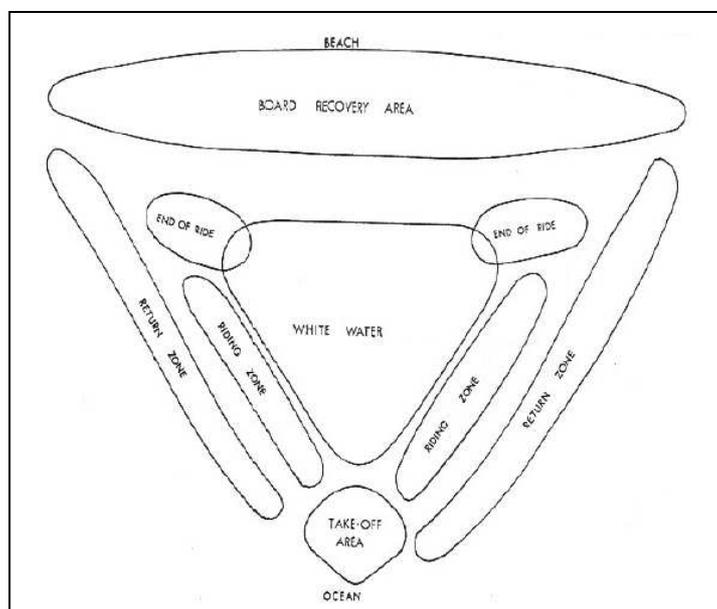


Figura 2.3 Esquema de una típica zona de surf (Moffat y Nichol, 1981).

2.2.1 TIPOS DE ROTURA

Varios factores afectan a una ola, a su pendiente o a su potencia en el proceso de rotura. De entre los cuáles destacan la altura de las olas y el período (Iribarren y Guza, 1947 - citado Dally, 1989) o la fuerza del viento y su dirección (Galloway et al., 1989; Moffat y Nichol, 1989; Button 1991). Sin embargo, es la batimetría la que determina la forma en que rompen la mayoría de las olas (Peregrine, 1983; Battjes, 1974; Sayce, 1997). Una gran cantidad de trabajo se ha realizado sobre los diferentes tipos de roturas y su forma, sobre todo en canales utilizando fondos marinos y pendientes similares, pero también en plena costa (Galvin, 1968; Peregrine, 1983; Battjes, 1988).

El tipo de rotura es uno de los factores más importantes en el surf. Patrick y Wiegel (1954) definieron tres tipos diferentes de rotura:

- **Spilling:** su cresta se va desmoronando poco a poco, perdiendo algo su simetría, apareciendo los denominados “*borreguillos*”, este tipo de oleaje es apto para el surf según Dally (1990) y Mead (2003). Mead (2003) menciona este tipo de rotura conocido en el lenguaje del surf como “*fat*” o “*gutless*” y denota la falta de velocidad o potencia que generan mientras se navega.
- **Plunging:** la parte superior de la ola avanza, balanceándose y cayendo delante de la ola produciendo una voluta, “*roler*” o “*vortex*”, típica de este tipo de rotura. Según Mead (2003) es la ideal para la práctica del surf y define otro concepto de intensidad de rotura, exclusivo de este tipo de rotura, para intentar describir de una manera numérica las distintas formas del “*vortex*” característico del tipo

plunging. Incluso hace una comparación de su parámetro con el lenguaje surfero (“*tubing*”, “*hollow*”, “*pitching*” y “*square*”).

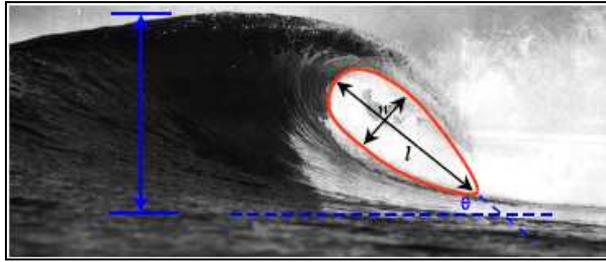


Figura 2.4 Curva de ajuste utilizada para calcular la longitud del vórtice (l), anchura (w) y ángulo (θ) (Black et al., 1997).

- **Surging:** la cresta se mantiene constante y la cara frontal intacta de la ola avanza hasta la playa. Se considera no apta para el surf.

Galvin (1968) añadió un cuarto proceso de rotura, estado entre el plunging y el surging:

- **Collapsing:** la cresta se mantiene intacta y la cara frontal presenta escalones, cayendo posteriormente. Produce una situación irregular y turbulenta en la superficie del agua. También se considera no apta para el surf.

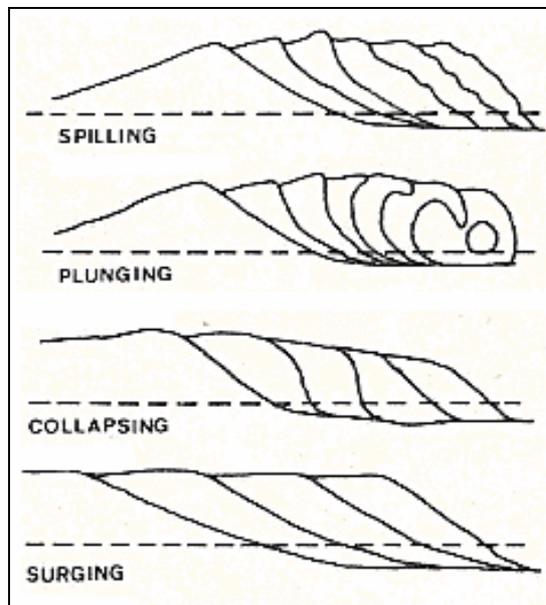


Figura 2.5 Tipos de rotura de oleaje, según Galvin (1968) (del Moral, 1978)

Galvin (1968) define dos parámetros para clasificar el tipo de rotura dependiendo de si la altura de ola registrada es en aguas profundas o en rotura, “*offshore*” e “*inshore*”:

Tipo de rotura	"offshore"	"inshore"
Surging / Collapsing	$\frac{H_0}{L_0 m^2} < 0,09$	$\frac{H_b}{m L_0} < 0,019$
Plunging	$0,09 < \frac{H_0}{L_0 m^2} < 4,80$	$0,019 < \frac{H_b}{m L_0} < 0,427$
Spilling	$\frac{H_0}{L_0 m^2} > 4,80$	$\frac{H_b}{m L_0} > 0,427$

Tabla 2.1 Relación tipo de rotura - parámetros "offshore" e "inshore" de Galvin (1968).

Battjes (1974) introduce la utilización del número de Iribarren (desarrollado inicialmente por Iribarren y Nogales (1947) como criterio de rotura) para describir el tipo de rotura. El número de Iribarren, también llamado parámetro de similitud del surf, se define como:

$$Ir = \frac{m}{\sqrt{s}}, \quad \text{siendo } m \text{ la pendiente del fondo y } s \text{ el peralte.}$$

Battjes (1974) define dos expresiones del número de Iribarren diferentes para realizar la comparación con los dos parámetros de Galvin ("offshore" e "inshore"):

$$Ir_0 = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \qquad Ir_b = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}}$$

Tipo de rotura	Número de Iribarren
Surging / Collapsing	$Ir_0 > 3,3$
	$Ir_b > 2$
Plunging	$0,5 > Ir_0 > 3,3$
	$0,4 < Ir_b < 2$
Spilling	$Ir_0 < 0,5$
	$Ir_b < 0,4$

Tabla 2.2 Relación tipo de rotura - número de Iribarren.

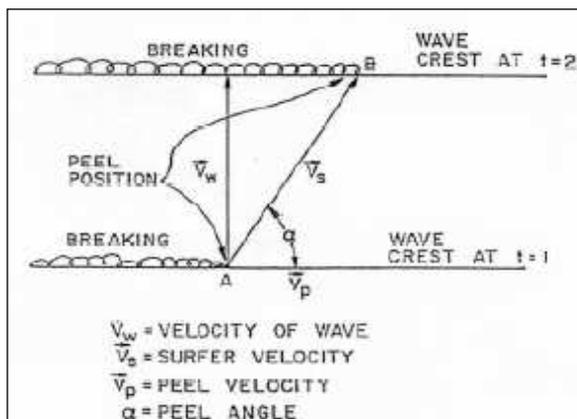
2.2.2 ÁNGULO DE DESCRESTAMIENTO ("Peel angle")

Las primeras investigaciones serias sobre ángulos de descrestamiento se produjeron a principios de los setenta por James "Kimo" Walker de la Universidad de Hawaii. Walker considera una serie de parámetros de navegación con la realización de experimentos de campo para medir la forma de navegar y de las olas rompiendo sobre los arrecifes de la costa sur de la isla de Oahu, Hawaii. Estos estudios fueron apoyados por una

serie de pruebas de laboratorio (Walker, 1971 y 1974; Walker et al., 1972). Walker indicó que el grado de dificultad (o "surfability") de una ola se puede definir como una función dependiente de la altura y "peel angle", o ángulo de descrestamiento.

El descrestamiento fue definido por Walker (1974) como la velocidad de desmoronamiento de la ola a lo largo del frente de ola. La trayectoria que lleva el punto de descrestamiento de la ola forma un ángulo con la cresta de ola que denominó "peel angle", ángulo de descrestamiento. Pero el frente de ola se mueve aproximándose a la costa con una determinada velocidad.

La composición de los dos movimientos, descrestamiento y propagación del frente, es la trayectoria que sigue el surfista durante su desplazamiento. La velocidad del surfista está relacionada con el ángulo de descrestamiento.



$$V_s = \frac{c}{\text{sen}\alpha};$$

- V_s Velocidad del surfista
 c Celeridad de la ola
 α Ángulo de descrestamiento

Figura 2.6 Parámetros de descrestamiento (Walker, 1974).

Como dice Henriquez (2004), *cuanto más pequeño sea el ángulo de descrestamiento, la velocidad del surfista será más alta llegando a no ser surfeable para valores muy bajos del "peel angle"*.

La velocidad que se puede alcanzar depende de la altura de ola y de la habilidad o grado de maestría del surfista. Walker (1974), basándose en las condiciones de surf de Hawaii, desarrolló un gráfico de altura de ola frente al ángulo de descrestamiento con isolíneas de velocidad del surfista V_s y considerando:

$$c = 1,25\sqrt{gH_b}$$

Varios factores considerados por Walker hacen difícil la aplicación de su clasificación. Su trabajo se basó únicamente en un oleaje hawaiano incidente sobre arrecifes de coral con un rango de alturas bastante superior al presente en otros litorales y sobretodo en el Mediterráneo. Walker representó en la misma figura una clasificación subjetiva. En su definición de los límites entre distintos niveles de destreza, los caracterizó principalmente a través de la altura de las olas con muy poco énfasis en el ángulo de descrestamiento. Sin embargo, la velocidad a la que una ola descresta afecta de una manera más directa a su diferenciación. (Hutt, 1997)

Distintas investigaciones científicas relacionadas con el surf han aumentado considerablemente desde mediados del decenio de 1990. Hutt (1997) llevó a cabo investigaciones detalladas de la ola y el ángulo de descrestamiento en las playas de Raglan, Nueva Zelanda (fondo rocoso).

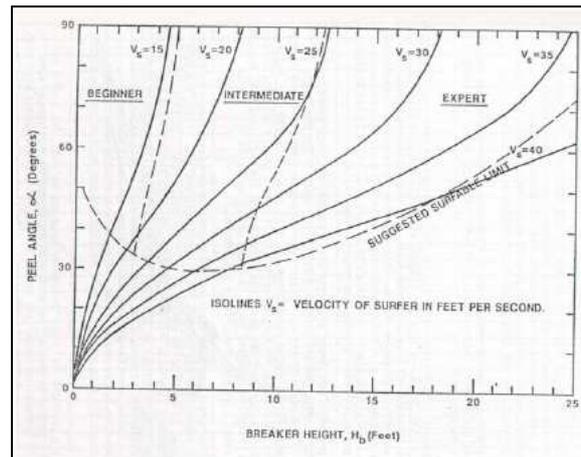


Figura 2.7 Clasificación de la capacidad del surfista y el ángulo de descrestamiento, Walker (1974).

Inicialmente, Hutt (1997) aplicó la clasificación de Walker (1974) y encontró que todos los registros de Raglan fueron clasificados como "intermedios", a pesar de disponer de una amplia gama de ángulos de descrestamiento registrados y de saber que las olas que rompen en Raglan requieren diferentes niveles de habilidad para navegarlas (desde principiantes hasta expertos).

Hutt *et al.* (2001) crearon un nuevo sistema de clasificación según el grado de dominio o maestría del surfista, el ángulo de descrestamiento y la altura de las olas. Esta clasificación divide y define 10 niveles o clases de surfista (desde el principiante absoluto (1) a surfistas que podrán surfear olas aún no navegadas (10)) teniendo en cuenta una restricción de la altura de las olas a un máximo de 4 m., véase tabla 2.311 y figura 2.8.

Clase	Descripción de la clase de surfista	Ángulo de descrestamiento (grados)	Altura de ola mín./máx. (m)
1	Principiante; todavía no puede surfear olas en su frente y simplemente se mueve siguiendo avance del oleaje	90	0,7 - 1
2	Aprendiz; solamente puede surfear lateralmente sobre la cresta de la ola	70	0,65 - 1,5
3	Iniciado; solamente puede desarrollar su destreza surfear en la cara de la ola en plunging	60	0,6 - 2,5
4	El surfista comienza a iniciar y ejecutar ocasionalmente maniobras típicas de surf	55	0,55 - 4
5	El surfista puede ejecutar maniobras típicas consecutivamente en una ola simple	50	0,5 - 4
6	El surfista puede ejecutar maniobras típicas consecutivamente. Ejecuta maniobras avanzadas en ocasiones	40	0,45 - 4
7	Grado más alto de aficionado. Ejecuta maniobras avanzadas de surf	29	0,4 - 4
8	Profesional. Ejecuta consecutivamente maniobras avanzadas de surf	27	0,35 - 4
9	Grado más alto del nivel de profesional. Ejecuta consecutivamente maniobras avanzadas de surf	No alcanzado	0,3 - 4
10	Surfista en el futuro	No alcanzado	0,3 - 4

Tabla 2.3 Relación altura de ola y clase de surfista (Hutt *et al.* , 2001).

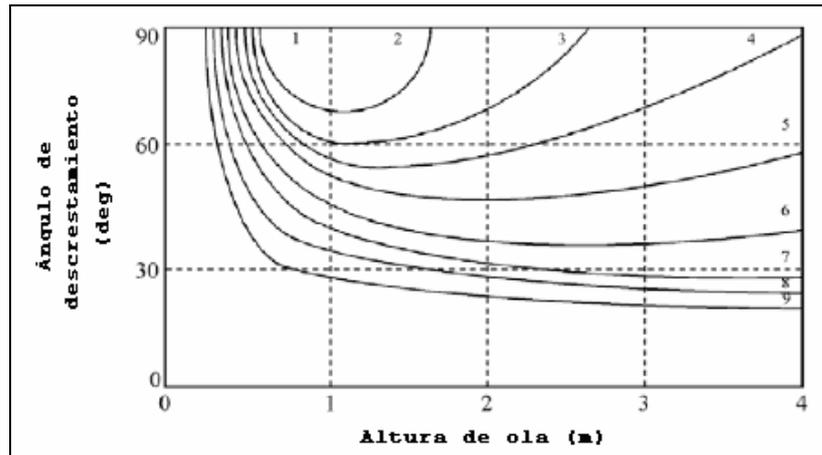


Figura 2.8 “Peel angle” en función de la altura de ola y clase de surfista (Hutt *et al.*, 2001).

2.3 RECORRIDO DEL SURFISTA

La longitud de recorrido surfeable que proporciona una ola es un parámetro clave que determina la capacidad de un “spot” o lugar de práctica del surf. Para coger una ola (“take-off”), generalmente se necesitan de 2 a 5 segundos, dependiendo de la talla de ola y el tipo de rotura (Walker, 1974). Los diferentes “spots” repartidos por todo el mundo presentan distintos recorridos; desde los inferiores a 50 metros como el ejemplo de Pipeline en Hawaii hasta los de más de 500 metros como en Jeffreys Bay en Sudáfrica. El caso de Mundaka, localización situada en el mar Cantábrico (País Vasco), tiene un largo recorrido de hasta 300 metros. Estos últimos recorridos no son comparables a los del Mediterráneo que ofrece recorridos muy cortos; inferiores a los 50 metros en la gran mayoría de puntos. En el litoral catalán el recorrido corto es el característico; llegando incluso en diferentes puntos o “spots” a la zona de batida. En estos casos se llega prácticamente a tocar la arena para poder de esta manera alargar el recorrido.

2.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Según Mead (2003) la rotura tipo para la práctica del surf es “plunging” que produce el típico tubo tan impactante, pero también admite roturas “spilling” caracterizadas por una ligera falta de potencia y velocidad. Esta característica del tipo de rotura se debe relacionar con la altura de ola, el ángulo de descrestamiento y la frecuencia con las que se produce para poder obtener conclusiones válidas a la hora de juzgar la idoneidad de un arrecife artificial con el objetivo principal de la mejora de la práctica del surf.

Analizando las alturas de ola mínimas según el nivel de maestría del surfista expuesto por Walker (1974) y posteriormente mejorada por Hutt *et al.* (2001), se tiene que olas de más de 30 cm. de altura y ángulos de descrestamiento situados entre 30-90 grados darían la oportunidad de surfear a un gran rango de niveles de manera general. Esta será la condición a exigir al ángulo de descrestamiento, rango de 30-90 grados siendo especialmente deseable valores medios de 40-60 grados para obtener olas de buen nivel. Durante los siguientes capítulos se marcará un mínimo de 50 cm. de altura de

ola, siendo deseable alturas mayores para surfistas avanzados.

Si la batimetría del fondo tiene contornos paralelos a las crestas de olas, la ola romperá casi simultáneamente a lo largo de toda cresta y en lenguaje del surf “se cerrará”. En cambio si una ola se encuentra con una batimetría desviada respecto la cresta de ola, entonces la ola se topará con una profundidad variable a lo largo de la cresta; la ola romperá en un punto inicialmente y luego progresivamente a lo largo de la cresta a medida que esta vaya avanzando sobre la cota propicia para la rotura, creando un “cierre” progresivo a lo largo de la cresta permitiendo un recorrido lateral del surfista por la ola. El ángulo de descrestamiento representa el cierre de la ola y éste es función, claramente, de la orientación del oleaje y la batimetría del fondo. Si se considera una batimetría paralela a la línea de costa, el ángulo de descrestamiento puede ser comparado con el ángulo de incidencia.

El parámetro de similitud del surf deberá situarse siempre por debajo de 2 ($I_r < 2$) para producir roturas tipo plunging o spilling. Siendo deseable que esté situado entre $0,4 < I_r < 2$ para producir un tipo plunging, ideal para el surf. La pendiente del fondo interviene en este parámetro, permitiendo así poder establecer la inclinación necesaria que producir un tipo de rotura con un peralte dado. De esta característica se desprende el estudio de peraltes del oleaje presentes en las costas catalanas detallado en el capítulo 4.

Los recorridos presentes en el litoral catalán poco tienen que ver con los largos recorridos de Mundaka, País Vasco. El surfista, en el litoral catalán así como en el Mediterráneo de manera casi general, se debe conformar con recorridos cortos y alturas de ola relativamente bajas. Por lo tanto, una actuación de gran interés podría ser el alargamiento del recorrido surfable mediante la colocación de una estructura sumergida que provoque la rotura durante más de 50 metros con unas condiciones favorables para la práctica del surf.

El ángulo de descrestamiento o “*peel angle*” es el parámetro más útil ya que es el más fácil de medir, puede ser modelado numéricamente con precisión y es más sensible al tipo de maniobra (Scarfe *et al.*, 2002). Se puede favorecer el ángulo de descrestamiento con una correcta disposición del arrecife artificial respecto al oleaje incidente.

Si mediante una actuación podemos cambiar los tipos de rotura de ola presentes en nuestro litoral hacia tipos plunging o spilling, con los adecuados ángulos de descrestamiento y con un recorrido aceptable, estaremos mejorando sin duda las condiciones de ola haciéndolas más surfables. Durante el capítulo 4 se efectúa el diseño de la estructura a proponer para el litoral catalán. Los taludes de la estructura se determinarán considerando el oleaje de surf medio de la zona.

CAPÍTULO 3

ESTRUCTURAS – ESTADO DEL ARTE

3.1 HISTORIA

En 1969, *Surfer Magazine* publicó un artículo del Dr. Richard Grigg titulado “*Artificial Reefs, a Plan for Multiple Use*” en el cual se propone la construcción de un lugar de surf con un proyecto multipropósito (surf, buceo y protección de costas). Este concepto fue adoptado para un proyecto en Royal Palms Beach (Point Fermin, Florida); sin embargo el proyecto se dejó y no se llevó a cabo su construcción. Palmer y Walker (1971) proponen la creación de un arrecife artificial con el objetivo del surf como parte integrada de un dique en Honolulu, Hawaii; tampoco se llevó a cabo. En agosto de 1971, “*International Surfing*” describió un arrecife compuesto de una bolsa de arena en Hermosa Beach, California, construido por Hoppy Swarts unos 30 metros mar adentro con una anchura en la base de 15 metros.

En 1975, el Dr. Richard Silvester fue el encargado por la “*West Australian Surf Riders Association*” para preparar un informe sobre la viabilidad de la construcción de arrecifes artificiales. La investigación y propuesta fueron presentadas en el informe “*Synthetic Surf Sites*”. En él se recoge el concepto de construir el arrecife con bolsas de polietileno llenas de arena con una extensión de aproximadamente 46 metros mar adentro y unos 9 metros de ancho. Sin embargo la propuesta de actuación no se llevaría a cabo. En su informe, Silvester (1975) destacó que un arrecife protegido con rocas presentará riesgos para la seguridad. Con un modelo hidráulico bidimensional, el Dr. Fred Raichlen (1976) realizó unos estudios para determinar la estabilidad de los materiales presentes en un arrecife encontrando, en acuerdo con Silvester (1975), que una capa de protección de grandes rocas podría causar diferentes situaciones de peligro como el desalojo de estas durante tormentas.

En 1981, Moffatt y Nichol prepararon un estudio de viabilidad para un arrecife artificial en Oceanside (San Diego, California). El estudio se realizó para “*Los Angeles District Corp of Engineers*” a raíz de una propuesta que consistía en el control de la erosión de la playa. En otro estudio, el “*Corp of Engineers*”, después de realizar un dragado de 115.000 metros cúbicos de material para la construcción del Puerto de Dana Point, California, se colocó el material al lado del puerto formando bancos de arena para mejorar las condiciones de surf. Sin embargo, no hay documentación disponible sobre la configuración de los arrecifes o bancos y sus efectos sobre el surf. El oleaje erosionó los bancos y, por lo tanto, dejó de producir olas surfeables.

En junio de 1988, el Gobierno de Australia Occidental (WA) formó el “*Artificial Surfing Reef Committee*” (ASRC) para investigar las posibles actuaciones en el área metropolitana de Perth siguiendo las propuestas realizadas desde principios de los setenta. En 1989, después de estudios detallados del oleaje, clima, servicios de apoyo, instalaciones y acceso del público el ASRC recomendó que el arrecife artificial se construyera en la zona conocida como Cable Station, South Cottesloe.

La construcción del arrecife de Cables Station se considera como la construcción del primer arrecife artificial de este tipo, diseñado con el propósito específico de mejorar y crear una ola surfeable. Paralelamente a Cables Station se han desarrollado otros

diseños de arrecifes artificiales surf en lugares como California, Nueva Zelanda y Australia. (Bancroft, 1999)

3.2 CONSTRUCCIONES EN FUNCIONAMIENTO

Existen un gran número de construcciones con semejantes propósitos en la actualidad. A continuación se recogen la primera actuación con el objetivo principal de mejorar las condiciones locales de surf (*Bargara en 1997*), algunas de las estructuras actualmente en funcionamiento (*Cables Station 1999, Pratte 2000, Gold Coast 2000, Mount Maunganui 2007 y Ventura Oil Piers 2007*) y una selección de proyectos en construcción y/o diseño (*Opunake 2008, Bourmouth 2008, Long Branch, Newquay, Orewa, Port Elisabeth, San Francisco Bay, Barcelona*).

Bargara (Australia)

Municipio situado en la parte norte de Queensland. Se puede clasificar como la primera actuación orientada esencialmente a la mejora de la práctica del surf como objetivo principal del proyecto, en 1997. La región está caracterizada por un oleaje generalmente menor a 1 metro de altura y asiduamente con olas de 0,2-0,4 metros con períodos de 6-9 segundos (BPA, 1986). No se llevó a cabo ninguna modelización previa, sino que fue el conocimiento y la experiencia local los recursos utilizados para la reubicación o fractura de los grandes bloques presentes en primera línea de playa. Los grandes bloques, rocas de basalto, fueron peinados durante marea baja utilizando una retroexcavadora para moverlos. El volumen movido de rocas fue aproximadamente 300 m³.



Figura 3. 1 Movimiento de grandes bloques, Bargara (Greg Redgard, en Jackson y Corbett, 2005).

Aprovechando las mareas con recorridos de 2,5 metros y una batimetría muy plana; la primera línea de playa donde se movieron los grandes bloques se convierte en zona de rompientes. El proyecto se considera en términos generales como exitoso a nivel local, aunque el arrecife sólo funciona con mareas altas. Evitar una cara modelización, la participación de la comunidad local y la simple metodología de construcción ha dado lugar a un bajo coste total. (Jackson y Corbett, 2005)

Cables Station (Australia)

El arrecife de Cables se encuentra en Perth, Australia Occidental. Las condiciones de ola se caracterizan por una altura significativa (H_s) de 2 metros y un período medio espectral (T_m) de 8,8 segundos aunque existe una gran variabilidad estacional (Lemme *et al.*, 1999). La forma del arrecife es una "V" en planta o incluso un boomerang con una abertura de unos 45°. El arrecife se construyó a unos 300 metros mar adentro, coronando a 1 m por debajo de la superficie. El arrecife se construyó con 5.500 m³ de roca de 1,5 a 3 toneladas utilizando una barcaza. Costó unos 235 €/m³.

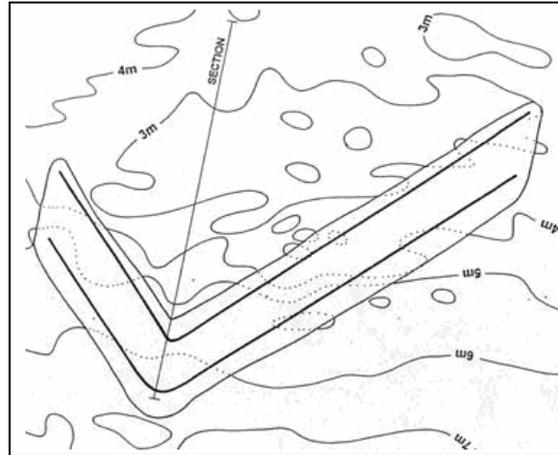


Figura 3. 2 Diseño inicial del arrecife de Cables Station (Artificial Surf Reef Committee, 1994).

Button (1991) tras estudiar en un canal el caso de Cables Station, indicó que una pendiente 1:20 produciría olas tipo plunging con la mayoría de las olas consideradas como oleaje de diseño. Un año más tarde, Lyon (1992) realizó un modelo reducido (escala 1:40) para determinar la configuración óptima del arrecife. Hurst (1996) aplicó el modelo de "refraction-diffraction" RCPWAVE (USACE) para determinar el aumento de la "surfeabilidad" colocando un arrecife. El estudio indicó que, a través de la construcción de un arrecife, el número de días surfeables se vio multiplicado por cinco.

Bancroft (1999) y Pattiaratchi (2003) llevaron a cabo un seguimiento del arrecife, llegando a la conclusión de que estaba realizado de acuerdo al diseño. Con oleajes bajos, como 0,5 metros, la rotura sobre el arrecife se produce en mareas bajas. Se empezó a construir en 1998 y se finalizó en 1999. Un año más tarde se consideró "surfeable" 142 días de 178 días que se producían roturas. El proyecto parece haber "mejorado" las características locales de surf cuando las condiciones de mareas, oleaje y viento son adecuadas. (Pattiaratchi, 2003)

Pratte's Reef (EE.UU.)

Es el primer arrecife artificial dedicado al surf en EE.UU., Pratte's Reef se encuentra en Dockweiler Beach (El Segundo, California). El arrecife fue construido con aproximadamente 120 contenedores de geo-textil llenos de arena, con un peso individual de alrededor de 15 t. Se empezó en el 2000 y terminó en 2001.

Según Henriquez (2004) el arrecife fue diseñado por Nelson (1996) y tiene una forma V-simple. Los componentes del arrecife se estimaron con el uso de un modelo basado en refracción-difracción, modelo REF / DIF - 1 (Kirby y Dalrymple, 1994).

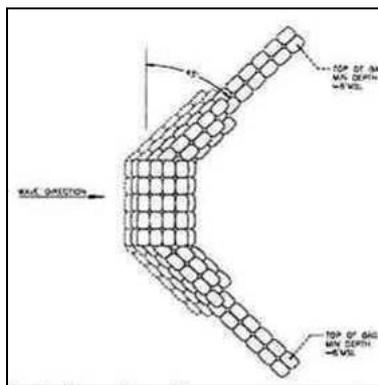


Figura 3. 3 Pratte's reef (Borrero y Nelson, 2003).

Borrero y Nelson (2003) monitorizaron ampliamente las condiciones de surf y la respuesta de la playa al arrecife de Pratte, llegando a la conclusión de que el arrecife no parece funcionar correctamente.

Gold Coast (Australia)

Situado en Australia, concretamente en el municipio de Narrowneck en la Gold Coast, este arrecife es quizás el más popular de entre todos los construidos hasta la fecha. Realizado en el año 2000 ha sido un éxito tanto en la mejora de las condiciones de surf como en el buen desarrollo del ecosistema que disfrutaban diversas especies de fauna marina y en su propósito principal de la protección de la línea de playa. Es necesario un poco de oleaje para que se produzca rotura dado que la coronación es 3 metros bajo el agua, rompiendo así olas superiores a los 3 metros de altura. El "take-off" se sitúa a unos 250 metros mar adentro.



Figura 3. 4 Vista aérea del arrecife de Narrowneck, Gold Coast (Black *et al.*, 2003).

La monitorización durante siete años y la investigación de Jackson *et al.* (2007) sobre este arrecife de Gold Coast indican que sólo la parte superior de la ladera afecta a la rotura, por lo que la parte inferior del talud puede ser cambiada para reducir su volumen (es decir, la pendiente puede ser escalonada cuando la profundidad del agua aumenta). Jackson *et al.* (2007) también comentan el hecho que si un arrecife se construye sobre un lecho marino de arena, las fluctuaciones en los fondos marinos puede tener un impacto significativo en su rendimiento. A pesar de haber sufrido el impacto de varias tormentas (H_m hasta 12 m) la protección de la costa ha sido eficaz.

Mount Reef (Nueva Zelanda)

En la localidad Mount Maunganui al norte de Nueva Zelanda, es considerado el segundo gran arrecife artificial con el propósito principal del surf y el primero de Nueva Zelanda. Su construcción se inició en septiembre de 2005 y finalizó un año después, en octubre 2006. Con un oleaje local generalmente menor a 1 metro de altura, el arrecife fue diseñado siguiendo un modelo reducido. Presenta una forma en V con una obertura de unos 40° y corona a 0,4 metros de profundidad (diseño de ASR Ltd.). El arrecife está situado a 250 m de la costa y proporciona un descrestamiento óptimo durante unos 50 metros de recorrido (www.asrltd.co.nz). Las ecuaciones empíricas de Andrews (1997) fueron utilizadas para predecir las dimensiones a la hora de realizar el diseño.

Los principales efectos físicos debidos a la construcción de arrecifes artificiales son los cambios producidos en el sistema de transporte de sedimentos. Estos cambios se reflejan en la deposición de sedimentos en las inmediaciones a lo largo de la costa y en la formación de un saliente o tómbolo (Komar, 1976) que mejora la protección de la costa. Macky *et al.* (1995) investigaron sobre los efectos en el transporte de sedimentos, en relación con los modelos numéricos de Black y Rosenberg (1992).



Figura 3.5 Vista aérea del arrecife, Mount Maunganui (www.mountreef.co.nz).

Una costura de los contenedores se rompió y tuvieron que ser retirados dejando un espacio de unos 60 m de largo por 6 m de ancho en el centro del brazo derecho del arrecife, véase en la figura 3.5.

Ventura Oil Piers Reef (EE.UU.)

Ventura Oil Piers Reef es un arrecife sumergido situado en una zona conocida como “los muelles de petróleo” en el condado de Ventura, California. Históricamente la zona de la costa ha sido una importante zona de surf, pero la construcción y posterior eliminación de los muelles del petróleo (1998) significó la desaparición de esta actividad. Además, la playa de los muelles de petróleo se había ido erosionando desde la retirada de los muelles.

En concreto, el arrecife está diseñado para mantener la arena de la playa sin bloquear el transporte de material en la zona litoral. Dado que los sedimentos pueden moverse libremente entre la estructura y la línea de playa, la estructura no tendrá un efecto perjudicial para las playas situadas en las inmediaciones. Además, el arrecife mejorará las condiciones para usos recreativos como el surf o buceo.

El arrecife también aumenta el ancho de playa y además proporciona un hábitat con gran variedad de flora y fauna marinas. A finales del 2007 todavía se esperaba una asignación de fondos del congreso de los EE.UU. para proceder a su construcción. (BEACON, 2007)

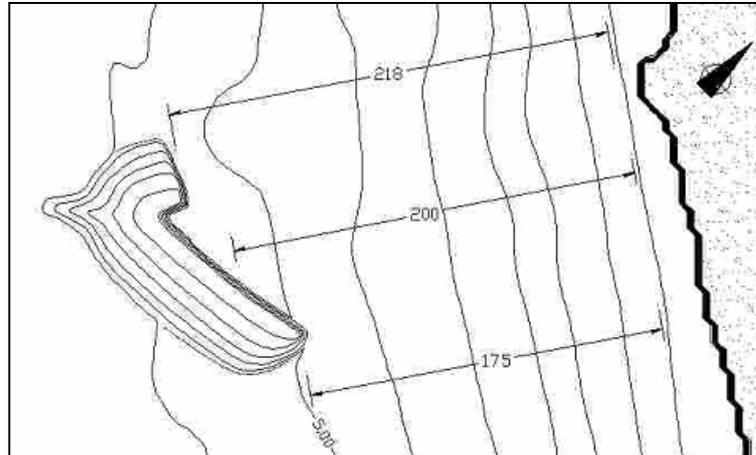


Figura 3. 6 Diseño del arrecife de Ventura Oil Piers (Section 227 USACE, diseño de ASR Ltd.).

3.3 CONSTRUCCIONES O PROYECTOS EN DESARROLLO

Opunake reef (Nueva Zelanda)

Opunake se encuentra en la costa este de Nueva Zelanda. Es el segundo arrecife de su país después de Mount Reef. Según datos de la empresa ASR Ltd. la construcción empezó en el 2008 y se espera su finalización para el verano del 2009. La obra tiene una forma más simple que las anteriores, distribuyendo el material de forma casi paralela a la costa y produciendo una rotura normalmente de derechas con un brazo de 100 metros de longitud.

Este proyecto ha requerido de varios años de labor sobre el terreno, recopilación de datos y un modelado para determinar la mejor ubicación. Se utilizó el modelo numérico 3DD[®] (Black, 2000) para comparar los beneficios e impactos producidos tras la colocación de la estructura.



Figura 3. 7 Recreación de la situación y diseño del arrecife de Opunake (ASR Ltd.).

Si bien la región de Taranaki Sur es famosa por la gran cantidad de lugares de calidad, muy pocos producen tubos de recorrido rápido como los que el arrecife de Opunake está diseñado para producir.

Bournemouth (Reino Unido)

El arrecife artificial estará estratégicamente situado entre los dos primeros espigones al este de Boscombe Pier (Bournemouth, Reino Unido). El tamaño real del arrecife será de aproximadamente una hectárea y se encontrará a más de 200 metros de la orilla. Será uno de los cuatro grandes arrecifes artificiales que tienen como finalidad principal la mejora del oleaje destinado a la práctica del surf en todo el mundo.

El arrecife fue diseñado por el Dr. Kerry Black (ASR Ltd.) en 2005. Al igual que el arrecife de Narrownack (Gold Coast), el arrecife se construirá con sacos de geo-textil de arena. Estará compuesto de 55 mega-contenedores que pueden llegar a pesar, llenos de arena, hasta 2.500 toneladas; con dimensiones máximas de 70 m. de largo, 2 m. de alto y 6 m. de ancho.

El inicio de las obras fue el pasado 16 de Julio de 2008, con la implantación del geo-material como capa base de los arrecifes y que evita el hundimiento de éstos en los fondos marinos o su desplazamiento por la fuerza del agua.

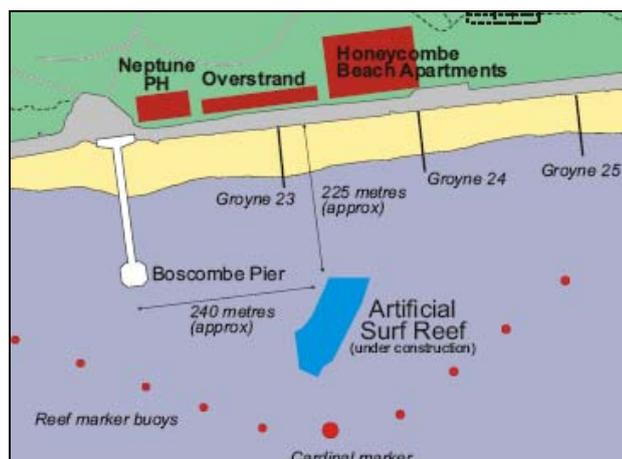


Figura 3. 8 Localización del arrecife artificial de Bournemouth (www.bournemouth.co.uk).

Con condiciones meteorológicas en calma, tales como en julio o agosto, el arrecife creará una 'laguna' a lo largo de la costa, es decir, mar plano para las familias y usuarios de la playa. Este arrecife está diseñado para mejorar la práctica del surf en Boscombe, que tiene necesidades particulares relacionadas con el tipo de oleaje que golpea esta parte del litoral sur inglés; generado principalmente por los vientos locales.

Esto condujo a un diseño que reduce la onda corta para proporcionar un viaje más limpio durante los 120 metros de longitud del brazo. (Mead (2007) en www.surfcore.co.nz)

Long Branch (EE.UU.)

En noviembre del 2005 se inició la primera etapa del trabajo de diseño de este arrecife multipropósito en New Jersey, Estados Unidos. Si bien el objetivo principal de este proyecto es una buena calidad de surf, en términos de protección es también de interés puesto que es necesaria realizar una estabilización de la playa. Actualmente existe una gran práctica de surf en la zona, sobretodo cerca de embarcaderos y espigones construidos para reducir la erosión en la playa. Según la empresa ASR Ltd. las actuales medidas de protección no solucionan el problema de la erosión, debiéndose realimentar las playas continuamente. El diseño y estudio de viabilidad lo realiza ASR Ltd. y se prevé su construcción para 2009-2010.

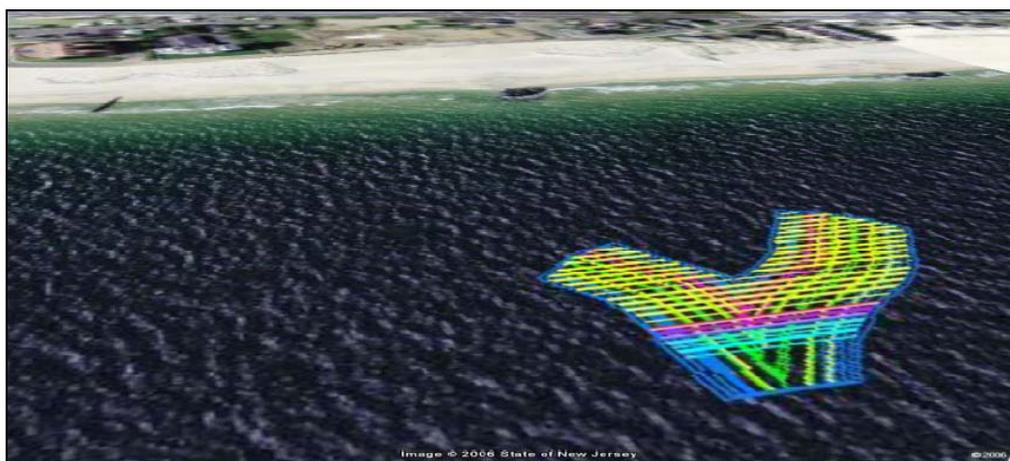


Figura 3. 9 Recreación del arrecife en Long Branch (ASR Ltd., fuente: State of New Jersey).

Newquay (Reino Unido)

La propuesta del arrecife de Newquay, costa sur-oeste de Inglaterra, tiene pendientes de entre 1:19 y 1:20. La pendiente de diseño influye en el volumen del arrecife y, potencialmente, en sus costes. Tras un estudio de viabilidad en 2004 (ASR Ltd.) quedó demostrada la posibilidad de diseñar un arrecife en Newquay y se vio que con condiciones de viento se producirían olas de alta calidad para la práctica del surf. Dependiendo de las condiciones de marea, en dicho estudio, se comenta que el arrecife estará sumergido en un 95 % de las ocasiones.

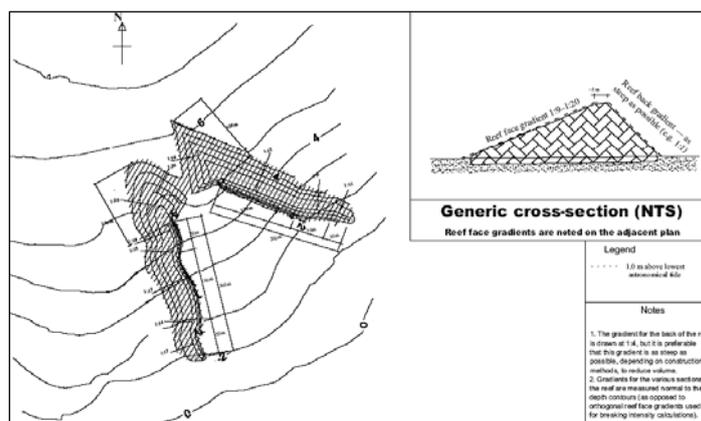


Figura 3. 10 Diseño del arrecife de Newquay (ASR Ltd.).

Weight (2004), director del “*Newquay Artificial Reef Company*”, comenta los múltiples beneficios que comporta la construcción de un arrecife artificial; sobretodo se centra en la mejora o potenciación de la economía local con una gran participación de la actividad surfera. Resalta que el proyecto ha tenido una gran cobertura a nivel local, nacional e incluso en la prensa internacional además de un gran éxito al capturar la imaginación de los jóvenes e inspirarlos a emprender estudios académicos.

Orewa (Nueva Zelanda)

El núcleo de Orewa se encuentra justo al norte de Auckland, Nueva Zelanda. Los 2,4 kilómetros del largo tramo de costa tienen poca playa seca con la llegada de la marea alta. La playa es considerada como una de las más activas e importantes, por lo tanto se ha buscado la manera de proporcionar una playa amplia incluso con marea alta para mejorar las comodidades durante varias décadas. En los trabajos de la Universidad de Auckland se presentan los arrecifes como las estructuras más exitosas para retener la arena. La realimentación de la playa sólo tiene éxito a corto plazo.



Figura 3. 11 Diseño preliminar presentado por Black y Mead (ASR Ltd.).

Orewa es un caso especial: dispone de un oleaje bastante bueno para el surf (excepto durante tormentas tropicales), una gama de mareas de 3 metros y una pendiente suavemente inclinada (<1:100). El objetivo principal es la protección de la playa, sin embargo, el arrecife está también diseñado para favorecer las condiciones de surf. Esto se debe a que en esta zona se concentra lo que probablemente sea la mayor comunidad surfera de Nueva Zelanda. (Black y Mead, “*Development of a Multi-Purpose Reef at Orewa Beach, New Zealand*”)

Port Elizabeth (Sudáfrica)

Este programa abarca la modelización física para cuatro proyectos en Port Elizabeth que van desde la creación de una zona de natación protegida hasta el aumento de la anchura de la playa, pero todos con la mirada puesta en mejorar la práctica del surf.

Los distintos proyectos están en diferentes etapas, con diversas combinaciones de arrecifes y objetivos específicos de cada caso. Por citar un par de ejemplos, Wells

Estate (playa de Bandera Azul en el municipio de Nelson Mandela Bay) y Pollok Beach (una playa más amplia) requieren la mejora de la práctica del surf y la protección contra la erosión. En este sentido, una estructura sumergida oblicua se está considerando para Pollok Beach.

San Francisco Bay (Sudáfrica)

Estudio de viabilidad que se está llevando a cabo para el uso de arrecifes con fines múltiples para prevenir la erosión de la playa de San Francisco y restaurar la amplia playa de arena blanca que hace famosa a la zona.

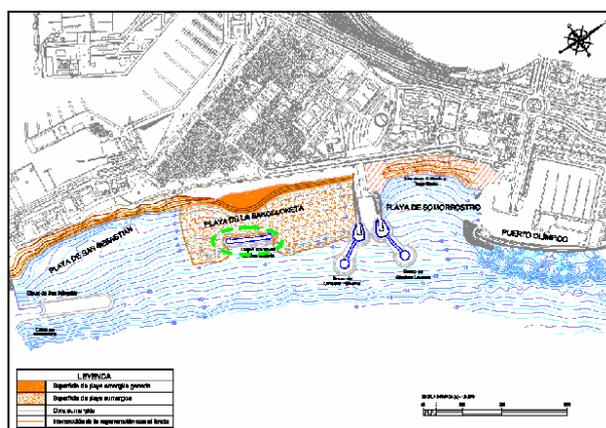


Figura 3. 12 Diseño preliminar presentado por ASR Ltd.

Situado en la Sunshine Coast (entre Jeffrey's Bay y Seal Point) este proyecto incorpora la realimentación de la playa, por lo menos tres arrecifes sumergidos en alta mar y la estabilización de las dunas a través de la plantación de especies adecuadas para estabilizarlas. Tiene el beneficio añadido de la apertura del estuario Kromme que se ha llenado de arena, ya que la construcción de presas lo evitaba desde hace varias décadas.

Barcelona (España)

El Ayuntamiento de Barcelona se propuso la construcción de un dique sumergido en la playa de la Barceloneta así como la prolongación de espigones mediante diques sumergidos en diferentes puntos. Véase el proyecto:



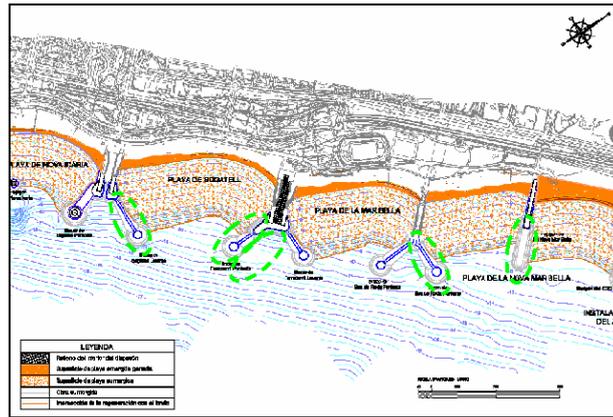


Figura 3. 13 Proyecto inicial, diseño preliminar presentado por ASR Ltd.

La Asociación Catalana de Surf encargó a la empresa ASR Ltd. una valoración de este proyecto de obra para la posible implementación de alguna estructura tipo arrecife artificial multipropósito. El resultado fue el documento “*Protección de las playas de Barcelona con diques-arrecife polivalentes*” con fecha de 2005, el cual propone cambiar el dique sumergido proyectado así como realizar la ampliación de varias prolongaciones propuestas en el proyecto del Ayuntamiento.

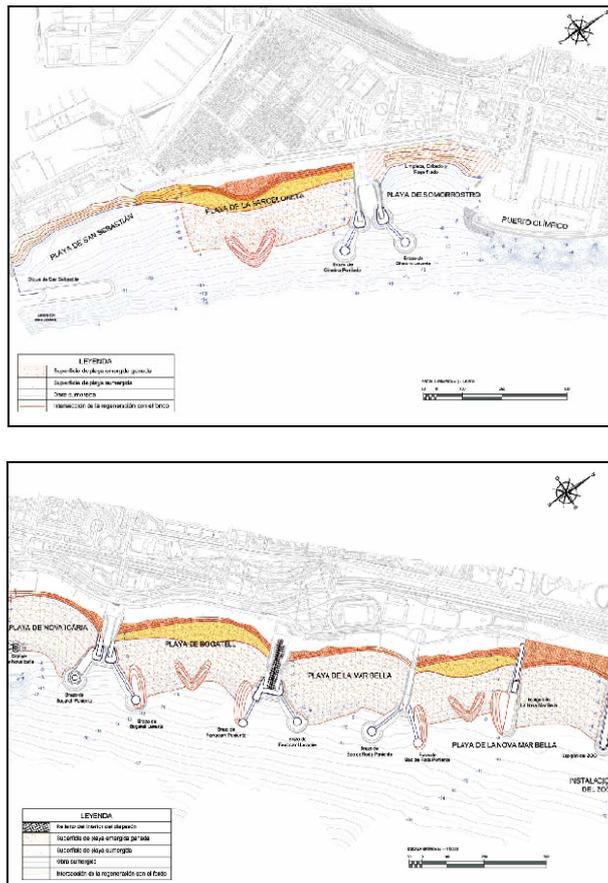


Figura 3. 14 Propuesta realizada por ARS Ltd. para la ciudad de Barcelona

Como se puede observar en la figura 3.14, la forma propuesta por la empresa consultora fue una forma en “V” o en boomerang en tres de nuestras playas, así como

la variación de las prolongaciones de los espigones produciendo taludes más suaves que ayuden a ordenar el oleaje por el efecto de refracción y a la misma vez aprovechen el efecto de difracción al incidir el oleaje sobre un obstáculo.

3.4 RESUMEN

A continuación se recoge una tabla que resume las características de cada proyecto expuesto durante el capítulo:

Proyecto	Año	País	Tipo	Función principal	Hs	Coronación
Bargara	1997	Australia	Recolocación de grandes bloques en zona de rompientes	Mejorar las condiciones de surf	<1 m.	?
Cables Station	1999	Australia	Grandes geotextiles rellenos de arena	Mejorar las condiciones de surf	≤2 m.	1 m. de profundidad
Prattes	2000	EE.UU.	Sacos rellenos de arena	Mejorar las condiciones de surf	≥2 m.	?
Gold Coast	2000	Australia	Grandes geotextiles rellenos de arena	Protección de costas y mejora de las condiciones de surf	>2 m.	1 m. de profundidad
Mount Reef	2005	Nueva Zelanda	Grandes geotextiles rellenos de arena	Mejorar las condiciones de surf	<1 m.	0,4 m. de profundidad
Ventura Oil Piers	2008	EE.UU.	Grandes geotextiles rellenos de arena	Protección de costas y mejora de las condiciones de surf	>1 m.	0,5 m. de profundidad
Opunake	2009	Nueva Zelanda	Grandes geotextiles rellenos de arena	Protección de costas y mejora de las condiciones de surf	?	?
Bournemouth	2009	Reino Unido	Grandes geotextiles rellenos de arena	Protección de costas y mejora de las condiciones de surf	?	?
Barcelona	-	España	Propuesta de implantación	Protección de costas y mejora de las condiciones de surf	≥1 m.	?

Tabla 3. 1 Resumen de funciones y detalles de las construcciones realizadas.

CAPÍTULO 4

LOCALIZACIONES TIPO – AGENTES IMPULSORES

4.1 INTRODUCCIÓN

Seguidamente se proponen una serie de localizaciones tipo y agentes impulsores necesarios para la colocación idónea de la estructura. Su viabilidad requiere unos detalles bastante básicos como pueden ser la minimización del coste del proyecto, la no erosión al entorno, la facilidad de su implantación e incluso la mejora en la protección de la costa. El coste del proyecto va unido al coste de su construcción, regido principalmente por la profundidad (a más profundidad, más volumen de material será necesario para su realización). La erosión de la playa situada en las inmediaciones de la estructura es evitable con una separación suficiente de la playa emergida que deberá ser determinada. La facilidad de implantación de un arrecife artificial es dependiente de las condiciones locales (meteorología, estado de la mar, etc.), del coste del proyecto y la protección de la costa.

Conceptos y experiencias

Para poder hacer un análisis exhaustivo de la morfología batimétrica y de la estructura a proponer, es necesario distinguir las diferentes partes que ayudan a la formación y rotura óptima. Mead y Black (1999), observando diferentes arrecifes naturales dispersos básicamente por el Pacífico e Indonesia, recogieron las formas o componentes que intervienen de manera decisiva en la calidad del surf. La conclusión de este estudio es que las olas de gran calidad están asociadas a ciertas combinaciones de una serie de siete componentes regulares. Además, utilizando modelos numéricos, se investigó la función de tales componentes en relación con la refracción y la rotura producida. Los siete componentes descritos por Mead y Black (1999) son (véase conjuntamente figura 4.1):

- 1) **Rampa** ("*ramp*"): físicamente es una rampa que aumenta la refracción del oleaje. Su función principal es alinear las olas antes de que rompan sobre otro componente geomorfológico que suele ser una cuña. La rampa alinea las olas, reduciendo las posibles variaciones direccionales del oleaje a un rango cercano a la ortogonal de las isobatas. La alineación de las olas resulta en un mayor control del ángulo de descrestamiento sobre el arrecife, manteniéndose más o menos constante con varias orientaciones de oleaje.
- 2) **Plataforma** ("*platform*"): La plataforma es un elemento horizontal y su función principal es mantener el alineamiento ortogonal del oleaje generado por la rampa. Esto hará que se puedan juntar varios componentes sin alterar la orientación de la ola. De otro modo al avanzar la ola, la refracción haría variar las condiciones de descrestamiento a lo largo del frente de onda. La plataforma óptima se sitúa a cierta profundidad justo antes de la profundidad de rotura.
- 3) **Foco** ("*focus*"): Un foco es una forma de arista del fondo situada de tal manera que las ortogonales del frente de onda convergen hacia su eje. Esta convergencia hará que se forme un aumento local en la altura de ola y

entonces romperá antes que cualquier otra parte del frente, pudiendo definir así el inicio del recorrido de surf o zona de "take off". Un foco puede ser bueno para generar un pico en la ola, sin embargo, si el foco es demasiado grande puede hacer que la convergencia de la ola quite demasiada energía a las partes colindantes del frente, transformándola en una ola de altura reducida y ángulo de descrestamiento demasiado alto para unas buenas condiciones de surf.

- 4) **Cuña** ("wedge"): La cuña es una superficie plana inclinada hacia el lado de mar. Es el componente más efectivo para producir roturas de ola surfeables. Se debe jugar con su orientación para determinar su correcta colocación para producir buenos ángulos de descrestamiento. La cuña es similar a una rampa pero con otras características: una cuña está orientada cierto ángulo con respecto a la dirección ortogonal favorable. Además se localiza en zonas suficientemente someras para producir la rotura del oleaje. La cuña suele ser el componente principal en una rompiente de surf.

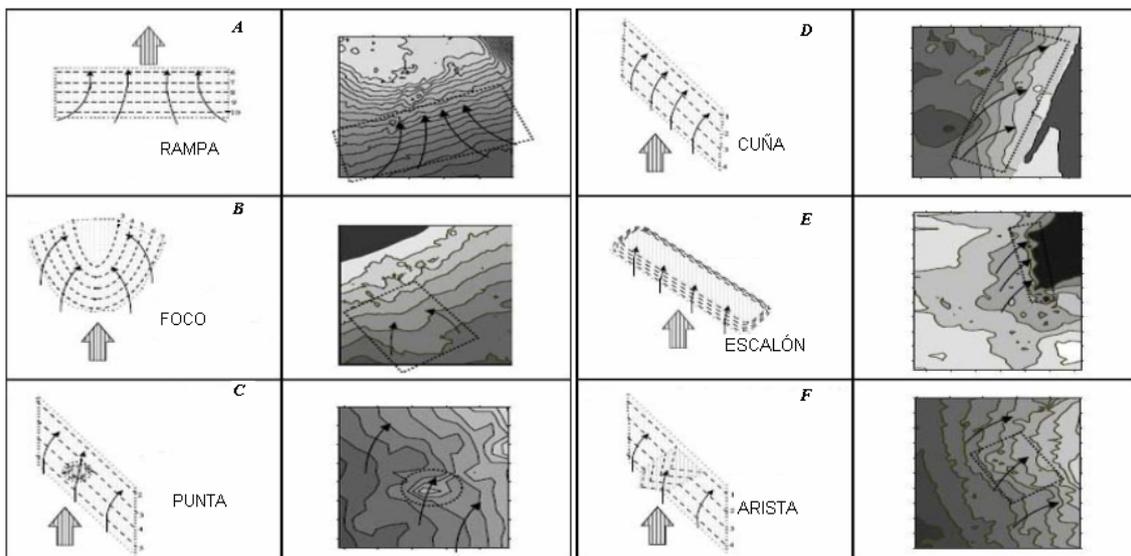


Figura 4.1 Componentes para el surf y su identificación en la batimetría (Black y Mead, 1999).

- 5) **Escalón** ("ledge"): se trata de una plataforma que tiene sus bordes inclinados, siendo más inclinado el borde que se enfrenta al oleaje. Un escalón, tal y como la palabra lo define, es una especie de cuña pero mucho más escarpado y con una plataforma hacia la orilla. Gradientes mayores a 1:4 se considera que producen roturas en surging o collapsing. (Galvin, 1968)
- 6) **Arista** ("ridge"): es un prisma triangular apoyado en una de sus caras rectangulares. Causa un decrecimiento en el ángulo de descrestamiento y un incremento en la intensidad de rotura del oleaje. Una arista es como un foco pero de reducidas dimensiones, sin crear convergencia en el frente de onda.
- 7) **Punta** ("pinnacle"): es una pequeña elevación, a modo de isleta sumergida, que incrementa la intensidad de rotura. Al igual que el foco, a menudo definen la salida de un recorrido o un punto para coger la ola. Son más abruptos y afectan a una zona menor que una arista. También pueden estar a lo largo del recorrido de la ola, creando una sección de ola más rápida y hueca.

Para una mejor comprensión del proceso de transformación que sigue el frente de olas en su aproximación a un arrecife se puede observar el arrecife de Bingin (Indonesia). Ha sido estudiado numéricamente en los trabajos de Mead y Black (1999). Está formado por rampa/foco/plataforma/cuña con una arista superpuesta encima de la cuña, véase la figura 4.2.

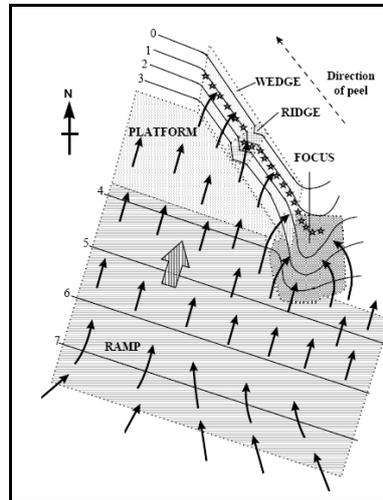


Figura 4.2 Configuración de los componentes a gran escala del arrecife de Bingin (Indonesia). Las unidades de las isobatas son los metros, las flechas muestran los cambios de orientación producidos en la ola por la refracción sobre los componentes (Black y Mead, 1999).

El oleaje que se aproxima desde aguas profundas se ve afectado inicialmente por la rampa. La rampa alinea las olas favoreciendo la ortogonalidad, reduciendo el posible abanico de direcciones de las crestas. La rampa también provoca el inicio del asomeramiento. Las crestas de las olas se refractan y rompen sobre la cuña. La función de la plataforma es mantener la dirección de las olas con el fin de conseguir un ángulo de descrestamiento constante en la rotura sobre la cuña. La arista crea una sección con un incremento localizado de la intensidad de rotura y un ángulo de descrestamiento inferior. El foco es el punto de cogida de la ola o "take-off" y es donde se inicia la rotura para su posterior descrestamiento sobre la cuña.

La tabla 4.1 recoge las características que deben tener los componentes de un arrecife para producir olas de calidad. Se destaca que estos valores han sido la conclusión de estudios realizados en zonas del Pacífico con oleajes bastante diferentes a los que se encuentran en el Mediterráneo.

COMPONENTE	FUNCIÓN	TAMAÑO(m ²)	GRADIENTE	ALINEACIÓN(°)
RAMPA	Pre-condicionante	100->10.000	1:40-80	0-90
PLATAFORMA	Transporte	10-3.000	>1:80	0-20
FOCO	Pre-condicionante	10-1.000	1:10-80	40-90
CUÑA	Rotura	50->2.000	1:4-40	30-80
ESCALÓN	Rotura	10-1000	1.1-4	25-60
ARISTA	Rotura	5-50	1:4-40	0-50
PUNTA	Rotura	01-10	<1:0.25-1	Sin alineación

Tabla 4.1 Características de cada componente según Black y Mead (1999).

La rampa, plataforma y el foco son componentes que preconditionan la ola, alineándola y produciendo el asomeramiento; mientras que la cuña, cresta, cima y saliente son componentes sobre los que la ola rompe. Dependiendo de la configuración, la orientación y el tamaño de estos componentes Mead y Black (1999 y 2001) encontraron los diferentes tipos de olas producidas. Cualquier alteración de estos componentes por procesos naturales o acciones humanas cambiarán los parámetros de la ola en la zona de surf. La ortogonalidad del arrecife artificial respecto a la alineación de las crestas provoca mejores resultados (Mead y Black, 2001). Cualquier desviación de la alineación óptima provocará un aumento o una disminución del ángulo de descrestamiento o *“peel angle”*; dando lugar a olas con recorridos más rápidos o más lentos dependiendo de la orientación de la estructura.

4.2 MORFOLOGIA BATIMÉTRICA

En todo el documento destaca una característica que influye de manera determinante en la propagación, formación y rotura de la ola para que esta última pueda ser surfada. Esta característica es la batimetría presente en la zona. La batimetría costera interviene en la refracción de la ola que se traduce en un cambio de orientación y un aumento o disminución de la altura de ola. Con oleajes irregulares, la batimetría y los obstáculos con los que interactúa el oleaje pueden ayudar, en cierta medida, a ordenarlo consiguiendo una buena sesión de surf.

Dado que el estudio se centra en la viabilidad de una estructura sumergida, siguiendo los componentes de un arrecife anteriormente descritos, el proyectista de una estructura semejante deberá buscar la rampa directamente en el medio sin proponer una alteración de este. La rampa se debe caracterizar por una pendiente suave. El estudio sugiere evaluar la viabilidad de pendientes más pronunciadas que las sugeridas por Black y Mead debido a la morfología disponible en la realidad del ámbito. Se proponen pendientes-tipo situadas desde un límite pronunciado de 1:20 hasta un límite tendido de 1:80, aunque este último límite rara vez será alcanzado en el litoral catalán cerca de la costa. Es deseable situar la estructura en fondos más tendidos que 1:20. De esta forma, se dispone de distancia suficiente desde la línea de playa hasta la estructura para producir una longitud de recorrido considerable sin llegar a un proceso de erosión de la costa.

4.2.1 FORMAS TIPO DE ISOBATAS

La forma de las isobatas, en aguas intermedias y someras va a repercutir en la propagación del oleaje y consecuentemente en las condiciones de ola en zona de surf. Se consideran, de manera descriptiva y a gran escala, las tres siguientes formas tipo de batimetría (cóncava, abierta y convexa):

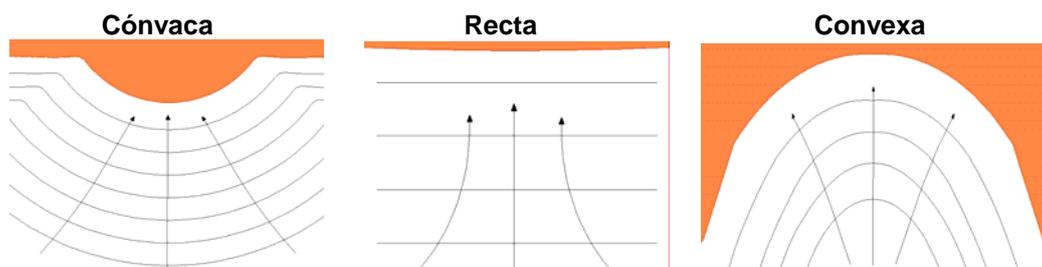


Figura 4.3 Formas tipo, se representan los cambios de orientación debidos a la refracción.

Características

- **Cóncavas** (tipo cabo): Esta forma tipo concentra, gracias al efecto de la refracción sobre el frente. Esta es la característica que un arrecife artificial potencia, focalizando la energía en el foco. La elección de una rampa con esta disposición de isobatas ayudaría a elevar la energía a una zona donde se implantará la estructura. Un punto negativo de esta clase de batimetrías es que pueden concentrar demasiado el oleaje en una zona, produciendo situaciones no aptas para el surf ni siquiera mediante la colocación de una estructura.
- **Rectas** (tipo abiertas): Unas líneas batimétricas completamente paralelas formarían una rampa perfecta en el caso de un oleaje ortogonal a ellas. Una forma tipo recta sometida a una variedad direccional reducida de orientaciones del oleaje es una disposición a tener presente para una elección viable.
- **Convexas** (tipo bahía): Las isobatas refractan las olas hacia el ancho de la playa desfocalizando el frente de ola ante la incidencia de un oleaje perpendicular, pero si el oleaje proviene de una dirección oblicua esta forma tipo puede ayudar a ordenar el oleaje hacia un ancho más amplio. Esta característica hace interesante esta morfología, pero presenta el inconveniente que una ordenación excesiva del oleaje puede provocar un cierre de la ola ("close-out"). Algunos "spots" concurridos por practicantes, por ejemplo Pals o S'agaró, disponen de una batimetría tipo bahía.

La elección de una forma tipo va unida a la presencia/ausencia de una incidencia predominante del oleaje. Tras un estudio del oleaje en la zona de actuación, el proyectista podrá evaluar la viabilidad de una u otra forma tipo. Siempre se deberá tener presente que las condiciones ideales de oleaje son las de un oleaje unidireccional que incida sobre una batimetría con forma recta. En estas condiciones, el oleaje se propaga de manera continua y, tras interactuar con la estructura, produce roturas aptas para ser montadas.

En el litoral catalán, los practicantes de surf recurren a estructuras de abrigo o de protección que les permiten disfrutar de condiciones de surf de manera más o menos regular. Este comportamiento es el resultado de la difracción producida por las estructuras. Tal fenómeno deberá ser tomado en consideración cuando la zona de actuación este bien delimitada y/o se pretenda aprovechar una ordenación del oleaje hacia un rango acotado de incidencia.

4.2.2 DISTANCIA MÍNIMA A PRESERVAR PARA LA NO AFECTACIÓN

La distancia mínima para la no afectación de la playa, situada en el trasdós de la estructura, es otra restricción que se ha de tener en cuenta a la hora de decidir una tipología base. Para realizar un análisis previo de la distancia a preservar, se ha tenido en cuenta una primera estimación a partir de los trabajos de Silvester y Hsu (1990). Éstos consideran el coeficiente B/S (donde B es el ancho de la estructura y S la distancia a la costa) y obtienen para diques "emergidos" la discretización sobre la formación de tómbolo, saliente o no afectación:

Criterio	Afectación
$B/S \geq 5$	Aparición de tómbolo
$1,33 < B/S < 5$	Con tiempo suficiente formación de tómbolo
$0,2 < B/S < 1,33$	Aparición de saliente
$B/S \leq 0,2$	No habrá cambios significativos en la línea de orilla

Tabla 4.2 Valores de formación de tómbolo y saliente de Silvester y Hsu (1990).

Aunque la estructura a proponer es sumergida, esta teoría ayuda a establecer unos mínimos. Suponiendo una anchura de estructura de 100 metros se necesitaría una separación mínima de 500 metros para no producir cambios significativos en la orilla. Una separación de dicha magnitud no es posible respetar en la costa catalana debido a las fuertes pendientes que registra el fondo marino en aguas costeras.

Para evaluar correctamente la generación de una posible erosión es necesario conocer el sistema de corrientes antes y después de la obra. La distancia a preservar se puede calcular a través de modelos numéricos. Se deberá tener en cuenta las condiciones de oleaje, las corrientes producidas, la batimetría local, los componentes proyectados y todas las posibles circunstancias o factores que puedan influir directamente o indirectamente en cada caso. Éstos van a alterar el proceso de diferente manera según la combinación y magnitudes con los que intervengan.

La determinación del esquema de corrientes antes y después de la actuación ha de ser el primer objetivo a modelizar para precisar la distancia mínima a respetar. Un estudio del transporte de sedimento de la zona de actuación aportará un conocimiento más exacto y detallado del escenario a modelizar.

4.2.3 PERFIL DE PLAYA

Para poder evaluar la pendiente del litoral catalán es necesario abordarlo desde un punto de vista de equilibrio teórico. El perfil de equilibrio es aquel que disipa de forma uniforme la energía que incide sobre él mismo. Se da cuando el sedimento es colocado y retrabajado por el oleaje (CEM, 2001). Bruun (1954) y posteriormente ampliado por Dean (1987), proponen que el perfil de equilibrio puede ser aproximado mediante la siguiente ley parabólica:

$$h(x) = A \cdot x^{\frac{2}{3}}$$

Donde h es la profundidad, x la distancia horizontal desde la línea de costa y A un parámetro adimensional relacionado con las características del sedimento. Además se asumen las siguientes hipótesis:

- Los perfiles de equilibrio son cóncavos.
- Los tamaños de grano pequeños y grandes están asociados a pendientes suaves y pronunciadas, respectivamente.
- El frente de playa es plano.

- Las ondas peraltadas dan lugar a pendientes más suaves y presentan tendencia a la formación de barras.

Dean (1987) demuestra que el parámetro A está relacionado con la velocidad de caída del sedimento, w , mediante la ecuación:

$$A = 0,067 \cdot w^{0,44} \quad \text{y} \quad w = 14 \cdot D^{1,1}$$

De esta manera se puede expresar el parámetro A en función del diámetro del sedimento a partir de las ecuaciones desarrolladas por Hallermeier (1981):

$$A = 0,21 \cdot D^{0,48}$$

Considerando esta última relación se obtiene, para un rango de diámetros medios del litoral catalán comprendido entre 200 y 1000 μm , los siguientes valores de A :

Díámetro medio μm	Valor A
200	0,097
250	0,108
300	0,118
350	0,127
400	0,135
450	0,143
500	0,151
550	0,158
600	0,164
650	0,171
700	0,177
750	0,183
800	0,189
850	0,194
900	0,200
950	0,205
1000	0,21

Tabla 4.3 Valores del parámetro adimensional A para diámetros medios catalanes

Resultando un valor medio de A de 0,161. Este valor muestra una ley de:

$$h(x) = 0,161 \cdot x^{\frac{2}{3}}$$

El perfil medio de este rango de tamaños de sedimento se aproxima mediante una pendiente cercana al 1:42. El valor mínimo se puede aproximar por una pendiente 1:69 y el máximo por 1:32. De esta manera, siguiendo un razonamiento teórico, el litoral catalán dispone de pendientes situadas mayoritariamente entre 1:30 y 1:70 en sus primeros 300 metros de perfil.

Una apreciación a este estudio del perfil medio según la ley de Dean, es que el fondo disponible permite la colocación de una estructura tipo arrecife artificial al poderlo aprovechar como rampa con inclinación dentro de los rangos establecidos (tabla 4.1).

4.3 MORFOLOGIA DE LA ESTRUCTURA

El principio básico de los arrecifes artificiales consiste en intentar alterar el fondo (su pendiente) para influir en la forma, intensidad de la rotura del oleaje y ángulo de descrestamiento básicamente. Se plantea inicialmente la elección de dos componentes imprescindibles para una estructura sumergida destinada a la práctica del surf; éstos son el foco y la cuña. El foco permitirá definir el punto de inicio de la rotura y la cuña orientada de cierta manera respecto el oleaje proporcionará el ángulo de descrestamiento óptimo. Una de las condiciones indispensables es la adecuación de la profundidad de coronación al oleaje disponible en la zona de actuación para que la estructura adquiera su correcta funcionalidad y propósito. Aristas y puntas no se consideran por su menor escala y afectación al comportamiento general de la rompiente.

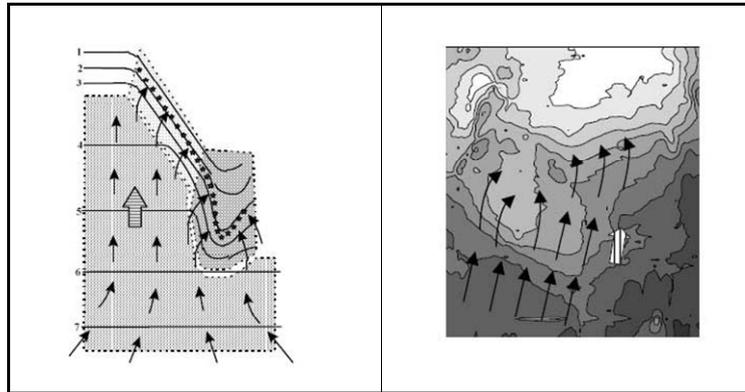


Figura 4.4 Combinación rampa+foco+cuña (Mead y Black, 2001b)

La combinación de componentes propuesta sigue las tendencias de las construcciones diseñadas hasta el momento. La rampa alinea las olas hacia la dirección ortogonal favorable, luego estas olas ya alineadas encuentran una zona donde hay menos profundidad que en el resto del frente. En este punto aumenta la altura de ola girando el frente de onda hacia el eje del foco, hasta el momento en que se produce el inicio de la rotura (el inicio del recorrido de surf).

Otras combinaciones de componentes son las citadas por Mead y Black (2001b) en sus trabajos. Pueden ser planteadas igualmente para nuestro litoral pero la combinación propuesta (foco+cuña) sigue el trabajo de Henriquez (2004). La forma óptima de un arrecife artificial focaliza la rotura en un punto inicial proporcionando dos brazos, uno de derechas y otro de izquierdas. Si el oleaje es oblicuo un brazo pierde calidad de surf, pero permite la ordenación del oleaje mejorando las condiciones en el otro brazo.

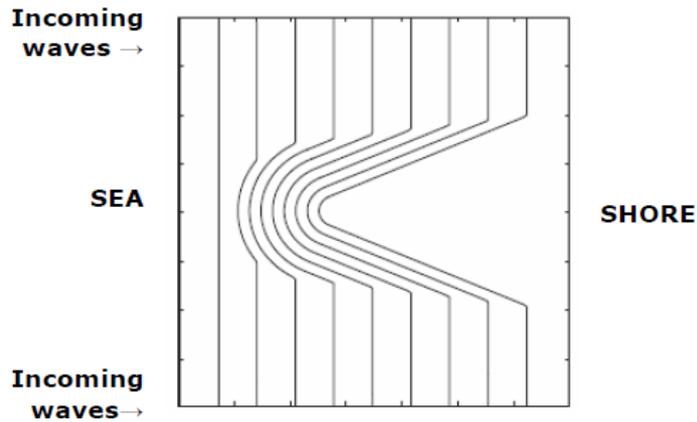


Figura 4.5 Forma óptima de arrecife según Henriquez (2004).

Según Henriquez (2004) una característica necesaria de diseño para un arrecife artificial es que debe producir ángulos de descrestamiento de al menos 40° . El número de Iribarren o parámetro de similitud del surf (I_{r_b}) ha de ser mayor de 0,4 y menor siempre de 2 para asegurar una rotura plunging o en su defecto Spilling (admiendo valores inferiores pero cercanos a 0,4).

En los primeros proyectos realizados de arrecifes artificiales se consideraba un gradiente lineal en la cara expuesta al oleaje (Mead, 2003); pero este concepto inicial evolucionó a un perfil convexo (Black y Blenkinsopp, 2002) tal y como se muestra en la figura 4.6. Con este perfil es posible ajustar la intensidad de rotura del oleaje para diferentes oleajes. El diseño convexo es compatible con la afirmación de Jackson et al. (2007) destacando que cuando la profundidad del agua aumenta la pendiente puede ser escalonada.

Es una conclusión del seguimiento realizado al arrecife de Narrowneck en Australia (Gold Coast); indicando que sólo la parte superior de la ladera afecta a la rotura, por lo que la parte inferior del talud puede presentar diferente morfología para reducir su volumen.

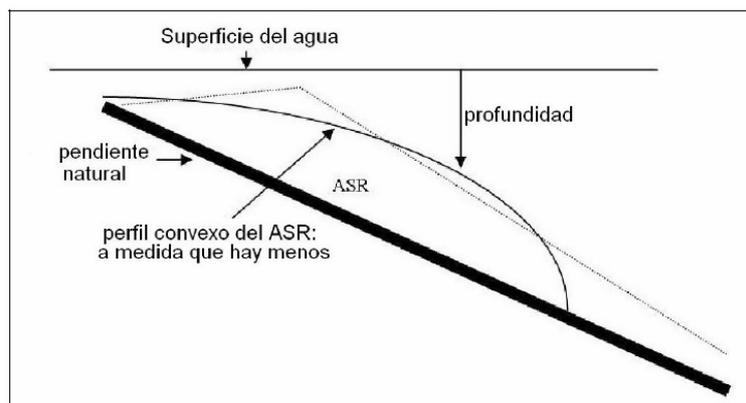


Figura 4.6 Perfil convexo propuesto por Black y Blenkinsopp (2002) (Modificado de Mead, 2003).

Multitud de diseños se pueden elaborar para abordar la viabilidad de una estructura, pero francamente, difícil sería su aplicación a una escala local. Por esta razón se

propone un diseño simple compuesto de una rampa, un foco y dos cuñas (brazo derecho e izquierdo) tal y como propone Henriquez (2004).

Utilizar la disposición de dos brazos unidos en forma de V está cambiando a favor de estructuras compuestas de dos brazos separados, como la experiencia realizada en el arrecife de Gold Coast en Narrowneck (figura 3.4), considerada un éxito en términos de surf y de protección de costas. En este documento se propone la aplicación de este tipo de estructuras con brazos separados que permite generar un sistema de corrientes diferente, pudiendo utilizar de manera inteligente la fuerza de las corrientes generadas y de retorno con un doble fin: el de mejorar las condiciones para el surfista y minimizar el transporte de material en la zona.

Como dice Van Ettinger (2005), tras la implantación de un arrecife artificial, la corriente generada por la rotura influye negativamente en las olas sobre el arrecife. Por este motivo se ha realizado un esbozo del mecanismo de estas corrientes. Dado que los arrecifes artificiales convencionales no tienen un buen comportamiento en presencia de corrientes generadas por el oleaje, se presenta en la figura 4.10 un concepto integral para el diseño de un arrecife artificial (AAI).

4.3.1 CORRIENTES DE SUPERFICIE

Un buen diseño de un AAI permite el retorno del surfista de manera segura, pudiendo así mejorar el número de olas por sesión sin aumento excesivo del esfuerzo por parte del surfista. En casi todas las investigaciones anteriores sobre arrecifes artificiales que afectaban a la surfabilidad, no se había tenido en cuenta el sistema de corrientes como factor altamente influyente. Henriquez (2004) con uso de un modelo numérico de Boussinesq ensaya una topografía típica de arrecife afectada por un oleaje característico de 1,5 metros de altura y estudia el sistema de corrientes producido.

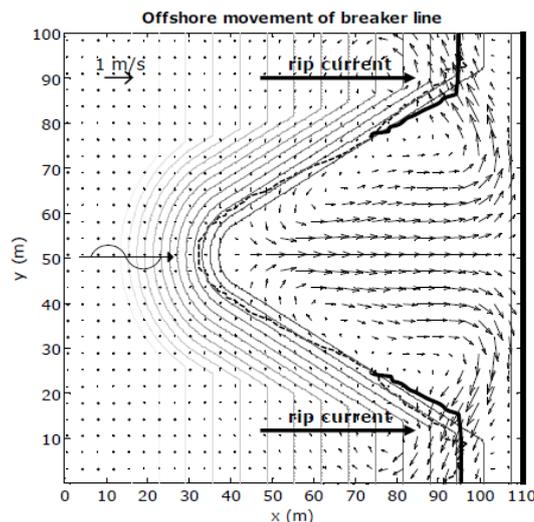


Figura 4. 7 Dirección de las corrientes generadas por un oleaje de $H_s=1,5$ m. (Henriquez, 2004).

Henríquez (2004) observa que se generan corrientes provocando irregularidades en las secciones y explica su causa en las variaciones de la velocidad de las corrientes sobre el arrecife. Otro resultado de su estudio fue que las corrientes salientes en la parte final de la cuña pueden afectar negativamente hasta un 20% del recorrido diseñado. Entonces se demuestra que para diseñar un arrecife artificial con altas

prestaciones, las corrientes generadas por el arrecife deben ser tratadas con especial atención. Es importante entender el mecanismo de corrientes en un arrecife artificial convencional.

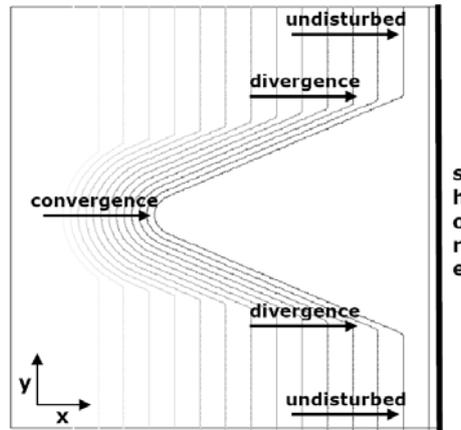


Figura 4. 8 Tipo de corriente producida sobre un arrecife convencional (Van Ettinger, 2005).

Los frentes de ola convergen a una mayor altura de las olas sobre el foco (véase la figura 4.8). En la parte final de las cuñas, el frente de ola diverge y la altura de las olas es menor. Fuera del arrecife las olas no se ven alteradas. De estas diferencias de alturas se generan las corrientes tal y como se muestra en la figura 4.9.

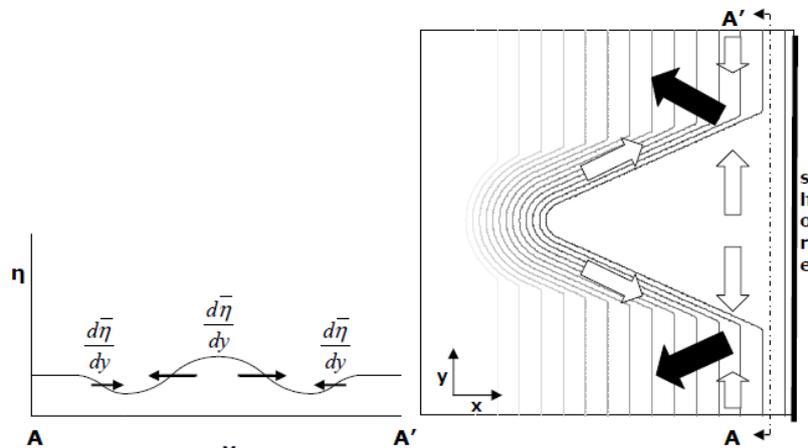


Figura 4. 9 Esquema de corrientes generadas por gradiente de alturas en un arrecife convencional (Van Ettinger, 2005).

Refiriéndose al comportamiento de un arrecife con canal de retorno que separa la estructura en dos, la configuración de la superficie y sus alturas quedan alteradas como se puede identificar si se comparan la figura anterior y la figura 4.10.

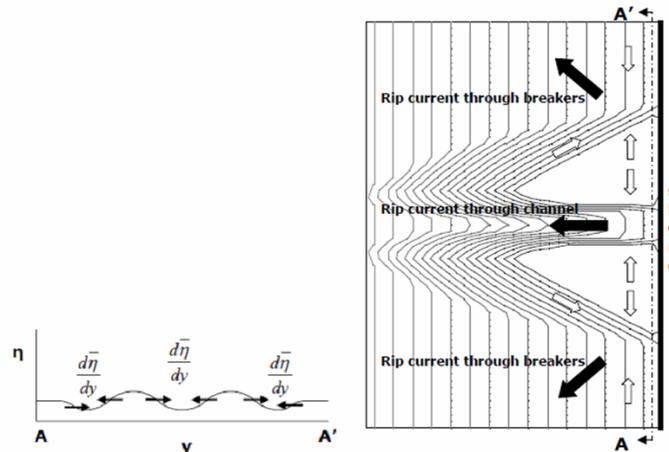


Figura 4. 10 Esquema de corrientes generadas por gradientes de alturas en un arrecife artificial integral (Van Ettinger, 2005).

Cáceres *et al.* (2009) siguiendo con el análisis de este concepto de AAI, estudian la importancia de la anchura del canal de retorno. La anchura de este canal de retorno interior a la estructura, interviene de manera decisiva en el campo de velocidades que resultará producido durante la interacción oleaje–estructura. Analizando tres escenarios diferentes con distintas anchuras de canal, constatan que el campo de velocidades en la zona de surf decrece en relación al incremento de la anchura del canal de retorno.

La anchura óptima del canal de retorno deberá ser establecida mediante un análisis del oleaje local que optimice las corrientes de superficie en la zona de surf y facilite el retorno del surfista por el canal.

Las pendientes del foco y la cuña para un arrecife tipo en la costa catalana deben ser determinadas mediante el oleaje particular de la zona. Los valores propuestos por Black y Mead (1999) para estos componentes son una buena referencia puesto que acota un rango de pendientes bastante amplio como posible solución.

4.4 ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN

Cerca de la costa, las corrientes inducidas por la rotura del oleaje tienen la capacidad de transportar grandes cantidades de sedimento en suspensión. Por ello es fundamental determinar la velocidad crítica de inicio de movimiento (velocidad de corte).

Se ha seguido el ejemplo de cálculo presentado en el Coastal Engineering Manual (2003), asumiendo las siguientes hipótesis:

- La densidad del sedimento se establece en $2,5 \text{ kg/m}^3$
- Los diámetros de sedimento en la costa catalana van de $200 \text{ }\mu\text{m}$ a $1000 \text{ }\mu\text{m}$. Se considera un sedimento medio de $600 \text{ }\mu\text{m}$.
- Las condiciones del fluido son $\rho = 1,025 \text{ kg/m}^3$ y $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

El parámetro de sedimento-fluido es calculado como $s = \rho_s/\rho = 2,44$, resultando un parámetro de Shields de:

$$S_* = \frac{D}{4\nu} \sqrt{(s-1)gD} = 13,81$$

Del diagrama de Shields modificado por Madsen y Grant (1976), recogido en en CEM (2003), se extrae $\psi_{cr} = 0,032$. Este último parámetro permite finalmente encontrar la velocidad de corte.

$$u_{*cr} = \psi_{cr} \cdot \sqrt{(s-1)gD} = 1,65 \cdot 10^{-2} \text{ m/s} = 1,65 \text{ cm/s}$$

La velocidad de corte se localiza en la parte inferior de la columna de agua. Para establecer una comparación con los datos de corrientes disponibles tras la simulación, se utiliza la ley de velocidades siguiente:

$$u(z) = \frac{u_{*c}}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

Donde:

u_{*c} : velocidad de corte, considerada en el fondo.

k : constante de von Karman (0,4).

z : altura de la lámina de agua desde el fondo (1 metro).

z_0 : considerada en un régimen moderadamente turbulento como $z_0 = \frac{\nu}{9u_{*cr}}$

Finalmente se determina que las corrientes próximas a la isobata -1 m. deben ser inferiores a 0,49 m/s. Si este valor umbral es superado en la zona próxima a la costa, la Tesina considera que habrá erosión.

4.5 OLAS

El oleaje es verdaderamente el motor que acciona el surf. Sin olas no se surfea evidentemente. Por lo tanto, presentadas las características esenciales de morfología para optimizar el surf en el litoral catalán, se analiza el oleaje que incide para poder definir el diseño aplicable a esta zona del Mediterráneo.

4.5.1 ESTUDIO DEL OLEAJE DE DISEÑO

Datos de partida

Para la realización de esta tesina se ha partido de datos del oleaje de tipo instrumental recogidos por cinco boyas en diferentes puntos del litoral. Se obtiene de esta forma datos del oleaje en las siguientes zonas: Zona 1 Golf de Roses, Zona 3 La Tordera, Zona 4 Llobregat, Zona 5 Tarragona y Zona 6 Tortosa (véase figura 4.12). La boya situada en Tarragona pertenece a la red de medida de Puertos del Estado mientras

que las otras cuatro forman parte de la *Xarxa d'Instruments Oceanogràfics i Meteorològics de la Generalitat de Catalunya (XIOM)*.



Figura 4. 11 Situación de las boyas en el litoral (modificado de <http://www.boiescat.org/>).

Las boyas son del tipo DATAWELL Waverider. La boya Waverider tiene forma esférica con un diámetro de 0.7 m (véase figura 4.12). El sensor de medida (en el interior del casco de la boya) es un acelerómetro suspendido dentro de una esfera en un líquido con una conductividad concreta. Las medidas instantáneas de diferencias de potencial así obtenidas son convertidas a aceleraciones. Éstas se integran dos veces para, finalmente, obtener las elevaciones que componen la serie temporal de datos brutos. La transmisión a la estación costera se realiza vía radio. La señal analógica es convertida a digital y analizada. De esta forma se dispone, en tiempo real, de los parámetros más representativos del oleaje (altura de ola, periodo y dirección).

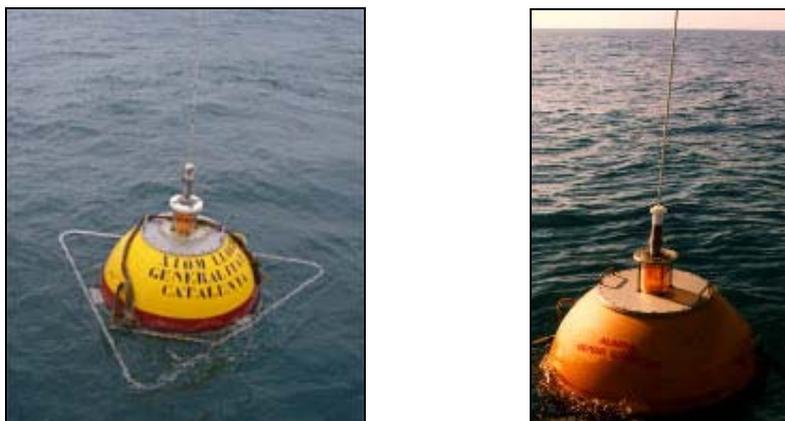


Figura 4. 12 Situación de las boyas en el litoral (modificado de <http://www.boiescat.org/>).

Ámbito	Localización	Profundidad (m.)	Punto de recepción	Datos disponibles desde
Zona 1 Golf de Roses	42° 10.79' N 03° 11.99' E	46	Port de Roses	1992
Zona 3 La Tordera	41° 38.81' N 02° 48.93' E	74	Port de Blanes	1984
Zona 4 Llobregat	41° 16.69' N 02° 08.48' E	45	Laboratori Enginyeria Marítima (LIM)	1984
Zona 5 Tarragona	41° 04.20' N 01° 11.50' E	24	Port de Tarragona	1992
Zona 6 Tortosa	40° 43.29' N 00° 58.89' E	60	Port de l'Ametlla de Mar	1990

Tabla 4. 4 Cuadro resumen de las características de las boyas utilizadas.

El conjunto de datos está integrado por un total de 141.018 observaciones repartidas de la siguiente manera:

- Zona 1: 23.868 observaciones entre septiembre de 1992 y abril de 2006.
- Zona 3: 31.812 observaciones entre mayo de 1984 y final de 2007.
- Zona 4: 36.261 observaciones entre mayo de 1984 y final de 2007.
- Zona 5: 17.924 observaciones entre mayo de 1998 y final de 2004.
- Zona 6: 31.153 observaciones entre junio de 1990 y final de 2007.

Estudio de peraltes, clima medio

En el capítulo 2 se detalla el número de Iribarren o parámetro del surf como la herramienta a utilizar para enfocar, de manera simple y fácil, el tipo de rotura de un oleaje sobre una pendiente de rompiente. En este parámetro interviene la pendiente y la raíz del peralte. El peralte viene determinado por la altura de ola y la longitud de onda.

A continuación se realiza un estudio del clima medio de peraltes presente en la costa catalana en diferentes sectores utilizando el registro de datos de partida.

En adelante solo se tratará el número de Iribarren o parámetro del surf a profundidades de rotura.

Se recuerda la formulación y los valores deseados:

$$I_r = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}};$$

Tipo de rotura	Número de Iribarren
Plunging	$0,4 < I_r < 2$
Spilling	$I_r < 0,4$

Tabla 4. 5 Rangos de Iribarren para roturas tipo plunging y spilling.

El estudio se divide en 5 zonas o sub-escenarios (Golf de Roses, La Tordera, Llobregat, Tarragona y Tortosa) hallando diferentes funciones de probabilidad para cada sub-escenario. Las funciones de probabilidad aproximadas al clima medio de peraltes han sido la función de Weibull y la función de Gumbel; produciéndose un ajuste más exacto con la función de Gumbel, véanse sus formulaciones:

➤ Función de Weibull
$$P(s < x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-A}{B}\right)^c}$$

➤ Función de Gumbel
$$P(s < x) = e^{-e^{\left(\frac{x-A}{B}\right)}}$$

El procedimiento de análisis incluye en primer lugar la propagación del registro de datos hasta las cotas de 3 y 5 metros de profundidad. El resultado del clima medio de peraltes a profundidades de 3 y 5 metros muestra una buena correlación con la función de Gumbel pudiendo aplicarse para la predicción de peraltes. Las figuras siguientes representan las distribuciones de peraltes de las diferentes zonas analizadas (color azul) y la función de Gumbel superpuesta (color rojo). La tabla 4.5 detalla los parámetros encontrados para cada zona y profundidad:

Ámbito	Profundidad [m]	Parámetro	
		A	B
Zona 1 Golf de Roses	3	0,004762	0,0054
	5	0,00482	0,006287
Zona 3 La Tordera	3	0,006758	0,004835
	5	0,006603	0,005177
Zona 4 Llobregat	3	0,006969	0,006041
	5	0,006724	0,006479
Zona 5 Tarragona	3	0,00722	0,005557
	5	0,007176	0,00592
Zona 6 Tortosa	3	0,01337	0,009766
	5	0,013504	0,0101

Tabla 4. 6 Resultados del ajuste mediante la función de Gumbel para el clima medio de peraltes.

	R ²	
	3 metros	5 metros
Z1	0,9612	0,9402
Z3	0,9861	0,9761
Z4	0,9786	0,975
Z5	0,9939	0,9895
Z6	0,9494	0,9498

Tabla 4. 7 Bondad del ajuste de la recta de regresión efectuada por mínimos cuadrados.

Zona 1 Golf de Roses

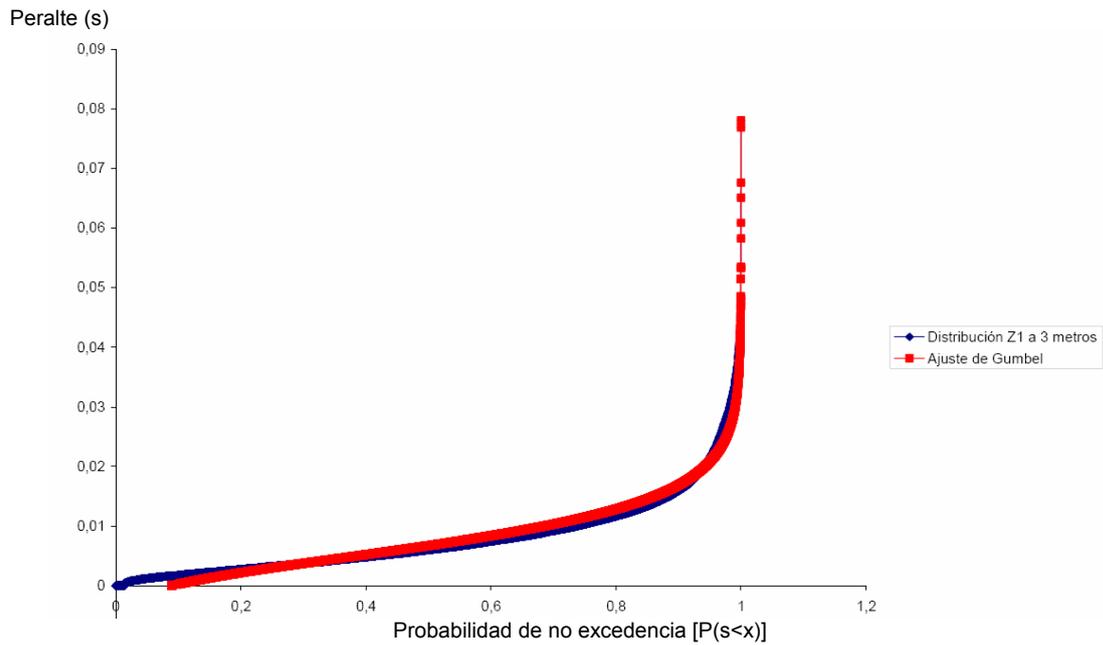


Figura 4. 13 Distribución de la Z1 y del ajuste de la función de Gumbel, a 3 metros de profundidad.

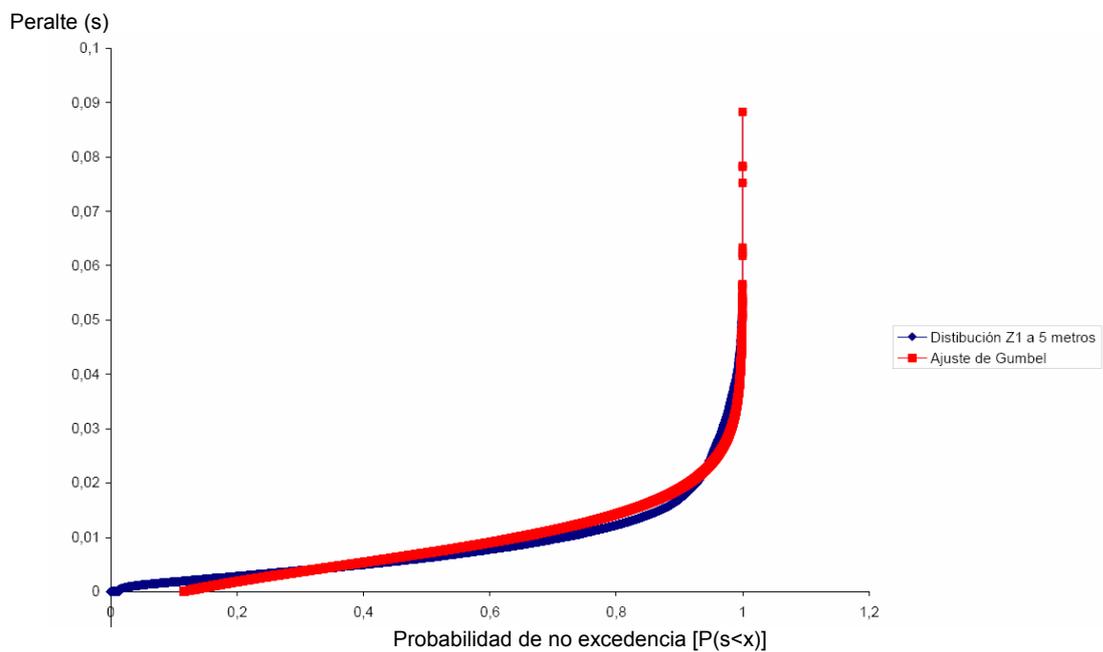


Figura 4. 14 Distribución de la Z1 y del ajuste de la función de Gumbel, a 5 metros de profundidad.

Zona 3 La Tordera

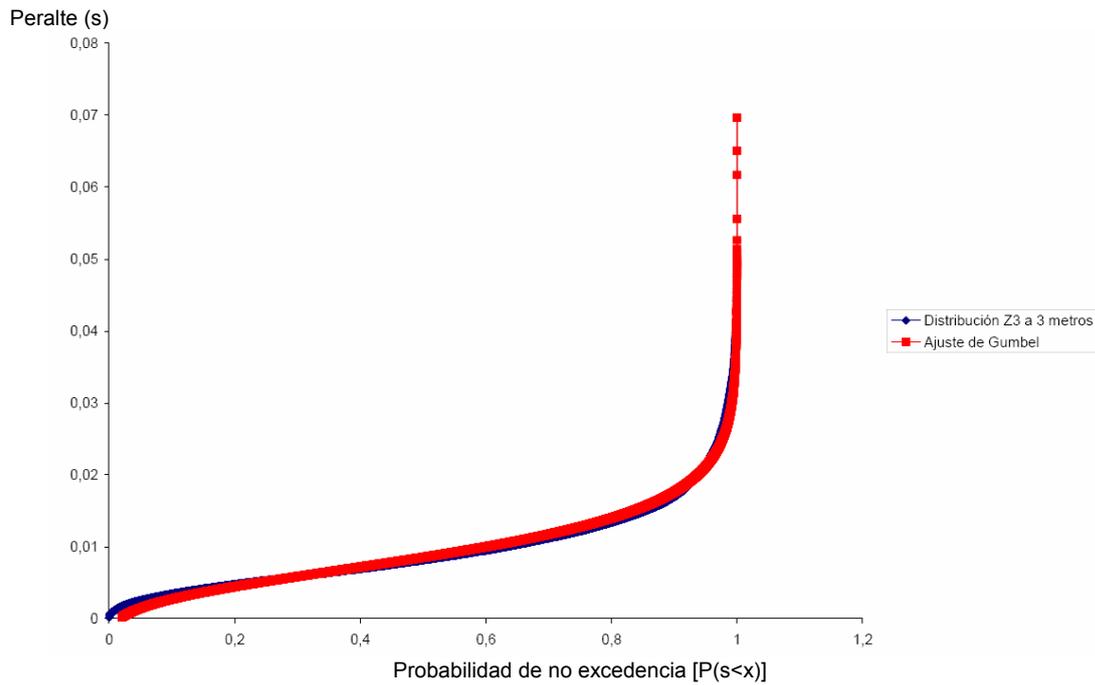


Figura 4. 15 Distribución de la Z3 y del ajuste de la función de Gumbel, a 3 metros de profundidad.

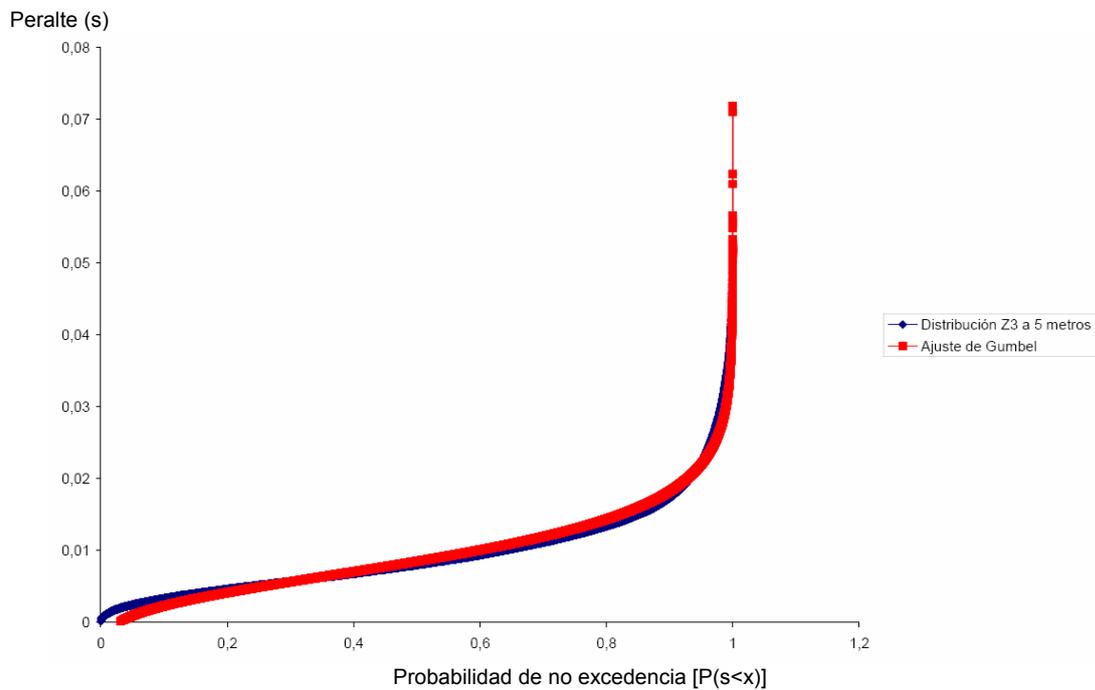


Figura 4. 16 Distribución de la Z3 y del ajuste de la función de Gumbel, a 5 metros de profundidad.

Zona 4 Llobregat

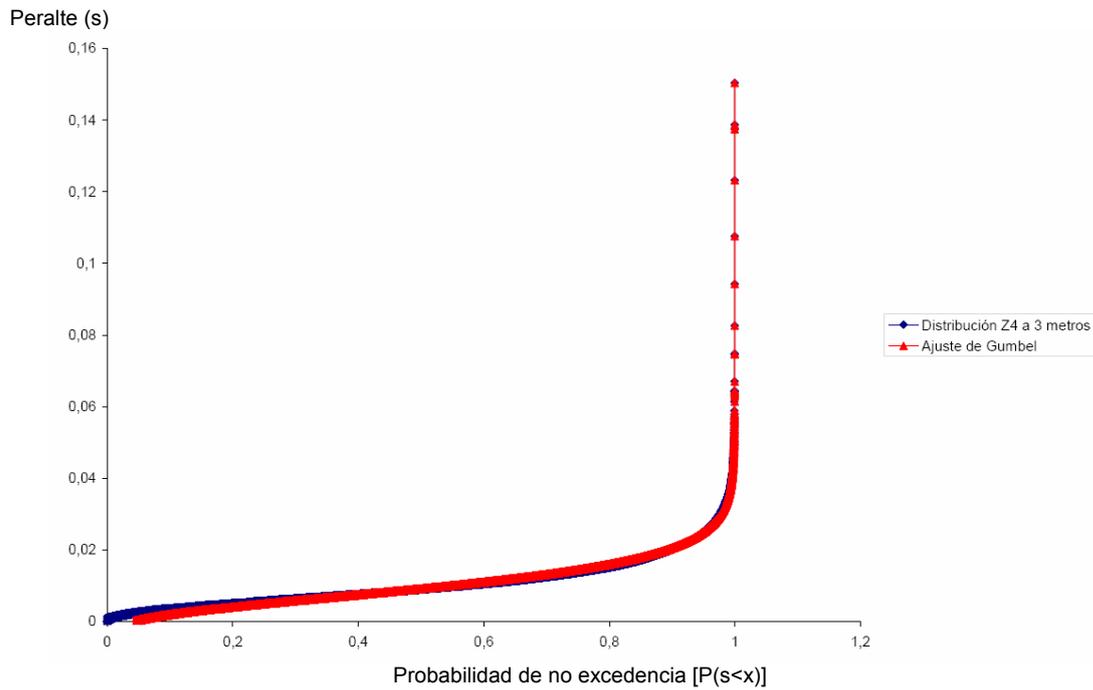


Figura 4. 17 Distribución de la Z4 y del ajuste de la función de Gumbel, a 3 metros de profundidad.

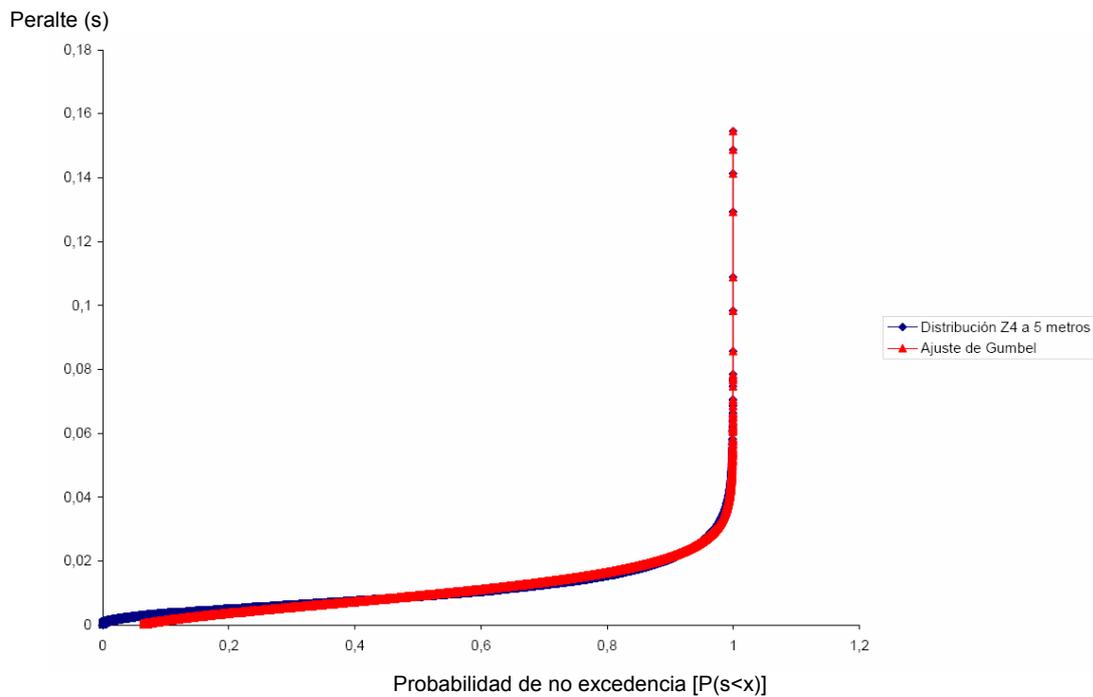


Figura 4. 18 Distribución de la Z4 y del ajuste de la función de Gumbel, a 5 metros de profundidad.

Zona 5 Tarragona

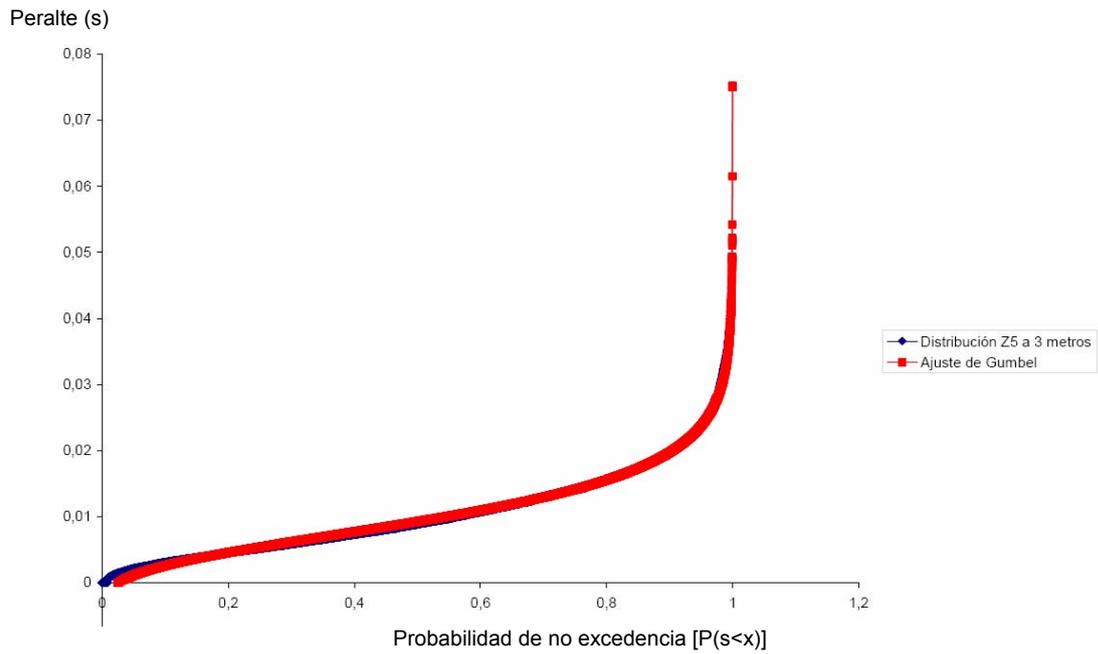


Figura 4. 19 Distribución de la Z5 y del ajuste de la función de Gumbel, a 3 metros de profundidad.

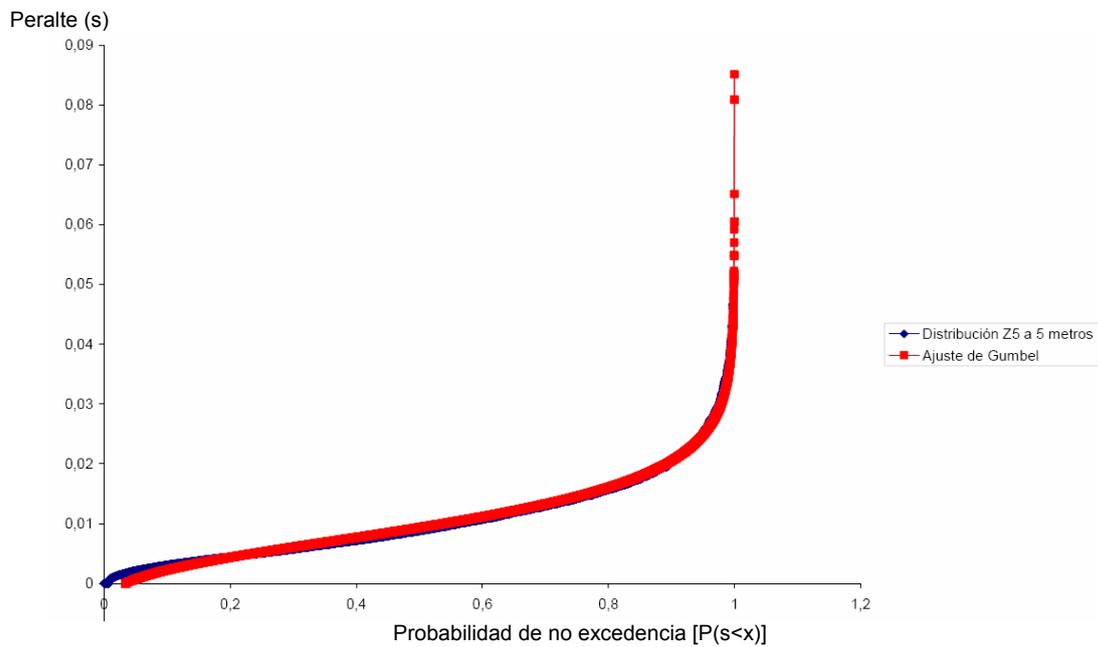


Figura 4. 20 Distribución de la Z5 y del ajuste de la función de Gumbel, a 5 metros de profundidad.

Zona 6 Tortosa

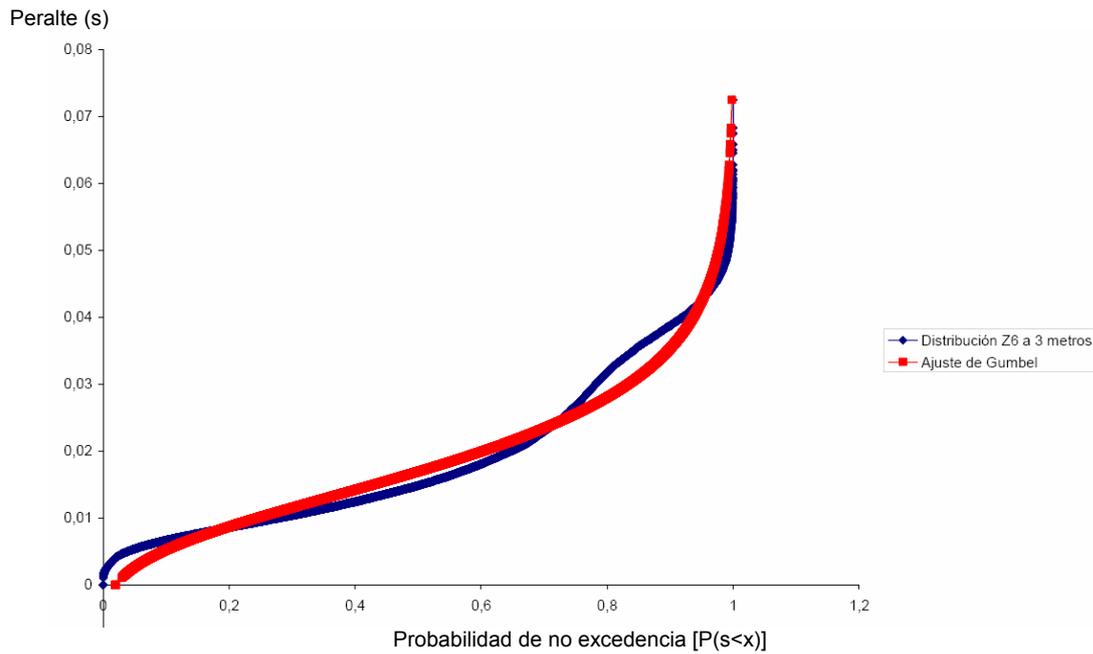


Figura 4. 21 Distribución de la Z6 y del ajuste de la función de Gumbel, a 3 metros de profundidad.

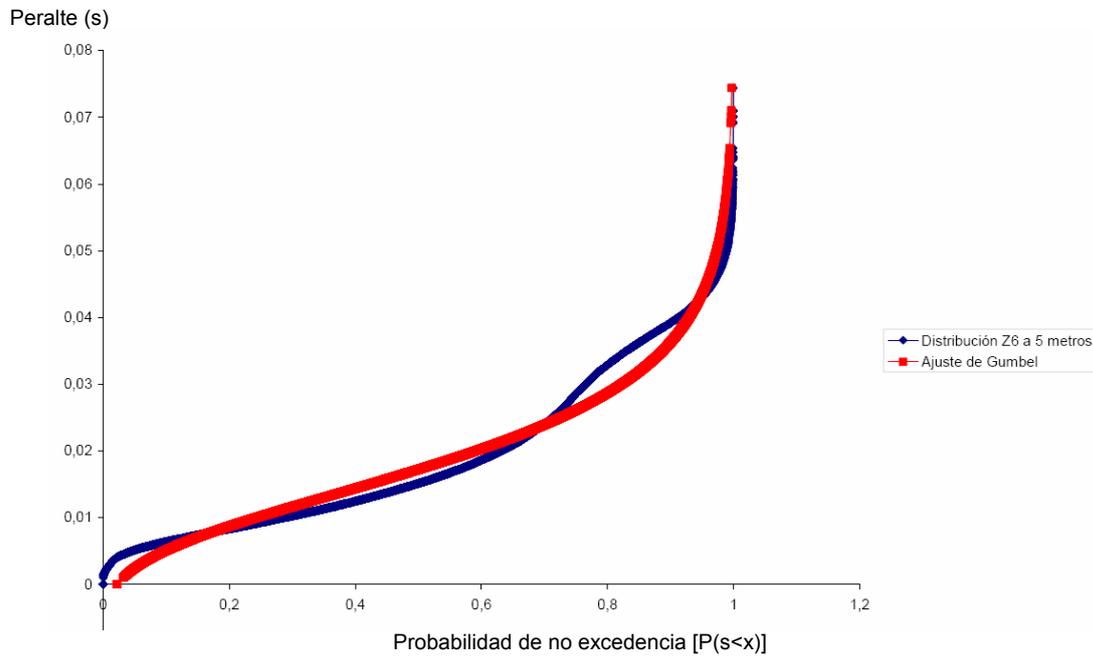


Figura 4. 22 Distribución de la Z6 y del ajuste de la función de Gumbel, a 5 metros de profundidad.

Características del los sub-escenarios

La tabla siguiente recoge los valores medios de longitud y peralte que permitirán más adelante tomar las primeras hipótesis sobre un oleaje de diseño para el arrecife artificial a proponer.

	Z1	Z3	Z4	Z5	Z6
Total datos analizados	141018 obs.				
Número de obs.	23868	31812	36261	17924	31153
Media	48,96 m	58,10 m	54,35 m	43,86 m	39,03 m
Moda	43,86 m	52,52 m	78,71 m	52,52 m	48,96 m
Max.	399,70 m	332,81 m	505,86 m	272,04 m	319,27 m
Min.	6,25 m	6,25 m	6,25 m	7,56 m	6,25 m
Rango 10-100	89,17 %	86,97 %	88,31 %	94,10 %	91,35 %
Total datos analizados	138070 obs.				
Número de obs.	23129	31234	35537	17870	30300
peralte medio	0,0060	0,0082	0,0090	0,0088	0,0149
peralte moda	0,0047	0,0068	0,0056	0,0055	0,0068
Max	0,0780	0,0696	0,1504	0,0752	0,0725
Min	1,17E-11	0,00017271	0,00022229	1,98E-11	2,21E-10
Rango 0,035-0,001	95,68 %	98,82 %	98,37 %	97,71 %	84,18 %
Total datos analizados	140755 obs.				
Número de obs.	23696	31781	36235	17923	31120
peralte medio	0,0062	0,0080	0,0089	0,0088	0,0151
peralte moda	0,0047	0,0069	0,0053	0,0051	0,0064
Max	0,0883	0,0719	0,1545	0,0851	0,0744
Min	1,09E-11	0,00016115	0,00020207	1,82E-11	2,77E-10
Rango 0,035-0,001	94,52 %	98,46 %	97,94 %	97,33 %	83,01 %

Tabla 4. 8 Valores medio, moda, máximo, mínimo y el rango característico del la longitud en aguas profundas y el peralte a las profundidades propagadas.

4.5.2 CLIMA DE SURF EN CATALUNYA

Clima de surf

El oleaje que se considera óptimo para la práctica del surf se encuentra en un rango de alturas de ola de 0,5 a más de 2 metros (Capítulo 2). En este intervalo, surfistas de todos los niveles podrán estar satisfechos con las roturas si se consiguen los ángulos de descrestamiento necesarios para cada nivel. La propagación a profundidades de 3 y 5 metros permitirá conocer de una manera teórica las características del oleaje en la zona de actuación. Después de considerar los valores medios de las distintas zonas, se propondrá las pendientes de diseño para los componentes del foco y la cuña.

Respetando los números de Iribarren (I_{r_b}) necesarios para coger la ola y poderla surfear, se puede encontrar con facilidad las pendientes requeridas por los componentes ya que han de provocar los valores requeridos de I_{r_b} . La zona 6 difiere de las otras zonas, pero de manera general un peralte de 0,035 tiene muy poca ocurrencia y puede servir como listón de valor máximo admisible por su frecuencia. El listón inferior se fija en 0,001.

Dentro de este rango de posibles valores para el peralte, se sitúan más del 95 % de todas las observaciones. Con el clima de surf se podrá ajustar el rango de pendientes para la conformación de los taludes del foco y la cuña.

Dada la relación de:

$$m = I_{r_b} \cdot \sqrt{s_b}$$

En la zona de cogida de ola, foco, se necesita I_{r_b} de 0,7 y relacionado con los listones marcados de 0,035 y 0,001 para el peralte en la zona de 3 o 5 metros de profundidad, resulta que se necesita una pendiente situada entre 1:7 y 1:45, rango mucho menor que el propuesto por Black y Mead (1999). Realizando el mismo procedimiento, resulta para la cuña una pendiente que se deberá situar entre 1:6 y 1:35.

Estos valores propuestos, aunque marcan la referencia a seguir, han de ser modelados para comprobar su efectividad puesto que no se ha tenido en cuenta la refracción que se generará cuando interactúen ola-estructura alterando los peraltes.

Valores del clima medio de surf

	Z1			
	h = 3 metros		h = 5 metros	
	0,5≤Hs≤1	1≤Hs<2	0,5≤Hs≤1	1≤Hs<2
Número de observaciones	5073	1535	3758	1474
Hs media [m]	76,51	134,43	64,99	132,54
Hs moda [m]	99,59	128,12	93,30	118,10
S medio	0,0122	0,0144	0,0114	0,0137

Tabla 4.9 Valores característicos de la zona 1 Golf de Roses.

Z3

	h = 3 metros		h = 5 metros	
	0,5≤Hs≤1	1≤Hs<2	0,5≤Hs≤1	1≤Hs<2
Número de observaciones	9747	2899	9721	2530
Hs media [m]	66,02	125,77	65,27	124,67
Hs moda [m]	67,51	103,58	66,09	116,23
S medio	0,0102	0,0134	0,0102	0,0131

Tabla 4.10 Valores característicos de la zona 3 La Tordera.

Z4

	h = 3 metros		h = 5 metros	
	0,5≤Hs≤1	1≤Hs<2	0,5≤Hs≤1	1≤Hs<2
Número de observaciones	11819	4215	12107	3735
Hs media [m]	67,86	124,59	67,09	122,94
Hs moda [m]	65,17	101,63	60,36	100,62
S medio	0,0112	0,0148	0,0111	0,0144

Tabla 4.11 Valores característicos de la zona 4 Llobregat.

Z5

	h = 3 metros		h = 5 metros	
	0,5≤Hs≤1	1≤Hs<2	0,5≤Hs≤1	1≤Hs<2
Número de observaciones	4613	743	4563	594
Hs media [m]	63,97	119,37	63,81	118,05
Hs moda [m]	55,10	104,96	51,01	124,46
S medio	0,0124	0,0175	0,0127	0,0176

Tabla 4.12 Valores característicos de la zona 5 Tarragona.

Z6

	h = 3 metros		h = 5 metros	
	0,5≤Hs≤1	1≤Hs<2	0,5≤Hs≤1	1≤Hs<2
Número de observaciones	11798	5934	12201	5732
Hs media [m]	68,47	129,20	68,10	127,31
Hs moda [m]	98,89	114,02	97,75	112,59
S medio	0,0164	0,0252	0,0170	0,0258

Tabla 4.13 Valores característicos de la zona 6 Tortosa.

Este trabajo acota a unos rangos de valores más pequeños para distintos componentes de un arrecife artificial que los expuestos por Mead y Black (1999 y 2001).

4.6 CONCLUSIONES PARA EL DISEÑO SEGÚN EL OLEAJE CATALÁN

Como conclusiones al diseño de una estructura semejante a la propuesta, se recogen los resultados y observaciones principales obtenidas:

- Examinando bien los componentes estudiados por Black y Mead (1999 y 2001), la rampa es una condición necesaria que ha de ser buscada directamente en la batimetría presente en nuestro litoral. Los otros componentes necesarios para la formación de la ola se pueden aportar al medio con la construcción de un arrecife artificial.
- Son mejores pendientes más tendidas para producir una refracción durante una distancia suficiente que permita la formación de una dirección preferencial sobre la cual se situará la estructura.
- Es preferible buscar batimetrías que focalicen el oleaje para intentar aumentarlo principalmente por el bajo oleaje medio catalán. Además, una importante restricción se presenta con la dirección preferencial del oleaje así como la orientación respecto la costa-estructura.
- Hay que analizar las diferentes direcciones que pueden llegar a la costa, determinado las distintas roturas producidas como los ángulos de descrestamientos, alturas de ola y otros parámetros que cambiarán dependiendo de la orientación respecto el oleaje.
- Si la cuña tiene una pendiente demasiado larga y suave puede hacer que la ola se reoriente según sus isobatas reduciendo así el ángulo de descrestamiento hasta límites insurfeables o "close-outs".
- La refracción empieza cuando la profundidad del agua es igual a 0,25-0,5 la longitud de onda (Komar, 1976). Como las longitudes de onda en aguas profundas se sitúan normalmente entre 100 y 10 metros; la refracción puede, en el rango considerado, empezar a unos 50 metros de profundidad. Entonces la rampa deberá ser establecida desde una profundidad menor a 50 metros siendo aconsejable una rampa lo más tendida y larga posible.

Componente	Sub-escenario	Rango de pendientes admisibles	Pendiente según valor medio del peralte en zona surf	Diseño final propuesto
Rampa		1:30 - 1:70		1:30
Foco	Z1	1:7 - 1:45	1:12	1:12
	Z3		1:12	
	Z4		1:12	
	Z5		1:11	
	Z6		1:9	
Cuña	Z1	1:6 - 1:35	1:9	1:09
	Z3		1:10	
	Z4		1:9	
	Z5		1:8	
	Z6		1:7	

Tabla 4.14 Resumen de características propuestas para el diseño tipo de un arrecife artificial en la costa catalana.

La abertura interior de la estructura es uno de los parámetros de especial interés, juntamente con los taludes propuestos. La abertura del arrecife frente al abanico de posibles ángulos de incidencia determinará el ángulo de descrestamiento. Como dice Henríquez (2004) un arrecife ha de producir ángulos de descrestamiento superiores a 40°. Con dicha premisa y con el máximo ángulo de 90 ° citado por Hutt *et al.* (2001), se proponen aberturas comprendidas entre 40-50°. Este rango del ángulo entre brazos de la estructura, permitirá producir ángulos de descrestamiento surfeables en ambos brazos para una oleaje de diseño con orientaciones de incidencia de $\pm 45^\circ$ respecto a la estructura.

La modelización de una estructura tipo se efectuará con las siguientes características:

Componente	Diseño modelo
Rampa	1:30
Foco	1:12
Cuña	1:9
Cota de coronación	≤ 1 de profundidad
Ángulo entre brazos	45°

Tabla 4.24 Valores adoptados para el diseño de la estructura tipo para el litoral catalán.

Esta solución se acepta siguiendo las siguientes consideraciones: oleaje caracterizado por alturas de ola superior a 50 cm. y períodos medios situados dentro de un rango de valores de 5-10 segundos.

CAPÍTULO 5

SIMULACIÓN NUMÉRICA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo se estructura en once apartados explicando el proceso de modelización, escenarios de oleaje considerados, localizaciones estudiadas, parámetros analizados, resultados de las simulaciones, análisis de las diferentes localizaciones, calidad de surf y una recopilación gráfica.

Unas conclusiones son el apartado final que sintetizan el comportamiento mostrado por la estructura modelo diseñada en diferentes situaciones. Por lo tanto, la viabilidad que plantea esta tesina esta sujeta en gran medida a esta parte del documento.

5.1 MODELIZACIÓN

Diferentes localizaciones se consideran durante la simulación realizada con la ayuda del trabajo realizado por Cáceres (2004) que utiliza dos modelos numéricos; el REF/DIF (modelo de oleaje) Kirby y Okan (1994) y LIMCIR (modelo de circulación) desarrollado en el Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM-UPC).

A partir de lo expuesto en el capítulo anterior ha sido diseñada una estructura tipo siguiendo una serie de directrices:

- La estructura se situará a una profundidad entre 3 y 5 metros, debido al análisis del clima de surf realizado.
- Se opta por una obertura de 45°, incorporando un canal de entrada de 30 metros que divide la estructura en dos.
- En todos los casos, la plataforma de coronación se sitúa a una profundidad de 80 cm.
- Los componentes de la estructura, foco y cuña, se han diseñado con taludes de 1:12 y 1:9 respectivamente.
- La estructura se plantea sobre diferentes batimetrías. Estas son detalladas para cada caso particular en el apartado 5.3 "*Localizaciones estudiadas*".
- Se consideran siempre las isobatas paralelas a la línea de playa y la estructura se coloca perpendicularmente a ellas.

Una vez realizado el modelo digital del terreno se ha procedido a la obtención de una malla de puntos, con un espaciado de 3x3 metros. Las directrices de diseño dan lugar a las siguientes configuraciones (para más detalle véase apartado 5.3):

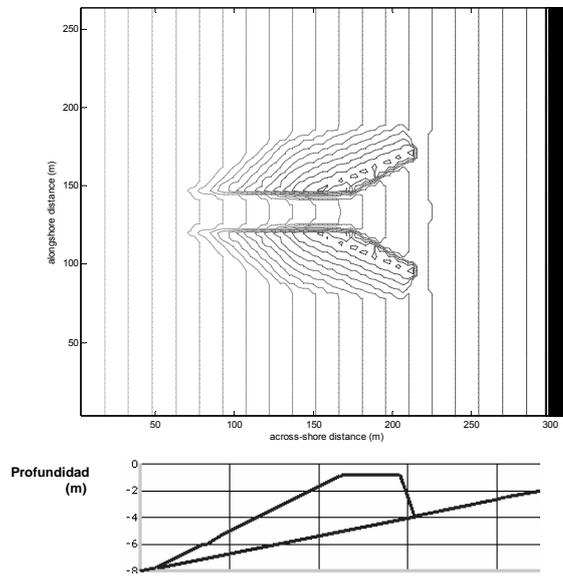


Figura 5.1 Isobatas y perfil resultantes tras la colocación de la estructura, localización tipo.

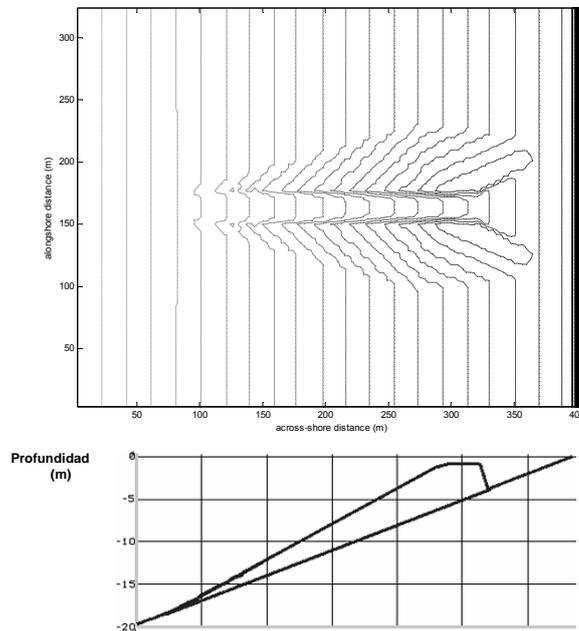


Figura 5.2 Isobatas y perfil resultantes tras la colocación de la estructura, Tossa de Mar.

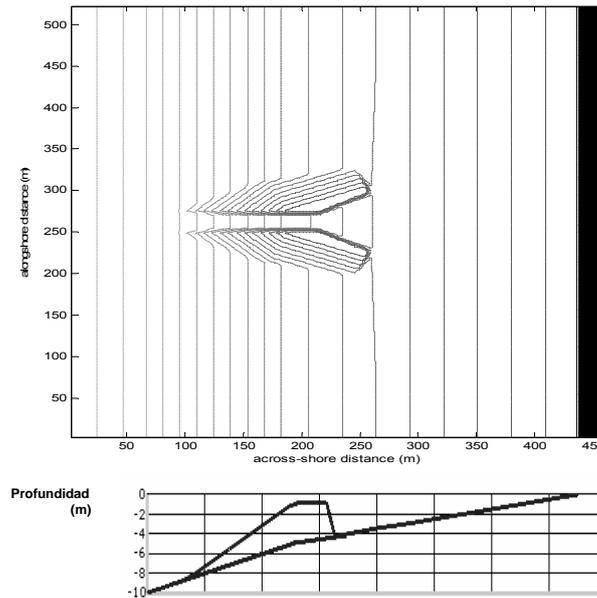


Figura 5.3 Isobatas y perfil resultantes tras la colocación de la estructura, Malgrat de Mar.

5.2 ESCENARIOS

Para poder realizar la simulación es necesario definir unas características concretas del oleaje. El capítulo 4 ha determinado un clima medio de surf que se caracteriza por alturas de ola superiores a 50 cm. y periodos cortos de 5 a 10 segundos.

En adelante, esta tesina considera como escenarios E1, E2, E3 y E4 cuatro situaciones de altura de ola con un periodo medio calculado a partir las observaciones registradas en los datos de partida. Los escenarios representan peraltes con una ocurrencia superior al 50 %, los valores de los cuales son 0,0120; 0,0141; 0,0157 y 0,0165 respectivamente para los casos E1, E2, E3 y E4.

La tabla siguiente recoge los valores de altura de ola y periodo de los escenarios establecidos:

	ESCENARIO			
	E1	E2	E3	E4
Altura de ola [m]	0,65	0,9	1,1	1,3
Periodo [s]	5,9	6,4	6,7	7,1

Tabla 5.1 Valores de altura de ola y periodo de los escenarios establecidos.

Cada escenario es simulado con tres ángulos de incidencia (0° , $+20^\circ$ y -20°).

5.3 LOCALIZACIONES ESTUDIADAS

El capítulo 4 define una estructura modelo que funciona bajo condiciones medias del clima estudiado. Tal estructura modelo se ha colocado

La tabla siguiente resume las diferentes características de localizaciones simuladas

Localización	Nombre	Batimetría	Distancia a la orilla	Escenarios
TIPO	Modelo	1:30	80 metros	E1, E2, E3 y E4
REALES	Tossa de Mar	1:20	30 metros	E1, E2, E3 y E4
	Malgrat de Mar	1:25 y 1:50	150 metros	E1, E2, E3 y E4

Tabla 5.2 Características de las distintas localizaciones.

Localización tipo

La estructura modelo se ha colocado sobre diferentes batimetrías. Una batimetría 1:30 para estudiar un comportamiento medio del litoral catalán, definida como localización tipo. Se necesitarían unos 6330 m³ de material para su verdadera construcción.

Localización de Tossa de Mar

En una costa totalmente rocosa la colocación de una estructura no comportaría erosión al medio debido a la resistencia del material. Por esta razón se considera la posibilidad de instalar un arrecife artificial en una playa situada en Tossa de Mar. A falta de verificar un fondo totalmente rocoso, se efectúa la simulación de un tramo de costa situado en el anterior municipio, ya que dispone de una línea de costa claramente rocosa sin playas de arena.

La erosión de la playa en este tipo de casos deja de ser un punto negativo a la hora de ubicar un arrecife artificial.

El volumen de tierras necesario asciende a 37.080 m³. Es la estructura más grande debido a la pendiente más pronunciada de la batimetría (rampa).

Localización de Malgrat de Mar

El siguiente caso tratado puede ser atribuido a playas amplias y arenosas. En concreto, el caso elegido dispone de un fondo con pendiente 1:25 desde profundidades de 50 m. hasta 5 metros. Después el fondo acaba aproximándose a la línea de costa con una pendiente 1:50. Ésta es la simulación llevada a cabo para Malgrat de Mar.

En referencia al volumen material necesario, es necesario un total de 19.150 m³.

5.4 PARAMETROS DE ANÁLISIS

Para efectuar un correcto análisis de las simulaciones, se han considerado los siguientes parámetros (véase conjuntamente la figura 5.4):

- Altura de ola y periodo: datos de cada escenario propuesto que representan los valores medios que caracterizan el clima medio de surf catalán.
- Altura de ola en el foco: medida en el punto de inicio del recorrido.
- Altura de ola al final de recorrido: medida en el punto de final del recorrido.
- Altura de ola en cuña: media de los valores de la altura de ola en foco y al final del recorrido.
- Iribarren en el foco: calculado en rotura con la altura de ola en foco y la pendiente del talud del foco (1:12).
- Iribarren en la cuña: calculado en rotura con la altura de ola en cuña y la pendiente del talud de la cuña (1:9).
- Longitud de recorrido: determinada a través de los puntos de rotura a lo largo de la estructura. Esta es la longitud aproximada que seguirá el surfista. Se ha considerado que la ola rompe cuando el índice de rotura (H/d) se sitúa entre 0,6 y 0,7.
- Ángulo de descrestamiento (α): medido a partir del recorrido del surfista propuesto y el ángulo de incidencia del oleaje. Cuando el oleaje es oblicuo, dependiendo si el brazo es el expuesto o el de sombra, decrece o aumenta el ángulo de descrestamiento (véase las figuras 5.3, 5.4, 5.5).
- Corriente en canal de entrada: representa el valor de la corriente en el punto de máxima velocidad situado justo en medio del canal cerca del principio de la plataforma de coronación.
- Corrientes en costa: se ha considerado como la velocidad máxima presente fuera de la estructura. Situada en todos los casos simulados cerca de la isobata -1 metro. Se utilizará para determinar la capacidad erosiva de las corrientes a pie de playa.

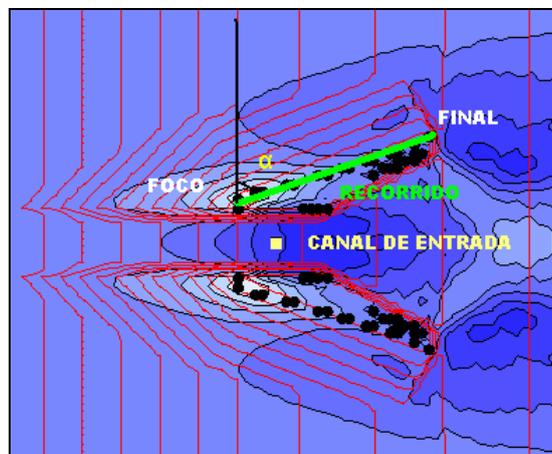


Figura 5.4 Visualización de algunos parámetros del análisis.

5.5 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Los resultados tras la computación del modelo numérico desarrollado mediante la herramienta REF/DIF + LIMCIR son presentados en los apéndices posteriores. Los distintos resultados encontrados muestran una clara simetría en el comportamiento de la estructura respecto un oleaje $+20^\circ$ o -20° .

Aprovechando tal simetría, el análisis se centra en oleajes con ángulos de incidencia de 0° (perpendicular) y $+20^\circ$ (oblicuo). Un oleaje oblicuo de $+20^\circ$ produce un brazo más expuesto (brazo derecho) y otro en sombra (brazo izquierdo).

Dado que se dispone de 3 localizaciones con 8 escenarios estudiados para cada una (cuatro perpendiculares y cuatro oblicuos) resulta un total de 24 casos analizados de los 36 simulados.

Para los casos de estudio donde las olas inciden oblicuamente, se entiende por brazo en sombra a la parte de la estructura menos afectada por el oleaje. El otro brazo será llamado durante este documento como brazo expuesto.

El apéndice 5.1 se muestran los gráficos de distribuciones de altura de ola y campo de velocidades de las corrientes para la "Localización tipo". El mismo contenido se presenta para las localizaciones reales en los apéndices 5.2 para Tossa de Mar y 5.3 para Malgrat de Mar.

Para algunos casos simulados, en concreto el E4 con oleaje perpendicular para la localización tipo y también el E4 con oleaje oblicuo para la localización real de Malgrat de Mar, la programación del software de simulación ha topado con dificultades. Produciendo errores que han imposibilitado su análisis.

Tales errores aparecen para oleajes superiores a 1,2 m. y evidencian la necesidad de estudiar la propagación del oleaje sobre la estructura mediante la utilización de modelos no-lineales. Esto es debido a que los modelos lineales no parecen capaces de reflejar, de manera precisa, los fenómenos producidos durante la rotura del oleaje y circulación de corrientes inducidas tras la colocación de un arrecife artificial.

Por lo tanto las conclusiones del estudio han considerado finalmente 22 análisis correctamente efectuadas.

5.6 ANÁLISIS DE LA LOCALIZACIÓN TIPO

5.6.1 OLEAJE PERPENDICULAR

La tabla 5.3 muestra los valores encontrados y calculados para los diferentes parámetros de la localización tipo; compuesta por una pendiente del fondo 1:30.

	ESCENARIO			
	E1	E2	E3	E4
Altura de ola en Foco [m]	1,05	1,30	1,40	-
Altura de ola en Cuña [m]	0,85	1,00	1,15	-
Iribarren en Foco	0,51	0,50	0,57	-
Iribarren en Cuña	0,75	0,76	0,84	-
Longitud de recorrido [m]	73,05	74,22	80,78	-
Ángulo de descrestamiento [°]	70,82	75,96	68,20	-
Corriente en Canal de entrada [m/s]	0,1	0,2	0,35	-
Corriente en costa [m/s]	0,69	0,79	0,77	-

Tabla 5.3 Resultados simulación de los cuatro escenarios, oleaje perpendicular, localización tipo.

Los primeros resultados observados señalan un buen funcionamiento del foco, que aumenta la altura de ola en un 162%, 144% y 127% para los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente. Se cumple en este caso el objetivo de potenciar la ola en una zona.

En la zona de cogida de ola, se ha marcado el objetivo de producir I_r iguales a 0,7. Según Henriquez (2004) este valor es el óptimo para coger una ola. Aún así los resultados muestran unos I_r más bajos, cercanos a 0,55 para los tres primeros escenarios.

Es importante que el parámetro de similitud del surf se sitúe en todos los casos por encima de 0,5. Por lo tanto se producen siempre roturas tipo plunging a lo largo del arrecife artificial propuesto para la localización tipo.

La longitud del recorrido aumenta a medida que se consideran alturas mayores con periodos más largos. La altura media de ola a lo largo de la cuña se mantiene cercana a un metro y al final del recorrido todavía discurren alturas de 65, 70 y 90 cm. para los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente.

En la cuña, el número de Iribarren tiende a aumentar a medida que crece la altura de ola alcanzando un valor medio de 0,78.

El ángulo de descrestamiento se sitúa en el rango de 68° a 76°.

El canal de entrada presenta una velocidad máxima de 0,35 m/s en el escenario 3 y muestra una tendencia a la alza a medida que aumenta la altura .

5.6.2 OLEAJE OBLICUO

La tabla 5.4 recoge los valores encontrados para la simulación de un oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$. Los resultados muestran una clara simetría en todos los casos.

		ESCENARIO			
		E1	E2	E3	E4
Altura de ola en Foco [m]	Brazo en sombra	1,00	1,25	1,45	1,65
	Brazo expuesto	0,95	1,25	1,40	1,65
Altura de ola en Cuña [m]	Brazo en sombra	0,85	1,05	1,25	1,43
	Brazo expuesto	0,80	1,03	1,15	1,30
Iribarren en Foco	Brazo en sombra	0,52	0,51	0,56	0,58
	Brazo expuesto	0,53	0,51	0,57	0,58
Iribarren en Cuña	Brazo en sombra	0,75	0,75	0,81	0,83
	Brazo expuesto	0,78	0,75	0,84	0,86
Longitud de recorrido [m]	Brazo en sombra	76,90	76,90	80,78	81,94
	Brazo expuesto	72,12	71,31	73,05	77,88
Ángulo de descrestamiento [°]	Brazo en sombra	89,44	89,44	88,20	86,25
	Brazo expuesto	53,07	55,38	50,82	54,36
Corriente de entrada [m/s]		0,1	0,15	0,27	0,60
Corrientes en costa [m/s]		0,78	0,95	0,83	1,18

Tabla 5.4 Resultados simulación de los cuatro escenarios, oleaje oblicuo, localización tipo.

Se observa una disminución de la altura de ola en el brazo expuesto tanto en la cuña como en el foco. Esto repercute, juntamente con el ángulo de descrestamiento, en la calidad de ola determinando un nivel de maestría diferente para cada brazo (véase figura 5.3).

El tamaño del foco disminuye considerablemente sobre todo en el brazo expuesto al oleaje y se desplaza ligeramente hacia la cuña.

El ángulo de descrestamiento se ve afectado por la incidencia oblicua del oleaje registrando unos ángulos cercanos a 90° para el brazo en sombra, con longitudes de recorrido superiores a las del brazo expuesto que presenta un "peel angle" entre 50° y 55° .

Respecto a los números de Iribarren, se produce el mismo comportamiento observado en los casos de incidencia perpendicular. Alturas mayores provocan I_r más próximos a los marcados en el diseño del foco y la cuña, sobretodo en la cuña que para el escenario 4 alcanza un 0,86.

Respecto a la incidencia perpendicular, se nota una disminución en las velocidades para el caso oblicuo.

5.7 ANÁLISIS DE LA LOCALIZACIÓN REAL, TOSSA DE MAR

5.7.1 OLEAJE PERPENDICULAR

	ESCENARIO			
	E1	E2	E3	E4
Altura de ola en Foco [m]	1,05	1,35	1,6	1,75
Altura de ola en Cuña [m]	0,8	1,1	1,25	1,375
Iribarren en Foco	0,508	0,493	0,535	0,559
Iribarren en Cuña	0,776	0,728	0,807	0,841
Longitud de recorrido [m]	69,26	51,26	75,89	76,90
Ángulo de descrestamiento [°]	72,35	69,44	71,57	69,44
Corriente en Canal de entrada [m/s]	0,30	0,45	0,50	0,60
Corriente en costa [m/s]	0,62	0,69	0,78	0,81

Tabla 5.5 Resultados simulación de los cuatro escenarios, oleaje perpendicular, Tossa de Mar.

Se observa un aumento de la altura de ola en el foco y una leve disminución en la cuña si se compara esta localización real con la localización tipo.

Los puntos de rotura observados sobre este arrecife denotan un mal comportamiento con oleajes pequeños que se ve solucionado cuando se aumenta la altura de ola (ver Apéndice 5.2). El escenario 2 es un claro ejemplo, presentado muy pocos puntos de rotura sobre el arrecife resultando en una longitud de recorrido algo escasa.

La corriente del canal de retorno aumenta considerablemente en esta localización. Se asocia a la proximidad de la estructura respecto la línea de costa.

El parámetro de similitud del surf (I_r) muestra el mismo comportamiento que para la localización tipo. Como antes, la cuña se comporta mejor que el foco, se sitúa más cerca del valor de diseño.

La altura media de ola a lo largo de la cuña se mantiene próxima a un metro de altura y al final del recorrido todavía discurren alturas de 55, 85, 90 y 100 cm. para los escenarios 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Algo superiores que para la localización tipo.

El ángulo de descrestamiento se sitúa entre 69° y 72°.

5.7.2 OLEAJE OBLICUO

		ESCENARIO			
		E1	E2	E3	E4
Altura de ola en Foco [m]	Brazo en sombra	1,00	1,30	1,60	1,70
	Brazo expuesto	1,00	1,25	1,50	1,60
Altura de ola en Cuña [m]	Brazo en sombra	0,83	1,05	1,23	1,38
	Brazo expuesto	0,83	1,05	1,18	1,25
Iribarren en Foco	Brazo en sombra	0,52	0,50	0,54	0,57
	Brazo expuesto	0,52	0,51	0,55	0,58
Iribarren en Cuña	Brazo en sombra	0,76	0,75	0,82	0,84
	Brazo expuesto	0,76	0,75	0,83	0,88
Longitud de recorrido [m]	Brazo en sombra	66,41	55,15	84,48	80,78
	Brazo expuesto	54,33	59,77	75,00	78,00
Ángulo de descrestamiento [°]	Brazo en sombra	91,57	87,62	93,50	88,20
	Brazo expuesto	63,66	52,47	53,74	47,38
Corriente de entrada [m/s]		0,25	0,32	0,46	0,52
Corrientes en costa [m/s]		0,83	0,99	1,00	1,03

Tabla 5.6 Resultados simulación de los cuatro escenarios, oleaje oblicuo, Tossa de Mar.

Se comprueba con este segundo caso oblicuo una reducción de velocidades en el canal de retorno. También continúa la tendencia a disminuir la altura de ola en el brazo expuesto tanto en la cuña como en el foco, como ya se había observado para la localización tipo.

El ángulo de descrestamiento se ve afectado por la incidencia oblicua del oleaje registrando unos algunos cercanos a 90° para el brazo en sombra con longitudes de recorrido superiores al brazo expuesto que dispone de un “peel angle” entre 47 y 63°.

Para el caso de Tossa de Mar la cuña en el escenario 4 alcanza un $I_r = 0,88$, mejorando los resultados de casos anteriores.

5.8 ANÁLISIS DE LA LOCALIZACIÓN REAL, MALGRAT DE MAR

5.8.1 OLEAJE PERPENDICULAR

	ESCENARIO			
	E1	E2	E3	E4
Altura de ola en Foco [m]	1,05	1,25	1,50	1,65
Altura de ola en Cuña [m]	0,83	1,03	1,20	1,38
Iribarren en Foco	0,51	0,51	0,55	0,58
Iribarren en Cuña	0,68	0,68	0,74	0,77
Longitud de recorrido [m]	78,75	82,54	85,38	89,20
Ángulo de descrestamiento [°]	72,26	70,91	71,57	70,35
Corriente en Canal de entrada [m/s]	0,33	0,46	0,42	0,36
Corriente en costa [m/s]	0,50	0,68	0,72	0,78

Tabla 5. 7 Resultados simulación de los cuatro escenarios, oleaje perpendicular, Malgrat de Mar.

Las alturas de ola en el foco y cuña son intermedias a los valores encontrados para las otras dos localizaciones. Este comportamiento resalta la influencia de la rampa.

Las longitudes de recorrido marcadas en esta localización son las más altas del estudio, llegando casi a 90 metros para el escenario de mayor altura.

El número de Iribarren mantiene el comportamiento encontrado para las otras localizaciones. Aumenta a medida que crece la altura de ola. Igualmente se sitúan por debajo de los establecidos durante el diseño.

La corriente del canal de retorno presenta unas velocidades sin aparente relación con el aumento de la altura de ola.

5.8.2 OLAJE OBLICUO

		ESCENARIO			
		E1	E2	E3	E4
Altura de ola en Foco [m]	Brazo en sombra	1,05	1,25	1,50	-
	Brazo expuesto	0,95	1,25	1,50	-
Altura de ola en Cuña [m]	Brazo en sombra	0,90	1,08	1,30	-
	Brazo expuesto	0,75	1,00	1,13	-
Iribarren en Foco	Brazo en sombra	0,51	0,51	0,55	-
	Brazo expuesto	0,53	0,51	0,55	-
Iribarren en Cuña	Brazo en sombra	0,73	0,74	0,79	-
	Brazo expuesto	0,80	0,76	0,85	-
Longitud de recorrido [m]	Brazo en sombra	73,05	80,78	86,38	-
	Brazo expuesto	75,89	78,75	79,71	-
Ángulo de descrestamiento [°]	Brazo en sombra	90,82	88,20	89,68	-
	Brazo expuesto	51,57	52,26	50,20	-
Corriente de entrada [m/s]		0,34	0,47	0,44	-
Corrientes en costa [m/s]		0,61	0,75	0,85	-

Tabla 5. 8 Resultados simulación de los cuatro escenarios, oleaje oblicuo, Malgrat de Mar.

Para el caso de Malgrat de Mar afecta por un oleaje oblicuo se aprecia que las alturas en el foco y cuña son intermedias a los valores encontrados para la localización tipo y real de Tossa de Mar. Este comportamiento resalta la influencia de la rampa. Según los resultados, una pendiente 1:20 del fondo situado antes de la estructura produce alturas mayores.

Las longitudes de recorrido marcadas para esta localización son las más altas del estudio, llegando casi a 90 metros para el escenario 4. El cambio de pendiente justo en la zona donde se ha situado la estructura (exactamente a 5 de profundidad), puede asimilarse como una ligera "plataforma", siguiendo con los conceptos de Mead y Black (1999). La plataforma ayuda a mantener las condiciones de ola producidas en el foco.

5.9 RECOPIACIÓN GRÁFICA DEL ANÁLISIS REALIZADO

A continuación se muestra un listado de los apéndices que recogen la documentación gráfica que acompaña a los apartados anteriores:

- Apéndice 5.4: Gráficos del análisis para la "Localización tipo".
- Apéndice 5.5: Gráficos del análisis para la "Localización real, Tossa de Mar".
- Apéndice 5.6: Gráficos del análisis para la "Localización real, Malgrat de Mar".

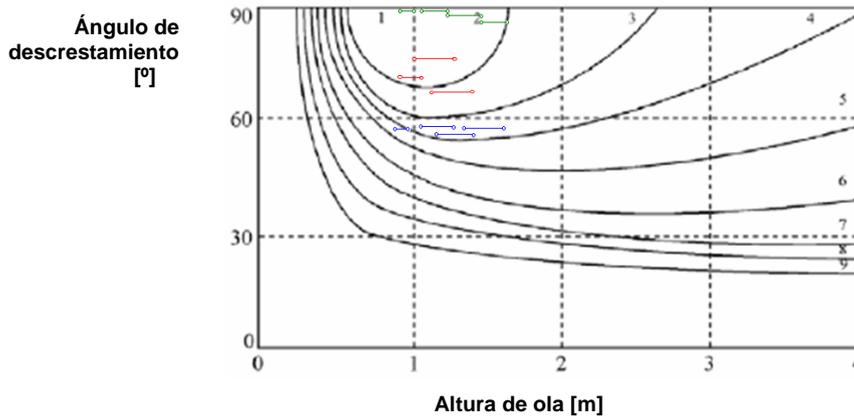
5.10 CALIDAD DE SURF

Con el objetivo de mostrar de forma clara la calidad de surf creada con la estructura propuesta, se recurre a los trabajos de Hutt *et al.* (2001) que relacionan el ángulo de descrestamiento y la altura de ola con el nivel de surfista (capítulo 2).

Clase	Descripción de la clase de surfista	Ángulo de descrestamiento (grados)	Altura de ola mín./máx. (m)
1	Principiante; todavía no puede surfear olas en su frente y simplemente se mueve siguiendo avance del oleaje	90	0,7 - 1
2	Aprendiz; solamente puede surfear lateralmente sobre la cresta de la ola	70	0,65 - 1,5
3	Iniciado; solamente puede desarrollar su destreza surfear en la cara de la ola en plunging	60	0,6 - 2,5
4	El surfista comienza a iniciar y ejecutar ocasionalmente maniobras típicas de surf	55	0,55 - 4
5	El surfista puede ejecutar maniobras típicas consecutivamente en una ola simple	50	0,5 - 4
6	El surfista puede ejecutar maniobras típicas consecutivamente. Ejecuta maniobras avanzadas en ocasiones	40	0,45 - 4
7	Grado más alto de aficionado. Ejecuta maniobras avanzadas de surf	29	0,4 - 4
8	Profesional. Ejecuta consecutivamente maniobras avanzadas de surf	27	0,35 - 4
9	Grado más alto del nivel de profesional. Ejecuta consecutivamente maniobras avanzadas de surf	No alcanzado	0,3 - 4
10	Surfista en el futuro	No alcanzado	0,3 - 4

Tabla 5.9 Relación de altura de ola y clase del surfista (Hutt *et al.*, 2001)

En las figuras posteriores se pintan en diferentes colores las distintas situaciones de surf encontradas sobre el gráfico propuesto por Hutt *et al.* (2001). Los puntos rojos pertenecen a una incidencia perpendicular; los puntos verdes son del brazo expuesto con una incidencia oblicua y los puntos de color azul son del brazo en sombra también con una incidencia oblicua.

Localización tipo

Figuras 5.5 Grados de maestría de los practicantes respecto al ángulo de descrestamiento y la altura de ola, localización tipo (modificado de Hutt *et al.*, 2001).

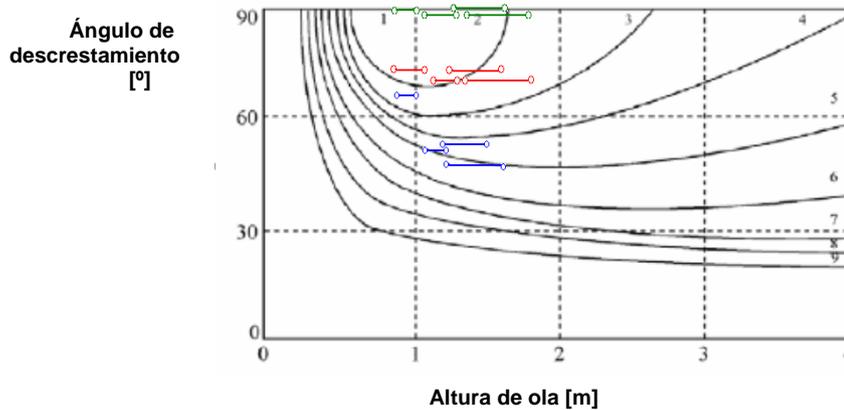
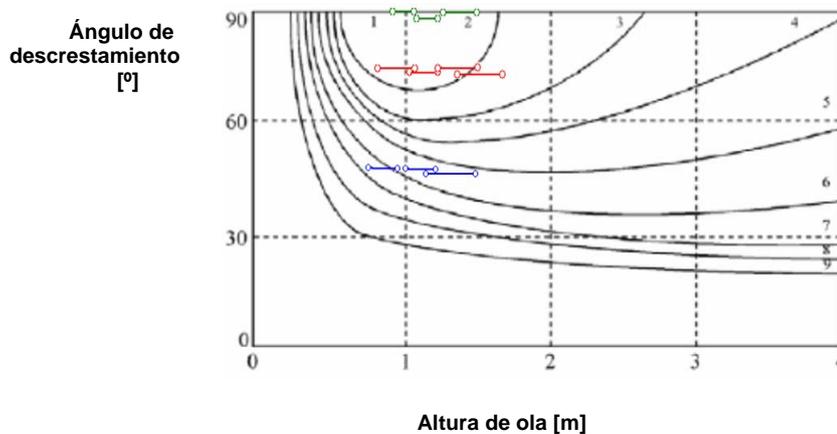
Localización real, Tossa de Mar

Figura 5.6 Grados de maestría de los practicantes respecto al ángulo de descrestamiento y la altura de ola, Tossa de Mar (modificado de Hutt *et al.*, 2001).

Localización real, Malgrat de Mar

Figuras 5.7 Grados de maestría de los practicantes respecto al ángulo de descrestamiento y la altura de ola, Malgrat de Mar (modificado de Hutt *et al.*, 2001).

Se puede estar cerca de niveles medios del grado de maestría del surfista con ángulos de descrestamiento de más de 50° y menores a 60° . Esta característica se da en el brazo más expuesto al oleaje donde el ángulo de descrestamiento es menor cuando incide un oleaje oblicuo.

Los ángulos de descrestamiento más bajos encontrados para Malgrat de Mar permiten llegar a niveles más avanzados de dominio que en la localización tipo. Oleajes más oblicuos, o una estructura más inclinada respecto el oleaje, favorecen las condiciones de surf para niveles avanzados.

Todos los resultados de números de Iribarren son superiores a 0,5. Por lo tanto, se ha demostrado numéricamente que con una estructura tipo arrecife artificial en el litoral catalán se consiguen roturas tipo plunging si es diseñada tal y como se propone en esta Tesina.

5.11 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

La primera conclusión que se extrae de los resultados de la simulación es que en cualquiera de los casos la altura de ola aumenta en el foco de la estructura. Este incremento relativo es mayor cuanto menores son la altura de ola y periodo, es decir, el máximo rendimiento de la estructura planteada se consigue para el escenario E1. Esto es debido a que el arrecife ha sido diseñado para un oleaje con alturas de ola reducidas.

Lógicamente, al paso de la ola sobre la cuña la rotura disipa energía provocando una disminución de la altura de ola, que de todas formas se mantiene superior a la del oleaje incidente sobre la estructura.

Con oleaje oblicuo, el brazo en sombra presenta mayores alturas de ola que el expuesto. Además se obtiene un desplazamiento del foco en el brazo expuesto hacia la plataforma de coronación, acortando la longitud de recorrido.

El número de Iribarren, o parámetro de similitud del surf, aumenta con la altura de ola y periodo. Como era de esperar este valor es menor para el foco (zona de cogida de ola) que para la cuña. Cuando crece la altura de ola y el periodo se obtiene un número de Iribarren más elevado y, en consecuencia, más próximo al de diseño. Se observa que el incremento de este parámetro, del foco a la cuña, es el diseñado para todos los escenarios (diseño: $\Delta I_r = 0,9 - 0,7 = 0,2$ y simulación: $\Delta I_r = 0,75 - 0,55 = 0,2$). Se tiene, por tanto, una rotura de tipo plunging para todos los casos sobre la parte surfeable del arrecife.

Se deduce del estudio que la longitud del recorrido crece con la altura de ola del oleaje propagado sobre la estructura. Como norma general la longitud del recorrido es superior a los 70 m. Con oleaje oblicuo la simulación presenta en el brazo en sombra una mayor longitud del recorrido que con una incidencia perpendicular. Justamente lo contrario sucede en el brazo expuesto.

La estructura logra mantener estables los ángulos de descrestamiento. Con una obertura de 45° entre brazos, como la de diseño, se consiguen $\alpha = 70^\circ$ o muy cercanos con una incidencia del oleaje perpendicular. En cambio, si el oleaje se aproxima con

una orientación de $\pm 20^\circ$ se producen $\alpha = 90^\circ$ en el brazo en sombra y $\alpha = 55^\circ$ en el brazo expuesto.

La corriente en el canal de retorno permite volver a la zona de cogida por en medio de los dos brazos, ya que la corriente en esa zona tiene dirección perpendicular a la playa y sentido aguas adentro. Los módulos de la velocidad muestran un aumento en consonancia con el crecimiento de la altura de ola y periodo. Esto último no se cumple para la velocidad de la corriente en el caso de Malgrat de Mar donde se muestra más estable o, incluso, tiende a disminuir a partir de valores de la altura de ola iguales a un metro.

Todas las velocidades de las corrientes en costa, recogidas en este capítulo, son superiores a la velocidad crítica de inicio del movimiento. Por lo tanto, se aprecia una posible erosión del medio. Si la estructura se aleja de la costa como el caso de Malgrat de Mar las corrientes dejan de influir en el perfil de línea de playa.

APÉNDICE 5.1

DISTRIBUCIONES DE ALTURA DE OLA Y CAMPO DE VELOCIDADES DE LAS CORRIENTES PARA LA “LOCALIZACIÓN TIPO”

A continuación se muestran las figuras correspondientes a los resultados de la simulación numérica de la localización tipo. Este apéndice se divide en dos apartados, uno para los casos con incidencia perpendicular del oleaje y uno segundo apartado para los casos con incidencia oblicua. Primero, se recogen las distribuciones de alturas de ola y después el campo de velocidades de las corrientes producidas para cada escenario.

INCIDENCIA PERPENDICULAR

Escenario 1 $H_s=0,65$ m. $T=5,9$ s.

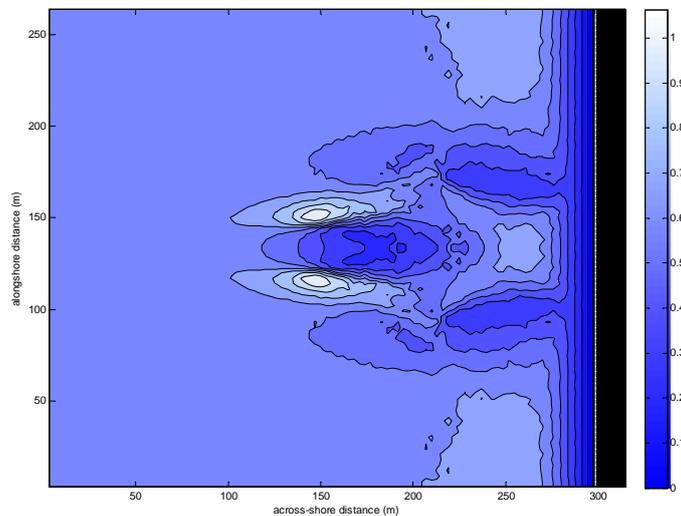


Figura 1 Distribución de alturas de ola con oleaje perpendicular a la estructura, escenario 1.

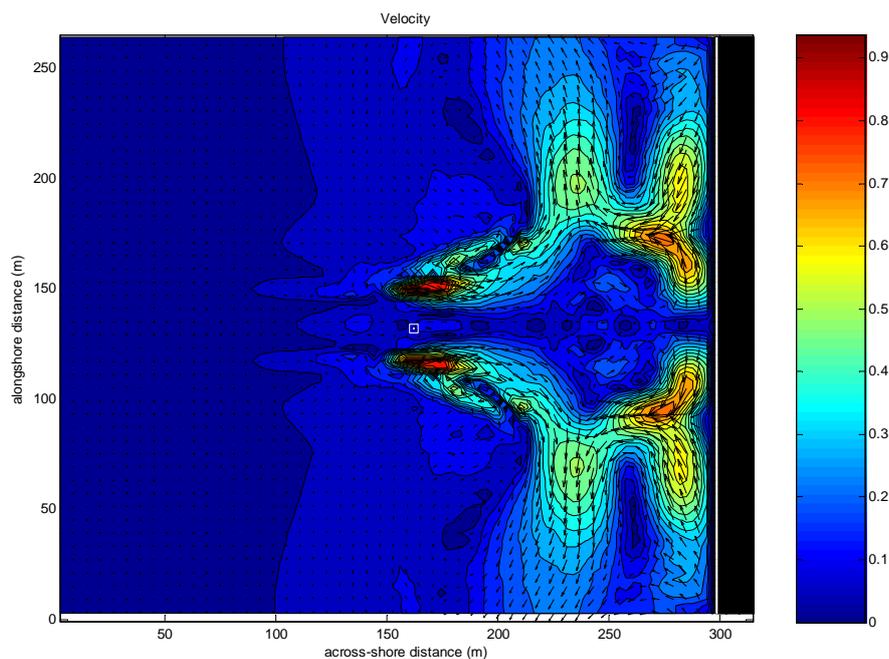
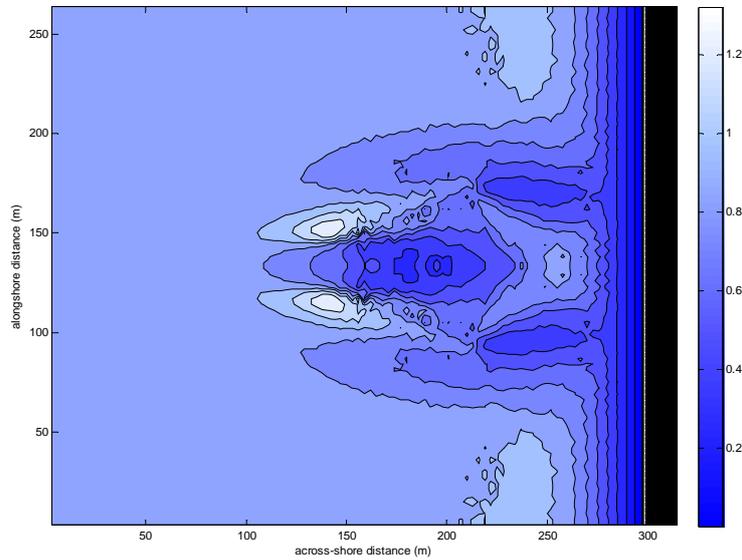
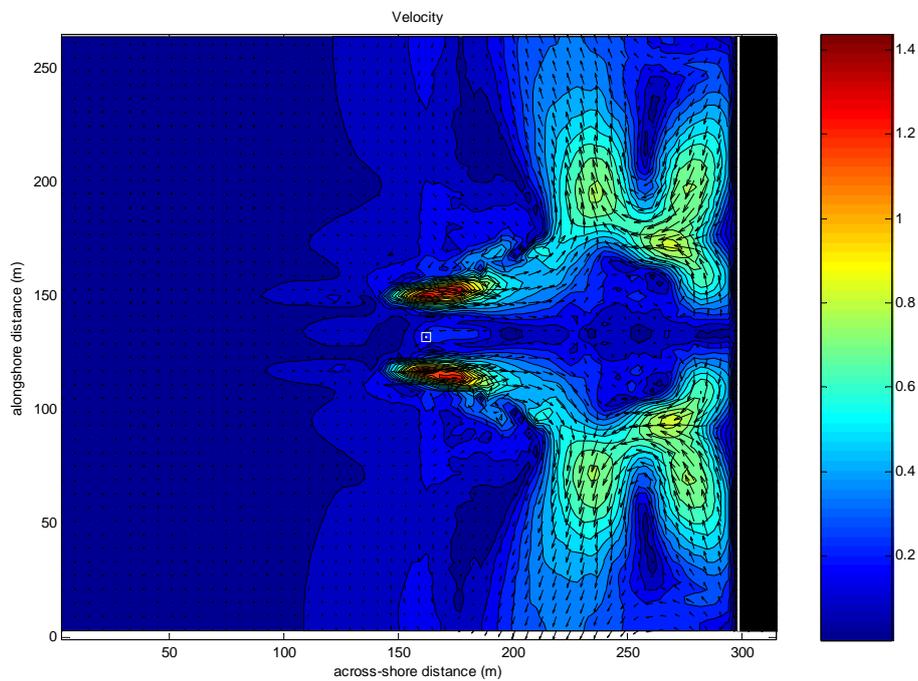
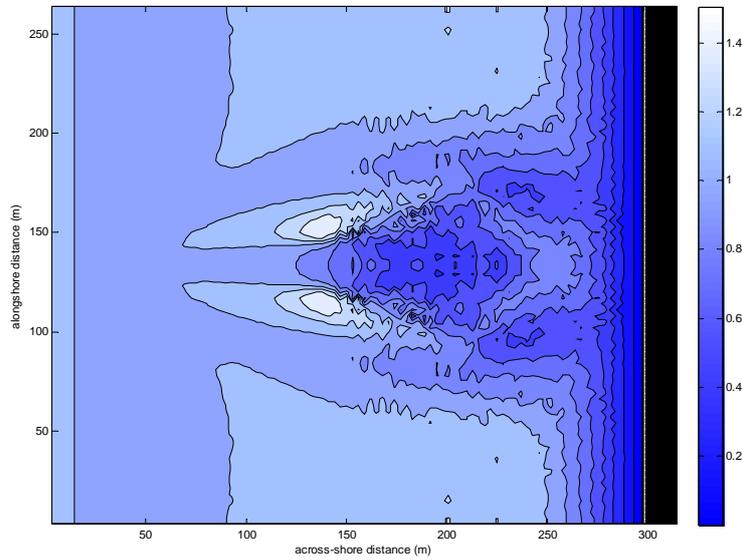
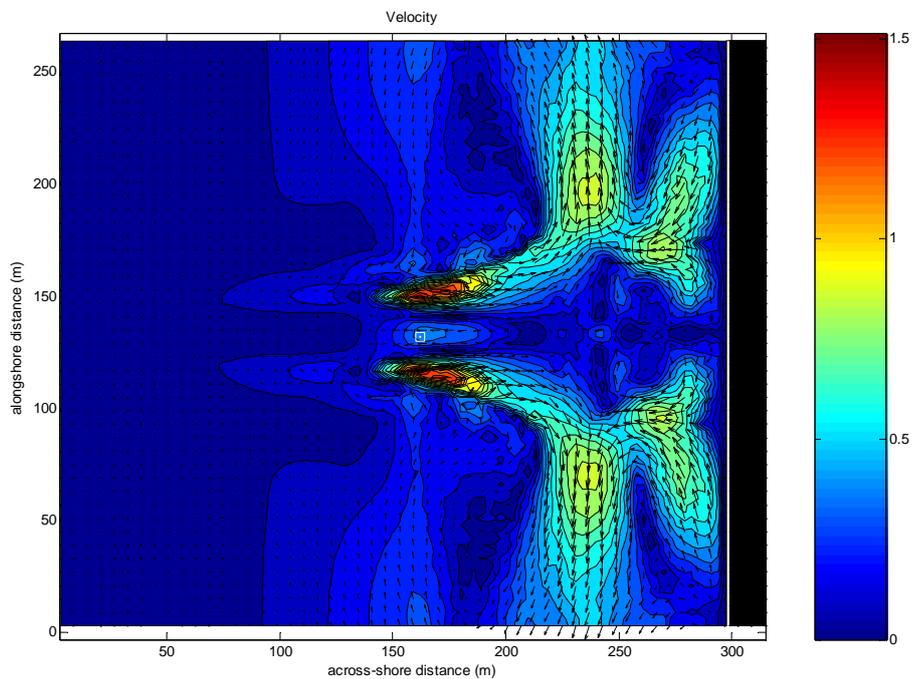


Figura 2 Campo de velocidades de las corrientes generadas, oleaje perpendicular, escenario 1.

Escenario 2 $H_s=0,90$ m. $T=6,4$ s.**Figura 3 Distribución de alturas de ola con oleaje perpendicular a la estructura, escenario 2.****Figura 4 Campo de velocidades de las corrientes generadas, oleaje perpendicular, escenario 2.**

Escenario 3 $H_s=1,10$ m. $T=6,7$ s.**Figura 5 Distribución de alturas de ola con oleaje perpendicular a la estructura, escenario 3.****Figura 6 Campo de velocidades de las corrientes generadas, oleaje perpendicular, escenario 3.**

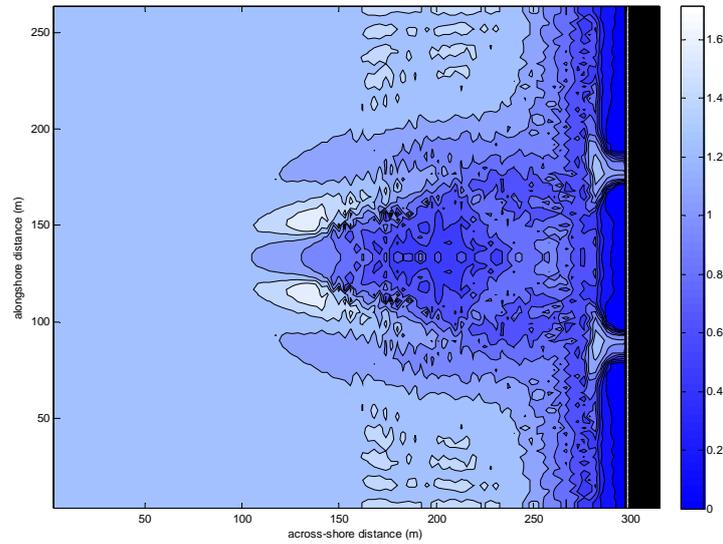
Escenario 4 $H_s=1,3$ m. $T=7,1$ s.

Figura 7 Distribución de alturas de ola con oleaje perpendicular a la estructura, escenario 4.

La figura correspondiente al campo de velocidades del Escenario 4 con oleaje perpendicular, no ha sido posible graficar.

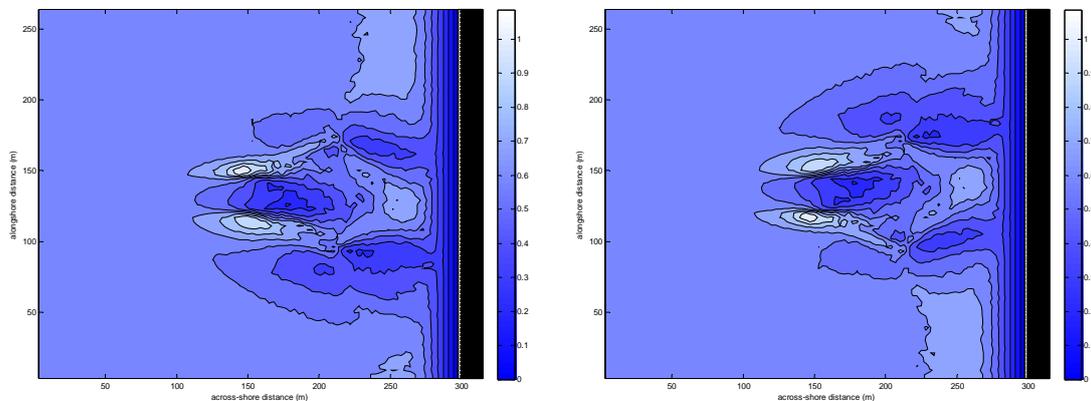
INCIDENCIA OBLICUA**Escenario 1 $H_s=0,65$ m. $T=5,9$ s.**

Figura 8 Distribuciones de alturas de ola con oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$ la ortogonal, escenario 1.

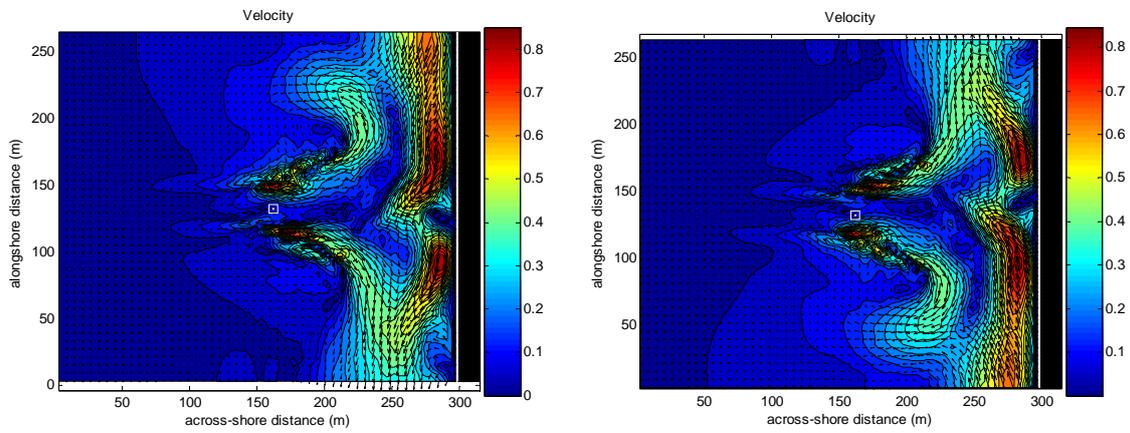


Figura 9 Campos de velocidades de las corrientes generadas, oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$, escenario 1.

Escenario 2 $H_s=0,90$ m. $T=6,4$ s.

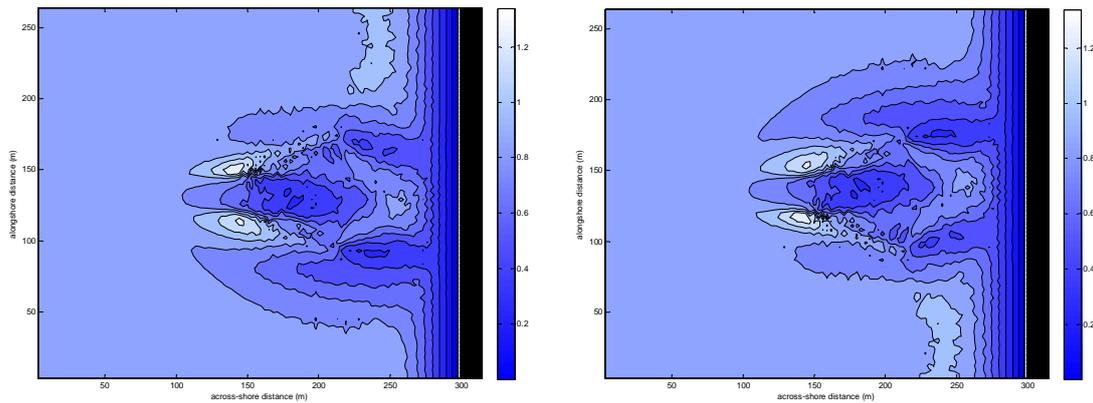


Figura 5. 10 Distribuciones de alturas de ola con oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$ la ortogonal, escenario 2.

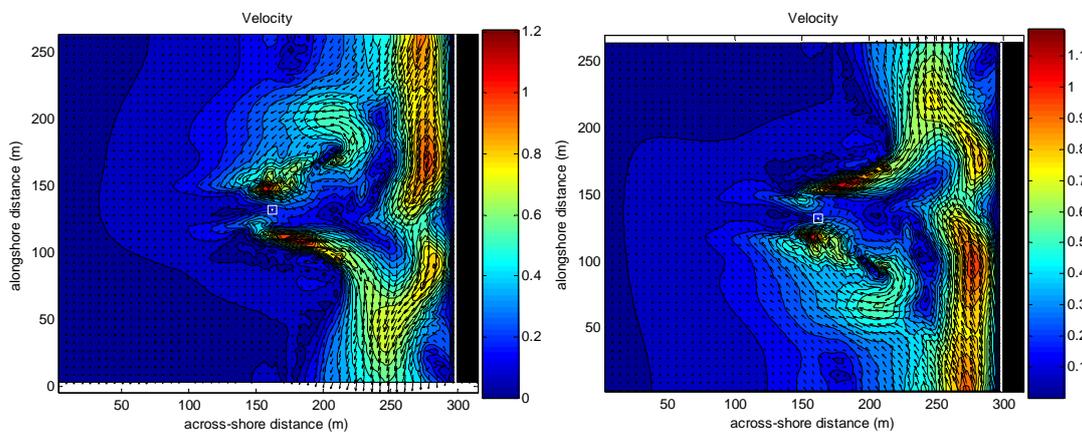
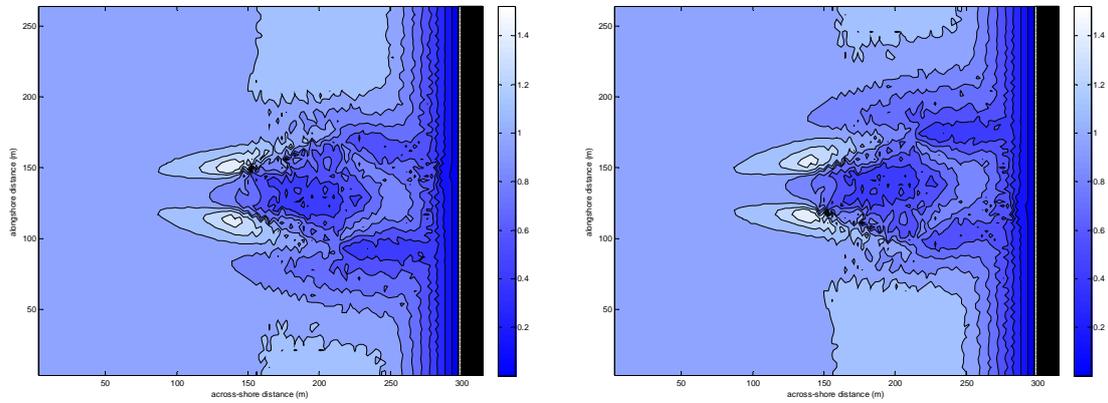
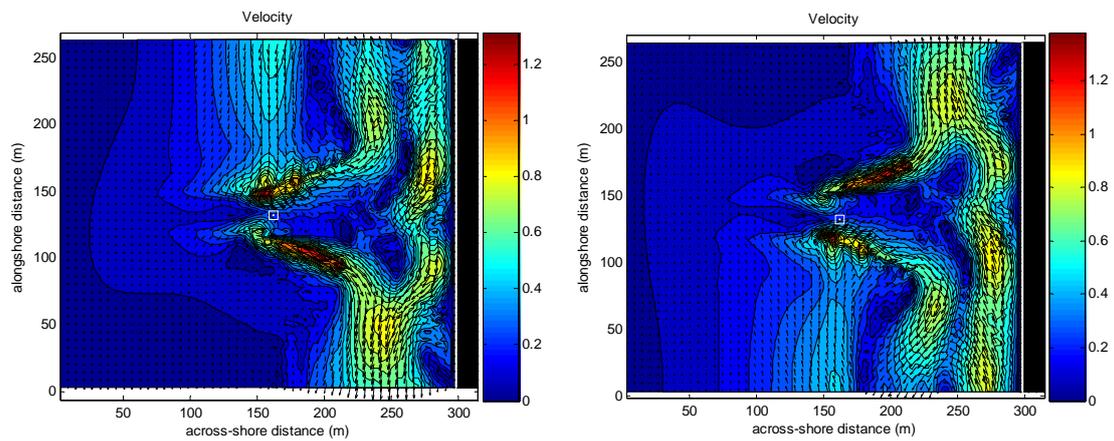
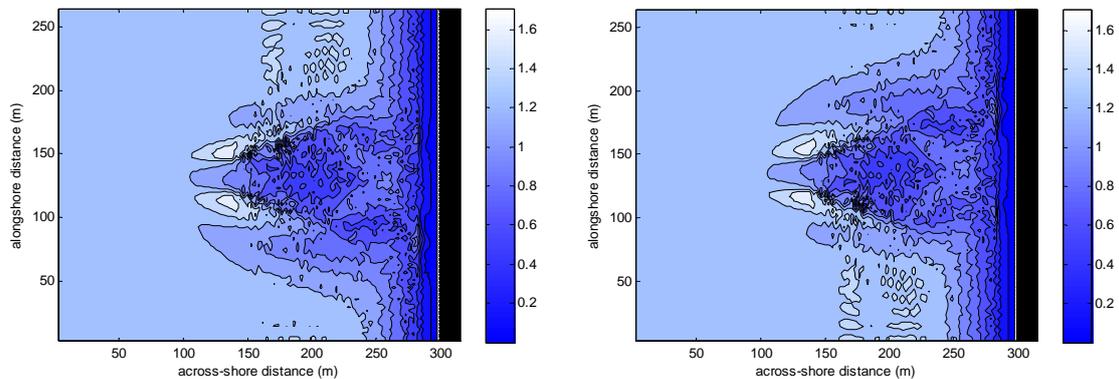


Figura 11 Campos de velocidades de las corrientes generadas, oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$, escenario 2.

Escenario 3 Hs=1,10 m. T=6,7 s.Figura 12 Distribuciones de alturas de ola con oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$ la ortogonal, escenario 3.Figura 13 Campos de velocidades de las corrientes generadas, oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$, escenario 3.**Escenario 4 Hs=1,3 m. T=7,1 s.**Figura 14 Distribuciones de alturas de ola con oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$ la ortogonal, escenario 4.

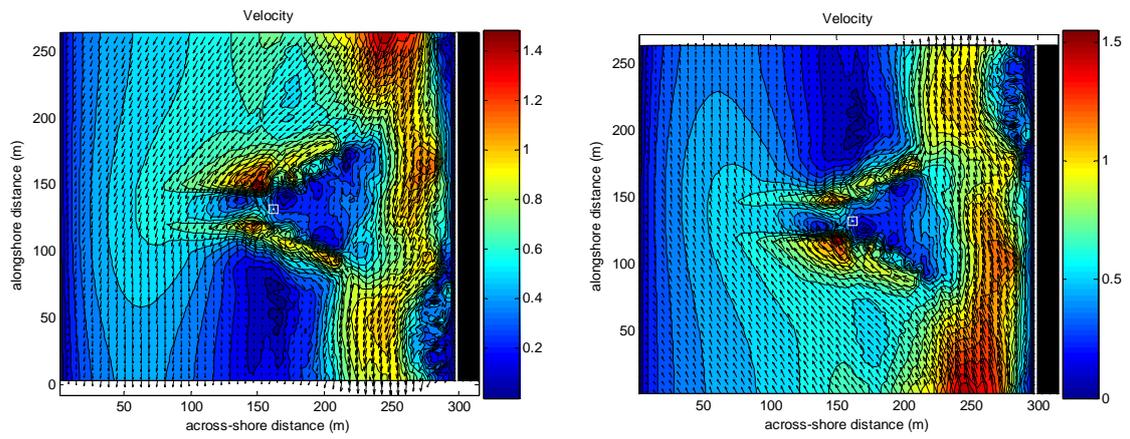


Figura 15 Campos de velocidades de las corrientes generadas, oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$, escenario 4.

APÉNDICE 5.2

DISTRIBUCIONES DE ALTURA DE OLA Y CAMPO DE VELOCIDADES DE LAS CORRIENTES PARA LA “LOCALIZACIÓN REAL, TOSSA DE MAR”

En este segundo apéndice del capítulo 5 se muestran las figuras correspondientes a los diferentes escenarios obtenidos para la localización real de Tossa de Mar (caso roca).

El apéndice se divide en dos apartados, igualmente que el apéndice 5.1, en incidencia perpendicular e incidencia oblicua del oleaje. Primero, se recogen las distribuciones de alturas de ola y después el campo de velocidades de las corrientes producidas para cada escenario.

INCIDENCIA PERPENDICULAR

Escenario 1 $H_s=0,65$ m. $T= 5,9$ s.

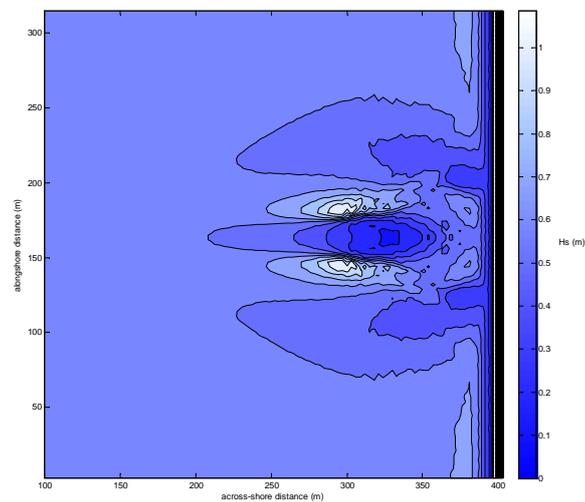


Figura 1. Distribución de alturas de ola con oleaje perpendicular a la estructura, escenario 1.

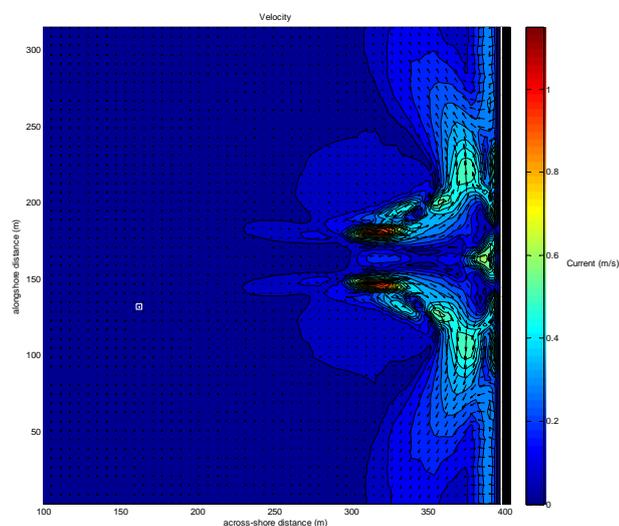
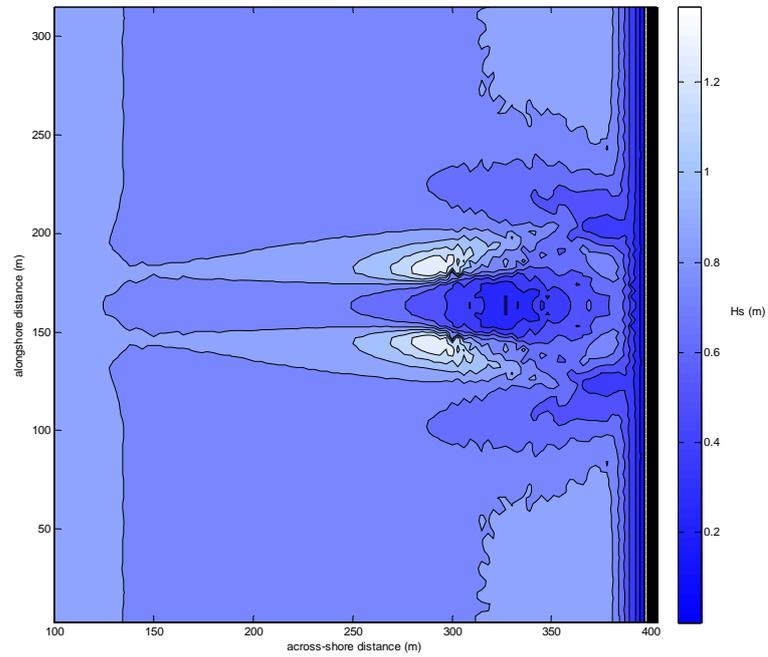
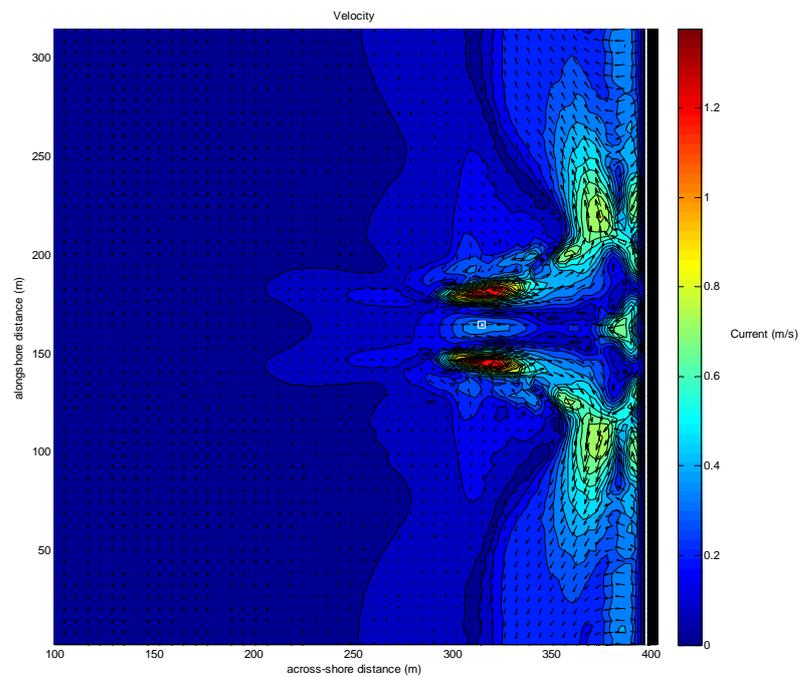


Figura 2. Campo de velocidades de las corrientes generadas, oleaje perpendicular, escenario 1.

Escenario 2 $H_s=0,90$ m. $T=6,4$ s.**Figura 3. Distribución de alturas de ola con oleaje perpendicular a la estructura, escenario 2.****Figura 4. Campo de velocidades de las corrientes generadas, oleaje perpendicular, escenario 2.**

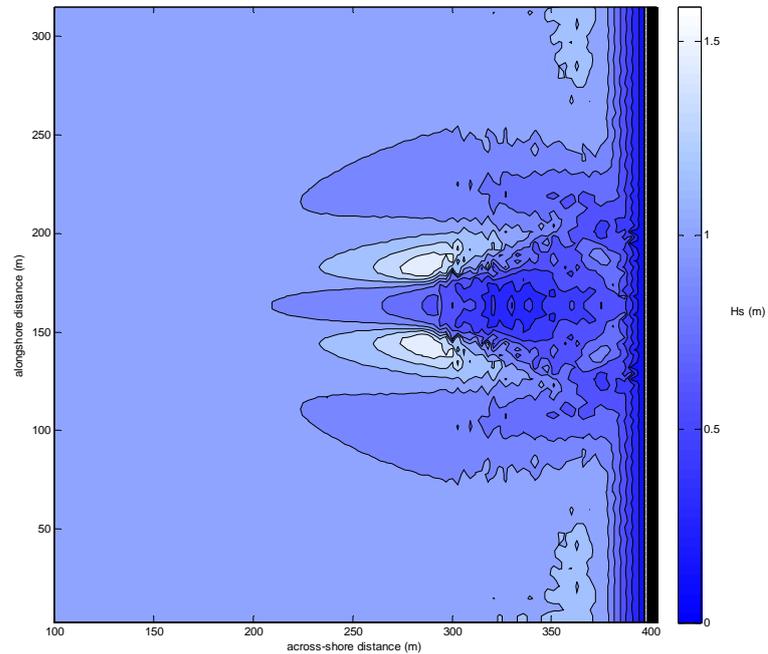
Escenario 3 $H_s=1,10$ m. $T=6,7$ s.

Figura 5. Distribución de alturas de ola con oleaje perpendicular a la estructura, escenario 3.

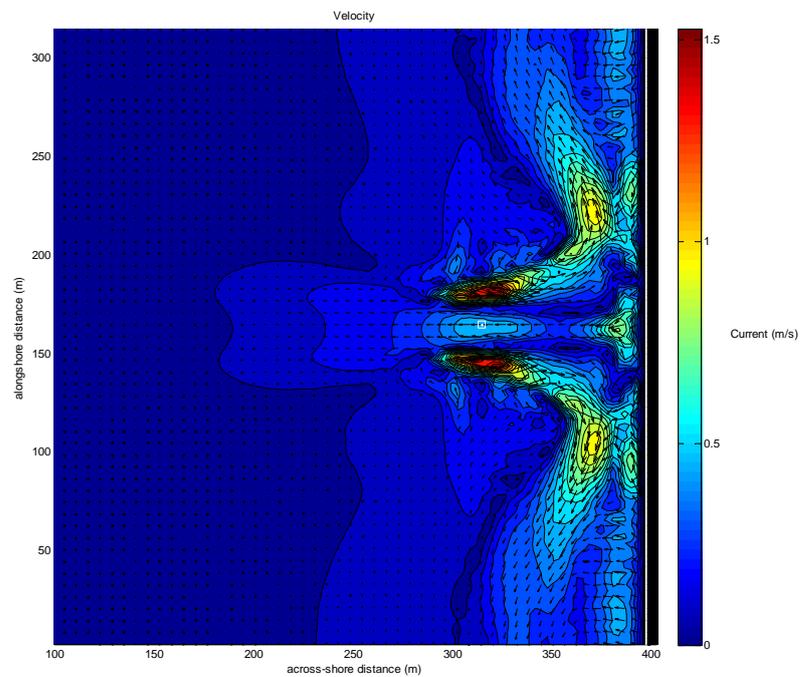


Figura 6. Campo de velocidades de las corrientes generadas, oleaje perpendicular, escenario 3.

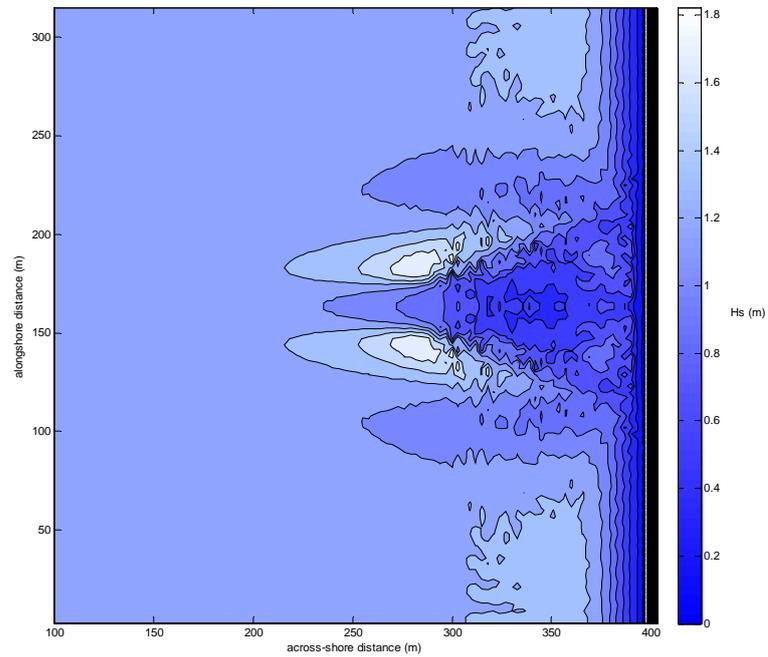
Escenario 4 $H_s=1,30$ m. $T=7,1$ s.

Figura 7. Distribución de alturas de ola con oleaje perpendicular a la estructura, escenario 4.

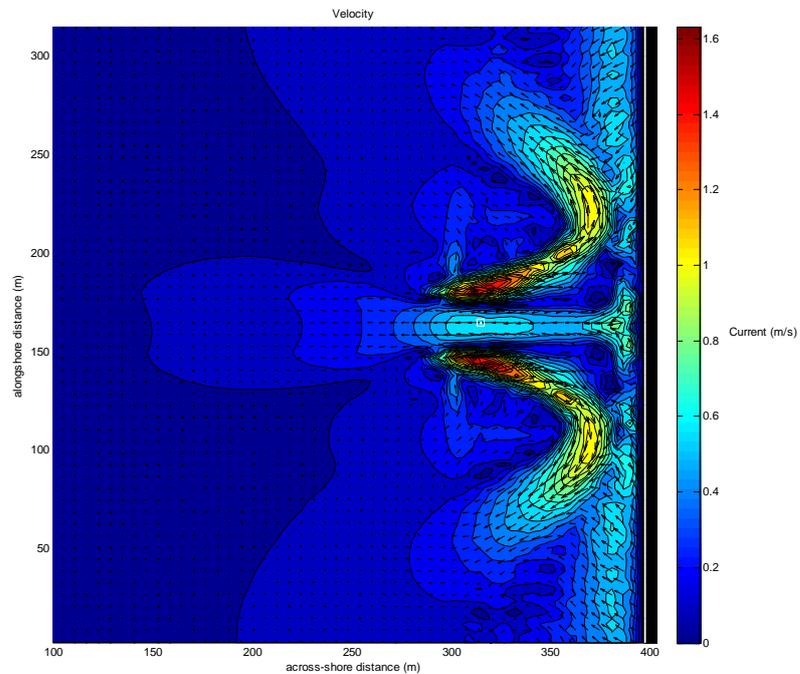


Figura 8. Campo de velocidades de las corrientes generadas, oleaje perpendicular, escenario 4.

INCIDENCIA OBLICUA

Escenario 1 Hs=0,65 m. T=5,9 s.

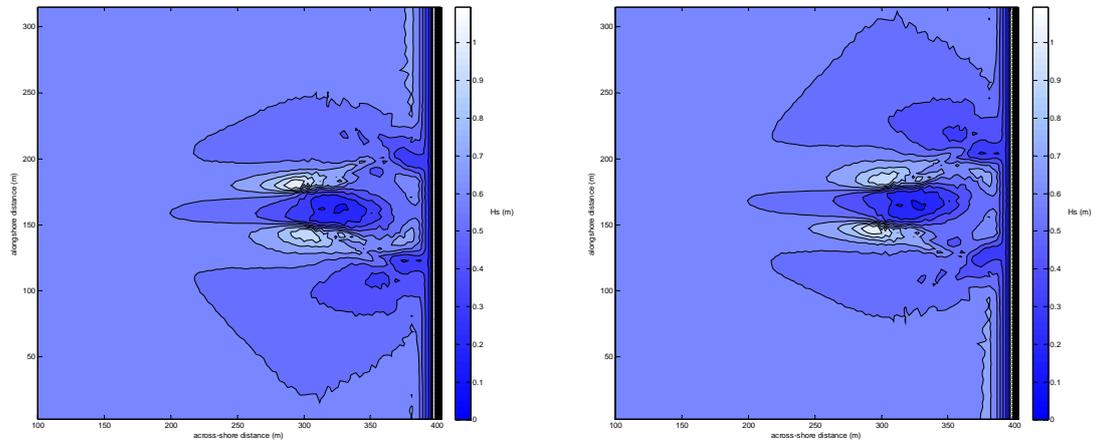


Figura 9. Distribuciones de alturas de ola con oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$ la ortogonal, escenario 1.

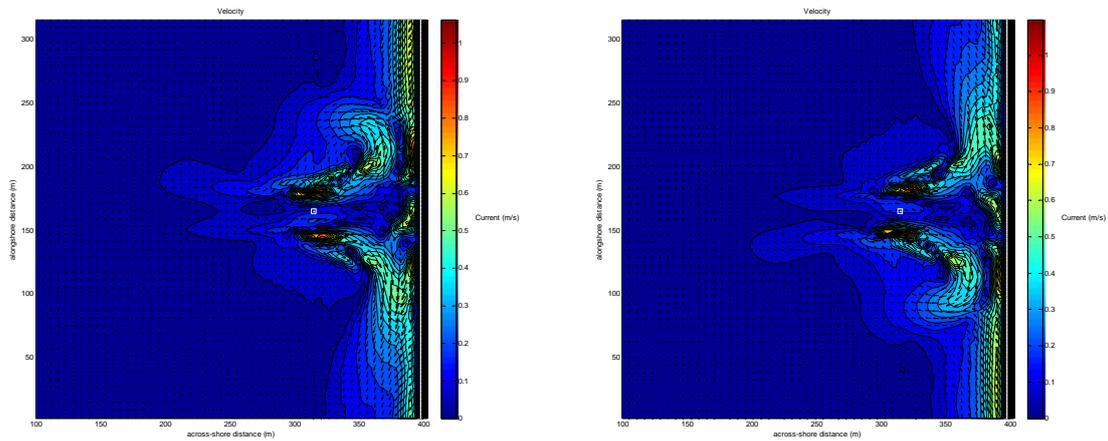


Figura 10. Campos de velocidades de las corrientes generadas, oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$, escenario 1.

Escenario 2 Hs=0,90 m. T=6,4 s.

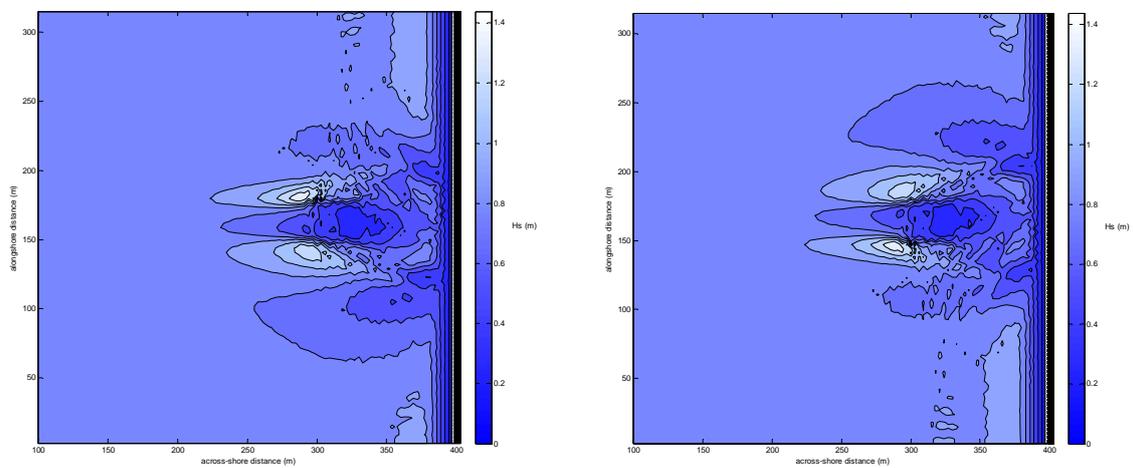


Figura 11. Distribuciones de alturas de ola con oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$ la ortogonal, escenario 2.

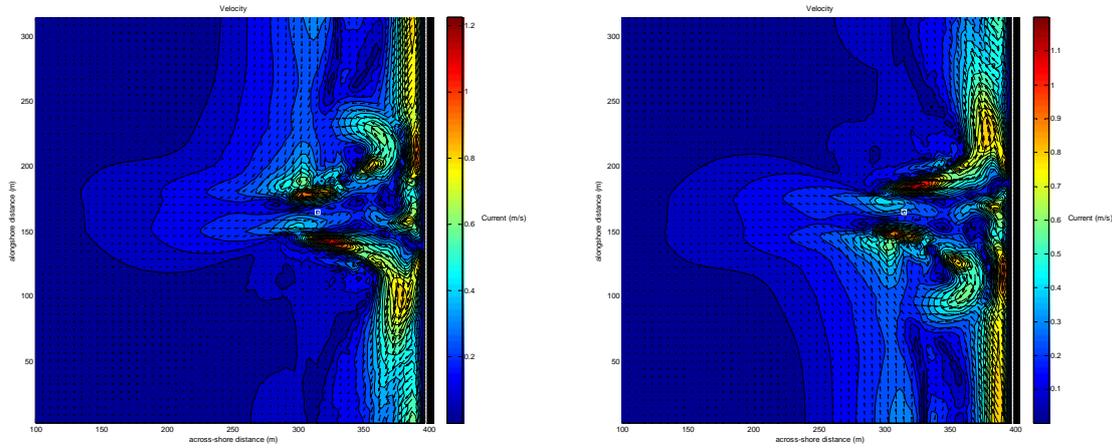


Figura 12. Campos de velocidades de las corrientes generadas, oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$, escenario 2.

Escenario 3 $H_s=1,10$ m. $T=6,7$ s.

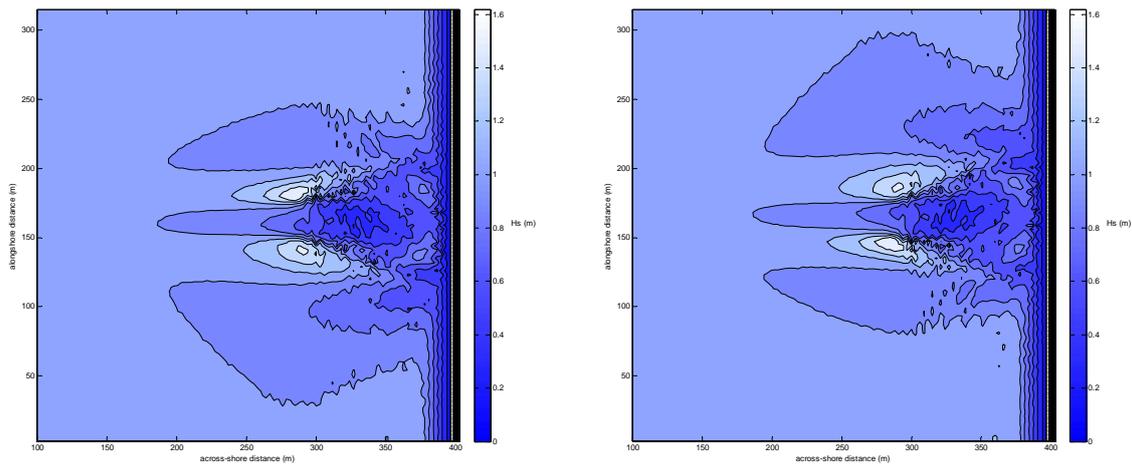


Figura 13. Distribuciones de alturas de ola con oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$ la ortogonal, escenario 3.

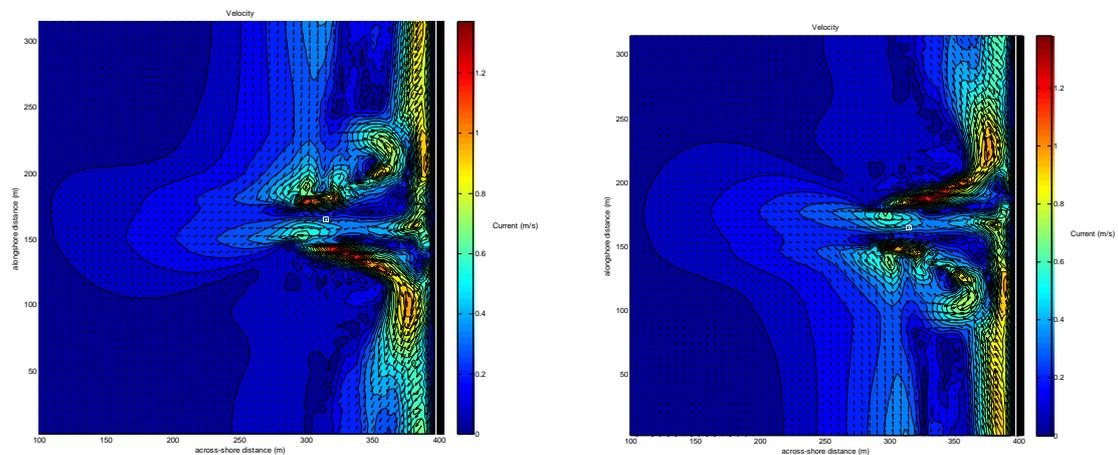
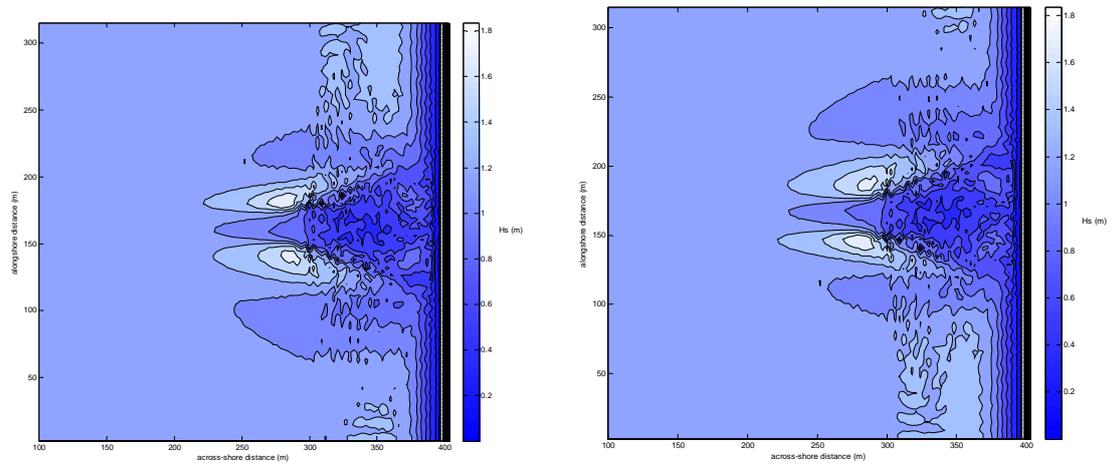
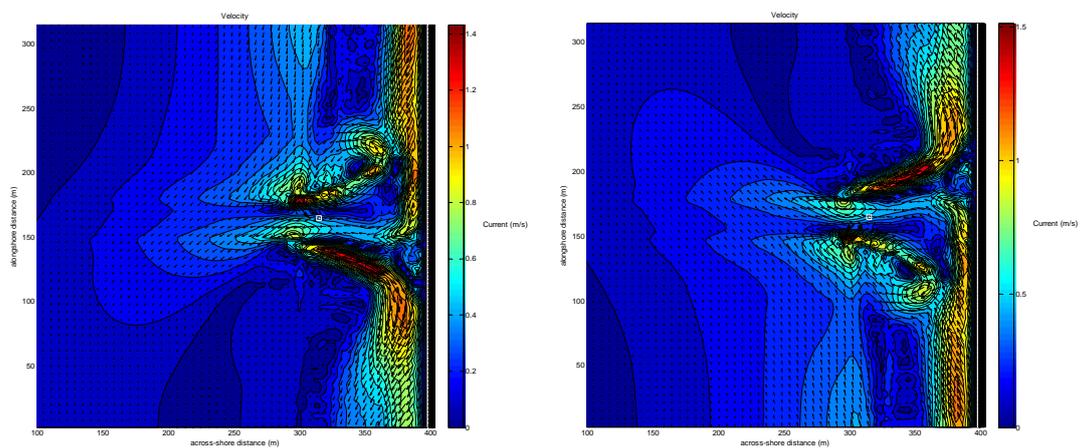


Figura 14. Campos de velocidades de las corrientes generadas, oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$, escenario 3.

Escenario 4 $H_s=1,3$ m. $T=7,1$ s.**Figura 15. Distribuciones de alturas de ola con oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$ la ortogonal, escenario 4.****Figura 16. Campos de velocidades de las corrientes generadas, oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$, escenario 4.**

APÉNDICE 5.3

DISTRIBUCIONES DE ALTURA DE OLA Y CAMPO DE VELOCIDADES DE LAS CORRIENTES PARA LAS “LOCALIZACIÓN REAL, MALGRAT DE MAR”

Se muestran las figuras correspondientes a los diferentes escenarios obtenidos para la localización real de Malgrat de Mar (caso playa abierta).

El apéndice se divide en dos apartados, repitiendo la misma estructura que apéndices anteriores, en incidencia perpendicular e incidencia oblicua del oleaje. Primero, se recogen las distribuciones de alturas de ola y despues el campo de velocidades de las corrientes producidas para cada escenario.

INCIDENCIA PERPENDICULAR

Escenario 1 Hs=0,65 m. T= 5,9 s.

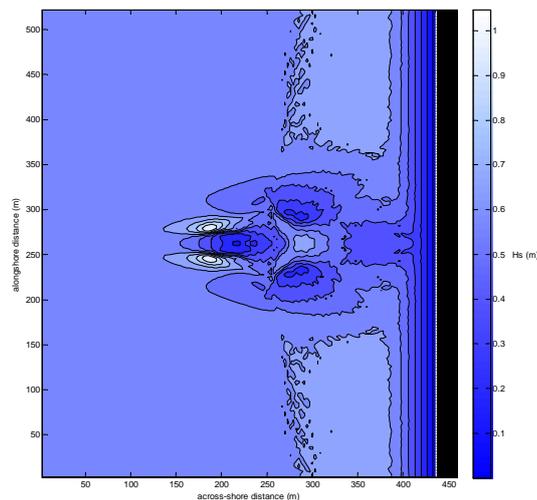


Figura 1. Distribución de alturas de ola con oleaje perpendicular a la estructura, escenario 1.

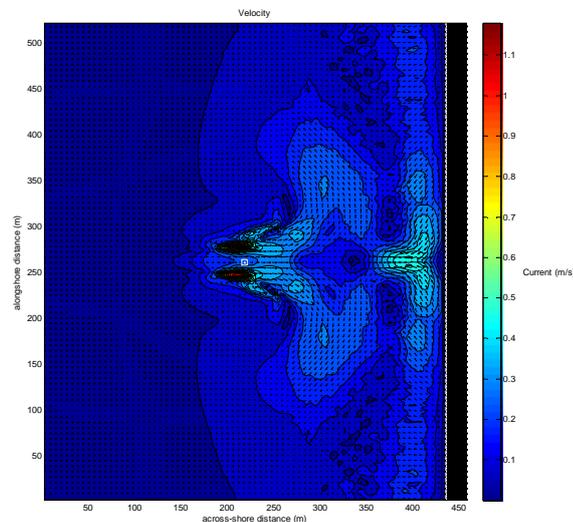


Figura 2. Campo de velocidades de las corrientes generadas, oleaje perpendicular, escenario 1.

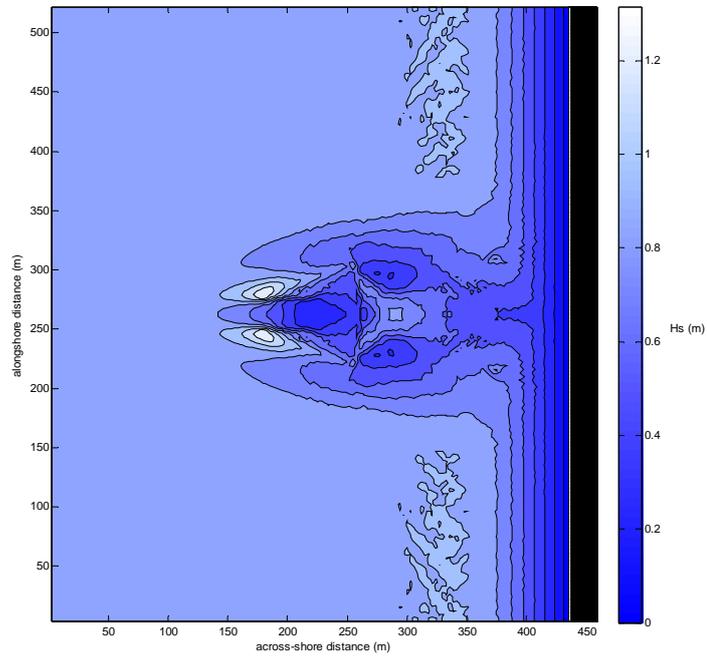
Escenario 2 $H_s=0,90$ m. $T=6,4$ s.

Figura 3. Distribución de alturas de ola con oleaje perpendicular a la estructura, escenario 2.

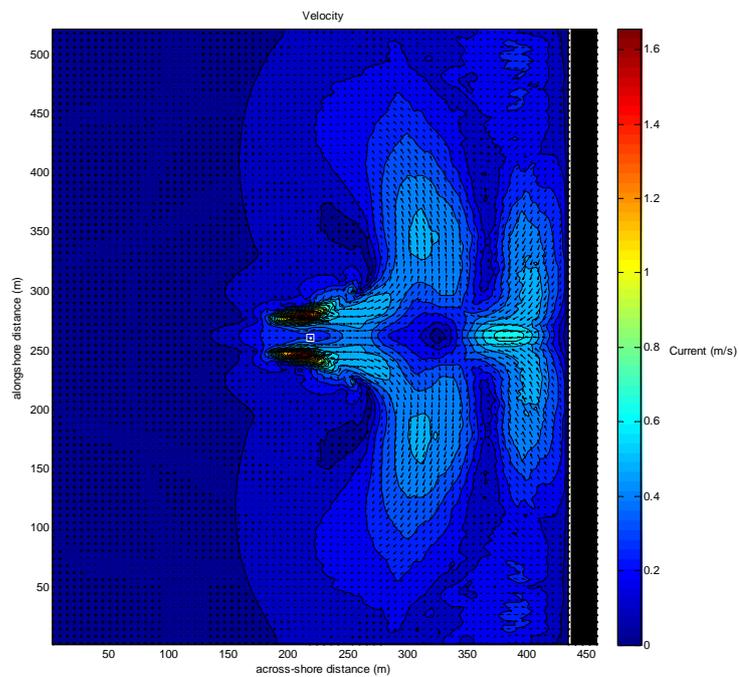


Figura 4. Campo de velocidades de las corrientes generadas, oleaje perpendicular, escenario 2.

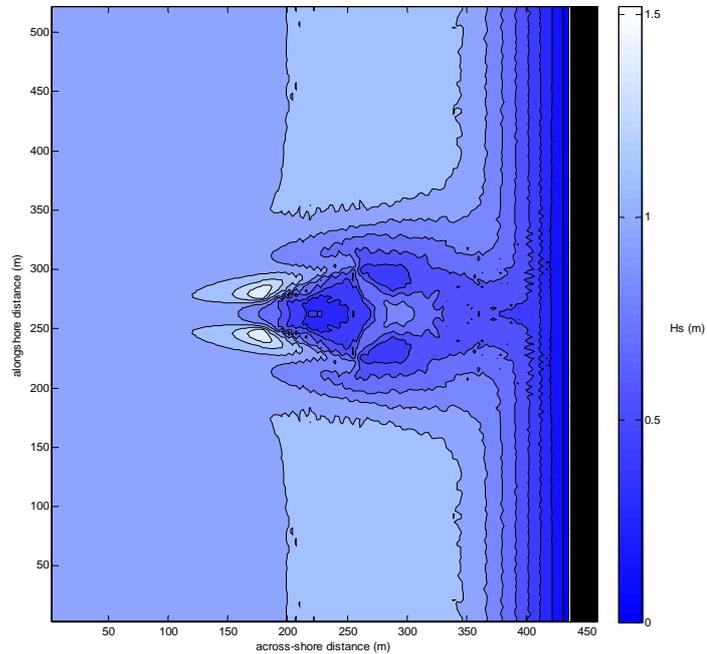
Escenario 3 $H_s=1,10$ m. $T=6,7$ s.

Figura 5. Distribución de alturas de ola con oleaje perpendicular a la estructura, escenario 3.

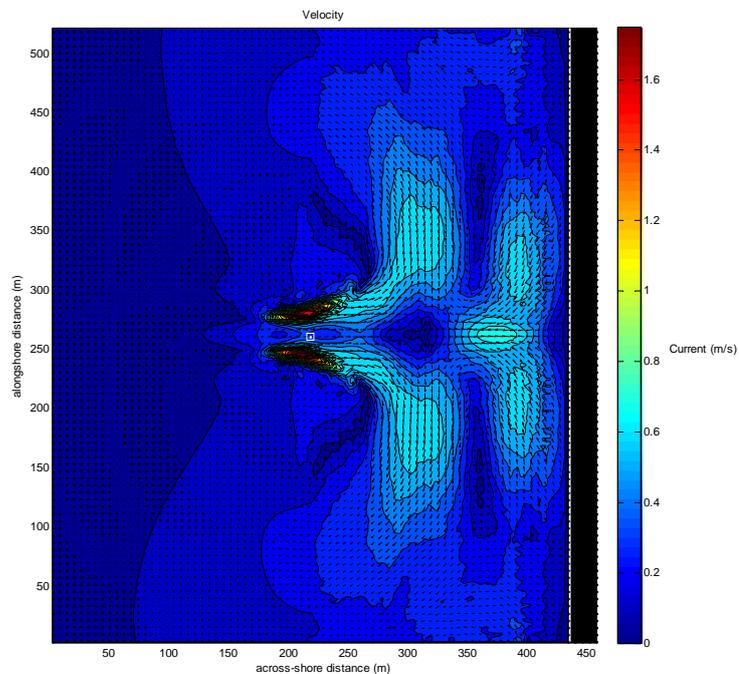


Figura 6. Campo de velocidades de las corrientes generadas, oleaje perpendicular, escenario 3.

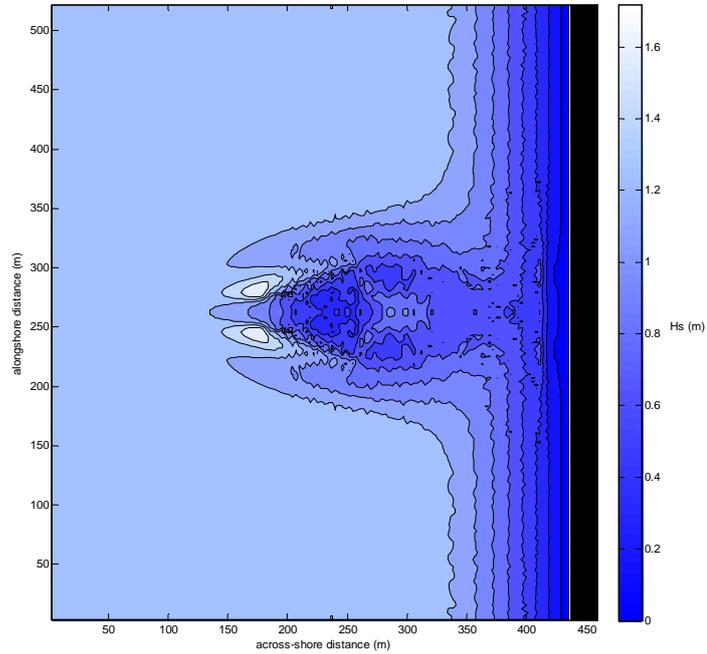
Escenario 4 $H_s=1,30$ m. $T=7,1$ s.

Figura 7. Distribución de alturas de ola con oleaje perpendicular a la estructura, escenario 4.

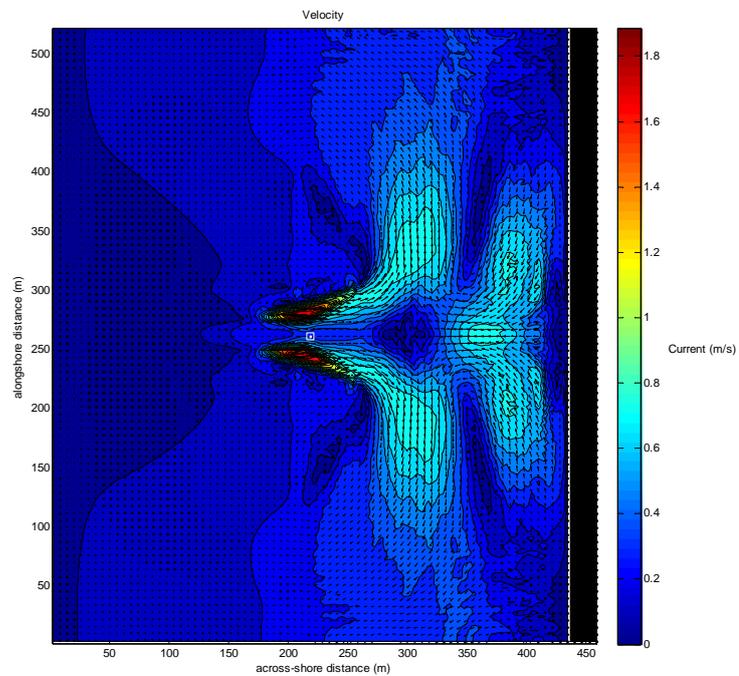


Figura 8. Campo de velocidades de las corrientes generadas, oleaje perpendicular, escenario 4.

INCIDENCIA OBLICUA

Escenario 1 Hs=0,65 m. T=5,9 s.

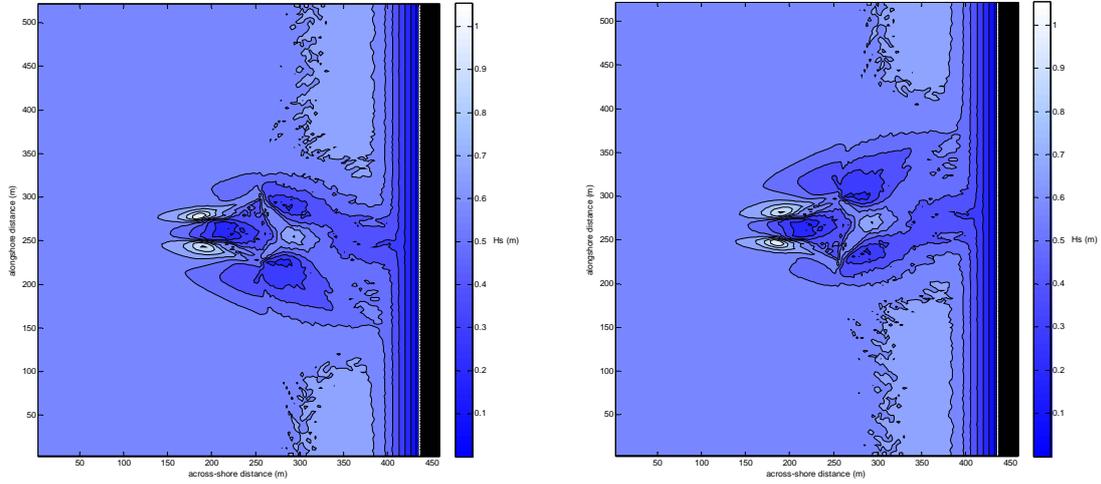


Figura 9. Distribuciones de alturas de ola con oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$ la ortogonal, escenario 1.

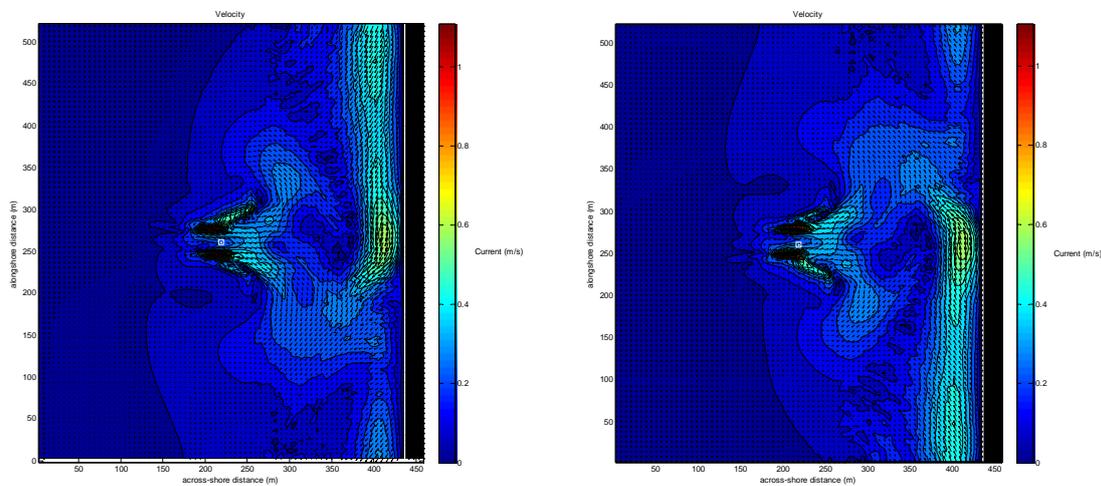
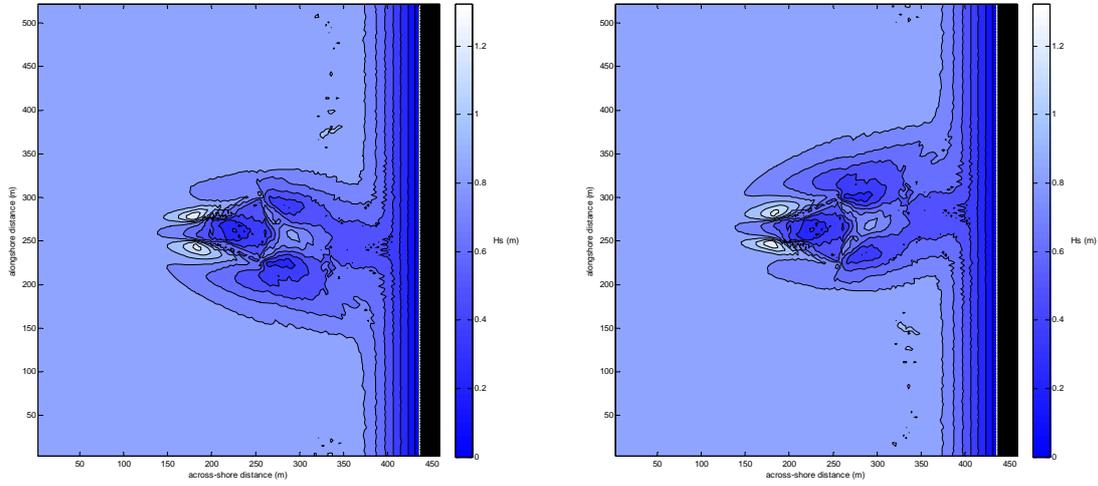
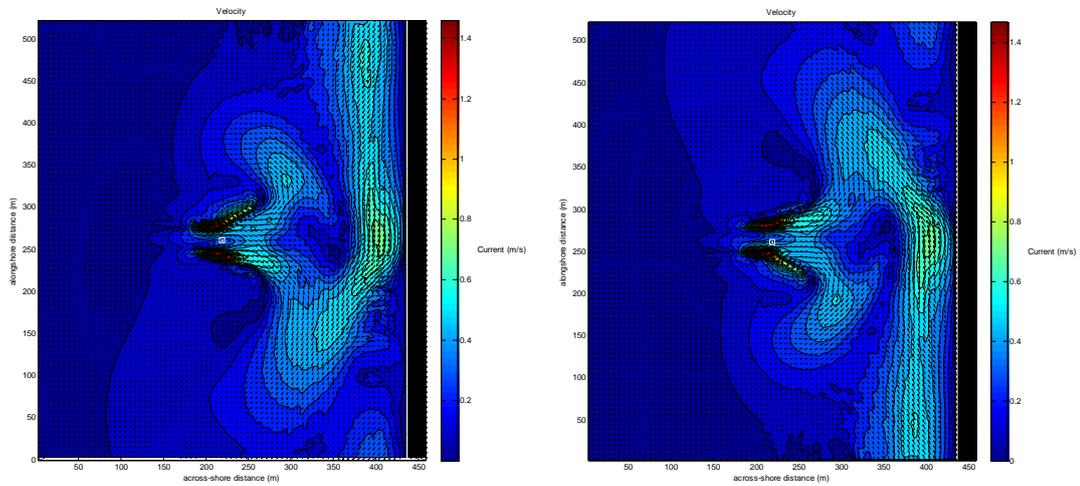
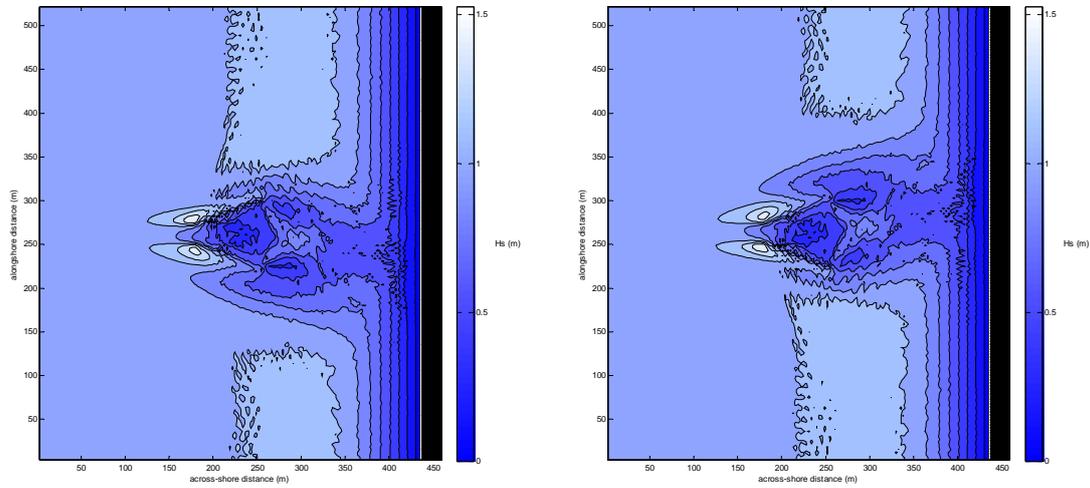
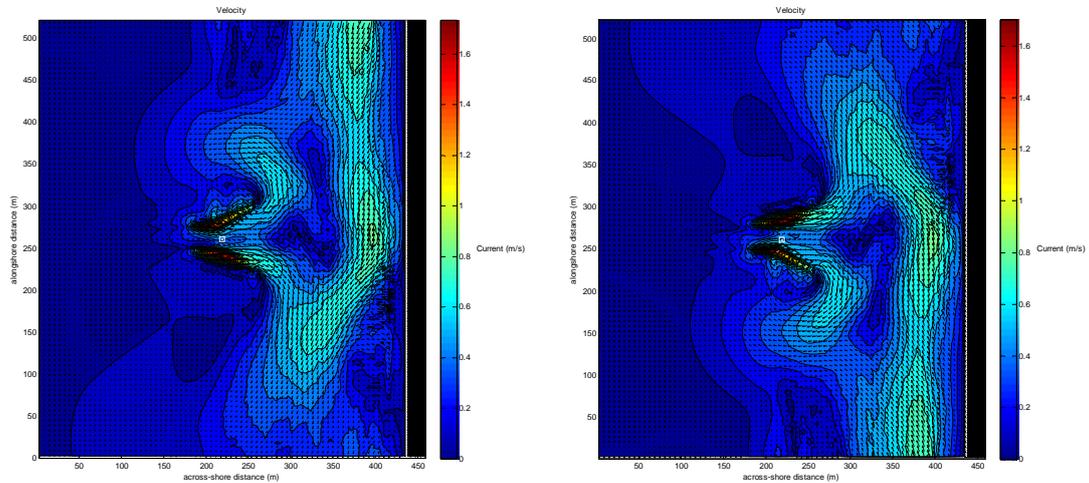


Figura 10. Campos de velocidades de las corrientes generadas, oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$, escenario 1.

Escenario 2 $H_s=0,90$ m. $T=6,4$ s.**Figura 11. Distribuciones de alturas de ola con oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$ la ortogonal, escenario 2.****Figura 12. Campos de velocidades de las corrientes generadas, oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$, escenario 2.**

Escenario 3 $H_s=1,10$ m. $T=6,7$ s.Figura 13. Distribuciones de alturas de ola con oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$ la ortogonal, escenario 3.Figura 14. Campos de velocidades de las corrientes generadas, oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$, escenario 3.

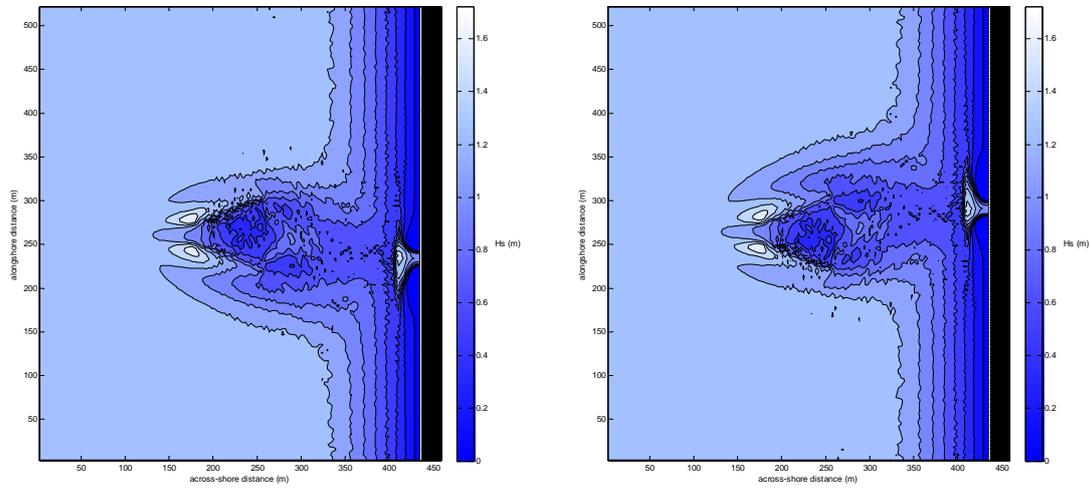
Escenario 4 $H_s=1,3$ m. $T=7,1$ s.

Figura 15. Distribuciones de alturas de ola con oleaje oblicuo $\pm 20^\circ$ la ortogonal, escenario 4.

La figura del campo de velocidades de este cuarto escenario en Malgrat de Mar no se ha podido graficar. La presencia de una zona de alturas de ola importantes que puede ser observada en la figura 15, involucra unas corrientes importantes debidas al gradiente de altura de ola.

APÉNDICE 5.4

ANÁLISIS REALIZADO PARA LA “LOCALIZACIÓN TIPO”

A continuación se muestran las figuras correspondientes a los análisis efectuados.

INCIDENCIA PERPENDICULAR

Escenario 1 $H_s=0,65$ m. $T=5,9$ s.

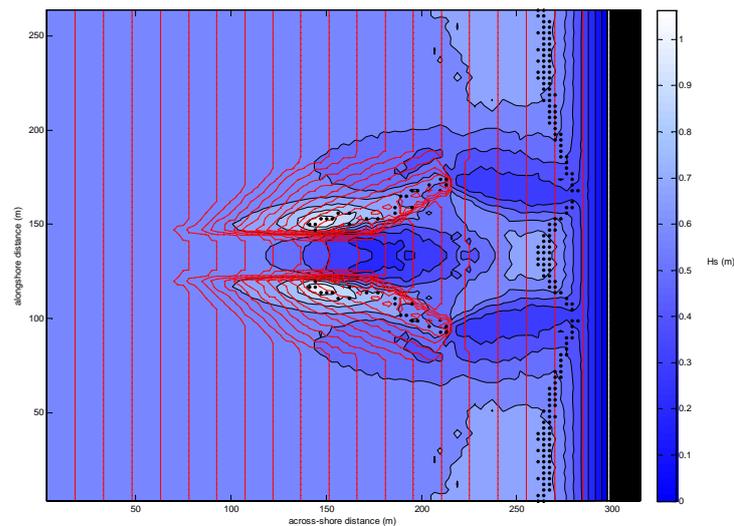


Figura 1. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 1.

Escenario 2 $H_s=0,90$ m. $T=6,4$ s.

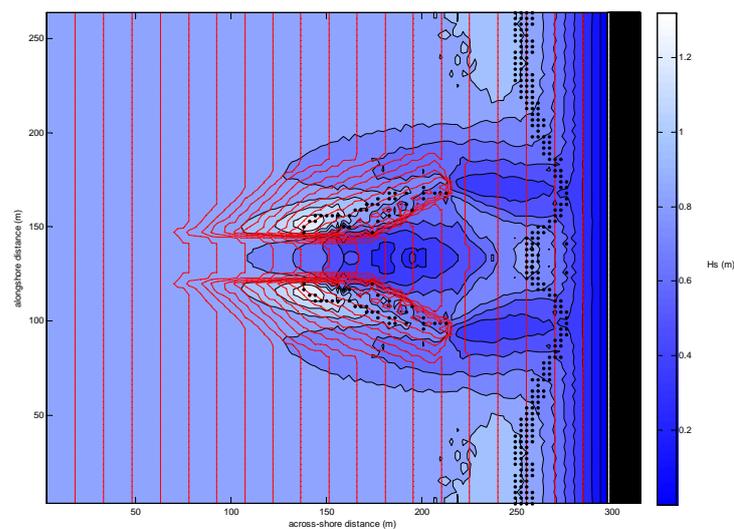


Figura 2. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 2.

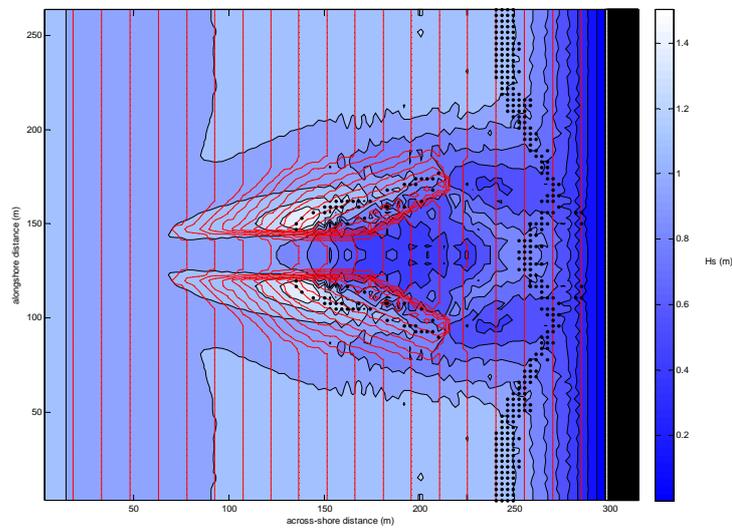
Escenario 3 $H_s=1,10$ m. $T=6,7$ s.

Figura 3. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 3.

Escenario 4 $H_s=1,30$ m. $T=7,1$ s.

La figura correspondiente al escenario 4 con oleaje perpendicular no se ha podido graficar.

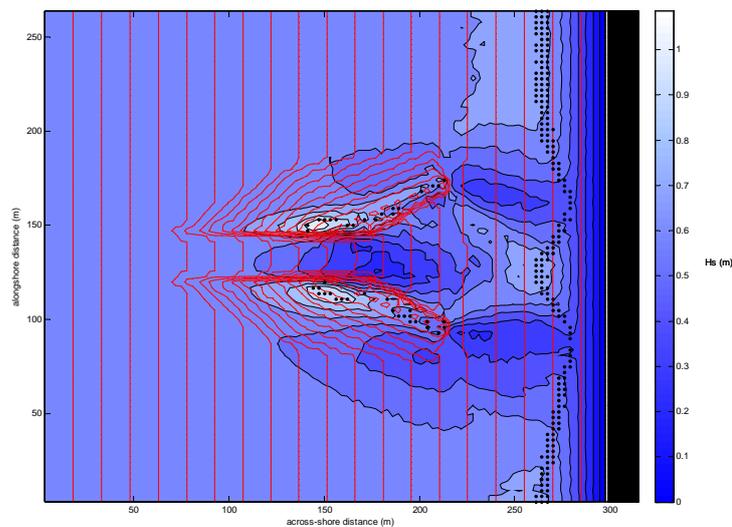
INCIDENCIA OBLICUA**Escenario 1 $H_s=0,65$ m. $T=5,9$ s.**

Figura 4. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 1.

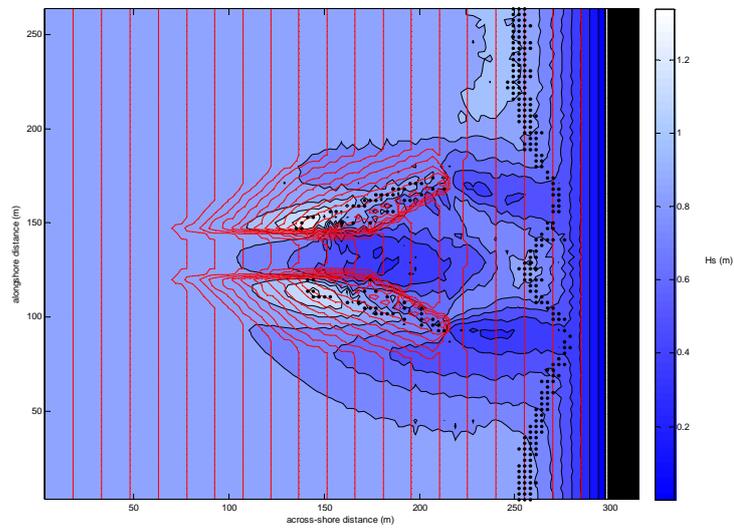
Escenario 2 $H_s=0,90$ m. $T=6,4$ s.

Figura 5. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 2.

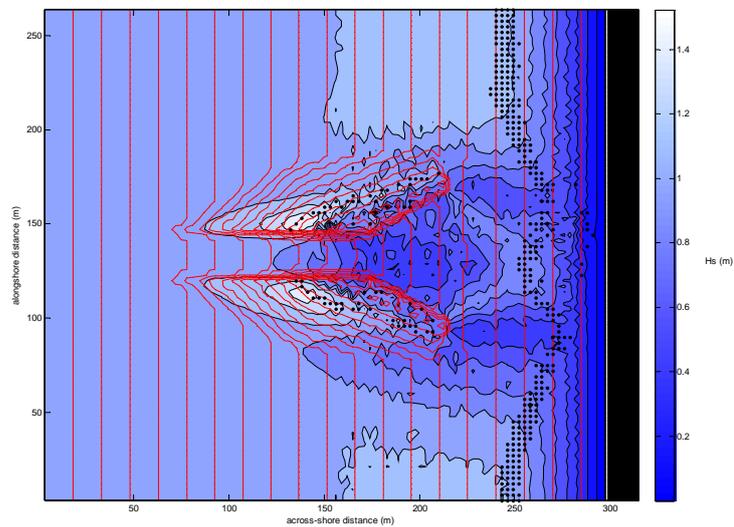
Escenario 3 $H_s=1,10$ m. $T=6,7$ s.

Figura 6. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 3.

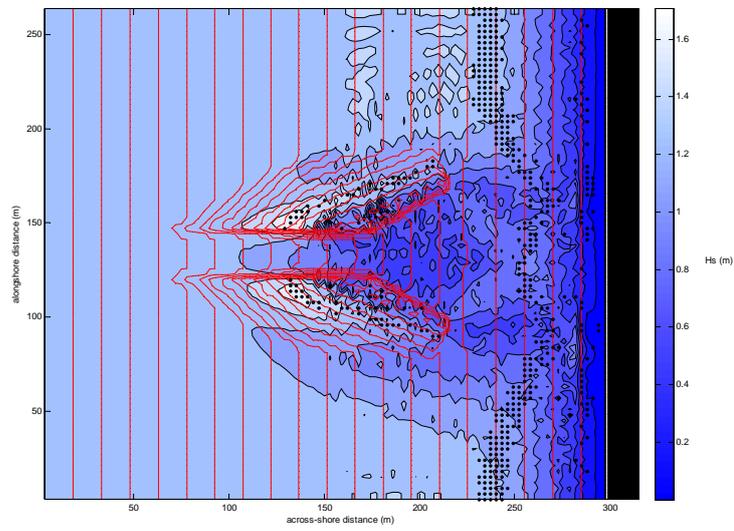
Escenario 4 $H_s=1,3$ m. $T=7,1$ s.

Figura 7. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 4.

APÉNDICE 5.5

ANÁLISIS REALIZADO PARA LA “LOCALIZACIÓN REAL, TOSSA DE MAR”

A continuación se muestran las figuras correspondientes a los análisis efectuados.

INCIDENCIA PERPENDICULAR

Escenario 1 $H_s=0,65$ m. $T=5,9$ s.

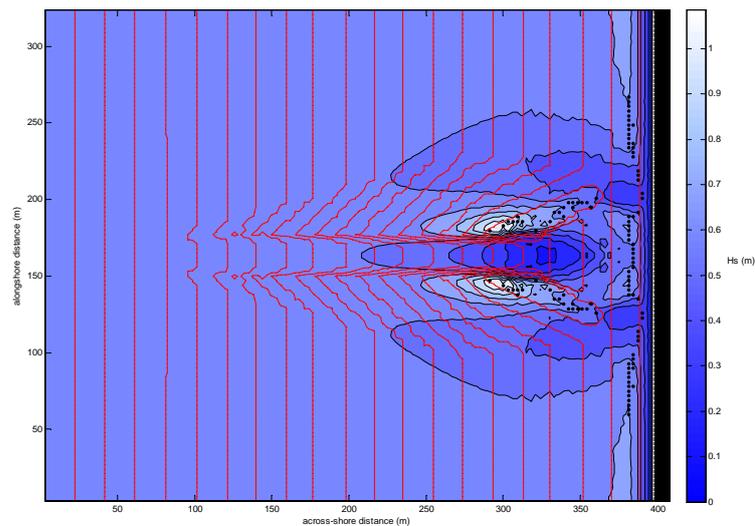


Figura 1. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 1.

Escenario 2 $H_s=0,90$ m. $T=6,4$ s.

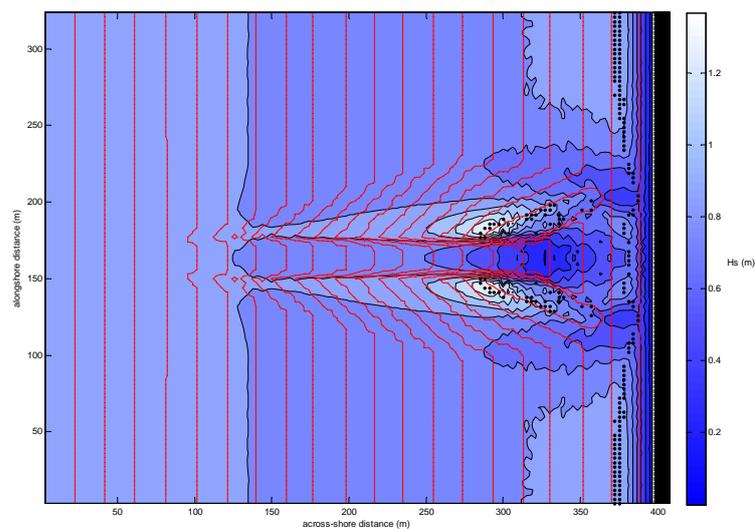


Figura 2. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 2.

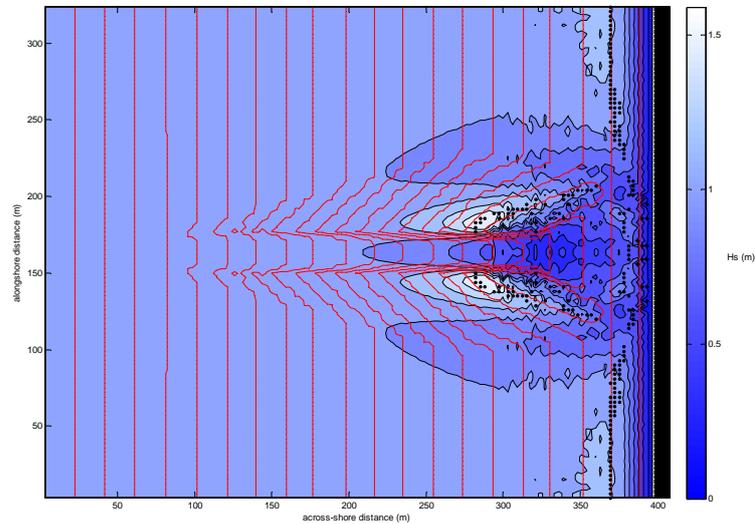
Escenario 3 $H_s=1,10$ m. $T=6,7$ s.

Figura 3. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 3.

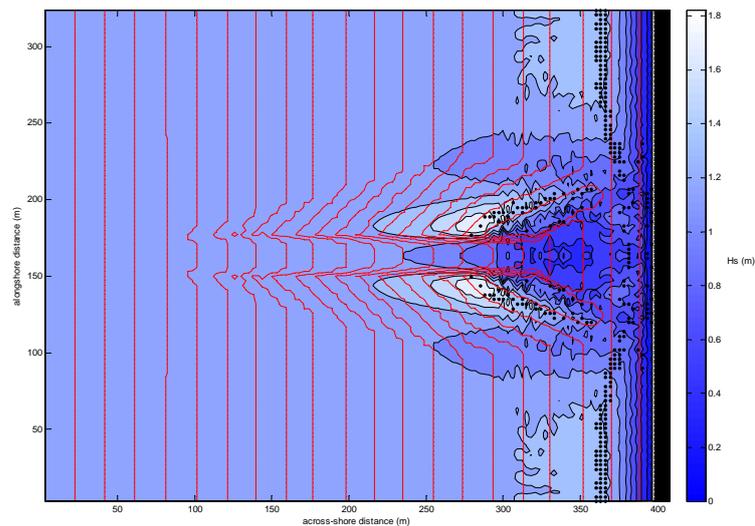
Escenario 4 $H_s=1,30$ m. $T=7,1$ s.

Figura 4. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 4.

INCIDENCIA OBLICUA

Escenario 1 Hs=0,65 m. T=5,9 s.

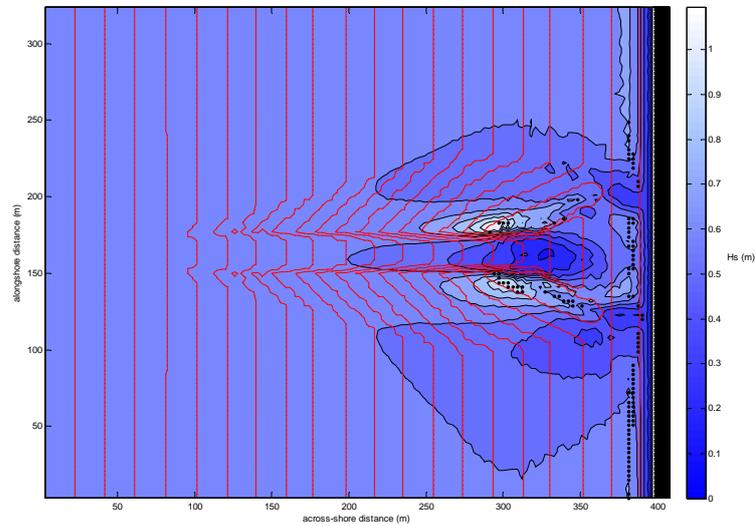


Figura 5. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 1.

Escenario 2 Hs=0,90 m. T=6,4 s.

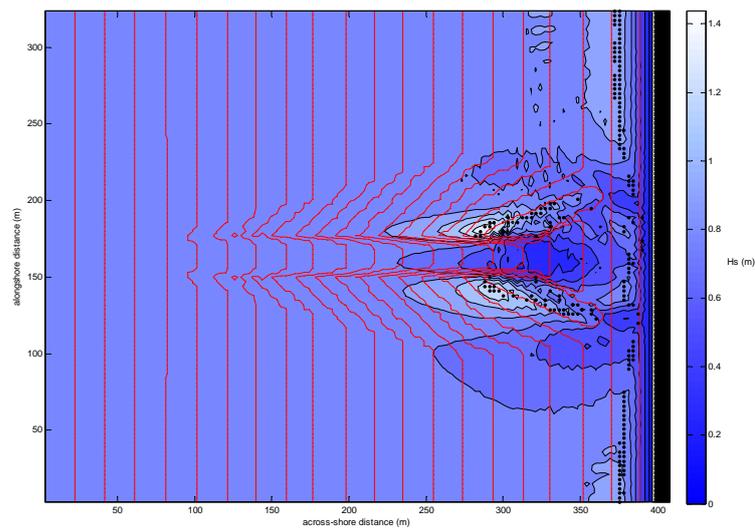


Figura 6. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 2.

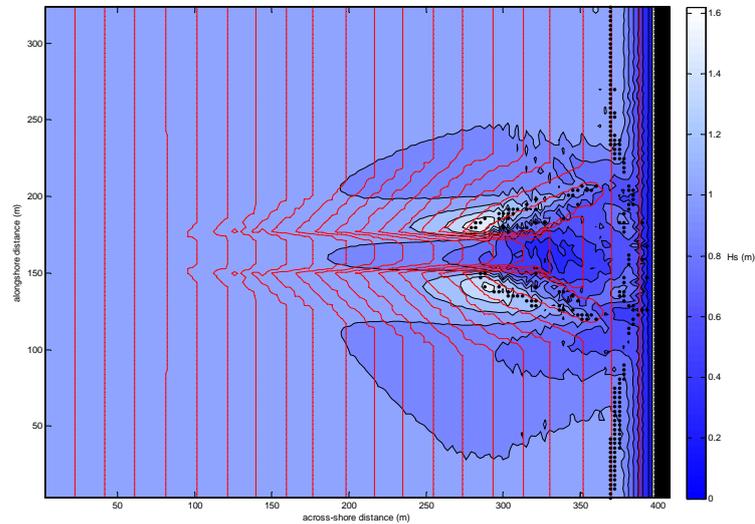
Escenario 3 $H_s=1,10$ m. $T=6,7$ s.

Figura 7. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 3.

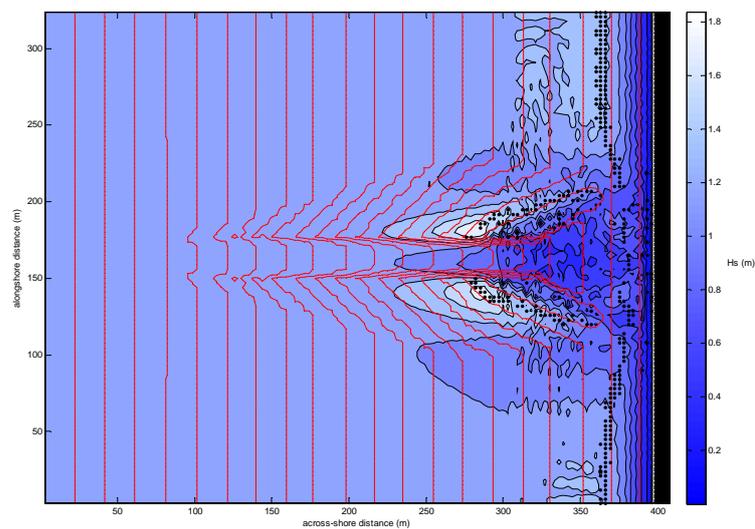
Escenario 4 $H_s=1,3$ m. $T=7,1$ s.

Figura 8. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 4.

APÉNDICE 5.6

ANÁLISIS REALIZADO PARA LA “LOCALIZACIÓN REAL, MALGRAT DE MAR”

A continuación se muestran las figuras correspondientes a los análisis efectuados.

INCIDENCIA PERPENDICULAR

Escenario 1 Hs=0,65 m. T=5,9 s.

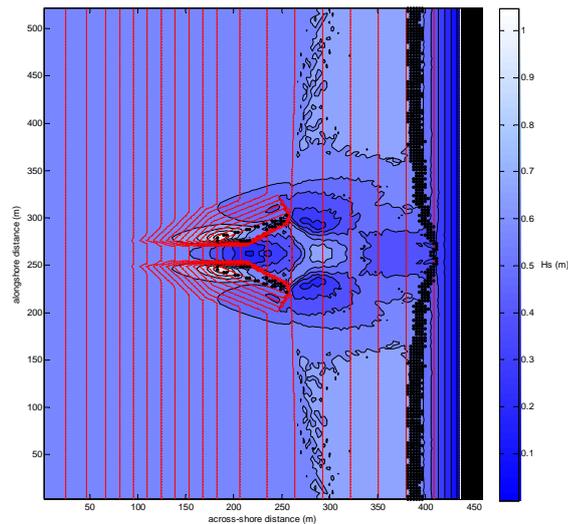


Figura 1. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 1.

Escenario 2 Hs=0,90 m. T=6,4 s.

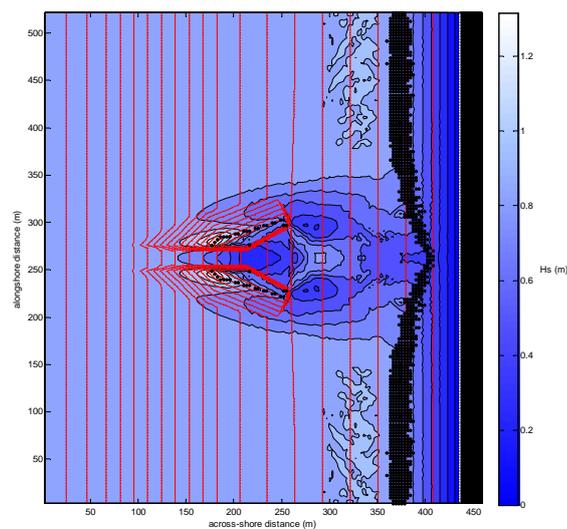


Figura 2. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 2.

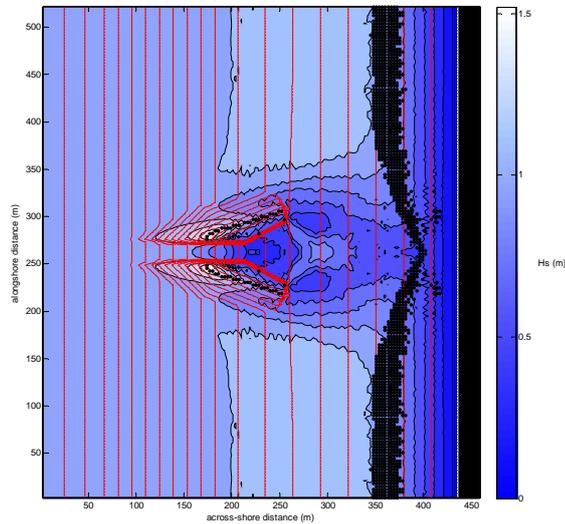
Escenario 3 $H_s=1,10$ m. $T=6,7$ s.

Figura 3. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 3.

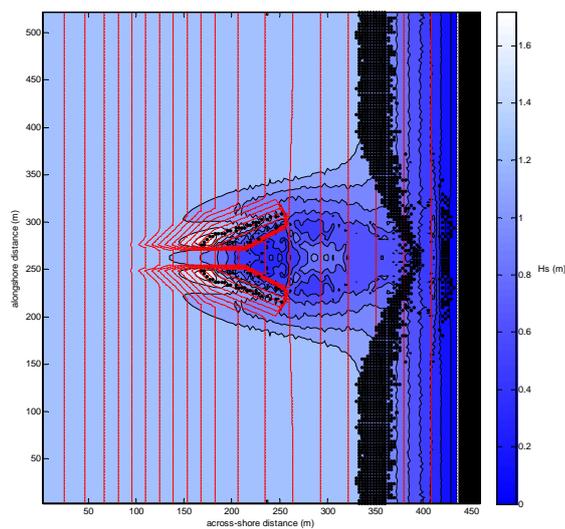
Escenario 4 $H_s=1,30$ m. $T=7,1$ s.

Figura 4. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 4.

INCIDENCIA OBLICUA

Escenario 1 Hs=0,65 m. T=5,9 s.

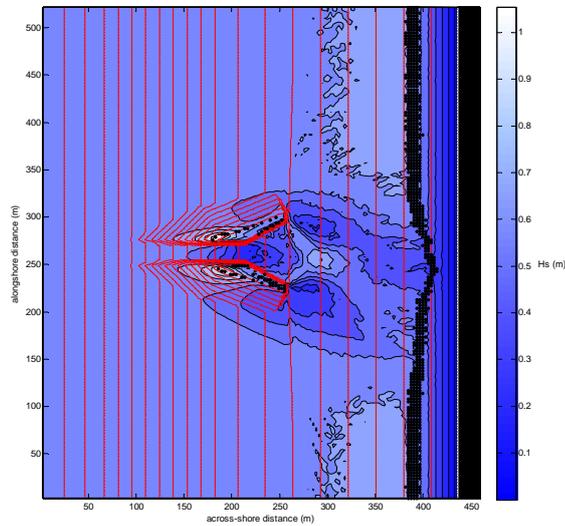


Figura 5. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 1.

Escenario 2 Hs=0,90 m. T=6,4 s.

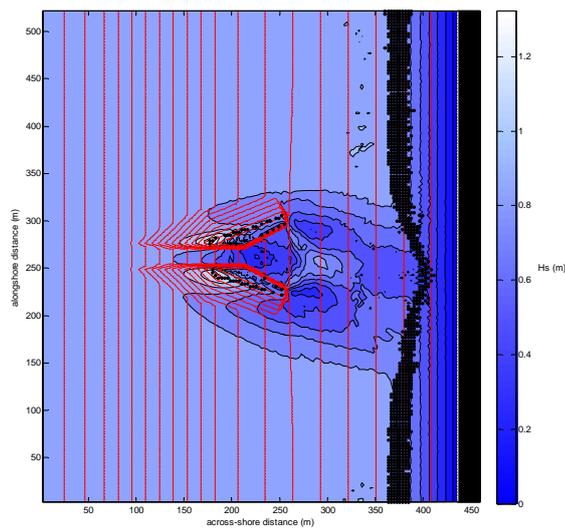


Figura 6. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 2.

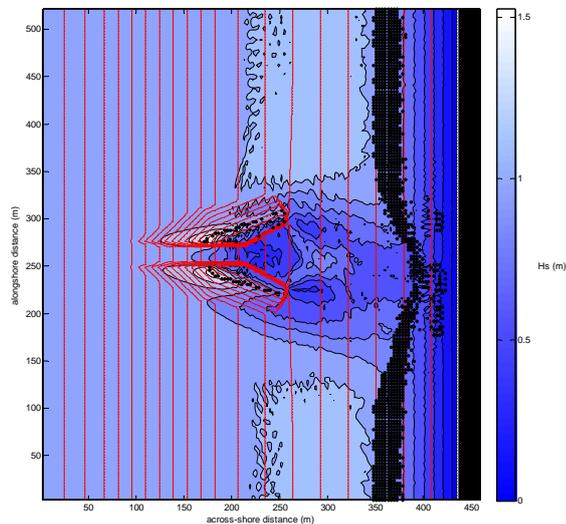
Escenario 3 Hs=1,10 m. T=6,7 s.

Figura 7. Batimetría (líneas rojas), puntos de rotura (puntos negros) y distribución de alturas sobre la estructura con oleaje perpendicular, escenario 3.

Escenario 4 Hs=1,3 m. T=7,1 s.

La figura correspondiente al escenario 4 para un oleaje oblicuo no se ha podido graficar.

CAPÍTULO 6

RESUMEN Y CONCLUSIONES

El cuerpo de la Tesina recoge diferentes conceptos y parámetros que ayudan a comprender las experiencias desarrolladas previamente por otros autores. Las teorías introducidas han sido consideradas y aplicadas a la costa catalana, con el objetivo de evaluar la viabilidad de una estructura sumergida que mejore las condiciones de surf existentes actualmente.

La práctica del surf requiere unas condiciones de oleaje particulares. En resumen, los parámetros determinantes de la calidad de ola son el tipo de rotura, el ángulo de descrestamiento y la altura de ola.

Se ha realizado un ajuste al clima medio de peraltes mediante la función de probabilidad de Gumbel. Se considera de relevancia esta parte del estudio, dado que puede utilizarse en futuros trabajos que requieran establecer condiciones de peralte en aguas someras; más concretamente, entorno a profundidades de 3 y 5 metros. En el clima medio de peraltes se ha observado que el peralte en el litoral catalán se sitúa dentro del rango 0,001 - 0,035. El capítulo 4 recoge los parámetros de ajuste encontrados.

Se ha planteado un diseño de estructura propio con el que realizar el análisis, teniendo en cuenta el oleaje local y los requisitos citados en los capítulos 2 y 3.

La simulación numérica de tal estructura muestra el comportamiento “teórico”. De la interpretación de los resultados se extrae que el arrecife mejora las condiciones de surf. En las localizaciones elegidas se producen roturas óptimas pudiendo alcanzar los 90 metros de longitud de recorrido. El diseño propuesto provoca roturas tipo plunging sin excepción, con un I_r mayor a 0,5 para todos los casos.

La estructura proyectada dispone de un canal de retorno que cambia el sistema de corrientes y minimiza las corrientes que fluyen sobre el arrecife. Además la corriente registrada en este canal favorece el regreso a la zona de cogida, minimizando el esfuerzo y aumentando la seguridad del surfista.

Tras evaluar la velocidad de corte se determina que las corrientes generadas por la rotura del oleaje pueden afectar negativamente a la erosión de la playa. Es posible que se presente un problema cuando el emplazamiento de la construcción no sea el idóneo.

Se recomienda separar la estructura de la costa para evitar los cambios en el perfil de la playa. Los casos simulados demuestran que al alejar el arrecife las velocidades de las corrientes a pie de playa disminuyen, reduciendo así el transporte de sedimento y la erosión. En cambio, si la estructura es colocada demasiado cerca se provoca el efecto contrario (erosión).

Para las simulaciones realizadas, las velocidades máximas de las corrientes en la costa se sitúan por encima del umbral a partir del cual empieza el transporte de sedimento. La posible erosión que pueda causar una estructura tipo arrecife artificial

en primera línea de costa podría ser minimizada a través de medidas correctoras complementarias.

Los resultados obtenidos en los distintos casos son representativos de condiciones de oleaje que se presentan con una ocurrencia superior al 50% en el litoral catalán. En todos ellos la estructura proyectada favorece la práctica del surf, mejorando significativamente las condiciones de uso. Sin embargo, cabe mencionar que para la realización de un proyecto como el tratado es necesario valorar todas las características locales que intervengan en los procesos de formación, propagación y rotura del oleaje.

CAPÍTULO 7

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREWS, C.J., 1997, Sandy shoreline response to submerged and emerged breakwaters, reefs or islands. Thesis, University of Waikato, New Zealand.
- BANCROFT, S., 1999. Performance monitoring of the Cable Stations artificial surfing reef. Department of Environmental Engineering, University of Western Australia. Honor's thesis.
- BATTJES, J.A., 1974. Surf Similarity. Proceedings 14th Coastal Engineering Conference. ASCE, 466-480.
- BATTJES, J. A., 1988. Surf-zone dynamics. Annu. Rev. Fluid Mech., 20, pp 257-293.
- BEACON, Beach Erosion Authority for Clean Oceans and Nourishment, 2007. Army Corps Section 227 Project, Oil Piers Reef.
- BLACK, K.P. and C. E. BLENKINSOPP, 2002. Design and Approvals for an Artificial Reef for Protection of Noosa Main Beach: Engineering Aspects. ASR Consultancy report for Noosa Council and International Coastal Management.
- BLACK, K. P. and M. A. ROSENBERG. 1992. Semi-empirical treatment of wave transformation outside and inside the breaker line. Coastal Engineering 16:313–345.
- BLACK, K. P., MEAD, S.T. McCOMB, P. and HEALY, T.R., 1999. Numerical modeling to incorporate recreational amenity in coastal structures on sandy and rocky coasts. Coastal Structures '99 Conference (Spain), 6 June 1999.
- BLACK, K. P., MEAD, S.T. and JACKSON, A.J., 2000. Beach amenity options and coastal protection at Bournemouth. For Leisure & Tourism Services, Bournemouth Borough Council, by ASR Ltd. May 2000. 116p.
- BLACK, K. P., y MEAD, S.T., 2001. Wave rotation for Coastal Protection. Proceedings Coasts & Ports, 2001, Gold Coast, Australia.
- BLACK, K. P., y MEAD, S.T., 2003. An Assessment of Coastal Protection Options to Reduce Erosion on Exposed Coasts. ASR, Marine and Freshwater Consultants, New Zealand.
- BLACK, K. P. and S. T. MEAD. 2007. Sand bank responses to a multi-purpose reef on an exposed sandy coast. Shore and Beach 75/4:55–66.
- BORRERO, J.C. y NELSON, C. 2003. Results of a Comprehensive Monitoring Program at Prattes Reef.

- BRUUN, P., 1954. Coast Erosion and the Development of Beach Profiles. Beach Erosion Board, Tech. Memo. no. 44.
- BUTTON, M., 1991. Laboratory Study of Artificial Surfing Reefs. Unpublished Bachelor of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Western Australia, 1991.
- CÁCERES, I. 2004. Q-3D. Near-shore circulation, development and utilities. Ph. D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, Spain.
- CÁCERES, I., TRUNG, L.H., VAN ETTINGER, H.D., RENIERS, A. y UIJTTEWAAL, W., 2009. Wave and flow response to an Artificial Surf Reef. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- CEM , 2001. Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
- DALLY, W.R., 1989. Quantifying beach surfability. Proc. Beach Technology Conference (Tampa, Florida) February 1989.
- DALLY, W.R, 1990. Stochastic Modelling of Surfing Climate. Proceedings The 22nd Coastal Engineering Conference, ASCE, Vol.1: 516-529.
- DEAN, R.G., CHEN, R. and BROWDER, A.E. (1997). Full scale monitoring study of submerged breakwater, Palm Beach, Florida, USA. Coastal Engineering, Vol. 29, 291-315.
- GALLOWAY, G. S., M. B. COLLINS and A. D. MORAN, 1989. Onshore/Offshore Wind Influence on Breaking Waves: An Empirical Study. Coastal Engineering, 13: 305-323.
- GALVIN, C.J. 1968. Breaker Type Classification on Three Laboratory Beaches. Journal of Geophysical Research, 73(12), 3651-3659.
- GÓMEZ PINA, GREGORIO, GALO DIEZ y JOSÉ LÚIS RAMÍREZ (1993). Proyecto de regeneración de la playa de la Zurriola (San Sebastián); Dirección General de Costas, Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- HENRIQUEZ, M., 2004. Artificial Surf Reefs. MSc. Thesis, Civil Engineering and GeoSciences, Delft University of Technology.
- HURST, P., 1996. Surfability Modelling of the Perth Metropolitan Coast. Honours Dissertation, Department of Civil Engineering, University of WA, 94 pp.
- HUTT, J. A., 1997. Bathymetry and Wave Parameters Defining the Surfing Quality of Five Adjacent Reefs. Thesis, University of Waikato, New Zealand. (<http://www.asrltd.co.nz>).
- HUTT, J. A., BLACK, K. P. y MEAD, S. T., 2001. Classification of surf breaks in relation to surfing skill. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 29, pp.66-81.
- IRIBARREN, R., 1947. Corrientes y transportes de arena originados por el oleaje, en R.O.P. pp. 195-206 y 243-250.

- IRIBARREN, C. R y NOGALES, C., 1949. Protection des Ports II. Comm.4, 17th International Navigation Congress. Lisbon.
- JACKSON, L.A. and B.B. CORBETT, 2007. Review of Existing Multi-Functional Artificial Reefs. 18th Australasian Conf. Coastal and Ocean Eng.
- JACKSON, L. A., TOMLISON, R. , COBETT, B. , D'AGATA, M. y MCGRATH, J., 2005. Narrowneck artificial reef results of 4 years of monitoring and modifications. Proceedings of the 4th International Surfing Reef Symposium 12-14 January 2005 Manhattan Beach, California, USA.
- KIRBY, J. T., DALRYMPLE, R. A., & MARTIN, P. A. (1994). Spectral methods for forward-propagating water waves in conformally mapped channels. Appl. Ocean Res., 16, pp 249–266.
- KIRBY, J. T. , OZKAN, H.T. , 1994, REF/DIF S Version 1.1 Documentation and User's Manual. Report No. 94-04, Center for Applied Coastal Research, Dept of Civil Engineering University of Delaware, Newark, 128p.
- KOMAR, D. P., 1976. Beach Processes and Sedimentation. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, Nueva Jersey, 430 p.
- LEMME AJ. HEGGE BJ. MASSELINK G. 1999. Offshore Wave Climate, Perth (Western Australia) 1994 - 96. CSIRO Marine and Freshwater Research Vol. 50, 2.
- LYONS, M., 1992. Design of an Artificial Surfing Reef. Bachelor of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Western Australia, 1992. Pp. 73.
- MACKY, G. H., G. J. LATIMER and R. K. SMITH, 1995. Wave Climate of the Western Bay of Plenty, New Zealand, 1991-93. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 29: 311-327.
- MEAD, S.T., BLACK, K.P., GREEN, M., HUME, T.M., HUTT, J.A. and SAYCE, A., 1997. High seabed gradients and low peel angles produce world-class surfing breaks. New Zealand Marine Science Society Annual Conference. University of Auckland, 8-11 July, 1997.
- MEAD, S.T., 2001. Incorporating high-quality surfing breaks into multi-purpose reefs. Hamilton, New Zealand: Department of Earth Science, University of Waikato, Ph.D. Thesis.
- MEAD, S.T. y BLACK, K.P., 2001b. Functional component combinations controlling surfing quality at world-class surfing breaks. In: BLACK, K.P. (ed), Natural and Artificial Reefs for surfing and Coastal Protection. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 29, pp. 21-32.
- MEAD, S. T., K. P. BLACK, B. E. SCARFE, and J. FRAZERHURST. 2003. The effect of wave focusing on surfing site selection and design at scales of Intercontinental shelf to sub-tidal reef. In Black, K. P. and S. T. Mead. (eds.). Artificial Surfing Reefs 2003: The 3rd International Conference. Raglan, New Zealand CD Publication. pp. 115–137.

- MOFFAT & NICHOL. 1981. Low-Cost Shore Protection: Final Report on Shoreline Erosion Control Demonstration Program (Section 54), US Army Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, VA.
- MOFFATT & NICHOL ENGINEERS, 1989. The Patagonia surfing reef feasibility study – Report prepared for The Surfrider Foundation, Huntington Beach, California by Moffatt & Nichol Engineers, Long Beach, California, September, 1989. Report No. 2521.
- MOORES, A.E., 2001. Using video images to quantify wave sections and surfer parameters. Thesis. Department of Earth Science, The University of Waikato. New Zealand.
- NELSON, C.E. 1996. A Coastal Management Case Study in El Segundo California. M.Phil. thesis, Nicholas School of the Environment of Duke University.
- PATRICK, D. A. & R.L. WIEGEL, 1955. Amphibian tractors in the surf; Proceedings of First Conference on Ships and Waves. The Engineering Foundation Council on Waves Research y American Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- PATTIARATCHI, C., 2003. Performance of an Artificial Surfing Reef: Cables Station, Western Australia. COPEDEC
- PEREGRINE, D. H., 1983. Breaking Waves on Beaches. Ann. Rev. Fluid Mech., 15:149-178.
- RAICHLIN, F. & J.L. HAMMACK, JR., 1976. Run-up Due to Breaking and Non-breaking Waves. In Proc. 14th Coastal Engrg. Conf., June 24-29, 1974, Copenhagen, Denmark, ed. J.W. Johnson, ASCE, Vol. III, pp 1937-1955.
- SAYCE, A., 1997. Transformation of surfing waves on steep and complex reefs. Hamilton, New Zealand: Department of Earth Science, The University of Waikato. Master's thesis.
- SCARFE, B.E., 2002. Categorising surfing manoeuvres using waves and reef characteristics; Department of Earth and Science, University of Waikato (Master Thesis).
- SCARFE, B.E., de LANGE, W.P., BLACK, K.P. & MEAD, S.T., 2002. The influence of surfing wave parameters on manoeuvre type from field investigations at Raglan, New Zealand. Proceedings for the Second Surfing Arts, Science and Issues Conference (SASIC 2, Ventura, California, USA). 9 November. The Groundswell Society, pp. 74-89.
- SCARFE, B.E., ELWANY, M.H.S, BLACK, K. P. & MEAD, S. T., 2003. Surfing conditions around jetties. Technical Report. Integrative Oceanography Division Escholarship Repository, 2003. Center for Coastal Studies SIO. University of California. USA.
- SILVESTER, R., 1975. Synthetic Surfing Sites. University of Western Australia, Nedlands, Western Australia.

- SILVESTER, R. & HSU, J. R. C., 1990. Accretion behind single offshore breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 116:3362–380.
- VAN ETTINGER, H. D., 2005. Artificial surf reef design, Dutch swell conditions. Master of Science at the research group of Hydraulic Engineering in the field of Civil Engineering at Delft University of Technology.
- WALKER, J.R. and PALMER, R.Q., 1971. The general surf site concept. LOOK Laboratory TR-18, University of Hawaii, Department of Ocean Engineering, Honolulu, Hawaii.
- WALKER, J.R.; PALMER, R.Q.; y KUKA, J.K., 1972. Recreational Surfing on Hawaiian Reefs. *Proceedings 13th Coastal Engineering Conference, 1972*. Vancouver, B. C., Canada.
- WALKER, J.R., 1974. Wave transformations Over a Sloping Bottom and Over a Three-Dimensional Shoal. PhD. Dissertation, University of Hawaii, 1974.
- WEIGHT, A., 2004. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Municipal Engineer* 157. June 2004 Issue ME2. Pages 87–95.

REFERENCIAS DE INTERNET

<http://www.asrltd.co.nz>

<http://www.coastalmanagement.com.au>

<http://www.lifeonperth.com>

<http://www.mma.es>

<http://www.multi-purposereef.com/>

<http://www.surfcare.co.uk/>

http://www.surflines.com/mag/features/artificial_reef/html/text.html

<http://www.surfrider.org>