

Diseño de las protecciones frente a la socavación en las cimentaciones tipo monopilote de los

aerogeneradores eólicos marinos

AUTOR:

LUCIANO
Sanz

TUTORES:

MARÍA DOLORES
Esteban

VICENTE
Negro

RESUMEN

Han pasado 26 años desde la construcción del primer aerogenerador offshore. No obstante, no ha sido lo suficiente como para consolidar los conocimientos, existiendo actualmente incertidumbres en las cimentaciones.

La principal preocupación entre las compañías instaladoras es el fenómeno de socavación en sus cimentaciones, al producir este su inoperatividad, inclusive en aquellos parques de reciente construcción.

Concretamente, la investigación buscó realizar una aplicación práctica respecto a las fórmulas de protección frente a la socavación de las cimentaciones, comparando los pesos obtenidos al aplicar las fórmulas, resultando notables diferencias del orden de 15 veces.

PALABRAS CLAVE

Eólico, marino, formulaciones, escollera

ABSTRACT

It has been 26 years since the construction of the first offshore wind turbine, however, has not been enough to consolidate knowledge in the sector, and there are actuality uncertainties in the foundations.

The main concern among the installation companies is the phenomenon of scour in their foundations, as it produces their inoperability, even in those wind farms of recent construction.

Specifically, the research sought to make a practical application regarding the foundation scour protection formulas, comparing the weights obtained when applying the formulas, resulting in notable differences of the order of 15 times

KEYWORDS

Wind, marine, formulation, riprap

1

Introducción

La presente investigación, forma parte del estudio realizado en el Trabajo Fin de Máster correspondiente a la titulación de Máster Habilitante en Ingeniería de Caminos Canales y Puertos de la Universidad Europea.

En dicho trabajo, se abordó la problemática del fenómeno de la socavación en las cimentaciones de los aerogeneradores eólicos marinos con tipologías monopilote, detectándose una importante carencia al no disponer de una fórmula de diseño que fuese clara y que permita el rápido dimensionamiento de los elementos de las protecciones en la cimentaciones (peso y/o diámetro), eligiéndose para ello la tipología de protección frente a la socavación basada en material granular del tipo escollera.

A lo largo de la investigación se manifestó que existen importantes incertidumbres por resolver en el ámbito de la eólica marina, siendo una de ellas el diseño de las cimentaciones [1].

Del mismo modo, se hace evidente que hasta el momento la gran mayoría de las investigaciones realizadas han sido enfocadas al estudio y al desarrollo de las socavaciones en cimentaciones bajo entornos fluviales y en condiciones de corriente continua.

No obstante, en la última década y debido al exponencial crecimiento del mercado de la eólica marina, han surgido nuevos estudios que caracterizan y evalúan el fenómeno de socavación en los entornos marinos, teniendo en cuenta simultáneamente los efectos de las corrientes y del oleaje.

También cabe destacar que la socavación ha demostrado ser una pieza clave en la planificación de la monitorización y mantenimiento de estas instalaciones, tal como se ha observado dada la evolución de la misma, además se han observado importantes afecciones sólo unos años después de la construcción, que si no se contemplan adecuadamente a tiempo podrían provocar paradas operacionales, modificaciones en las frecuencias del sistema e incluso en casos extremos el colapso de la estructura [2]. Todo ello puso de manifiesto la significativa necesidad de avanzar en este campo y en el desarrollo de esta investigación [5].

2

Objetivos y metodología

El objetivo principal se ha dividido en dos partes:

- Primeramente, se recopiló la información real de cinco parques eólicos marinos (en adelante casos de estudio), y que permitió

Fig. 1.



identificar el peso medio nominal del material de escollera de la protección frente a la socavación (W_{n50}), basándose siempre en los datos existentes publicados en las fuentes oficiales.

- Seguidamente, se llevó a cabo una aplicación práctica que consistió en determinar el peso (W_{n50}) de la escollera mediante la aplicación de las formulaciones de diseño existentes, habiendo para ello utilizado los datos de partida documentados de los casos de estudio analizados.

Adicionalmente se impusieron en la investigación los siguientes requisitos:

- Por un lado, que la tipología de cimentación sea del tipo monopilote, al representar esta el 80 % de las cimentaciones instaladas hasta el 2015 en Europa.

- Por otro lado, que el sistema de protecciones de la cimentación sea de un material granular del tipo escollera o riprap, por ser este el sistema más utilizado hasta el momento por las compañías instaladoras y ser el de mayor facilidad de disposición in-situ [3].

En la fig. 1 se observa un sistema de protección con material de escollera en una cimentación tipo monopilote [4].

De esta manera que el objetivo principal estaría directamente vinculado a analizar, comparar y verificar la viabilidad de aplicación de las formulaciones de diseño referente a las protecciones de las cimentaciones en los aerogeneradores eólicos marinos. Igualmente, se plantearon otros objetivos secundarios:

- Realizar un estado del arte de las formulaciones de diseño referentes al diámetro medio nominal del material de escollera (D_{n50}) y al peso medio nominal del material de escollera de la protección frente a la socavación (W_{n50}).

- Identificar la teoría de ondas aplicable a los casos de estudio.
- Determinar si es de aplicación las fórmulas de diseño de entornos fluviales en ambientes marinos.

Por otra parte, la metodología seguida se dividió en cuatro fases.

- En una primera fase se revisó el estado del conocimiento relativo al fenómeno de la socavación, y a las formulaciones de diseño de las protecciones, haciendo hincapié en los requisitos impuestos en los objetivos.
- En una segunda fase se seleccionaron los casos de estudio, recopilando los datos de interés para el desarrollo de la investigación, identificando, analizando y constatando toda la información disponible y descartando toda aquella que fuera consistente o completa.
- En una tercera fase se realizó la aplicación práctica, que permitió aplicar las diferentes formulaciones de diseño propuestas y analizadas en el estado del conocimiento.
- Por último, en una cuarta fase se efectuó una comparación de los resultados obtenidos, valorando las diferencias entre los pesos calculados y los datos reales documentados en cada caso de estudio, para terminar con una discusión y unas conclusiones del trabajo de investigación.

3 Estado del conocimiento

Desde 1970 se han realizado numerosas investigaciones en el sector industrial de los hidrocarburos en referencia a la socavación, siendo aprovechada como experiencia acumulada en sectores como el eólico marino [5].

Del mismo modo, estas investigaciones han permitido caracterizar y conocer con mayor detalle las principales afecciones que se producen por este fenómeno, y vinculadas a una serie de factores, como por ejemplo [5]:

- La composición del material del lecho marino.
- La geometría y dimensión de la cimentación.
- El clima marítimo.
- La profundidad de emplazamiento de la estructura.

También cabe destacar la gran dificultad encontrada en la investigación, al tener un limitado acceso a los documentos técnicos relacionados con el fenómeno, debido al alto grado de confidencialidad impuesta por el propio sector industrial [6].

También se ha observado que al interactuar el flujo con los sedimentos alrededor de la cimentación, ya sean estos flujos de

corriente continua u oscilatorios [7], siempre que se interponga un obstáculo al flujo, se desarrollarán turbulencias, destacándose dos tipologías particulares:

- La producida justo delante de la estructura y que tiene una trayectoria vertical descendente.
- La desarrolla detrás del obstáculo, tras atravesar el flujo la estructura del mismo, suscribiendo una turbulencia en sentido circular en un plano horizontal [8].

Estos vórtices son conocidos como vórtice de herradura o horseshoe vortex, aquellos que se producen delante del monopilote, y en estela o lee-wake vortex, aquellos desarrollados a sotavento de la misma [9].

El esquema de acción de las dos tipologías de vórtices se pueden observar en la fig. 2 [10].

No obstante, y para mitigarlo se han desarrollado una gran variedad de sistemas de protecciones para las cimentaciones, siendo los de más común uso en el sector los que se exponen a continuación:

- Sistemas de protecciones con materiales tipo escollera o riprap, ver fig. 3 [11].
- Sistemas de Protecciones con materiales tipo manta de concreto o concrete mattress, ver fig. 4 [12].
- Sistemas de protecciones con materiales granular tipo bolsas rellenas o geocontainers, ver fig. 5 [13].
- Sistema de protecciones con materiales sintético o SSCS front mats, ver fig.6 [14].

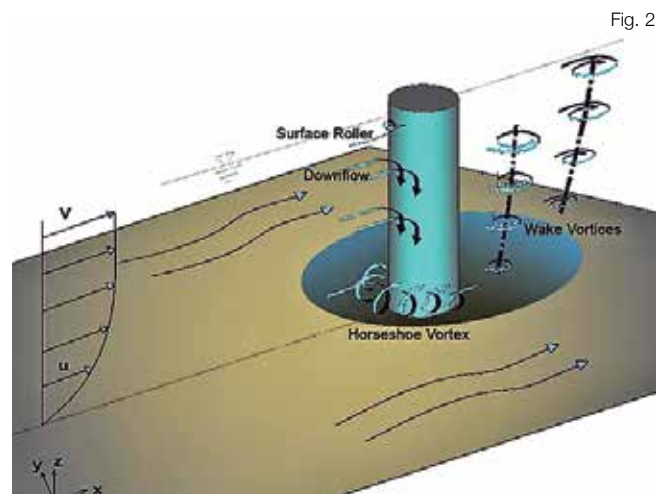


Fig. 2

Fig. 3

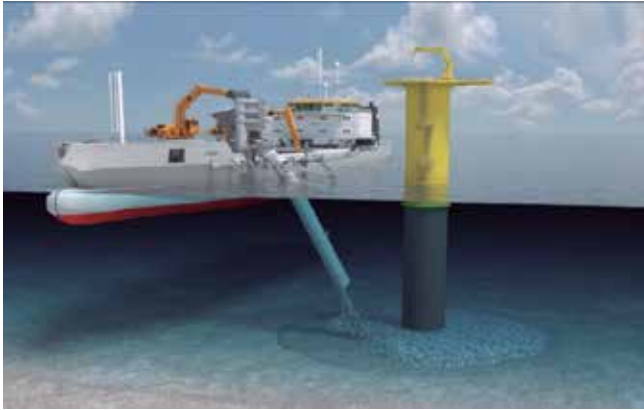


Fig. 4



Fig. 5

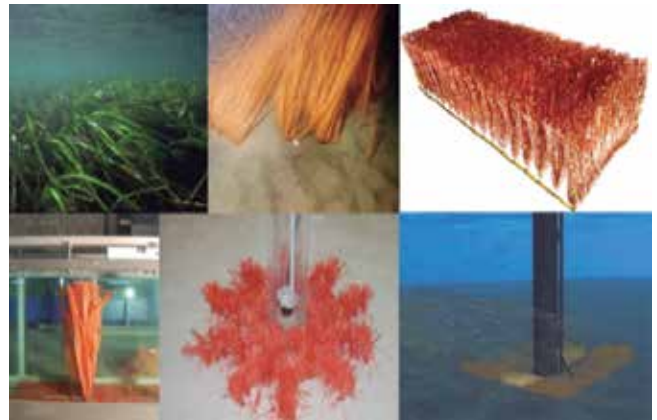


Fig. 6

INVESTIGADOR Y AÑO	FORMULACIÓN PROPUESTA
Isbash (1936)	$D_{50} = \frac{V_a^2}{g * N * (G_s - 1)}$
Peterka (1958)	$D_{50} = 0,0122 * (V_a)^{2,06}$
Blodgett-McConaughy (1981)	$D_{50} = 0,01 * V_a^{2,44}$
Cox-Campbell (1958/66)	$W = \frac{V^6 * w_r * w_w^3}{15,23 * 10^5 * (w_r - w_w)^3 * (\cos \phi - \sin \phi)^3}$
Soulsby (1997)	Oleaje: $D_{n50} = \frac{97,9 * U_w^{3,08}}{T_p^{1,08} * [g * (s - 1)]^{2,08}}$

Tabla 1

Por otra parte, en la tabla 1 se describen las cinco formulaciones de diseño seleccionadas, de un total de catorce fórmulas investigadas y que cumplían los objetivos planteados en la investigación [15], y que además fueron utilizadas en el trabajo aquí expuesto. Asimismo, se pueden deducir que $V_a \cdot V$ y U_w corresponde a la velocidad media actuante definida por Isbash, Peterka, Blodgett, Cox y Soulsby en (feet/s), g es la aceleración de la gravedad en (feet/s²), N es el número de estabilidad de Isbash (Adimensional), G_s y s corresponde a la densidad relativa, que relaciona los pesos específicos de la roca W_r respecto al agua W_w (Adimensional), y siendo T_p el período pico del oleaje (s).

4 Desarrollo de la investigación

La investigación se ha basado en analizar y aplicar las formulaciones propuestas en la tabla 1, comparando sus pesos resultantes, con los pesos reales documentados en los cinco casos de estudio seleccionados.

4.1. Casos de estudio

En el trabajo se han identificado, analizado y caracterizado más de cincuenta parques eólicos marinos que cumplían con

los requisitos impuestos en los objetivos, tipología monopilote, protección con escollera y encontrarse en operación dentro de aguas Europeas.

Posteriormente y de este listado tan amplio, se seleccionaron cinco casos de estudio, justificado su limitado número debido a la gran dificultad encontrada a la hora de identificar casos de estudio con la suficiente información, como para poder homogenizar todos los aspectos de sus características:

- Lugar de emplazamiento.
- Proceso constructivo.
- Estructura de cimentación.
- Estructura del aerogenerador.
- Datos del clima marítimo.

Sin embargo, fue necesario el realizar en paralelo, un análisis de cada uno de los datos documentados, contrastando y validando cada uno de ellos por diferentes fuentes. En la tabla nº2, se expone la ficha resumen preparada tras el análisis del caso de estudio 1 (Egmond Aan Zee) habiéndose realizado lo mismo para los cuatro parques eólico restantes [20].

En concreto, los cinco casos de estudio seleccionados se muestran en la fig. 7, Arklow Bank fase 1 (Irlanda), Egmond aan Zee (Holanda), Horns Rev fase 1 (Dinamarca), Princess Amalia (Holanda) y Scroby Sands (Reino Unido) [16].



Fig. 7

FICHA RESUMEN		PARQUE EÓLICO MARINO	EGMOND AAN ZEE	FICHA RESUMEN
Características (Generales)		Características (Cimentación)		
País	Holanda			
Plataforma continental mar del Norte	Aguas holandesas	Tipologías (Cimentación)	Monopilote	
Sistema geodésico de referencia	WGS84 Datum	Diámetro del Monopilote (Base)	4,6	
Coordenadas (Latitud/Longitud)	52°36'21,6"N - 4°25'8,3"E	Profundidad de Hinca	30	
Distancia a la Costa	15 km	Sistema de Protección (Tipo)	Escollera	
Área	27 km ²	Densidad específica Filtro y Protección	2.800,00	
Nivel Medio del Mar (NMM):	20 m	Tipo Material Fondo marino	Arenas	
Características (Superestructura)		Fondo marino-(D50)	0,02	
Inicio de Construcción	2005	Filtro-(D50)	0,05	
Puesta en Funcionamiento	2007	Filtro-(Espesor)	0,4	
Potencia Nominal	3	Filtro-(Longitud de Extensión)	24	
Modelo	V90	Protección-(D50)	0,4	
Número de Aerogeneradores	36	Protección-(Espesor)	1,8	
Capacidad Total Instalada en el Parque	108	Protección-(Longitud de Extensión)	18	
Altura Total del Aerogenerador	105	Características (Oceanográficas)		
Diámetro del Rotor	90	Altura Ola Significante (Hs)	3,6	
Características (Configuración)		Período Pico (Tp)	8	
Número de Filas	12	Velocidad Oleaje (Uw)	s/d	
Número de Columnas	4	Velocidad Corriente (Uc)	0,6	
Separación entre Aerogeneradores	500	Período Retorno (Tr)	50	

Tabla 2

Casos de Estudio	APLICACIONES DE LAS FORMULACIONES				
	ISBASH	BLODGETT y MCCONAUGHY	COX y CAMPBELL	SOULSBY	PETERKA
	W _{n50} (kg)	W _{n50} (kg)	W _{n50} (kg)	W _{n50} (kg)	W _{n50} (kg)
EGMOND AAN ZEE	0,77	2,10	8,21	1,79	0,71
PRINSES AMALIA-Q7	84,47	649,08	901,81	1330,58	90,05
SCROBY SANDS	57,18	403,30	610,53	1308,59	60,26
HORNS REV 1	21,66	123,40	231,28	662,54	22,17
ARKLOW BANK 1	85,95	663,05	917,68	1742,25	91,69

Tabla 3

4. 2. Aplicación de las formulaciones

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos tras aplicar las cinco formulaciones de diseño seleccionados en los cinco casos de estudio, pudiendo observarse notables diferencias entre sí, lo que puede ser, debido a que cada investigador ha propuesto una metodología diferente en su aplicación. Asimismo, se destacó como la variable más influyente en cada formulación, la velocidad del flujo en el fondo marino definida como velocidad orbital, encontrándose está generalmente elevada a una potencia cuadrática, con lo cual sus resultados tienen una importante sensibilidad a cualquier variación de las velocidades del flujo, manifestando resultados muy dispares [17].

Paralelamente y con el fin de comprobar y validar cada uno de los resultados obtenidos en la aplicación práctica, se realizaron cálculos auxiliares para determinar las velocidades orbitales. Teniendo presente todas las posibles teorías de ondas que se aconsejen utilizar en función de la zonificación resultante de cada uno de los casos de estudio, llegando a justificar del análisis la utilización de la teoría lineal de Airy, a modo de simplificación, se determinó que para estudios de detalle sería necesario aplicar la teoría de ondas más adecuada de acuerdo a las características del emplazamiento.

5 Discusión

Como se ha mencionado la aplicación práctica propuesta ha permitido, comparar y determinar qué diferencia existe entre los dos pesos analizados, cuantificándose su diferencia mediante tres metodologías diferentes:

- Relación de rangos, representada por la diferencia entre los pesos calculados y los reales.
- Relación de dispersión, representada por el cociente entre los pesos calculados y los reales.
- Relación de factor de paso, definida como la raíz cuadrada del cociente entre los pesos calculados y los reales.

Todo ello, permitió detectar que los resultados eran muy dispares, concretamente en tres formulaciones de diseño, originalmente pensadas para regímenes de flujo en corriente continua y no para el caso oscilatorio. Además, se observó que las velocidades registradas en los datos documentados eran muy reducidas, cuantificándose valores de 1 a 2 m/s, y por consecuencia estos valores reflejaban que los pesos del material de escollera fueran de dimensiones reducidas, manifestando valores del orden de 1 kg o inferiores. En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos tras comparar estos pesos calculados mediante las tres metodologías mencionadas para el caso de estudio 1 [18]. Idénticamente se realizó para los otros 4 parques.

6 Conclusiones

Se concluye que existe un número muy reducido de fórmulas que pueden ser de aplicación a la hora de diseñar los sistemas de protecciones de las cimentaciones en los aerogeneradores marinos. Además, se ha observado que las formulaciones no son muy claras, ni permiten una rápida determinación, debido a que la mayoría no han sido aplicadas ni contrastadas para

COMPARATIVA DE VALORES OBTENIDOS						
Casos de Estudio	Aplicación	ISBASH	BLODGETT y MCONAUGHY	COX y CAMPBELL	SOULSBY	PETERKA
		W_{n50} (kg)	W_{n50} (kg)	W_{n50} (kg)	W_{n50} (kg)	W_{n50} (kg)
EGMOND AAN ZEE	^{s/} fórmula	0,77	2,10	8,21	1,79	0,71
	^{s/} caso estudio	166,40	166,40	166,40	166,40	166,40
	Rangos	165,63	164,30	158,19	164,61	165,69
	Dispersión	216	79	20	93	234
	Factor paso	15	9	5	10	15

Tabla 4

sistemas estructurales offshore, siendo solamente verificadas para casos del litoral costeros o en canales hidráulicos, añadiéndose a todo ello, una incertidumbre adicional referente las dimensiones utilizadas en estas estructuras, no siendo de uso habitual estas dimensiones en la ingeniería marítima offshore. También se detectó un alto grado de confidencialidad impuesta en el sector industrial, a raíz de que las compañías instaladoras guardan con recelo su información, evitando así la competencia o el exponer su know how. Igualmente se comprobó que al aplicar las formulaciones de las protecciones, tanto para régimen continuo como oscilatorio, sus resultados presentaban importantes incoherencias, debido a que por lo general estas fueron pensadas para calados del orden de los 5 m, y no los 20 m en los que se encuentran habitualmente las instalaciones eólicas marinas. Con respecto a las comparativas de los pesos, se ha observado una gran dispersión entre los valores resultantes, reflejándose diferencia en las 3 relaciones propuestas, e identificándose dos casos de estudios como los más comprometidos que son el 1 y 4, en coincidencia con la aplicación de las fórmulas de Isbash y Peterka. Esto conduce a que sea fundamental seguir investigando en la socavación, para lo que sería adecuado contar con datos reales de parques en funcionamiento, adquiridos mediante monitorización de las estructuras. @

REFERENCIAS

- [1] Negro, V., López-Gutiérrez, J.S., Esteban, M.D. y Matutano, C., 2014. Uncertainties in the design of support structures and foundations for offshore wind turbines. *Renewable Energy* 63:125-132.
- [2] Matutano, C., Negro, V., López-Gutiérrez, J.S. y Esteban, M.D., 2013. Scour prediction and scour protections in offshore wind farms. *Renewable energy* 57: 358-365.
- [3] EWEA, 2016. Website: [En Línea]: <http://www.ewea.org/> [4] Dong Energy. 2017 [En línea] <http://www.dongenergy.com/en>
- [5] Matutano-Molina, C. 2013. Caracterización de los sistemas de protección basados en materiales naturales destinados al control de la socavación en obras marítimas presentes en instalaciones eólicas marinas. E.T.S.I.C.C.P, U.P.M. Págs. 39, 45, 49, 231-248, Tesis Doctoral.
- [6] Sumer, B.M.; Whitehouse, R.J.S. and Toerum, A. 2001. Scour around coastal structures: A summary of recent research: *Coastal Engineering*, Vol. 44, 2001. Pages. 153-190.
- [7] De Vos, L. 2008. Optimisation of scour protection design for Monopiles and quantification of wave run-up. Universiteit Gent, Belgium. 2008. PhD. Thesis.
- [8] Sumer, B.M. y Fredsøe, J., 2002. The mechanics of scour in the marine environment. *World Scientific Press Advanced Series on Ocean Engineering*, vol. 17, Singapore.
- [9] Jahangirzadeh, A.; Basser, H.; Akib, S.; et al. 2014. Experimental and numerical investigation of the effect of different shapes of collars on the reduction of scour around a single bridge pier. México.
- [10] Soulsby, R. 1997. *Dynamics of Marine Sands: A manual for practical applications*. London UK: Thomas Telford, 1997.
- [11] Website: [En Línea]: <http://subseaworldnews.com>
- [12] Website: [En Línea]: <http://www.offshore-technology.com>
- [13] Website: [En Línea]: <http://www.geosynthetica.net>
- [14] Rudolph 2010. [En Línea]: <https://www.dredging.org/>.
- [15] Formulaciones de diseño de las protecciones, elaboración propia basada en las fuentes consultadas.
- [16] Zonificación y emplazamiento de los casos de estudio, elaboración Propia basada en las fuentes consultadas.
- [17] 4C Offshore. 2016. Plataforma especializada. [En línea] <http://www.4coffshore.com/>
- [18] ASCE. American Society of Civil Engineers. 2016. Library of ASCE. [En línea] 2016. <http://ascelibrary.org/>
- [19] CERC, Coastal Engineering Research Center. 2002. *Coastal Engineering Manual-Part II-Waves: U.S.A.C.E.*
- [20] CIRIA, Construction Industry Research and Information Association. 2007. *The rock manual*. London: CUR, CETMEF (2nd edition).