UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DOCUMENTO Nº1. MEMORIA Y ANEJOS

ANEJO Nº7. CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS

Diseño y valoración económica de arrecife artificial en la playa Norte de Peñíscola (Castellón)

Grado de Ingeniería Civil, curso 2018/2019

Bárbara Herrero Rodríguez

ÍNDICE

1. CÁLCULO DE LOS MÓDULOS ARRECIFALES 1
1.1 ALTURA DE OLA PARA EL CÁLCULO DE LOS MÓDULOS ARRECIFALES 1
1.2 ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE EN AGUAS PROFUNDAS (H_{SO}) 1
1.3 ALTURA DE OLA EN CONDICIONES DE ROTURA (H_b) 3
1.4 ALTURA DE OLA DE CÁLCULO (H_{CAL}) 4
2. DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DE LOS POLÍGONOS ARRECIFALES 4
2.1 PROXIMIDAD A LA COSTA Y PROFUNDIDAD 5
2.2 ORIENTACIÓN RESPECTO DE LA COSTA 5
2.3 NÚMERO, LONGITUD Y SEPARACIÓN ENTRE POLÍGONOS ARRECIFALES 5
3. DISEÑO DE LOS MÓDULOS ARRECIFALES 6
3.1 MATERIALES 6
3.2 DISEÑO Y FORMA DE LOS MÓDULOS 6
4. ESTABILIDAD DE LOS MÓDULOS ARRECIFALES 10
4.1 ESTABILIDAD FRENTE AL OLEAJE Y CORRIENTES 10
4.2 ESTABILIDAD FRENTE A VUELCO Y DESLIZAMIENTO 11
5. BIBLIOGRAFÍA 14

1. CÁLCULO DE LOS MÓDULOS ARRECIFALES

1.1 ALTURA DE OLA PARA EL CÁLCULO DE LOS MÓDULOS ARRECIFALES

Los módulos arrecifales estarán sometidos principalmente a la acción del oleaje y de las corrientes, por eso uno de los objetivos de este apartado es realizar la determinación de la altura de ola de cálculo para el dimensionamiento de los bloques de arrecifes artificiales.
El cálculo de la altura de ola está relacionado directamente con la profundidad (d_b), por tanto las olas que afecten a la proyección de las obras estarán relacionadas con esta profundidad y serán las olas originales o de rotura correspondientes al oleaje; por eso es necesario conocer el régimen de oleaje de esta zona, y se va a hallar la altura de ola en condiciones de rotura (H_b), la altura de ola de cálculo (H_{cal}) y la altura de ola significante en aguas profundas (H_{SO}).

1.2 ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE EN AGUAS PROFUNDAS (H_{SO})

Siguiendo las indicaciones de la ROM 0.3-91 "Recomendación para Oleaje y Atlas de Clima Marítimo en el Litoral Español" y una vez zonificada nuestra área de estudio se procede a utilizar la información aportada por los cuadros D (Registros Instrumentales.-Regímenes Extremales Escalares. Relación Altura/Dirección) y E (Registros Instrumentales: Correlaciones. Altura de ola / Periodo en Temporales) de la página VII que son los siguientes:

E - REGISTROS INSTRUMENTALES: CORRELACIONES ALTURA DE OLA / PERIODO EN TEMPORALES

BOYA	$P = H_s / L_{\bar{T}} = \frac{2\pi H_s}{g \bar{T}^2}$	$T_p / \bar{T}$	RELACION FINAL H_s (m) T_p (s)	VALORES DE DISEÑO H_s (m)	T_p (s)
VALENCIA I	0.025 ~ 0.04	≃1.25	$T_p = (5\text{-}6.3)\sqrt{H_s}$	3	8.5–11
				5	11~ 14
				7	13~ 16.5
ALICANTE	0.025 ~ 0.04	≃1.25	$T_p = (5\text{-}6.3)\sqrt{H_s}$	3	8.5~11
				5	11~ 14
				7	13~ 16.5

Figura 1. Cuadro E del área VII de la ROM 0.3-90

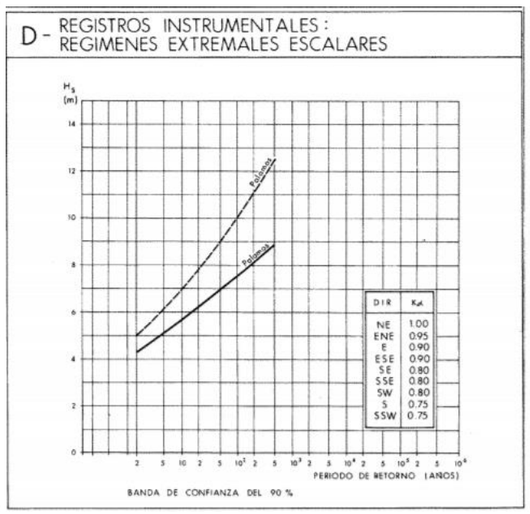

Figura 2. Cuadro D del área VII de la ROM 0.3-90

La altura de ola significante asociada a un periodo de retorno en aguas profundas en una dirección determinada, puede obtenerse a partir de los resultados instrumentales disponibles por medio del coeficiente K_R, a través de la siguiente ecuación:

$$H_{SO} = H_{SR} \cdot K_\alpha / K_r$$

Siendo:

- H_{SO}: Altura de ola significante en aguas profundas asociada a un periodo de retorno, para una dirección determinada.
- H_{SR}: Altura de ola significante asociada a un periodo de retorno obtenida del régimen extremal escalar instrumental.
- K_α: Coeficiente de reparto direccional para la dirección considerada.
- K_R: Coeficiente de refracción-shoaling en el punto de medida para la dirección considerada, y el periodo establecido asociado a dicha altura de ola.

Atendiendo al gráfico D de la hoja correspondiente al área VII de la ROM 0.3-90, se determina que los coeficientes direccionales en función de las direcciones dominantes de la zona son los siguientes:

DIRECCIÓN	$K\alpha$
NE	1.00
ENE	1.00
E	0.90
ESE	0.80
SE	0.70

Tabla 1. Direcciones dominantes y parámetro K_α

Y a partir de la tabla 2.7.1 de la ROM 0.3-90 se obtiene el valor de K_R en función del periodo de temporales para la boya de Valencia:

DIRECCIÓN	K_R
NE	0.83
ENE	0.75
E	0.95
ESE	0.95
SE	0.89

Tabla 2. Direcciones dominantes y parámetro K_R

Así pues, utilizando la fórmula anteriormente mencionada de la altura de ola significante en aguas profundas, se obtiene las siguientes alturas de ola:

DIRECCIÓN	K_α	K_{RO}	H_{SO} (m)
NE	1	0.83	**5.81**
ENE	1	0.75	**6.43**
E	0.90	0.95	**4.57**
ESE	0.80	0.95	**4.06**
SE	0.70	0.89	**3.79**

Tabla 3. Clima de oleaje en aguas profundas en las direcciones dominantes

Siguiendo con las instrucciones de la ROM 0.2-90 se procede a analizar los criterios generales de proyecto específicas de las acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias en la fase de servicio (estado límite último). Aquí se establecen las vidas útiles para obras e instalaciones de carácter definitivo, como son las que se proyectan en la playa Norte de Peñíscola.
Según la clasificación de las obras la Recomendación para Obras Marítimas ROM 0.2-90 "Acciones en Proyecto" da el siguiente cuadro de vidas útiles para las obras marítimas:

TABLA 2.2.1.1. VIDAS ÚTILES MÍNIMAS PARA OBRAS O INSTALACIONES DE CARÁCTER DEFINITIVO (en años)

TIPO DE OBRA O INSTALACIÓN	NIVEL DE SEGURIDAD REQUERIDO		
	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL	25	50	100
DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO	15	25	50

LEYENDA:

INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL:
Obras de carácter general; no ligadas a la explotación de una instalación industrial o de un yacimiento concreto.

DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECIFICO:
Obras al servicio de una instalación industrial concreta o ligadas a la explotación de recursos o yacimientos de naturaleza transitoria (por ejemplo, puerto de servicio de una industria, cargadero de mineral afecto a un yacimiento concreto, plataforma de extracción de petróleo,...).

NIVEL 1:
Obras e instalaciones de interés local o auxiliares.
Pequeño riesgo de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.
(Obras de defensa y regeneración de costas, obras en puertos menores deportivos, emisarios locales, pavimentos, instalaciones para manejo y manipulación de mercancías, edificaciones,...).

NIVEL 2:
Obras e instalaciones de interés general.
Riesgo moderado de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.
(Obras en grandes puertos, emisarios de grandes ciudades, ...).

NIVEL 3:
Obras e instalaciones de protección contra inundaciones o de carácter supranacional. Riesgo elevado de pérdidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.
(Defensa de núcleos urbanos o bienes industriales, ...).

Figura 3. Vida útil mínima para obras de carácter definitivo

En el caso de las obras a realizar en la playa Norte de Peñíscola se considera la barrera de arrecifes obra de NIVEL 1 ya que son obras de carácter general y de interés local y por tanto la vida útil será de 25 años *(L= 25 años)* como indica la anterior tabla 2.2.1.1. de la ROM 0.2-90.

Otro epígrafe a tener en cuenta dentro de las Recomendaciones es el del "Riesgos máximos admisibles para la determinación, a partir de datos estadísticos, de valores característicos de cargas variables para fase de servicio y condiciones extremas". Este último define que el riesgo máximo admisible depende de la repercusión económica en el caso de la inutilización de la obra, la posibilidad de pérdidas de vidas humanas pudiendo ser reducida (no esperable la pérdida de vidas humanas) o esperable (con posibilidad de pérdidas humanas).
Además hay que tener en cuenta también las características de deformabilidad y de posibilidad o facilidad de reparación de la estructura resistente que se pretende diseñar. Por eso se hace una distinción entre:

- Obras rígidas o de estructura frágil sin posibilidad de reparación
- Obras flexibles o de rotura reparable

La ROM 0.2-90 "Acciones en Proyecto" da las siguientes tablas de riesgos máximos admisibles:

TABLA 3.2.3.1.2. RIESGOS MÁXIMOS ADMISIBLES PARA LA DETERMINACIÓN, A PARTIR DE DATOS ESTADÍSTICOS, DE VALORES CARACTERÍSTICOS DE CARGAS VARIABLES PARA FASE DE SERVICIO Y CONDICIONES EXTREMAS

a) RIESGO DE INICIACIÓN DE AVERÍAS

		POSIBILIDAD DE PÉRDIDAS HUMANAS	
		REDUCIDA	ESPERABLE
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA.	BAJA	0,50	0,30
	MEDIA	0,30	0,20
Indice : $\frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$	ALTA	0,25	0,15

b) RIESGO DE DESTRUCCIÓN TOTAL

		POSIBILIDAD DE PÉRDIDAS HUMANAS	
		REDUCIDA	ESPERABLE
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA.	BAJA	0,20	0,15
	MEDIA	0,15	0,10
Indice r : $\frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$	ALTA	0,10	0,05

Se adoptará como riesgo máximo admisible el de iniciación de averías o el de destrucción total según las características de deformabilidad y de posibilidad o facilidad de reparación de la estructura resistente.
Para obras rígidas o de rotura frágil sin posibilidad de reparación se adoptará el riesgo de destrucción total.
Para obras flexibles, semirrígidas o de rotura en general reparable (daños menores que un nivel prefijado función del tipo estructural) se adoptará el riesgo de iniciación de averías.
En este tipo de obras podrá adoptarse también el riesgo de destrucción total, definiendo para cada tipo estructural el nivel de daños aceptado como de destrucción total. La acción resultante se considerará como accidental.

Figura 4. Riesgos máximos admisibles

En el caso de estas obras se asume un riesgo de iniciación de avería, pérdida de vidas humanas reducida o inexistente y una repercusión económica en caso de inutilización de la obra baja. Concluyendo, el valor del riesgo máximo admisible (E) será 0.5.

Para calcular el periodo de retorno relacionado con el riesgo máximo admisible se utiliza el criterio de Leo Borgmann, que afirma:

$$E = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{L}$$

Donde:

- ***T***: periodo de retorno
- ***L***: vida útil en años (L>10 años)
- ***E***: riesgo máximo admisible

De este modo, con los parámetros anteriormente obtenidos y despejando de la fórmula se obtiene:

$$0.50 = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{25} = 36.56\,;$$ **T=36.56 años**

Para este periodo de retorno, se asocia la altura de ola significante en aguas profundas (H_{SO}) el valor de **6.43m** con dirección ENE y se procede a definir la longitud de onda y el periodo exacto de dicha ola recurriendo de nuevo a la ROM 0.3-91, en concreto a la boya de Valencia:

$$T_p = (5{\sim}6.3)\sqrt{H_{SO}}$$

Y se obtienen dos valores:

T_{p1}= 12.68 s ; T_{p2}=15.98s

Se escoge la media entre ambos periodos:

T_p= 14.33 s

Y para hallar la longitud de onda se emplea la siguiente fórmula:

$$L_O = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi}$$

Que suponiendo una g=9.8m/s^2 y el periodo de T=14.33 s, se obtiene:

$$L_O = \frac{9.8 \cdot 14.33^2}{2 \cdot \pi} = 320\ m$$

L_o= 320m

1.3 ALTURA DE OLA EN CONDICIONES DE ROTURA (H_b)

Es preciso conocer la altura de ola rompiente para determinar la altura que tendrán los bloques de hormigón que harán la función de arrecife artificial. Esta se determina para aguas poco profundas que viene limitada por la relación entre la altura de ola y la longitud de onda (peralte).

Según la relación aportada por la ROM 02.90 de la altura de ola de rotura (H_b) con la profundidad (d_b) en el momento en el que la ola rompe se afirma que:

$$\frac{H_b}{d_b} = 0.8$$

Donde:

- H_b: altura de ola en condiciones de rotura.
- d_b: profundidad de cálculo al pie de los módulos, obtenida como suma de la profundidad real de éstas (d_s) y la sobreelevación recomendada por la ROM 02.90.

Estos datos están asociados con lo observado por la naturaleza, pero si se tiene en cuenta que la marea puede variar, el peralte, la profundidad de los módulos, etc., se debe ajustar más estos resultados. Para ello se va emplear las curvas de Weggel, recomendada por el Shore Protection Manual, que representan la variación de la relación H_b/d_b en función de la pendiente de la playa y el periodo. Para realizar este ajuste es necesario saber el periodo del oleaje (T), que en este caso oscila entre los 12 y los 15 segundos y se conoce, a través de la batimetría de la playa Norte de Peñíscola, que posee una pendiente entre el 2%-3%, que es la típica de las costas valencianas.

En este caso la altura de ola de diseño está limitada por la profundidad frente a la estructura, ya que las olas que tengan una altura mayor que la permitida por la relación de rotura H_b/d_b, habrán roto más lejos de la estructura.

En la siguiente gráfica se representan unas curvas que indican la rompiente máxima que puede llegar a una obra con una cierta profundidad de agua delante de esta, Z_S, según la profundidad relativa, $Z_S/g{\cdot}T^2$ y la pendiente del fondo *m*:

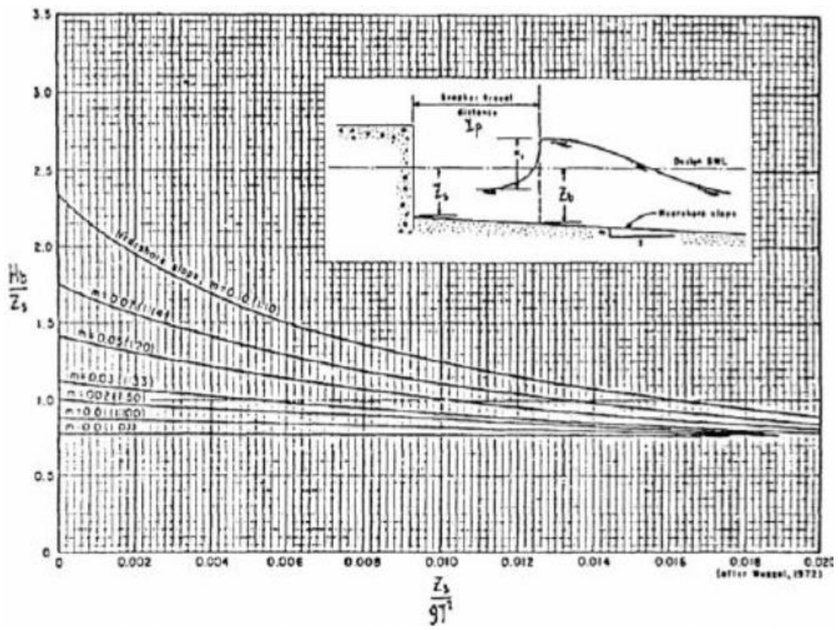

Figura 5. Condición crítica para la rotura del oleaje en aguas someras (Curvas de Weggel, 1972)

Se debe considerar que por lo general Z_S (profundidad frente a la obra) es menor que Z_b (profundidad de inicio de rotura) a causa de la pendiente de fondo frente a la obra. Sabiendo esto y que la Z_S es igual a **d_S= 4.25m** en este caso si se observa en la gráfica el resultado de la relación anterior sustituyendo los valores se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{H_b}{d_s} = 1.05\ m$$

Despejando la altura de ola de rompiente de esta fórmula se aprecia:

$$H_b = 1.05 \cdot d_s = 1.05 \cdot 4.25 = 4.5m$$

Así pues, siguiendo la teoría de onda solitaria, a la profundidad de cálculo escogida se le añade un incremento de altura debido a la marea meteorológica en temporal de +0.8 que recomienda considerar la norma y para quedarse del lado de la seguridad se le añade un incremento de +1, quedando:

$$d_b = 4.25 + 1 = 5.25m$$

Y como anteriormente se ha comentado, la altura de ola en rotura sigue la relación de H_b/d_b= 0.8 por lo que para una profundidad del arrecife artificial de 4.25 metros más la sobreelevación del nivel del mar de +1 y despejando de la relación mencionada, se queda:

$$\boldsymbol{H_b = 0.80 \cdot (4.25 + 1) = 4.20\ m}$$

Tomando este valor como altura de ola en condiciones de rotura (H_b).

1.4 ALTURA DE OLA DE CÁLCULO (H_{CAL})

Se obtiene una altura de ola en condiciones de rotura de H_b= 4.20 m y se asume que cualquier ola con una altura superior a esta romperá antes de alcanzar la obras proyectadas.
Según la ROM 0.3-91 se pueden alcanzar alturas de olas individuales del orden de $2 \cdot H_{1/3}$ y la altura de ola significante del régimen de oleaje para Valencia, para un periodo de retorno de 40 años, es $H_S=H_{1/3}$= 4.3 metros; entonces la altura de ola máxima será: 2 · 4.3= 8.6 metros.

Según la Shore Protection Manual se recomienda el uso de $H_{1/10}$, y siendo $H_{1/10}$= 1.27 · $H_{1/3}$ se obtiene que **$H_{1/10}$= 5.46** metros para un periodo de retorno de T= 40 años.

Como $H_b<H_{1/10}$ significa que las obras se encuentran en aguas someras, es decir, en profundidades reducidas y condiciones de rotura por el fondo, entonces se asume que la altura de ola de cálculo (H_{cal}) será igual a la altura de ola en condiciones de rotura (H_b):

$$\boldsymbol{H_{cal} = H_b = 4.20\ m}$$

2. DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DE LOS POLÍGONOS ARRECIFALES

Previamente a la elección de la distribución de las obras a realizar es necesario definir la terminología con la que se refiere a los distintos elementos que forman un arrecife artificial. Así pues se habla de:

- **Módulo arrecifal**: Es el elemento más pequeño, la unidad, el bloque individual.
- **"Set arrecifal" o Cúmulo arrecifal**: Reúne varios módulos arrecifales amontonados unos con otros.
- **"Reef group" o Grupo arrecifal**: Reunión más o menos ordenada de varias unidades o Módulos arrecifales y/o varios cúmulos arrecifales. En España se conocen como "Polígono arrecifal" y si se tratan de arrecifes de protección se denominan también "Barreras" o "Polígonos de Protección" y cuando se trata de un arrecife artificial de Producción/Concentración se ha llamado "Núcleo Arrecifal Alveolar" al agrupamiento de módulos alveolares.
- Se propone la denominación general de **"Polígonos Arrecifales"** y en especial **"Polígono de Protección"** para el caso de la forma de distribución en alineaciones de módulos arrecifales de protección y **"Núcleo Arrecifal" o "Núcleo Alveolar"** para el agrupamiento de varios módulos o cúmulos arrecifales de producción.
- **Zona arrecifal**: el conjunto de varios polígonos de protección y/o núcleos arrecifales y tiene una escala local o regional.

Sobre la tipología de los elementos que formarán el arrecife artificial se tratará más adelante, pero se puede afirmar que se ha escogido la proyección de una zona arrecifal con núcleo arrecifal alveolar y polígonos de protección, que a su vez, contarán con distintos tipos de módulos arrecifales.

La elección del emplazamiento y distribución de los módulos arrecifales dependerán de varios parámetros a tener en cuenta, los cuales son:

- Profundidad
- Proximidad a la costa y puntos de acceso
- Orientación
- Número, longitud y separación entre los polígonos arrecifales

2.1 PROXIMIDAD A LA COSTA Y PROFUNDIDAD

La separación a la costa determina en cierto modo el funcionamiento del arrecife pero además la elección de su emplazamiento ha tenido varias consideraciones en cuenta:

- Para conseguir minimizar al máximo el impacto visual desde la costa, de modo que los bañistas no aprecien las obras desde el horizonte, dando la sensación de paisaje despejado, se ha establecido la separación a la línea de costa a una distancia superior a 200m desde la orilla que respeta así la zona límite de baños.

- Para conseguir minimizar al máximo el impacto visual desde la costa, de modo que los bañistas no aprecien las obras desde el horizonte, dando la sensación de paisaje despejado, se ha establecido la separación a la línea de costa a una distancia superior a 200m desde la orilla que respeta así la zona límite de baños.

- Para que el balance hidráulico que generan las corrientes de retorno al paso del oleaje sobre las obras sea mínima o despreciable, se han alejado las construcciones lo suficiente de la costa.

- La profundidad idónea será función directa de la iluminación de la zona sumergida, penetración de la luz, turbidez de las aguas, etc., de manera que permitan el desarrollo de organismos y algas fotófilas en las estructuras de reproducción.

- Existe una dos zonas que delimitan la actuación sobre el transporte de sedimentos, determinada por la profundidad activa que es hasta la que existe transporte de sedimentos y la profundidad límite que será aquella a partir de la cual no hay ningún tipo de transporte. El propósito es fondear las obras en la zona desde la orilla hasta la profundidad activa para que las obras tengan algo de impacto positivo sobre el transporte de sedimentos

De acuerdo con las consideraciones comentadas arriba, la separación de la zona arrecifal respecto de la orilla, considerando una anchura de playa media de 44 metros, se establece en unos 280 metros que pertenece a la distancia de la batimétrica de -4 metros a la orilla, que es el calado al que se ha determinado que se fondeen todos los módulos.

2.2 ORIENTACIÓN RESPECTO DE LA COSTA

La recomendación que se da respecto a la orientación de las obras exentas respecto a la costa es que sean perpendiculares a la resultante del oleaje. Se sabe que los temporales en la playa Norte de Peñíscola se registran durante los meses de Octubre a Diciembre, siendo en estos casos, las olas procedentes en su mayoría de las direcciones E y ENE.

Por otro lado hay que tener en cuenta los procesos de refracción que modifica la dirección del oleaje al llegar a la zona de profundidad reducida, lo cual podría cambiar la incidencia de las olas sobre la zona arrecifal planteada.
Por todo esto, y considerando la playa Norte de Peñíscola como una playa bastante abierta, se considera que la orientación de la zona arrecifal a proyectar sea sensiblemente paralela a la línea de costa.

2.3 NÚMERO, LONGITUD Y SEPARACIÓN ENTRE POLÍGONOS ARRECIFALES

La playa Norte de Peñíscola cuenta con unos 4500 metros de longitud, pero se ha decidido ocupar 1900 metros de estos para la localización de las obras, puesto que esta distancia alberga una amplia zona para la distribución apropiada de los polígonos arrecifales, además el fondo marino de toda la playa tiene características similares por lo que no haría falta el análisis individual de la instalación de cada polígono arrecifal.

Según el Shore Protection Manual para evitar la formación de tómbolos la longitud de los polígonos arrecifales ha de ser inferior a la longitud de separación de la orilla establecida para el fondeo de las obras.
Por lo que se escoge una longitud de los polígonos arrecifales de aproximadamente 150 metros con una separación de 200 metros entre cada uno de ellos para que no interfieran en la navegación de embarcaciones recreativas y haya una buena fluencia del agua entre las obras y la costa.

Entonces a lo largo de los 1900 metros escogidos de la playa Norte de Peñíscola se instalarán un total de **6 polígonos arrecifales** de unos **150 metros** de longitud cada uno aproximadamente, que cumple con la recomendación de la SPM (150m < 80m), y separados cada **200 metros**.

3. DISEÑO DE LOS MÓDULOS ARRECIFALES

Para el diseño y cálculo de los distintos módulos arrecifales que formarán parte de estas obras se necesita definir ciertos criterios previamente, como por ejemplo los tres tipos básicos de estructuras de arrecifes artificiales que existen, que son:

- Estructuras de reproducción
- Estructuras de protección
- Estructuras mixtas

Siendo las estructuras de reproducción aquéllas que tienen por finalidad el desarrollo y regeneración de la fauna marina, favoreciendo la repoblación, puesta y reproducción de las diferentes especies que lo colonicen. Las características principales de estos elementos son: peso suficiente para permitir la estabilidad, además de formas que favorezcan el antiarrastre.
Las estructuras de protección son aquéllas que, por su forma, peso y estabilidad están indicadas para disuadir o impedir el acceso de barcos con artes como el arrastre, a la zona de reproducción.
Y las estructuras mixtas conjuntan las cualidades de los dos anteriores, actuando como protector-reproductor.

Se ha decidido proyectar, en este caso, unos polígonos arrecifales formados por estructuras de reproducción (estructuras alveolares) pasándose a llamar **"Núcleo Alveolar"** para el agrupamiento de varios módulos arrecifales de producción.
A pesar de que su función principal sea la de producción para la regeneración del fondo marino, estas obras también tendrán algo de efecto sobre la costa de la playa Norte de Peñíscola, puesto que al estar fondeados a una cota inferior a -5m afectarán a la disipación del oleaje como ya ha sido comentado anteriormente.

Para el diseño y cálculo de los módulos arrecifales de producción se tienen en cuenta varios aspectos importantes como los materiales a emplear, el puntal y la forma de las estructuras, etc.

Se procede al diseño y cálculo de los distintos módulos arrecifales que formarán parte del núcleo alveolar en los siguientes apartados.

3.1 MATERIALES

Los materiales que se emplearán en la construcción de los módulos deben ser limpios (esto es, no contaminantes), tendrán suficiente durabilidad, su puesta en obra y ejecución se realizará con facilidad y, fundamentalmente, serán económicos y poco corrosivos.
Según especifican las directrices establecidas en los convenios internacionales OSPAR y Barcelona, los arrecifes artificiales deben construirse a partir de materiales inertes, es decir, materiales que no causan contaminación por lixiviación, resistencia física o química a la intemperie y/o la actividad biológica.

Los materiales posibles a usar en este tipo de obras son, entre otros, el hormigón, la madera, las rocas, la electrodeposición, materiales reciclados inertes, el PVC, etc. Pero los más comunes son el hormigón que resulta muy favorable puesto que se trata de un material que no se degrada, moldeable, estable, cuyo pH puede ser neutro, y cuya textura puede ser comparable a la de los arrecifes naturales y el PVC y otros plásticos que en cambio, a pesar de ser también moldeables, no degradables y de fácil transporte, tienen poca estabilidad debido a su ligereza y su textura suele ser demasiado lisa.

Después de analizar todas estas características se determina que el mejor material para la realización de los módulos arrecifales es el **hormigón de alta resistencia**. Este cumple con los criterios de durabilidad, baja permeabilidad y flexibilidad que se le exigen; es compatible con el medio, y es de fácil obtención y colocación.

Según las recomendaciones establecidas por el documento "Arrecifes artificiales: estructuras llenas de vida" de la Dirección General de Costas (Ministerio del Medio Ambiente) se recomienda que la dosificación no sea inferior a 350 kg de cemento por metro cúbico de consistencia plástica, que la resistencia característica del hormigón no será inferior a 200 kg /cm^2 y que el tamaño del árido será tal que permita mejorar la compactación: se recomienda un tamaño máximo de 20 mm.

Con todos estos datos se procede a la dosificación del hormigón, siguiendo las indicaciones de la EHE, quedando de la siguiente forma:

- 350 kg de cemento tipo CEM I-42.5 SR
- 175 kg de agua
- 975 kg de árido 0/40
- 400 kg de árido 4/12
- 600 kg de árido 12/20
- 60 kg de fibras de acero de 60/30
- 3.5 kg de aditivo superplastificante

3.2 DISEÑO Y FORMA DE LOS MÓDULOS

Para el diseño de los tipos de módulos arrecifales que se van a instalar en la playa Norte de Peñíscola, se ha escogido que sean de tipo alveolar para fomentar la producción de organismos y así regenerar el fondo marino de la zona. Se ha tenido en cuenta para su diseño distintos criterios:

- A modo de funcionalidad de los elementos del arrecife artificial incluyen que la forma sea tal que "atraiga" vida animal, que promueva que algas, peces, moluscos, corales etc. se establezcan con rapidez en su superficie y entorno.
- La forma y tamaño de los módulos deben actuar como estimulantes visuales y como referencia espacial para determinadas especies.
- La existencia de espacios intersticiales con diferentes tamaños para la atracción de diferentes especies y diversidad de organismos, de manera que pueda circular el agua y que existan posibilidades de escape ante el ataque de depredadores y también crear cavidades en las que penetra la luz.
- Se tendrá en cuenta que al situarse la zona arrecifal en la línea batimétrica de -4m y necesitándose una lámina libre de agua por encima de las estructuras mínima de 1.5m; por tanto el puntal de los distintos módulos se aproximará a los 2 metros de altura para quedar del lado de la seguridad por los cambios del nivel del mar.

- Para evitar problemas de vuelco o diferentes inestabilidades que pueda sufrir la estructura, se diseñará la base de los módulos de mayor volumen que la parte superior.

Con estas consideraciones y todos los estudios previos realizados se procede a diseñar los distintos módulos de hormigón que formarán los polígonos arrecifales y que posteriormente se comprobará su estabilidad frente al oleaje y su comportamiento respecto al vuelco, deslizamiento.

A continuación se muestran los módulos diseñados:

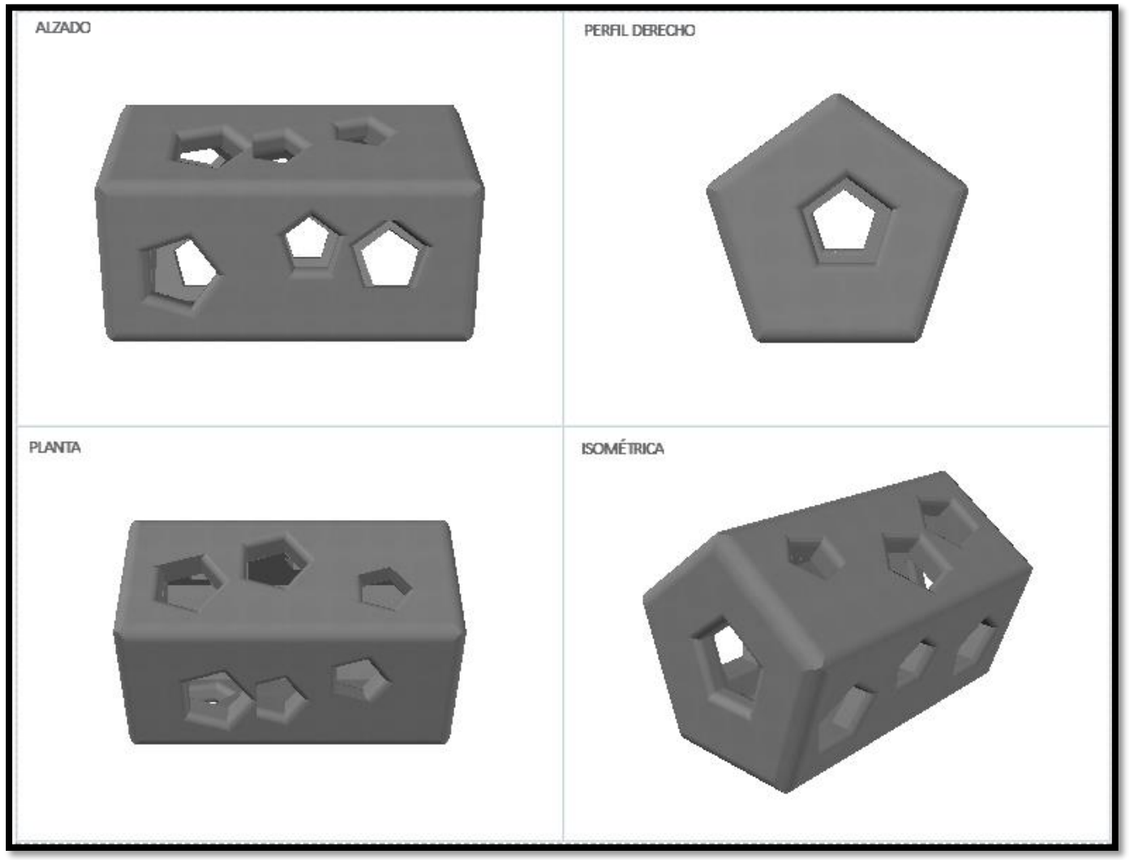

Figura 6. Módulo 1. Fuente propia

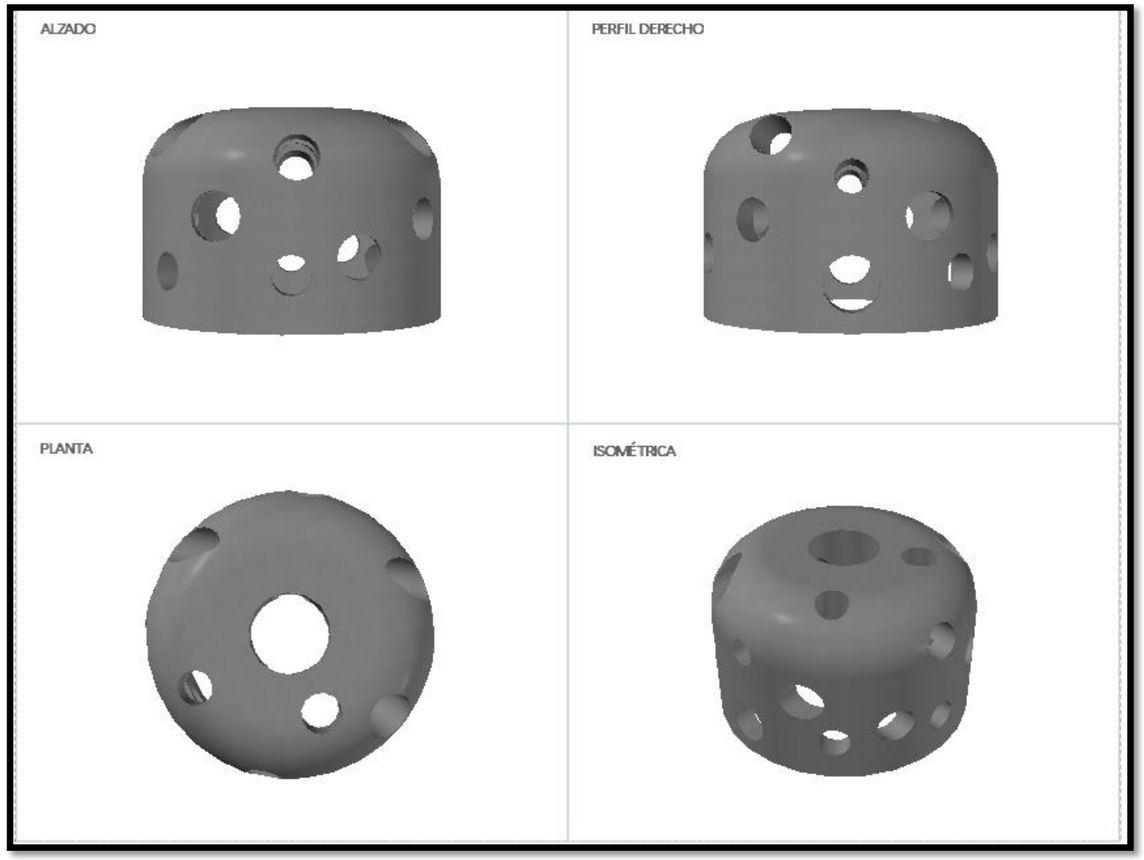

Figura 7. Módulo 2. Fuente propia

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	
PUNTAL	1.40 m
SUPERFICIE OCUPADA	1.76 m^2
VOLUMEN	1.16 m^3
TAMAÑOS DE HUECOS	0.4 m, 0.3 m y 0.25 m
TAMAÑO HUECO LATERAL	0.5 m

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	
PUNTAL	2 m
SUPERFICIE OCUPADA	7.07 m^2
VOLUMEN	4.86 m^3
TAMAÑOS DE HUECOS	0.4 m, 0.3 m y 0.2 m
TAMAÑO HUECO SUPERIOR	0.5 m

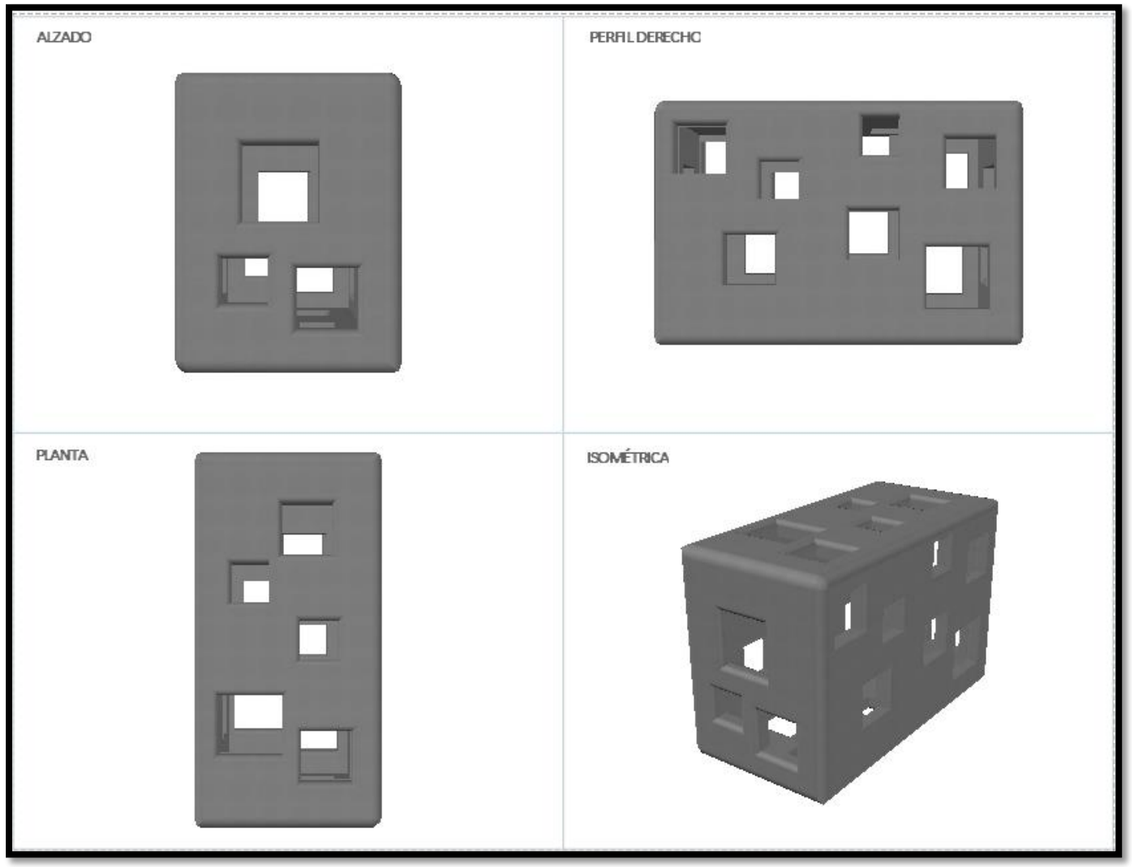

Figura 8. Módulo 3. Fuente propia

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	
PUNTAL	2 m
SUPERFICIE OCUPADA	4.5 m^2
VOLUMEN	2.8 m^3
TAMAÑOS DE HUECOS	0.4 m, 0.3 m y 0.25 m
TAMAÑO HUECO LATERAL	0.5 m

4. ESTABILIDAD DE LOS MÓDULOS ARRECIFALES

Es necesario comprobar la estabilidad de los distintos módulos frente a las acciones que puedan sufrir durante su fase de servicio para, de esta forma, verificar que su funcionamiento y colocación son los adecuados y evitar que se produzcan volcamientos, desplazamientos o roturas de los módulos sumergidos.

4.1 ESTABILIDAD FRENTE AL OLEAJE Y CORRIENTES

Partiendo de los datos de profundidad mínima a la que se encuentran los módulos (d), la altura de ola de cálculo (H_{cal}) y el periodo (T) anteriormente calculados, es necesario conocer la relación que establece la profundidad a la que se encuentra el arrecife (d) y la longitud de onda (L). Según esta última relación se define la profundidad relativa en la que se encuentra la estructura mediante el siguiente esquema:

profundidad de la estructura (d) / longitud de onda (L):

Profundidad indefinida	Zona de transición	Profundidad reducida
d / L < 1 / 2 d / g x T 2 > 0,08 v ≅ 0	1 / 25 < d / L < 1/2 0,08 > d / g x T 2 > 0,0025 $L = g \cdot T^2/2\pi \cdot tg\ h\ (2\pi d/L)$	d / L < 1 / 25 d / g x T 2 < 0,0025 v ≅ cte

Entonces sabiendo que la relación es:

$$\frac{d}{L} = \frac{4.25}{320} = 0.0133$$

Y como 0.0133 < $\frac{1}{25}$ y la otra condición también se cumplen, se afirma que las obras se sitúan en profundidad reducida. Y mediante el segundo cuadro, una vez conocida la profundidad relativa, se considera la velocidad horizontal del agua en función de la profundidad relativa.

Para d / L > 1 /25	Para d / L < 1 / 25
v ≅ 0 La velocidad del agua es prácticamente nula. No se realiza ningún cálculo.	v ≅ cte La velocidad es constante para toda la profundidad.

Observando la relación d/L < 1/25 se asume que la velocidad es constante para toda la profundidad.

Ahora, con las características del oleaje se calcula la estabilidad de la estructura, utilizando la propuesta de Djounkovski y Bojitch, que se representa mediante la siguiente expresión:

$$G\ (f \cdot \cos\alpha - \sin\alpha) = S \cdot w \cdot \frac{\pi \cdot h^2}{L \cdot e^{-2\pi \cdot \frac{z}{L}}}$$

Siendo:

- **G**: peso del arrecife artificial por unidad de superficie
- **f:** coeficiente de rozamiento entre el arrecife y el fondo
- **α**: pendiente del fondo en grados
- **S**: coeficiente de seguridad
- **w**: peso específico el agua del mar
- **h**: semialtura de la ola de cálculo
- **L**: semilongitud de la ola de cálculo
- **z:** Profundidad

Y de aquí se obtiene el coeficiente de seguridad (S).

Los valores por los que se van a sustituir en la ecuación son los siguientes:

- **G**= calculado mediante el volumen de los módulos y la superficie que ocupan (Kg/m^2)
- **f**= 0.79
- **α**= 2% pero para el cálculo se considera despreciable (α=0)
- **S**= coeficiente de seguridad (incógnita)
- **w**= 1035 kg/m^3
- **h**= 4.2/2= 2.1m
- **L**= 320/2= 160m
- **z**= 4.25m

ESTABILIDAD FRENTE AL OLEAJE Y CORRIENTES									
MÓDULO	**G**	**f**	**α**	**w**	**h**	**L**	**z**	**S**	**ESTABLE**
1	1584.85	0.79	0	1035	2.1	160	4.25	**11.82**	**SÍ**
2	1650.32	0.79	0	1035	2.1	160	4.25	**12.31**	**SÍ**
3	1494.03	0.79	0	1035	2.1	160	4.25	**11.14**	**SÍ**

Tabla 4. Estabilidad frente al oleaje y corrientes

Con lo cual se ha comprobado que todos los módulos son estables frente las acciones del oleaje y las corrientes.

4.2 ESTABILIDAD FRENTE A VUELCO Y DESLIZAMIENTO

Para analizar el comportamiento de los módulos frente a vuelco y deslizamiento es necesario calcular la fuerza de la corriente submarina (F) a la que se enfrentan. Esta fuerza de arrastre queda definida por la siguiente ecuación de Morison:

$$F_D = C_0 \cdot A \cdot W_0 \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Siendo:

- **C_0** = coeficiente de forma del arrecife
  - C_0 = 1 circular
  - C_0 = 2 cuadrado
  - C_0 = 3 trabado
- **A** = sección perpendicular a la corriente
- **W_0** = densidad del agua del mar
- **V** = velocidad de la corriente

Para poder determinar la fuerza de arrastre, primero hemos de calcular la velocidad máxima en horizontal de la partícula mediante:

$$V = \frac{\pi \cdot H}{T} \cdot \frac{\cosh\big(k \cdot (z+d)\big)}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos\varphi$$

Siendo:

- **H**: altura de la ola en metros **(4.2m)**
- **T**: período de la ola en segundos **(14.33 s)**
- **k**: número de la ola (2π/L) **(0.02)**
- **d**: profundidad del agua en m.**(4.25m)**
- $\boldsymbol{cos\varphi}$= **1** (máxima velocidad)
- **z**: profundidad para la que se calcula la velocidad en m. **(-1.5m)**

Entonces, sustituyendo en la fórmula anterior, se obtiene:

V=5.23m/s

Con la ayuda del programa de dibujo Autocad se han sacado las áreas proyectadas perpendiculares a la incidencia del oleaje, que son distintas para cada tipo de módulo. Con este dato y con los obtenidos anteriormente se procede a calcular la fuerza de arrastre, escogiendo la más restrictiva para la comparación posterior.
A continuación se muestra una tabla con los resultados de las fuerzas de arrastre y también las secciones proyectadas:

MÓDULO	1	2	3
A_P (m^2)	1.34	5.52	3
F_D (N)	1933.52	7964.96	4328.78

El siguiente paso consiste en calcular la fuerza de inercia, es decir, la fuerza ejercida sobre el objeto sumergido por la aceleración que se representa por la siguiente ecuación:

$$F_i = C_M \cdot \rho \cdot Vol \cdot a$$

Siendo:

- **C_M**: coeficiente de inercia (1)
- **ρ**: densidad del agua del mar en Kg/m^3
- **Vol**: volumen del objeto sumergido en m^3
- **a**: aceleración de la partícula de agua en m/s^2

Así pues el cálculo de la aceleración se hará mediante la siguiente fórmula:

$$a = \frac{\pi \cdot H \cdot G}{L} \cdot \frac{\cosh\big(k \cdot (z+d)\big)}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos\varphi$$

Donde están ya definidas anteriormente la constante para el cálculo de la velocidad y G es 9,81 m/s^2, entonces queda:

a= 4.52 m/s^2

Y en la siguiente tabla se presentan los volúmenes de cada uno de los módulos y el resultado de F_i:

MÓDULO	1	2	3
Vol (m^3)	1.16	4.86	2.80
F_i (N)	5426.71	22736.05	13098.96

Y sumando la fuerza de inercia con la fuerza de arrastre calculadas anteriormente se obtiene las siguientes fuerzas de ola en cada uno de los módulos arrecifales:

MÓDULO	1	2	3
F_D (N)	1933.52	7964.96	4328.78
F_i (N)	5426.71	22736.05	13098.96
F (N)	**7360.23**	**30701.01**	**17427.74**

Una vez obtenidas las fuerzas de arrastre (F) de los diferentes módulos, se procede al cálculo de la fuerza de resistencia siguiendo la explicación de a continuación.

A pesar de que los módulos arrecifales, al no estar anclados al fondo marino, solo cuentan como fuerza de resistencia con su propio peso hay que tener en cuenta dos fuerzas que disminuyen a esta y que son la fuerza de flotación y la fuerza ascensional, siendo cada una:

La fuerza de flotación viene definida por la siguiente ecuación:

$$F_f = \rho_w \cdot Vol$$

Donde ρ_w es la densidad del agua en Kg/m^3. Y se obtienen los siguientes resultados:

MÓDULO	1	2	3
Vol (m^3)	1.16	4.86	2.80
F_f (N)	1200.6	5030.1	2898

Y la fuerza ascensional viene definida por la ecuación:

$$F_a = C_L \cdot \rho_w \cdot S_a \cdot \frac{V^2}{2}$$

Siendo:

- C_L: coeficiente de alzamiento y se toma un valor indicado en tablas de 0,3.
- S_a: área de apoyo del objeto sumergido en m^2 y se obtiene con el programa de diseño Autocad para cada uno de los módulos.

Se obtienen los siguientes valores:

MÓDULO	1	2	3
S_a (m^2)	1.33	7.07	3.64
F_a (N)	5647.89	30023.02	15457.4

Finalmente se calcula la fuerza del peso propio ejercida por el hormigón:

$$F_{PP} = Vol \cdot \gamma_H$$

Siendo γ_H el peso específico del hormigón: $\gamma_H = 25000$ N/m^3 y se obtienen los siguientes resultados:

MÓDULO	1	2	3
Vol (m^3)	1.16	4.86	2.80
F_{PP} (N)	29000	121500	70000

De manera que la fuerza de resistencia de los diferentes bloques se calcula:

$$F_R = F_{PP} - F_a - F_f$$

Y se obtienen los siguientes valores:

MÓDULO	1	2	3
F_{pp} (N)	29000	121500	70000
F_a (N)	5647.89	30023.02	15457.4
F_f (N)	1200.6	5030.1	2898
F_R (N)	**22151.51**	**86446.88**	**51644.6**

Ahora que ya están obtenidas las fuerzas de oleaje y de resistencia se procede a realizar las **comprobaciones frente a deslizamiento y vuelco.**

La condición de deslizamiento es: **F > F_R**, con lo cual se comprueba el comportamiento de los diferentes módulos frente al deslizamiento:

ESTABILIDAD FRENTE AL DESLIZAMIENTO				
MÓDULO	F (N)	F_R (N)	¿F_R>F?	COMPROBACIÓN
1	7360.23	22151.51	SÍ	NO DESLIZAMIENTO
2	30701.01	86446.88	SÍ	NO DESLIZAMIENTO
3	17427.74	51644.6	SÍ	NO DESLIZAMIENTO

Tabla 5. Estabilidad frente al deslizamiento

Del mismo modo, definiendo la condición de vuelco, se procede a comprobar la estabilidad de cada uno de los módulos en este caso.

Para que no se produzca el vuelco de las estructuras debe cumplirse la condición **F·d < N·e,** siendo **d** y **e** representadas en el siguiente esquema:

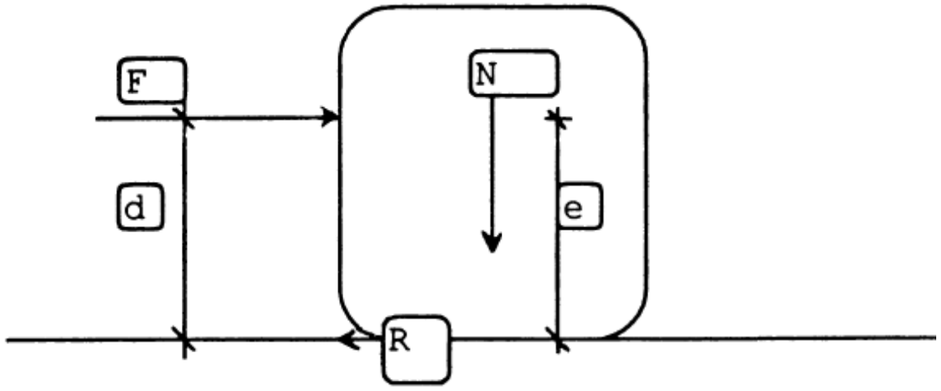

Figura 9. Diagrama de fuerzas que actúan sobre un módulo de un arrecife artificial

Teniendo en cuenta que la N es el peso propio del módulo y que a su vez es la única fuerza de resistencia que opone el mismo antes las acciones, como se ha comentado anteriormente, se asume que N será igual a la fuerza de resistencia calculada la cual incluye las dos fuerzas que influyen que son la fuerza de flotación y la fuerza ascensional; por tanto $N=F_R$.
Se asume también un valor común de **d** y **e** en todos los módulos siendo estos: d=e=1.5 metros. Entonces se procede a la comprobación del comportamiento de los módulos ante el vuelco en la siguiente tabla:

ESTABILIDAD FRENTE AL VUELCO						
MÓDULO	**F (N)**	**d (m)**	**N (N)**	**e (m)**	**¿F·d<N·e?**	**COMPROBACIÓN**
1	7360.23	1.5	22151.51	1.5	**SÍ**	**NO VUELCA**
2	30701.01	1.5	86446.88	1.5	**SÍ**	**NO VUELCA**
3	17427.74	1.5	51644.6	1.5	**SÍ**	**NO VUELCA**

5. BIBLIOGRAFÍA

- COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER. (1984). SHORE PROTECTION MANUAL. VICKSBURG, MISSISSIPPI.
- GAYO ROMERO, J. L. (1998). ARRECIFES ARTIFICIALES: ESTRUCTURAS LLENAS DE VIDA. ESPAÑA.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. (2011). GUÍA METODOLÓGICA DE INSTALACIÓN DE ARRECIFES ARTIFICIALES.
- PUERTOS DEL ESTADO. (1990). ROM 02.90 ACCIONES EN EL PROYECTO DE OBRAS MARÍTIMAS Y PORTURARIAS.
- PUERTOS DEL ESTADO. (1991). ROM 0.3-91 CLIMA MARÍTIMO EN EL LITORAL ESPAÑOL
- DIRECTRICES RELATIVAS A LA COLOCACIÓN DE ARRECIFES ARTIFICIALES. CONVENIO DE LONDRES Y PROTOCOLO/ PNUMA
- ANEJO 5 DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE MÓDULOS ARRECIFALES ARTIFICIALES EN MARO-CERRO GORDO (MÁLAGA-GRANADA) Y ROQUETAS DEL MAR (ALMERÍA).