

Ensayo de segregación en cimentaciones para la estructura soporte de aerogeneradores off-shore hechas por vertido en caída libre



Segregation test of the off-shore wind turbine jacket foundations made by free fall pouring



Miguel Sánchez-Calero¹, Alberto Jesús Perea-Moreno², Carlos de San Antonio Gómez³ y Francisco Manzano-Agugliaro¹

¹ Universidad de Almería. Escuela Politécnica Superior. La Cañada de San Urbano – 04120 Almería. Tfno: +34 950 01 53 46.

² Universidad de Córdoba. Dpto. de Física Aplicada. Campus Universitario de Rabanales. Edificio Albert Einstein (C2). Ctra. Madrid-Cádiz, km. 396 – 14014 Córdoba. Tfno: +34 957 21 26 33.

³ Universidad Politécnica de Madrid. ETSIA. Dpto. de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Ciudad Universitaria – 28040 Madrid.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8542> | Recibido: 20/07/2017 • Evaluado: 12/05/2017 • Aceptado: 04/09/2017

ABSTRACT

- One of the major concern of wind farm offshore is the type of wind turbine foundation to be installed. When it comes to talk about offshore installation of pre-piled fixed jacket foundations (3–4 legs), one of the most critical activities to be performed by the installer is the grouting operation. For currently wind turbines size, pre-piling jacket installation is a very extended alternative used which are drilled into the seabed until only 4–5 m come out the seabed line. Once piles have been installed into the seabed it comes the time to proceed with jacket legs installation. Next step is to grouting-secured together both structures (pile and jacket) pouring grout, throughout the already pre-installed grouting lines into the lower part of the jacket leg. Due to complexity of the overall manoeuvre as well as required precision not only for the grout system but for the right parameters should be considered for pouring in order to ensure the grout correctly into the pile/jacket annulus without segregation or other undesirable effects occurring a mock-up test was carried out. The proposed and analysed method defines a protocol that could be used and repeated for others offshore windfarms that are planned to be installed in the future over pre-piled foundations. Running a grout wall test based on protocol described on this paper prior to offshore grout operations will guarantee mix of grout and lub is in line with grouting foundations requirements, saving pumping grout time and therefore vessel stand by costs as well as money savings for grout exceeds, avoiding segregation problems could lead up to in worst case to foundations removal with massive vessel standby costs for reparation of the entire installation foundation operation.
- **Keywords:** Piles, jackets, grouting, offshore installation, segregation, mock-up test.

RESUMEN

Los proyectos de instalación de parques eólicos marinos tienen en la selección del tipo de cimentación a instalar para las turbinas eólicas una de sus mayores preocupaciones. En lo que se refiere a estructuras fijas pre-pilotadas tipo jackets (3 –4 patas), una de las operaciones más críticas es la relativa a la aplicación de la lechada de cemento para la unión de los pilotes y los jackets. En la actualidad están muy extendidas las estructuras fijas pre-pilotadas tipo jackets, las cuáles se pilotan dentro del lecho marino hasta que solamente quedan por encima del mismo 4–5 m del pilote. Una vez que los pilotes están instalados dentro del suelo marino, se

instalan los jackets. En esta operación se emplean grandes barcos-grúa con gran capacidad de izado debido al tamaño y peso de las estructuras jackets. Posteriormente ambas estructuras, pilotes y jackets, son fijados mediante una lechada de cemento. Debido a la complejidad de toda la maniobra en si, así como a la precisión se requiere tanto para la instalación del sistema de inyección de la lechada de cemento como a la definición adecuada de los parámetros que definen la mezcla y metodología usada para la inyección de la lechada de cemento, es recomendable y necesario llevar a cabo unos ensayos de campo. En este trabajo se define un protocolo de trabajo que puede ser usado y repetido para otros proyectos similares que usen estructuras fijas pre-pilotadas tipo jackets. Para ello, se ha llevado a cabo un ensayo de campo para analizar que la mezcla de lechada de cemento y lubricante es la adecuada para el tipo de instalación que se va a llevar a cabo. Este método de ensayo ha demostrado ser útil y permitirá, ahorrar costes, tanto en tiempo de inyección de la lechada de cemento (coste del barco), así como por el exceso del mismo que se pudiera estar aplicando. Por otro lado, se están evitando los posibles problemas medioambientales derivados de la segregación de una mezcla no idónea, y en casos más extremos, una mala instalación de las estructuras, que pueda obligar a retirar la cimentación para volver a proceder a su reinstalación.

Palabras clave: pilotes, jackets, lechada de cemento, instalación en el mar, segregación, ensayo de campo.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de energía ha aumentado debido al rápido desarrollo de la sociedad humana [1] y como consecuencia las crisis energética y ambiental [2]. Para dar respuesta a estas crisis, muchos países en todo el mundo se han centrado en los recursos que se obtienen a partir de la energía eólica [3]. La mayoría de ellos han evaluado sus recursos en tierra [4] y en alta mar para poder producir energía eólica [5]. En este sentido, los países europeos han sido pioneros en la energía eólica marina tanto en su investigación como en su aplicación [6]. Aunque desde el punto de vista medioambiental se estima que las emisiones de gases de efecto invernadero fueron inferiores a 7 g CO₂-eq / kWh en tierra y 11 g CO₂-eq / kWh para offshore [7]. La energía eólica marina ha demostrado ser una fuente alternativa a tener muy en cuenta para la generación de energía [8].

Teniendo en cuenta el tamaño actual de las turbinas eólicas que se están instalando en los nuevos parques eólicos marinos,

su instalación sobre estructuras fijas tipo *jacket*, previamente pre-pilotadas en el lecho marino, es una alternativa que está muy extendida [9], particularmente con pilotes de una longitud que fácilmente llegan a los 30 m y que tienen entre 2-3 m de diámetro. Estos pilotes son instalados en el lecho marino hasta que solamente la parte superior de los pilotes sobresale de la línea del lecho marino unos 4-5 m. Una vez que los pilotes han sido instalados en el fondo marino llega el momento de proceder con la instalación de las patas de *jacket* [10]. Para esta operación se utilizan grandes buques de carga debido a la dimensión y el peso que tienen estas estructuras [11, 12]. El proceso de instalación pasa por una fase intermedia en la que la estructura queda suspendida a escasos metros sobre el nivel del mar hasta que está completamente estabilizada y a partir de ahí comienza a sumergirse dentro del mar hasta que el *jacket* queda fijado en los pilotes ya instalados [13]. El siguiente paso es juntar las dos estructuras (pilote y *jacket*) mediante una unión continua de cemento, el cual se vierte a través de las tuberías para inyectar el cemento ya preinstaladas en la parte inferior de la pata de la *jacket*. La unión de ambas estructuras mediante cemento se produce a lo largo del espacio hueco en forma de anillo que queda alrededor de la pata de la *jacket* y el borde de los pilotes a modo de camisa, así como el espacio entre el cono (que es la parte final de la pata de la *jacket*) y el fondo marino (estamos hablando generalmente de una distancia de apenas milímetros).

Iberdrola está desarrollando un parque eólico marino con una potencia instalada 350 MW en el Mar del Báltico llamado Wikinger (Fig. 1). El proyecto consiste en 70 Turbinas Eólicas (WTG) que alimentan a una Sub-estación marina donde la energía se transforma a un voltaje más alto antes de la exportación a la costa. La subestructura que soporta la plataforma de la subestación es una estructura tipo *jacket* de acero de seis patas apoyadas en pilotes también de acero pre-pilotados. Por lo tanto, debido a la complejidad de toda la operación, así como la precisión requerida no sólo para el vertido del cemento, sino a la hora de definir los parámetros adecuados que deben considerarse para que el vertido se realice correctamente, nace el presente trabajo. El objetivo del presente estudio es hacer una prueba de campo para verificar que el cemento se ha vertido correctamente en el anillo que definen el pilote y la *jacket*, y analizar si posteriormente aparecen problemas de segregación u otros efectos indeseables. Por tanto, el presente ensayo examinará el efecto del cemento utilizado MasterFlow 9500, mediante su caída libre a través de una columna de agua desde una altura entre los 300 mm y 2900 mm. La estabilidad del cemento depende de varios factores, como son las propiedades de

los distintos componentes [14], las proporciones de la mezcla [15] o las propiedades reológicas obtenidas [16]. Existen varias pruebas para estimar el grado de segregación estática de los materiales cementosos que se basan en la monitorización de la segregación de las partículas a través del tiempo, analizando diferentes propiedades a diferentes alturas tales como: densidad y distribución de partículas gruesas [17]. Hay otros ensayos en cambio que analizan la sedimentación de partículas para estudiar la influencia de los parámetros de la mezcla sobre la estabilidad de los materiales cementosos [18]. Como se ha visto en estudios anteriores, es especialmente interesante analizar los resultados a diferentes alturas respecto de la caída del vertido del cemento.

2. DATOS Y MÉTODOS

El ensayo se llevó a cabo en la base de *FoundOcean* en Livingston, Reino Unido. Se había configurado para replicar, en la medida de lo posible el sistema de inyección de cemento propuesto para la instalación de la estructura tipo *jacket* en sus pilotes ya preinstalados para la subestación eólica marina.

2.1. METODOLOGÍA PROPUESTA

La conexión entre la pata de la *jacket* y el pilote se realiza mediante un anillo de cemento tipo MasterFlow 9500 (dado que este material es de alta resistencia, con una mínima fuerza de compresión de 80 MPa). Un sistema de inyección de cemento se ha diseñado para la instalación del *jacket* en los pilotes. En este sentido, la *jacket* está equipada con:

- Tuberías flexibles para las líneas de cementado: permitiendo el paso del cemento desde el punto de bombeo situado a la altura de la plataforma donde están los puntos de izado de la misma (+7.00 m sobre el nivel medio del mar) hasta el punto de conexión donde se fija la línea de cemento (-32.7m por debajo del nivel del mar)
- Tuberías fijas para las líneas de cementado: permite el paso del cemento a través de las líneas flexibles de cemento dentro de los espacios en los que se va a inyectar el cemento como por ejemplo entre el anillo formado entre el pilote y la pata de la *jacket* y la cavidad que queda por debajo (excavada en el suelo). Las tuberías fijas se equiparán con una conexión tipo abrazadera para conectar las mangueras.
- Tuberías de inundación: conectadas desde el interior de la pata de la *jacket* empezando en la punta final del cono de la pata de la *jacket* y terminando a una distancia vertical de 500 mm por encima de la longitud del pilote que quedará inundada con el cemento. Dos agujeros de ventilación se encuentran en la parte superior de la pata, cada uno de 120 mm de diámetro, estos permiten el desalojo del agua durante la operación de hincado del pilote.

Cada una de las patas de la *jacket* está provista con dos líneas de inyección de cemento, denominadas líneas 1 y 2. La línea 1 termina en la parte final de la cruz que forma la punta de la pata del pilote, penetrando en su cavidad a través de 4 tuberías flexibles, una por cuadrante, de forma que la distribución se realice de forma homogénea alrededor de dicha cruz. Estas líneas se recortarán hasta la medida necesaria que permita la altura de "caída libre" deseada (dimensión Z en la Fig. 2). La línea de cemento 2 termina sobre la línea de la base del anillo. De esta forma los siguientes compartimentos quedan definidos: compartimento de inundación, anillo de cemento, vacío dentro de la pata de la *jacket* hasta el plato de cierre y la cavidad (se extiende por debajo del anillo de



Fig. 1: Localización del Parque Eólico Marino

cemento hacia la parte interior del pilote excavado a nivel del suelo).

La aprobación de este proceso está sujeta al denominado proceso ZiE (*Zustimmung im Einzelfall* - ZiE) para las uniones cementadas de la subestación marina del proyecto Wiking, que es necesario para obtener la aprobación de las autoridades alemanas, en este caso el de la BSH (the Federal Maritime and Hydrographic Agency). Como parte de este proceso de aprobación es necesario

llevar a cabo una prueba o ensayo para simular el vertido de cemento para poder demostrar que la metodología y preparativos propuestos garantizan que el cemento se verterá correctamente dentro de la unión en forma de anillo que definen el pilote y la jacket sin que se produzca segregación u otro efecto indeseable. Basándose en esta premisa Iberdrola ha definido el alcance de estos trabajos para el ensayo aquí propuesto y ha solicitado a la empresa FoundOcean que proporcione una detallada metodología, suministrar el material requerido para llevar a cabo el ensayo, así como suministrar el molde que se utilizará para el ensayo de vertido del cemento, una vez mezclado, en el molde. De igual forma se le ha solicitado a FoundOcean que tome muestras las cuales serán posteriormente confirmadas por los dos representantes ZiE.

Para replicar el proceso de llenado del anillo, FoundOcean mezcló y vertió el cemento dentro de un molde de ensayo, como se muestra en la Fig.3, de la misma forma que se habría hecho durante la operación en alta mar. Por otro lado, las propiedades del cemento fresco fueron verificadas durante el ensayo tomando muestras tanto del material vertido en el molde, como las propiedades mecánicas de la resistencia del cemento.

Una vez que el cemento utilizado en el ensayo había fraguado, se procedió a retirar el molde para ver cómo había quedado la superficie de cemento. El representante del ZiE junto con los representantes de Iberdrola (incluyendo alguno de los autores del presente artículo) llevaron a cabo una inspección visual sobre la superficie para determinar si había signos de segregación. Un test Schmidt-hammer se llevó a cabo en la superficie de cemento en aquellas localizaciones que previamente habían sido identificadas

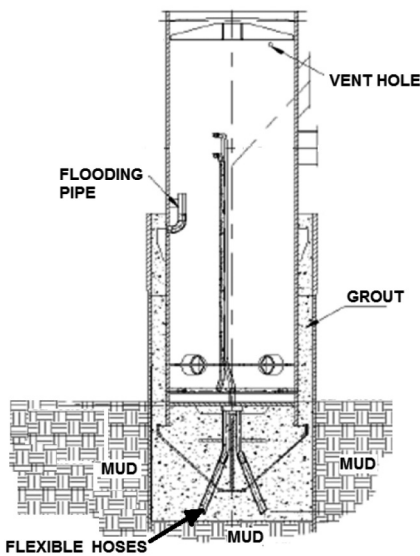


Fig. 2: Sistema de cementado

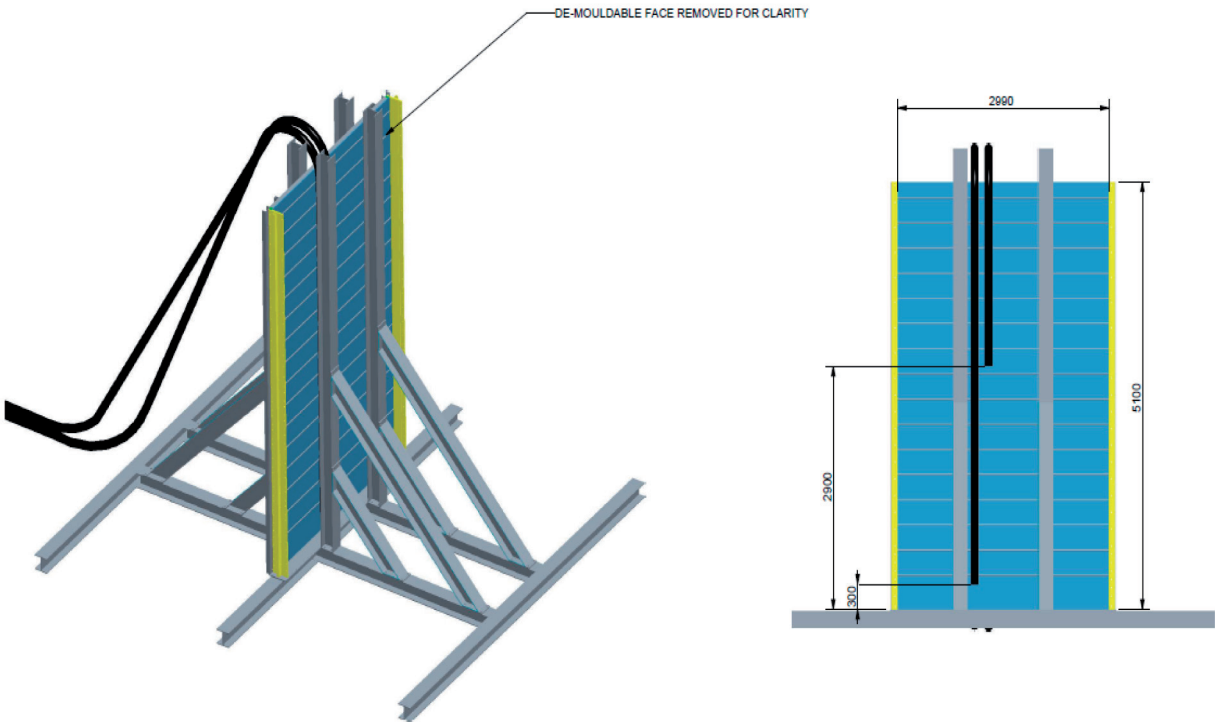


Fig. 3: Localizaciones de las entradas en el molde

Muestra No	Lote No	Intervalo de la muestra (min)	Duración del test	Test de Fluidez D1 (mm)	Test de fluidez D2 (mm)	Temperatura (°C)	Densidad del Cemento (DC)
1	1	0	12:01	860	790	20.0	2.44
2	3	60	13:01	730	760	N/A	2.44
		0	12:36	750	760	20.1	2.45

Tabla 1: Propiedades cemento

por el representante ZiE para de esta forma determinar la resistencia del cemento. Las muestras fueron transportadas al laboratorio AMPA en Kassel para ser visualmente observadas y sometidas a pruebas de compresión transcurridos 28 días.

2.2. DATOS

Para lubricar las líneas de vertido e inyección de cemento se utilizó el lubricante BASF MasterFlow 9000LUB. La mezcla utilizada para lubricar estas tuberías de 4 pulgadas de diámetro consistía en: 100 partes por peso de BASF MasterFlow 9000LUB y entre 15-18 partes por peso de agua fresca. Cuando se mezclan estos componentes en dichas proporciones, la mezcla tiene una gravedad específica de 2.20 y un volumen de 0.45m³ de cemento por tonelada de materia seca. Las tuberías fueron instaladas en el interior del molde y aseguradas antes de comenzar el test. La tubería primaria fue suspendida y asegurada a una distancia de 300 mm desde la base del molde. La tubería secundaria fue suspendida y asegurada por el contrario a una distancia de 2900 mm desde la base del molde. Las dos partes del molde se habían atornillado juntas y soportadas por vigas cerrando la estructura del encofrado, ver Fig. 4.

El día de la prueba fue el 20 de Julio de 2015. El encofrado se llenó con agua pulverizada usando un Putzmeister P715 a través de una tubería de 1 pulgada de diámetro que iba desde la parte superior de la estructura. Una cuba o mezclador proporcionado por FoundOcean fue usado para realizar la mezcla requerida en este ensayo. Un lote de 0.4 T de BASF MasterFlow 9000LUB fue mezclado y vertido a través de la línea secundaria. La línea secundaria tenía una longitud de 22 m desde la boca hasta el final. Esto resulta en un volumen de 0.173 m³. Un lote de 0.4 T de BASF MasterFlow 9000LUB producirá 0.180 m³ de cemento. Por lo tanto, se asume que una cantidad muy pequeña de material lubricante se verterá dentro del molde a través del conducto secundario cayendo libremente a través de la columna de agua. Por tanto, 3 lotes de BASF MasterFlow9500 fueron mezclados y vertidos al molde a través de la línea primaria. Usando los volúmenes calculados de la tubería, el molde y el cemento, se estima que 3 x 1.5 T lotes serán necesarios para que el nivel de cemento llegue hasta los 100 mm

por debajo del nivel del conducto secundario en el molde.

Un lote de BASF MasterFlow 9500 fue mezclado y vertido a través de la línea secundaria hasta que se observó que el material rebosaba por encima del molde. La operación de vertido se detuvo durante cinco minutos para monitorizar si se había producido algún tipo de hundimiento o deformación. Tras la observación se pudo confirmar que ninguna deformación se había producido. Posteriormente la mezcla remanente se vertió en el molde. Esto supuso un exceso del 20 %. Fue constatado que parte del material BASF Master Flow 9000LUB no había fluido hasta la esquina más lejana donde el anillo tiene 140 mm de ancho. Se cree que esto es debido a que el molde no se encontraba a nivel del suelo.



Fig. 4: Estructura de encofrado

Un test de control fue llevado a cabo a lo largo de todo el ensayo para verificar que los criterios de calidad especificados por BASF relativos al material MasterFlow 9500 se cumplieran. El material había sido mezclado durante 5 minutos y una muestra inicial había sido tomada. Una vez que la muestra fue verificada como

Nº	Días	Largo (mm)	Ancho (mm)	Altura (mm)	Densidad lechada	Peso (g)	Densidad seca del cemento (Kg/m³)	Fuerza (KN)	Presión (N/mm²)	Modo resultante: A-C
1	4	75.1	75.2	75.2	2.45	1030	2425	664	117.6	A
2	4	75.1	75.3	76.1	2.45	1065	2475	635	112.4	C
3	4	75.0	75.0	5.3	2.45	1009	2382	645	114.7	B
Media	4								114.9	
4	7	75.1	75.2	75.4	2.45	992	2330	757	134.1	C
5	7	75.1	75.2	75.3	2.45	1046	2460	717	127.1	C
6	7	75.1	75.1	75.3	2.45	1028	2421	704	124.9	C
Media	7								128.7	
7	14	75-0	75.2	74.9	2.45	1037	2455	785	139.3	C
8	14	75.2	75.1	75.3	2.45	1061	2495	759	134.5	C
9	14	75.1	75.1	75.3	2.45	1046	2463	767	136.1	C
Media	14								136.6	
10	28	75.1	75.2	75.3	2.45	1059	2490	774	150.7	C
11	28	75.1	75.2	75.4	2.45	1043	2449	793	147.3	C
12	28	75.3	75.2	75.3	2.45	1019	2390	796	153.5	C
Media	28								150.5	

Tabla 2: Resultados de los ensayos de compresión

válida por todas las partes, el material fue vertido en el molde. Las condiciones de temperatura para el test fueron: agua fresca procedente de un tanque de agua a 12.5 °C, temperatura del aire 16 °C y temperatura en seco del material MF9500 de 15.4 °C.

3. RESULTADOS

Se obtuvieron mediciones de la gravedad específica del cemento, medidos sobre n litro del mismo, según el procedimiento descrito en BS EN 12350-6 [19], el cual es comúnmente usado para este tipo de test [35,36]. Los resultados de los test de densidad se recogen en la tabla 1. En este sentido podemos observar que la densidad del cemento medida durante el ensayo estaba en el rango entre 2.44 y 2.45.

La mezcla fue ensayada de forma regular a lo largo del ensayo de conformidad con la DIN EN 12350-8 [20], la cual es comúnmente usada para estos test [21]. Los resultados de la resistencia del material se pueden observar en la tabla 1. Durante el ensayo, dos muestras de cemento fueron tomadas del mezclador donde 15 cubos de 75 mm fueron fabricados de conformidad a la BS EN 12390-2 [22]. En la mañana del ensayo se acordó una desviación respecto del procedimiento de trabajo original. Originalmente se habían acordado 10 muestras, sin embargo, finalmente se tomaron 15. Debido a este cambio, las muestras no fueron tomadas de un único lote, sino que, 10 muestras se tomaron del lote 2 y los otras 5 se tomaron del lote 3. Las muestras fueron inmediatamente puestos en las probetas de fraguado a una temperatura de 20 °C (+/- 2 °C). Las probetas fueron posteriormente desmoldadas transcurridas 24 h y devueltos al tanque de curado. Las probetas se mantuvieron en el tanque de curado hasta que una vez acabado el ensayo fueron pesados, medidos y probados de conformidad a la BS EN 12390-3 (EN 12390-3,2009).

4. DISCUSIÓN

Las probetas obtenidas durante el ensayo fueron sometidos a prueba de compresión a los 3,7,14 y 28 días para determinar su resistencia a la rotura. Los resultados de las pruebas de compresión aparecen representados en la Tabla 1 y los tipos de formas resultantes se muestran en la Fig. 6. Como se muestra en la Fig. 7, el modelo de compresión es correcto. El molde fue desmoldado el día 23 de Julio de 2015 cuando el cemento en el muro tenía 3 días. Una inspección visual se llevó a cabo el 24 de Julio de 2015 cuando el cemento curado tenía 4 días.

Como el muro fue desmoldado se hizo evidente que el cemento había curado bien a lo largo de toda la altura del muro, ya que no apareció indicio de segregación del BASF Masterflow 9500 en la base del muro. De la inspección visual, tampoco se observó que había ninguna capa diferente o deformación del cemento procedente de la tubería secundaria. También se observó que el cemento

había curado bien a lo largo de toda la altura del muro, ya que no apareció indicio de segregación del BASF Masterflow 9500 en la base del muro. De la inspección visual, tampoco se observó que había ninguna capa diferente o deformación del cemento procedente de la tubería secundaria. También se observó que el cemento

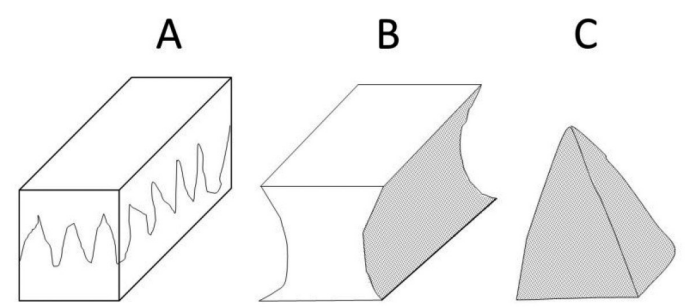


Fig. 6: Modos de fractura para los ensayos de compresión (Tabla 1)

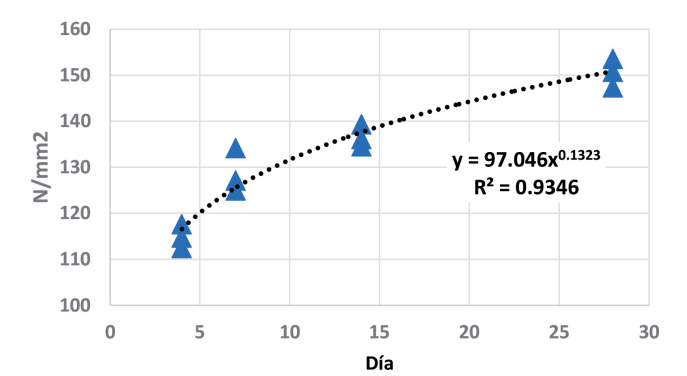


Fig. 7: Modelo de compresión

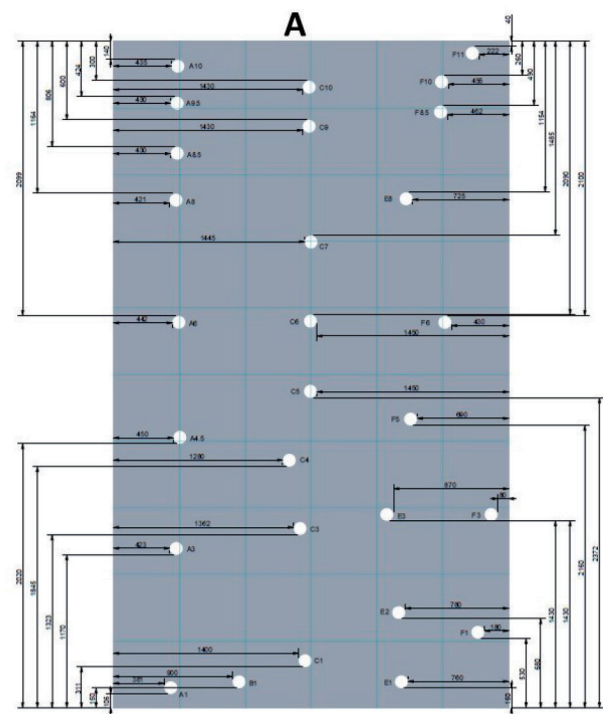


Fig. 5 Muro: A) Localización de las muestras B) Muestras extraídas



mento había rellenado perfectamente todos los bordes del muro, incluyendo alrededor de las tuberías y conectores.

Como se ha detallado anteriormente, parte del BASF Masterflow 9000 LUB no rebosó en una de las esquinas del muro. Pudo observarse que algún material se quedó en la parte más alta del muro, pero sin llegar a rebosar. Por lo tanto, se puede asumir que se ha formado buen cemento hasta ese nivel en la conexión de la estructura. Hay una sección de aproximadamente 2 m, desde los 2.5 m hasta los 4.5 m de la base del muro, la cual aparece tener una sustancia de color blanco suave ocupando una capa de entre 5 a 30 mm entre y alrededor de las tuberías en la cara desmoldada del molde. El representante ZIE marcó el muro con 28 localizaciones de ensayo como puede verse en la Fig. 5. Aunque se marcaron 28 posiciones, debido a las restricciones en el anillo en la esquina superior izquierda de la cara desmoldada, cuadrantes A10 al C7, las muestras tomadas en esta zona fueron consideradas como no "aptas para ensayo" ya que la longitud de los centros es menor que su diámetro. La intención original del ensayo fue la de comprobar que, con la metodología propuesta, no se produciría segregación del mortero de cemento. En este sentido el ensayo fue un éxito, sin embargo, se identificaron otros dos efectos negativos:

1. denominado problema del lubricante en la sección superior: se formó pasta de cemento blanda alrededor de las tuberías.
2. El problema de la sección inferior: la sección inferior del muro se llenó con la primera lechada de cemento y con lubricante más fresco. El problema en esta sección fue una especie de lavado del cemento en la parte de arriba de los conectores.

Como se había mencionado antes, es especialmente interesante analizar los resultados obtenidos a diferentes alturas del cemento [33]. Usando estos datos, y las coordenadas de la Fig. 5, un modelo espacial de 40 filas x 10 columnas fue generado para tener una distribución en alturas de los resultados, y como así puede verse en la Fig 8:

$$Z = 0.0001 X - 0.006 Y + 73.25 \quad (\text{eq. 1})$$

Siendo Z la fuerza de compresión que se habría obtenido con un Martillo Schmidt. Puede verse como Z es inversamente proporcional a la altura Y. Este modelo muestra las áreas que deberían ser mejoradas o consideradas para futuros ensayos. Por lo tanto, a partir de los valores de fuerza de compresión obtenidos, puede comprobarse que la fuerza de compresión de este material es significativamente más baja de lo que cabría esperar bien del BASF Masterflow 9500 o del BASF Masterflow 9000 LUB. Por lo tanto, esto parece indicar que algo de separación del material sí se ha producido. Sin embargo, se cree que esto fue debido a la colocación en sí de la línea secundaria del cemento y no a la metodología planteada para todo el ensayo. El material lubricante se quedó en la línea secundaria durante una hora, antes de que comenzara el vertido en la secundaria. Por lo tanto, se asume que esto fue lo que causó que el material lubricante empezara a asentarse, y durante el vertido, causó que parte del material se mezclara con el agua. Este material luego fraguó dentro del muro originando una capa de material de baja resistencia entre el acero y la superficie de cemento. A la vista de estos resultados, los dos problemas que fueron encontrados y descritos anteriormente parecen estar directamente relacionados con la lubricación del cemento. En este sentido, lo primero es anotar que previamente al vertido del Master flow 9500, un lubricante llamado Masterflow 9500 LUB es inyectado a través de la tubería del

cemento. Este lubricante tiene la misma presión de inyectado, así como la misma fuerza de compresión que el propio cemento una vez fraguado.

Estos problemas pueden verse claramente reflejados en la Fig.5, donde el material gris es el cemento en buen estado y el material blanco que se ve en la parte superior es el cemento lubricado (no deseado). De cara a corregir estos dos problemas identificados durante el desarrollo de este test y ligados a la lubricación del cemento; y para mejorar de forma general la metodología planteada sería necesario probar la fiabilidad de las uniones entre el pilote y la cimentación jacket, y realizar ensayos específicos de lubricación para entender mejor el comportamiento del cemento lubricado. En este sentido, se podría proponer por ejemplo un escenario durante el cual el lubricante 9000 LUB se bombea justo después del cemento, o bien un segundo escenario en el que esperemos un tiempo antes de verter el lubricante 9000LUB y un escenario final en el que no se emplee lubricante. Con ello, deberíamos ser capaces de determinar la mejor y más eficiente forma para combinar cemento y lubricante en este tipo de operaciones de instalación marinas.

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados, se puede concluir que se ha producido muy poca o ninguna segregación del material BASF Masterflow 9500. Se sospecha no obstante que si se ha producido alguna separación del mismo. Se supone que esto es debido a la propia instalación de la manguera de inyección del lubricante. Cabe señalar no obstante que esto no será parte del procedimiento a seguir durante la instalación marina. En cualquier caso, se recomienda que, el ensayo se repita posteriormente con cualquiera de los siguientes cambios en su procedimiento:

1. Vertido del cemento en una única etapa – El cemento se vierte continuamente desde la entrada primaria hasta que rebosa. La entrada secundaria se utilizará como entrada de contingencia solamente. Las principales ventajas de esta opción son: caída libre de lechada de cemento limitada al mínimo. Además, un vertido acelerará la operación en alta mar y la línea secundaria seguirá siendo el método de contingencia viable en caso de bloqueos. Por otra parte, las desventajas de esta opción 1 podrían resumirse de la siguiente manera: Posible contaminación de la unión estructural desde el material que se encuentra en el lecho marino en el pilote pre-pilotado y la posibilidad de caída, si el material en la base del pilote penetra en la superficie del lecho marino después de que la operación de vertido de la lechada de cemento termine.
2. Vertido del cemento en dos etapas – Se coloca un tapón de cemento desde la entrada primaria hasta el inicio de la conexión estructural. El tapón se deja fraguar hasta que es lo suficientemente fuerte para soportar el peso del anillo completo de cemento. El cemento será bombeado desde la entrada secundaria hasta que rebosa. Las ventajas principales de esta opción son: la unión contendrá cualquier material contaminante y lo mantendrá fuera de la conexión estructural y esa base sólida sellada formada por la unión, para soportar el peso del cemento, por lo tanto, la posibilidad de caída a través de la superficie de fondo marino se elimina. Por otra parte, las principales desventajas de este método serían: se debe considerar la caída libre de cemento desde la entrada secundaria hasta la altura del tapón y la formación de una unión fría entre las capas de cemento.

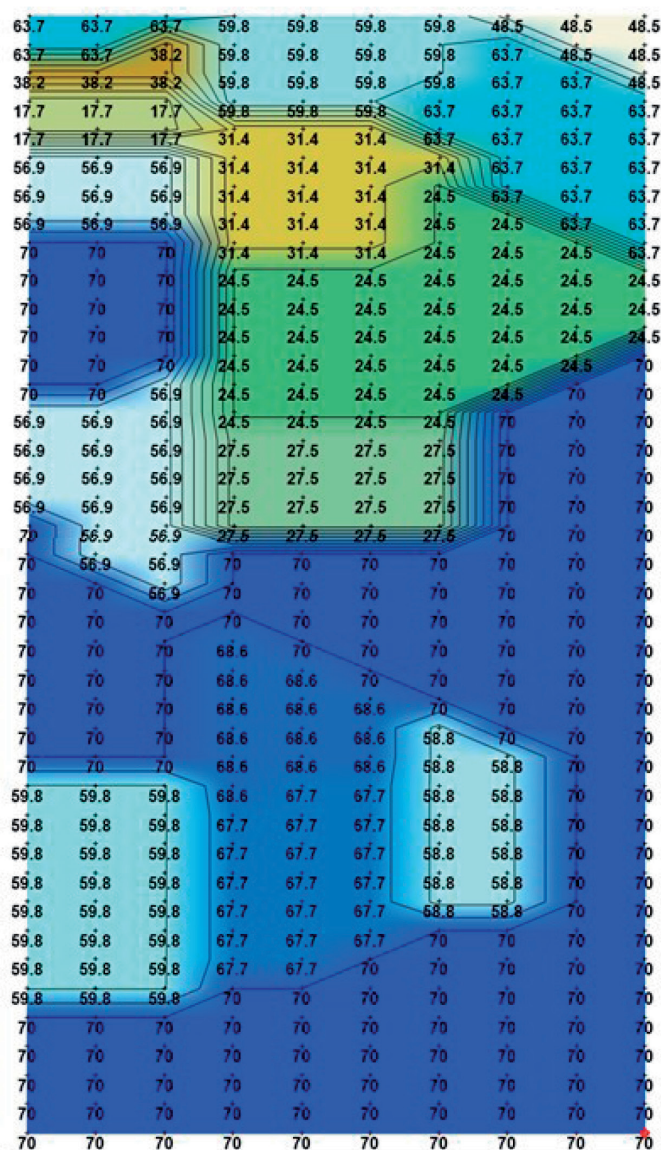


Fig. 8: Distribución espacial de la resistencia del cemento en el muro ensayado

La importancia del procedimiento seguido para esta prueba se basa en el protocolo definido el cual podría ser utilizado y repetido para el resto de parques eólicos marinos que plantean llevar a cabo una instalación basada en pilotes pre-pilotados. Esto ayudará a la industria de la eólica marina a: 1º reducir los costes de fabricación en la medida en la que el sistema de inyección de cemento (tuberías, mangueras, equipos de bombeo ...) pueda ser optimizado, 2º reducir los costes de instalación (los cuales pueden incrementarse de forma significativa si hay necesidad de repetir las operaciones de cimentación por problemas durante la fase de bombeo del cemento, que pueden conducir en el peor de los casos a tener que desinstalar la jacket y reiniciar de nuevo el proceso de instalación y cementado), 3) reducir los posibles problemas estructurales que puedan surgir en el futuro debido a una mala conexión entre el pilote y el jacket. Durante las operaciones en alta mar, hay muy poco margen para el error, ya que los tiempos muertos de los barcos son muy costosos, y no es posible rectificar los trabajos en el caso de que la conexión pilote-jacket, a través de la unión de cemento, no funcione como se esperaba. En resumen, este trabajo pretende dar una orientación de cómo realizar de formar correcta la inyección de cemento en las operaciones en alta mar con el fin de evitar problemas de segregación en el cemento en la conexión pilote-jacket.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Banos R, Manzano-Agugliaro F, Montoya FG, et al. "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15(4). p. 1753-1766. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.008>
- [2] Perea-Moreno AJ, García-Cruz A, Novas N, et al. "Rooftop analysis for solar flat plate collector assessment to achieving sustainability energy". *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 148. p. 545-554. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.019>
- [3] Manzano-Agugliaro F, Alcayde A, Montoya FG, et al. "Scientific production of renewable energies worldwide: an overview". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 18. p. 134-143. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.020>
- [4] Hernández-Escobedo Q, Saldaña-Flores R, Rodríguez-García ER, et al. "Wind energy resource in Northern Mexico". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 32. p. 890-914. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.043>
- [5] Hernández-Escobedo Q, Manzano-Agugliaro F, Zapata-Sierra A. "The wind power of Mexico". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14(9). p. 2830-2840. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.019>
- [6] Gadad S, Deka PC. "Offshore wind power resource assessment using Oceansat-2 scatterometer data at a regional scale". *Applied Energy*. 2016. Vol. 176. p. 157-170. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.046>
- [7] Bonou A, Laurent A, Olsen SI. "Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application". *Applied Energy*. 2016. Vol. 180. p. 327-337. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.058>
- [8] Montoya FG, Manzano-Agugliaro F, López-Márquez S, et al. "Wind turbine selection for wind farm layout using multi-objective evolutionary algorithms". *Expert Systems with Applications*. 2014. Vol. 41(15). p. 6585-6595. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2014.04.044>
- [9] Lee D, Lee T. "Basic design of jacket substructures for the south-west offshore wind farm project in Korea". *European Wind Energy Association Conference and Exhibition 2014, EWEA 2014*. Conference Paper.
- [10] Ku CY, Chien LK. "Modeling of Load Bearing Characteristics of Jacket Foundation Piles for Offshore Wind Turbines in Taiwan". *Energies*. 2016. Vol. 9(8). p. 625. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en9080625>
- [11] Li L, Gao Z, Moan T, et al. "Analysis of lifting operation of a monopile for an offshore wind turbine considering vessel shielding effects". *Marine Structures*. 2014. Vol. 39. p. 287-314. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2014.07.009>
- [12] Li L, Acero WG, Gao Z, et al. "Assessment of Allowable Sea States During Installation of Offshore Wind Turbine Monopiles With Shallow Penetration in the Seabed". *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2016. Vol. 138(4). p. 041902. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4033562>
- [13] Shi W, Han J, Kim C, et al. "Feasibility study of offshore wind turbine substructures for southwest offshore wind farm project in Korea". *Renewable Energy*. 2015. Vol. 74. p. 406-413. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.039>
- [14] Roussel N. "A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications". *Cement and Concrete Research*. 2006. Vol. 36. p. 1797-1806. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.025>
- [15] Gelade, P., Le Roy, R., Boucenna, I., & Flaud, P. (2002). Stability of cement grout: Study of sedimentation phenomena. *Applied Rheology*, 12(1), 12..
- [16] Nguyen VH, Remond S, Gallias JL. "Influence of cement grouts composition on the rheological behavior". *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. p. 292-300. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.015>
- [17] Perrot A, Lecomte T, Khelifi H, et al. "Yield stress and bleeding of fresh cement pastes". *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol.42(7). p. 937-944. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.03.015>
- [18] Hoang QG, Kaci A, Kadri EH, et al. "A new methodology for characterizing segregation of cement grouts during rheological tests". *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 96. p. 119-126. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.008>
- [19] EN BS. 12350-6. "Testing Fresh Concrete Density". *British Standards Institution, London*, 2009.
- [20] CSN EN. 12350-8 Testing fresh concrete-Part 8: Self-compacting concrete-Slump-flow test. 2010.
- [21] Oliveira MJ, Ribeiro AB, Branco FG. "Curing effect in the shrinkage of a lower strength self-compacting concrete". *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 93. p. 1206-1215. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.035>
- [22] EN, T. S. 12390-2, "Testing hardened concrete-Part 2: Making and curing specimens for strength tests". *Brussels, Belgium: European Committee for Standardization*, 2009.