

Exploraciones geotécnicas para fundaciones de aerogeneradores en mar abierto

Geotechnical explorations for foundations of offshore wind energy converters

Fecha de entrega: : 12 de Marzo 2010

Fecha de aceptación: 28 de Mayo 2010

Andrés Vásquez¹ e Ingo Weidlich²

¹Instituto para la construcción con acero, Leibniz Universität Hannover, Appelstrasse 9A D-30167 Hannover, Alemania, vasquez@stahl.uni-hannover.de

²ACP Grundbauplanung, Max-Dohrn-Strasse 10, 10589 Berlín, Alemania, weidlich@acp-grundbau.de

Las construcciones que se realizan en mar abierto están expuestas principalmente a solicitaciones de carga variables que provienen de diferentes direcciones. Una gran parte de estas solicitaciones que actúan en la estructura son cargas de olas, corrientes marinas y viento. Por consiguiente, la transferencia de cargas al suelo de fundación es bastante compleja. Para realizar un dimensionamiento óptimo de la fundación, es necesario realizar un modelo del comportamiento del subsuelo a lo largo de la vida útil de la estructura. Por esta razón, la interacción suelo - estructura de fundación es actualmente objeto de muchas investigaciones (Achmus y Abdel-Rahman 2004, 2005, 2007). Una estimación del comportamiento del subsuelo es posible solamente a través de exploraciones geofísicas y particularmente a través de exploraciones geotécnicas como perforaciones, sondajes como por ejemplo CPT y ensayos de laboratorio de mecánica de suelos. Ya que los sondajes CPT son más económicos en comparación a las perforaciones, estos son preferidos en las exploraciones geotécnicas. Sin embargo, los resultados de los sondajes CPT deben ser validados y correlacionados con resultados de perforaciones realizadas en el área de exploración. Por consiguiente, la tarea más difícil en una exploración geotécnica, es elegir la correcta distribución de sondajes y perforaciones en el área de exploración.

Constructions carried out offshore are mainly exposed to variable loads which act from different directions. These variable loads acting on structures come from waves, marine currents and wind. Therefore, load transfer from the structure to the ground is complex. To perform an optimum design of the foundation, it is necessary to model the subsoil response during the lifespan of the structure. For this reason, the soil - foundation structure interaction is currently under intense research (Achmus and Abdel-Rahman 2004, 2005, 2007). An estimation of the subsoil response is only possible by means of geophysical explorations and in particular by means of geotechnical exploration such as drilling boreholes, in situ testing such as CPT (Cone Penetration Test) and soil mechanics laboratory testing. Since in situ CPT testing can be more economic in comparison to drilling boreholes, the former is preferred as geotechnical exploration. However, results from CPT testing should be validated and correlated with borehole results obtained in the exploration area. Consequently, the hardest task in a geotechnical exploration is to choose the more adequate distribution of in situ testing and boreholes within the exploration area.

Keywords: offshore wind turbines, North Sea, geotechnical explorations, boreholes, CPT testing

Palabras clave: aerogeneradores en mar abierto, Mar del Norte, exploraciones geotécnicas, perforaciones, ensayo CPT

Introducción

Para la construcción de obras en mar abierto rigen actualmente una serie de guías y recomendaciones internacionales, entre las cuales se puede mencionar, las de la sociedad de clasificación de naves Germanischen Lloyd (GL 2005) y la de la fundación Det Norske Veritas (DNV 2004). En ellas se definen los lineamientos para la ejecución, planeación y construcción de obras en mar abierto, particularmente

para aerogeneradores. Además en Alemania son válidas las recomendaciones de la oficina federal para la navegación marítima e hidrografía (BSH 2007). Una de las normas más importantes para la construcción de plataformas para la extracción de petróleo y gas, es la del instituto estadounidense de petróleo (API 1993). En todas éstas se dan a conocer los requerimientos para la realización de investigaciones geotécnicas.

La planeación técnica y la instalación de aerogeneradores en mar abierto exigen tener conocimiento sobre las propiedades del subsuelo, principalmente en aquellos sitios donde se construirá la fundación. Esto es necesario al momento de realizar una optimización técnica y económica de la fundación. Según la profundidad del lecho marino los aerogeneradores con una potencia nominal de 5 MW son construidos sobre diferentes tipos de estructuras portantes (Schaumann *et al.* 2007). En lugares en donde el lecho marino se encuentra alrededor de los 20 m de profundidad, se utilizan fundaciones portantes tipo monopilote o bases gravitacionales macizas (Lesny 2008b; Villalobos 2009). Otros sistemas de fundación portantes como enrejados y trípodes son anclados al subsuelo por medio de pilotes y son utilizados en profundidades del orden de los 20 a 45 m. Al contrario de muchas otras obras de ingeniería que son fundadas en tierra firme las estructuras en mar abierto son solicitadas constantemente por cargas dinámicas, provenientes de diferentes direcciones.

Las dimensiones de las fundaciones pueden aumentar considerablemente con la profundidad del lecho marino. Esto es causado principalmente por la acción de las cargas hidrodinámicas sobre las fundaciones, las cuales pueden llegar a ser hasta 10 veces mayores a las cargas aerodinámicas. Como consecuencia de lo anterior el momento aplicado por las fuerzas de oleaje y corrientes pueden duplicar el momento aplicado por las solicitaciones aerodinámicas (Lesny 2008). Debido a esto, es necesario para el dimensionamiento la determinación de las reacciones del suelo. Esto debe ser tenido en cuenta cuando se realizan las exploraciones geofísicas, particularmente en la realización de exploraciones geotécnicas del subsuelo como son las perforaciones y los sondeos.

Para realizar un informe geotécnico es necesario llevar a cabo investigaciones directas e indirectas del subsuelo. Por medio de los métodos directos, la muestra de suelo es extraída de perforaciones, con lo cual la muestra es forzada a que se altere durante la extracción del testigo. Al realizar ensayos de laboratorio a estos testigos, se obtienen valores de los parámetros de diseño. Por otro lado los métodos directos son mucho más costosos, en comparación con los métodos indirectos. En el ensayo de cono CPT una sonda es introducida en el subsuelo, con la cual se determinan los valores de la resistencia por punta q_c

y la resistencia por fricción en el fuste de la sonda f_s . Con estos parámetros es posible determinar el espesor de los estratos y los diferentes tipos de suelo presentes.

A continuación se presenta una descripción sobre el desarrollo de la energía eólica en Alemania. Posteriormente se describen los diferentes tipos de exploraciones geotécnicas y sus características para su desarrollo en mar abierto.

Situación actual en Alemania

En agosto del 2009 se instalaron y fueron puestos en servicio (en fase de prueba) los primeros seis aerogeneradores de la clase Multibrid M5000, soportados sobre el sistema de fundación portante tipo trípode. A mediados del mes de noviembre del año 2009 se instalaron adicionalmente seis aerogeneradores de la clase REpower 5M, los cuales descansan sobre estructuras portantes tipo enrejado. En abril del año 2010 culminó la fase de prueba y fue puesto en servicio el primer parque eólico Alemán Alpha Ventus. Ambos sistemas de fundación fueron anclados con pilotes. La unión de estas subestructuras con la fundación de pilotes, es realizada por medio del método constructivo *grouted joint* (Schaumann *et al.* 2008). En el parque eólico Alpha Ventus, los aerogeneradores presentan una altura de izaje cercana a los 90 m, un diámetro de rotor de 126 m y una profundidad del lecho marino cercana a los 30 m. En total se instalaron en Alpha Ventus 12 aerogeneradores, obteniéndose así una potencia nominal de 60 MW. Este parque eólico se localiza en el Mar del Norte a 45 km de la Isla Borkum, fuera del mar territorial de 12 millas y dentro de la zona económica exclusiva ZEE de la República Federal Alemana (Alpha Ventus 2010).

Con este parque eólico Alpha Ventus comenzó la explotación de energía eólica en mar abierto en la Republica Federal de Alemania. Además este parque servirá para la investigación y desarrollo de la energía eólica a través de los proyectos RAVE (Research at Alpha Ventus). El gobierno alemán se ha propuesto la meta de reducir hasta el año 2020 las emisiones de dióxido de carbono hasta en un 40% con respecto a los niveles registrados en 1990. Como consecuencia de esta medida, se planea hasta el año 2030 la instalación de unos 25.000 MW de potencia. Para lograr estas metas se construirán en mar abierto alrededor de 20 parques eólicos (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2009).

La experiencia ganada con el parque eólico Alpha Ventus se podrá utilizar y aplicar en construcciones futuras de aerogeneradores en mar abierto. Hasta ahora no existe mucha experiencia a nivel mundial en la construcción y puesta en servicio de parques eólicos en mar abierto, que se encuentren a grandes profundidades marítimas y localizados a grandes distancias de la costa. Por otro lado existen actualmente tres plataformas que sirven como base para la investigación de la energía eólica en el Mar del Norte y en el Mar Báltico. Una de estas plataformas es Fino I (GL 2010), localizada en el Mar del Norte y puesta en servicio en septiembre del 2003. Una segunda plataforma Fino II fue instalada en la Mar Báltico, localizada al norte de la isla Rügen. Y por último una tercera plataforma Fino III fue puesta en servicio en el verano del 2008 y al igual que la plataforma Fino I, también fue instalada en el Mar del Norte pero en las cercanías de la isla Sylt. Las plataformas son utilizadas para hacer mediciones de temperatura, salinidad, corrientes marinas y velocidad y dirección del viento.

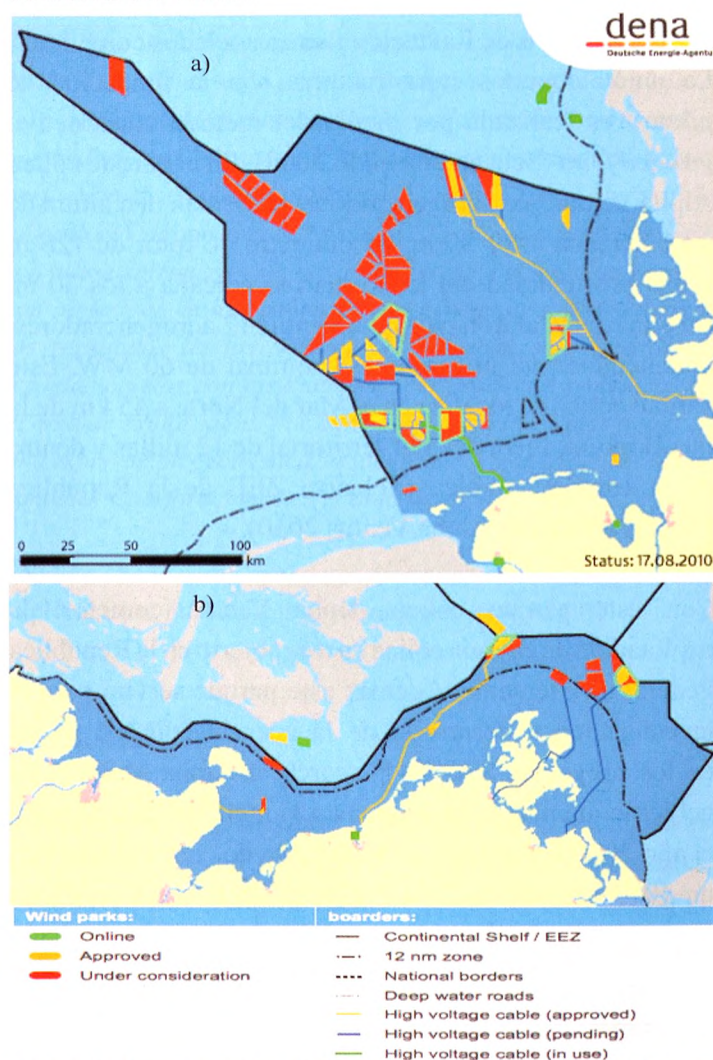


Figura 1: Zonas marítimas alemanas para la explotación eólica en: a) Mar del Norte y b) Mar Báltico (dena 2010)

Las zonas marítimas relevantes para la explotación de la energía eólica en Alemania se encuentran localizadas en el Mar del Norte y en el Mar Báltico (Figura 1). La aprobación de la licencia de construcción para los parques eólicos en la zona económica exclusiva ZEE es determinada por la oficina federal para la navegación marítima e hidrografía (BSH). Además otros requisitos legales están descritos en las reglamentaciones para instalaciones costa afuera “Seeanlagenverordnung SeeAnlV” y en la ley federal para la protección de la vida silvestre “Bundesnaturschutzgesetz BNatSchG”.

Exploraciones del subsuelo requeridas

La posibilidad de obtener datos oficiales sobre los parámetros del subsuelo es muy limitada. Debido a esto es necesario realizar un reconocimiento geológico donde estén demarcadas las zonas de exploración, estén definidos los costos de exploración geotécnica y donde eventualmente puedan ser identificados los diferentes lugares donde se encuentran los suelos más favorables para la instalación de aerogeneradores en la región marítima.

La investigación del subsuelo se basa principalmente en exploraciones y ensayos de laboratorio tanto geológicos como geotécnicos, las cuales permiten definir el tipo de fundación a emplear. La investigación se debe llevar a cabo en una cierta extensión, teniendo en consideración que se deben determinar con anticipación todas las propiedades relevantes del subsuelo antes de la instalación de la obra. Para esto se puede diferenciar los métodos para las investigaciones geotécnicas de los métodos geofísicos. Estos últimos se tratan acerca de métodos indirectos como por ejemplo el método batimétrico, ultrasónico, de reflexión sísmica y escaneo acústico. Entre tanto los métodos geotécnicos entregan información característica directa e indirecta del subsuelo. Por medio de perforaciones o excavaciones se extraen muestras de suelos, con las cuales se obtiene información directa del subsuelo. A través de sondajes se obtienen valores indirectos del subsuelo, con lo que es posible determinar los espesores de las estratificaciones y los diferentes tipos de suelo.

Estructura geológica en el Mar del Norte

El subsuelo del Mar del Norte se localiza en una zona que fue muchas veces zona continental y que durante

la época glacial del Pleistoceno (8.000 a 2.5 millones de años) estuvo cubierta por grandes masas de hielo. Además se caracteriza principalmente por los sistemas de cauces o lavados, originados probablemente durante la glaciación kansaniense (500.000 años hasta 350.000 años a. C). Se puede considerar que estos cauces se originaron por la erosión debido al flujo de deshielos, depositándose sedimentos tanto de arcillas como de limos. Además el movimiento originado por los glaciares pudo ser otra causa que diera origen a estos sistemas. Las condiciones del subsuelo en esta zona son heterogéneas debido a lo cual se pueden encontrar diferentes tipos de suelos (Lesny 2008).

El subsuelo del Mar del Norte fue explorado a finales de los años 60 en el marco del reconocimiento para exploraciones petroleras (Sindowski 1970). En total se realizaron 23 perforaciones que alcanzaron profundidades de hasta 45 m bajo el lecho marino. La Figura 2a muestra la localización de la zona explorada, en la cual se aprecian los niveles del lecho marino, la localización de las perforaciones y los perfiles geológicos desarrollados.

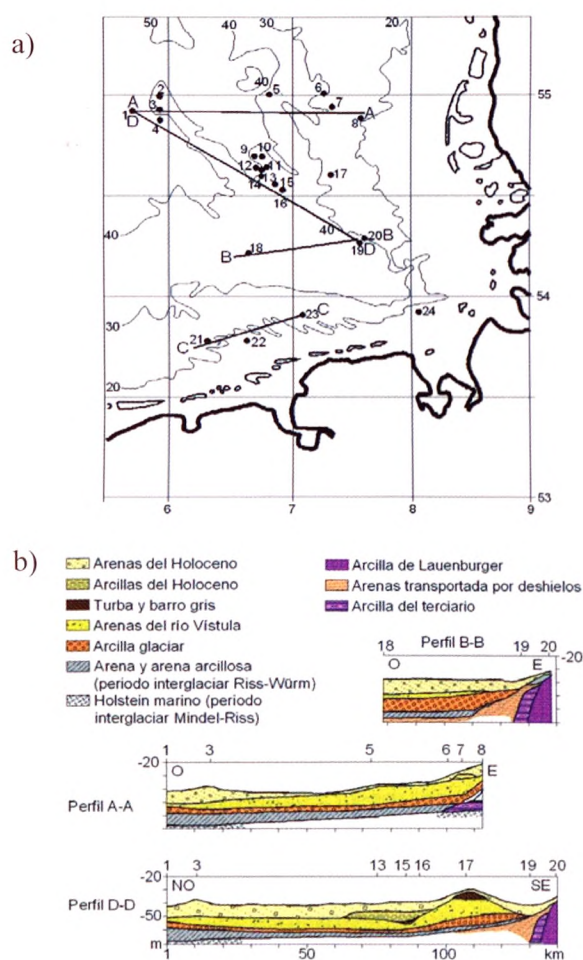


Figura 2: a) Localización de perforaciones y b) perfiles geológicos en el Mar del Norte (Sindowski 1970)

De la Figura 2b se puede observar que la formación de la estructura geológica en el perfil A-A es bastante regular. Las capas superiores están compuestas por estratificaciones de arenas y arcillas del holoceno, que alcanzan espesores entre 10 y 3 m en el oeste y entre 6 y 8 m en el este, respectivamente. Bajo estas capas se encuentra un desarrollo de depósitos de arcillas del periodo glacial y arenas del periodo interglacial Riss-Würm.

La irregularidad de la estructura en el perfil geológico D-D se singulariza por la disminución en la capa de arenas del Holoceno, desde el noroeste hacia el sureste. Debajo de esta capa descansan depósitos de turbas del Pleistoceno, al igual que sedimentos de arcilla del Holoceno. En áreas alrededor de la coordenada longitud 7,5° este, hay presencia tanto de arcillas Lauenburger como arcillas del Terciario, cuyos espesores varían significativamente.

Investigaciones geotécnicas

Las perforaciones y las excavaciones pertenecen al grupo de investigaciones geotécnicas por medio de métodos directos. En proyectos en mar abierto sólo se realizan perforaciones, ya que en este caso las excavaciones no pueden ser realizadas. En relación a los métodos indirectos se pueden nombrar los sondajes a presión, por golpeteo, por hincado con excavación previa, además el ensayo con barreno helicoidal y de carga lateral directamente en la perforación. De los mencionados anteriormente generalmente se emplean en mar abierto los sondajes a presión.

Perforaciones

En Alemania se llevan a cabo las perforaciones de acuerdo a la norma DIN 4021, las cuales se pueden diferenciar según el procedimiento de perforación a utilizar, la clase de muestra a extraer y el tipo de equipo de perforación a emplear. El modo de perforación puede ser por rotación, presión, golpeteo o hincado. Por medio de estas perforaciones se pueden extraer muestras de testigos inalterados, alterados o completamente fracturados. Para la extracción de muestras se puede emplear por un lado una barra sencilla, de interior doble, para hincado y por otro lado el barreno helicoidal o el barreno tipo cuchara.

Para obtener testigos de buena calidad es muy importante

la selección del método de perforación y el tipo de equipo de perforación a emplear. Además de lo mencionado anteriormente, la calidad de la muestra depende también de la composición del suelo. Entonces en suelos cohesivos duros se obtiene un mejor grado de calidad que en suelos granulares sueltos (véase Tabla 1). Los costos de perforación de los diferentes métodos varían considerablemente, por lo tanto se debe analizar cual método es el más económico para un determinado tipo de suelo según el grado de calidad que se desea obtener.

Tabla 1: Grado de calidad para muestras de suelo según norma DIN 4021

Grado de calidad	Muestra de suelo inalterada en	Deben ser determinados:	
1 ¹	Z, w, ρ , k, E_s , τ_f	Límite de la capa fina Clasificación del suelo, Z Límites de consistencia índice de consistencia Valores límites de la densidad aparente Densidad de grano Contenido de materia orgánica	Contenido de humedad, w Densidad del suelo húmedo, ρ Porosidad, n Permeabilidad, k Módulo de rigidez, E_s Resistencia al corte, τ_f
2	Z, ρ , k	Límite de la capa fina Clasificación del suelo Límites de consistencia índice de consistencia Valores límites de la densidad aparente Densidad de grano	Contenido de materia orgánica Contenido de humedad Densidad del suelo húmedo Porosidad Permeabilidad
3	Z, w	Límite de la capa fina Clasificación del suelo Límites de consistencia índice de consistencia	Valores límites de la densidad aparente Densidad de grano Contenido de materia orgánica Contenido de humedad
4	Z	Límite de la capa fina Clasificación del suelo Límites de consistencia índice de consistencia	Valores límites de la densidad aparente Densidad de grano Contenido de materia orgánica
5	(también cambia Z, muestra de suelo inalterada)	Siguiendo capa	

¹ el grado de calidad 1 se diferencia del grado 2 debido a que la estructura de grano queda inalterada

El objetivo de las pruebas con ganancia de testigos es obtener una muestra del subsuelo lo menos alterada posible. El procedimiento de perforación deberá ser escogido de acuerdo a la geología local. Para la toma de muestras inalteradas, con un grado de calidad entre 1 a 3, se emplean las barras para extracción de testigos. El método más económico se realiza con una barra sencilla, sin embargo ésta es apropiada solamente en suelos cohesivos muy compactos. Esto se debe a que el testigo entra en contacto directo con la barra girando y en suelos cohesivos muy blandos se presenta el riesgo de la alteración de la muestra. Además el testigo entra en contacto directo con el lavado y se puede presentar una pérdida del material fino contenido en el testigo. En suelos cohesivos muy blandos se debe emplear una barra de interior doble (véase Figura 3). Por medio de ésta, la muestra de suelo se protege con un tubo de PVC que se encuentra en el interior y a lo largo de la barra. Este tubo garantiza que el material del testigo no se degrade durante el lavado y además que no haya

riesgo que la muestra gire, lo que garantiza que ésta no se altere.

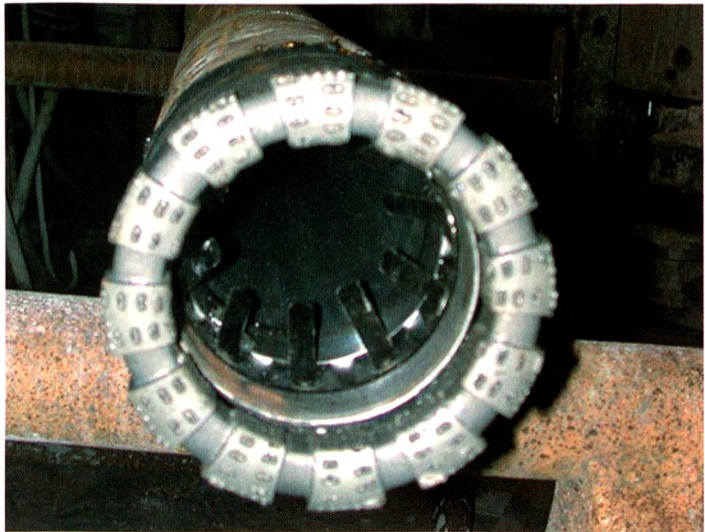


Figura 3: Barra doble con extractor de testigo y tubería interior (inliner)

En arenas se prefiere el uso de perforaciones por hincado, en primer lugar porque son más económicas y en segundo lugar porque las perforaciones por rotación para la extracción de testigos no son apropiadas para este tipo de suelos. La perforación por hincado se puede emplear en suelos arcillosos y arenosos, que no estén demasiado compactos. La barra para hincado está compuesta por un tubo de perforación sencillo con retenedor de testigos en su extremo inferior y un cabezal en su extremo superior. Esta barra es introducida en el subsuelo por medio de un martinete que hincó la tubería en el subsuelo de acuerdo a un número determinado de golpes. De esta manera no es necesario emplear el lavado, con lo cual no se presenta así el riesgo de degradación de la muestra.

Por medio de barrenos o cucharas se extraen muestras de suelo completamente alteradas, por lo tanto la estructura del grano es afectada considerablemente (véase Figura 4a). Por consiguiente únicamente se puede obtener muestras de suelo con un grado de calidad no superior a 3. Este método es empleado cuando no es posible extraer testigos o no sea necesario obtener un alto grado de calidad (véase Tabla 1). Este procedimiento es apropiado para todo tipo de suelo y se puede emplear hasta cuando exista la presencia de obstáculos geológicos como bloques erráticos.

Cuando hay presencia de obstáculos geológicos compactos, se deben utilizar equipos de fresado o de cincheles (véase Figura 4b). Debido a esto la estructura del suelo queda prácticamente destruida y por consiguiente sólo se puede

obtener fragmentos de la formación geológica. Estos fragmentos son transportados con el lavado y en algunos casos es posible reconocer los horizontes de cada una de las capas geológicas.



Figura 4: a) Barrenos y b) tubería para fresado

Inmediatamente después de ser extraídos los testigos, estos deben ser colocados en recipientes a prueba de humedad y ser tendidos para evitar en lo posible, perturbaciones en la muestra. Además la muestra deberá ser transportada al laboratorio lo más pronto posible para disminuir los posibles efectos de alteración.

Ensayos CPT

En mar abierto se emplea usualmente el ensayo de penetración de cono estático CPT (Cone Penetration Test). En Alemania este ensayo está normalizado según la norma DIN 4094 Parte 1. Durante este ensayo una sonda es introducida en el subsuelo a una velocidad constante de penetración de 2 cm/s. La sonda tiene un tamaño fijo, en donde la punta presenta un área que puede variar entre 10 y 15 cm² y el fuste o manguito con una superficie lateral entre 150 y 225 cm². En la Figura 5 se muestran los diferentes tipos de sondas utilizadas en un sondeo CPT y CPTU.

En este ensayo se mide la resistencia unitaria a la fricción en el fuste f_s , la resistencia del cono a la penetración en la punta q_c y de acuerdo al instrumento a emplearse también se puede medir la presión de poros u (CPTU).



Figura 5: Conos para el ensayo CPT

Con el uso de celdas de carga electrónicas se mide la resistencia por fricción lateral y la resistencia de punta del cono a la penetración, adicionalmente la presión de poros es medida con transductores a través de un filtro. La profundidad de penetración es determinada generalmente por un dispositivo de medición en el lugar de avance. Durante estas mediciones es necesario hacer una medición de inclinación cada 15 m. Esta inclinación es determinada por un inclinómetro instalado en la punta de la sonda, cuya desviación máxima medida en el eje del armazón no debe sobrepasar 1 mm/m. Es necesario hacer mediciones de referencia con el inclinómetro antes y después del sondaje, las cuales se realizan a la temperatura que se encuentra el subsuelo, esto para asegurar la correcta medición de los parámetros. En los ensayos que se realizan en mar abierto, se deben llevar a cabo estas mediciones en el lugar donde se realiza el sondaje. Además hay que tener en cuenta que los valores medidos de la presión de poros deben ser corregidos de acuerdo a las condiciones de presión hidrostática bajo el agua para así obtener el exceso de presión de poros u' .

El equipo de ensayo debe ser calibrado regularmente. Antes de realizar ensayos CPT es necesario inspeccionar el equipo con el objetivo de encontrar deterioros o deformaciones. Adicionalmente se deben limpiar los anillos de cierre hermético e inspeccionarlos para ver si presentan algún desgaste.

Al escoger la celda de carga es importante prestar atención en la posibilidad de usar una gran parte de su rango de medición durante el registro de la resistencia por fricción

en el fuste y la resistencia de punta del cono a la penetración. Por ejemplo, si se usan celdas de carga que son fabricadas y calibradas para suelos muy duros en suelos blandos, se obtienen resultados no confiables debido a la falta de precisión en el rango de medición. Por el contrario al utilizar en suelos duros celdas de carga muy sensibles, las cuales son diseñadas especialmente para suelos blandos, esto puede llevar a la celda a una sobrecarga y por consiguiente a su deterioro.

Requisitos y condiciones en mar abierto

Los trabajos realizados en el mar están muy influenciados por el oleaje y el viento. En mar abierto hay que tener en consideración las altas velocidades del viento. Cuando hay aviso de tormenta y de marea alta, se deben suspender los trabajos y los navíos que realizan trabajos en el mar deben regresar a puerto o buscar la forma de evadir la tormenta. Debido a esto, todos los trabajos en el mar tienen que ajustarse a los pronósticos del tiempo y se debe considerar la posibilidad de suspensión y replanteo de los trabajos por presencia de tormentas o por la mala condición meteorológica.

En contraste con ensayos realizados en tierra firme, en mar abierto es muy difícil mantener una fuerza y velocidad de avance constante durante el ensayo CPT, ya que los barcos y las plataformas son balanceados por las olas y el viento. Por lo general se debe considerar, que en el Mar del Norte el subsuelo se encuentra muy compacto, con lo que durante este ensayo son necesarias mayores fuerzas de empuje para poder penetrar en el subsuelo.

Equipos y procedimiento

Generalmente se llevan a cabo el sondaje y las perforaciones en mar abierto desde pontones o barcos de forma similar como se realizan en tierra firme, por medio de un vehículo equipado con los instrumentos de medición. Sin embargo, los equipos a emplear en mar adentro se diferencian considerablemente y puede ser necesaria la utilización de instrumentos adicionales.

En el sitio escogido para la exploración el pontón es anclado sobre pilares portantes, que se apoyan en el lecho marino. Una vez estabilizado el pontón, el ensayo CPT se lleva a cabo desde un camión, de la misma manera como

se realiza en tierra firme (véase Figura 6a). Este procedimiento exige que el pontón se traslade de sitio, cada vez que haya que realizar un nuevo ensayo, lo que conlleva a altos costos y largos tiempos de trabajo. Por consiguiente este ensayo está limitado para profundidades en el mar no mayores a 30 ó 40 m.

Mayor movilidad ofrecen las exploraciones realizadas desde barcos (véase Figura 6b). En ellos la posición del barco es calculada por un sistema de posicionamiento global GPS. Para la realización del ensayo CPT es necesario que el barco cuente con una grúa y bastante espacio para realizar las maniobras de transporte. Las barras con la sonda son bajadas hasta el lecho del mar e introducidas en el subsuelo. Un bloque de balasto es usado como apoyo y lastre. La profundidad de penetración a la que se puede llevar la sonda de presión está limitada por la cantidad de sobrecarga disponible. Además el abastecimiento de energía eléctrica, el sistema de control para el manejo de equipos hidráulicos o motores eléctricos y la transferencia de los datos del equipo CPT se realiza por medio de cables alimentadores suministrados desde el barco.

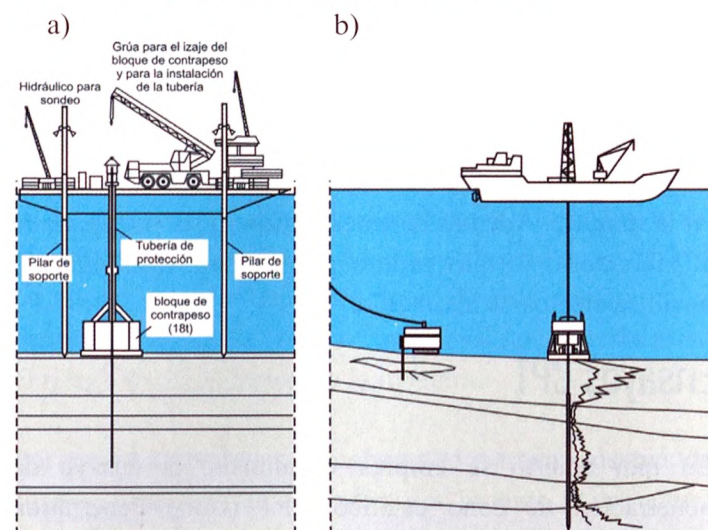


Figura 6: a) Ensayo desde un pontón y b) desde un barco también con bloque de balasto

Otro método usado en las exploraciones del subsuelo es el CPT dentro de una perforación. Primero se realiza un ensayo de penetración de cono y posteriormente se perfora a partir del fondo del sondaje. Alternadamente se lleva a cabo el CPT y la perforación hasta alcanzar la profundidad de ensayo deseada. El ensayo CPT se debe hacer por tramos no mayores a 3 m. La fuerza de empuje es aplicada por medio de un cilindro hidráulico. El equipo de sondaje es llevado por una tubería hueca, la cual es fijada lateralmente a las paredes de la perforación por

medio de un mecanismo de sujeción. Un soporte auxiliar es colocado sobre el lecho marino, el cual es usado para un mejor control durante el suministro de barras de perforación. A pesar de ser un ensayo bastante laborioso tiene la ventaja de poder alcanzar grandes profundidades de ensayo cuando hay presencia de suelos marinos densos.

Resultados típicos y análisis de resultados

En el ensayo de penetración de cono estático CPT los resultados obtenidos de resistencia por fricción en el fuste f_s , de resistencia del cono a la penetración en la punta q_c y de presión de poros u son relacionados en función de la profundidad. La relación de fricción R_f se obtiene dividiendo la resistencia por fricción en el fuste por la resistencia a la penetración en la punta, ambos parámetros relacionados a una misma profundidad. Estos resultados son graficados tal como se muestra en la Figura 7.

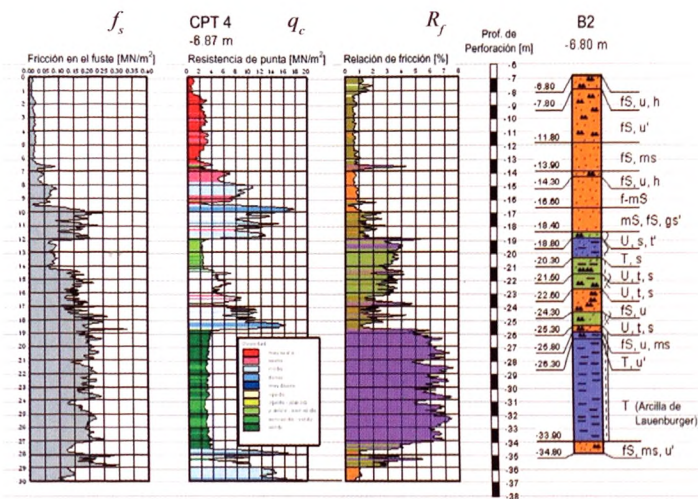


Figura 7: Resultados de un ensayo CPT

Después de realizar un ensayo CPT se debe efectuar una perforación exploratoria en el área de investigación lo más próxima posible al lugar del ensayo. Esto para comparar y correlacionar los resultados obtenidos del CPT con la información de la perforación. Esto es necesario, ya que durante el ensayo CPT no es posible examinar directamente el suelo y debido a esto se puede hacer una interpretación errónea de los resultados. En los alrededores de una perforación se pueden realizar más exploraciones del subsuelo por medio de ensayos CPT, con lo cual se evita hacer perforaciones adicionales, ya que éstas son muy costosas. Esto se puede hacer siempre y cuando los resultados de estos CPT concuerden o se ajusten con los resultados de la perforación.

Antes de realizar la comparación de los resultados de las perforaciones con los del CPT, ya se tiene a disposición información sobre el subsuelo. Por ello se puede reconocer en gravas o arenas valores altos de resistencia del cono a la penetración en la punta y valores bajos de la relación de fricción. Por el contrario en limos y arcillas se presentan valores bajos de resistencia por punta y valores altos de la relación de fricción. Un punto de referencia se presenta en la Figura 8 de acuerdo a la norma DIN 4094 para suelos que se encuentran en el norte de Alemania. No obstante este diagrama solo muestra una tendencia, por ello es necesario el uso de modelos de ajuste para casos particulares (Jamiołkowski *et al.* 1988; Lunne *et al.* 1997).

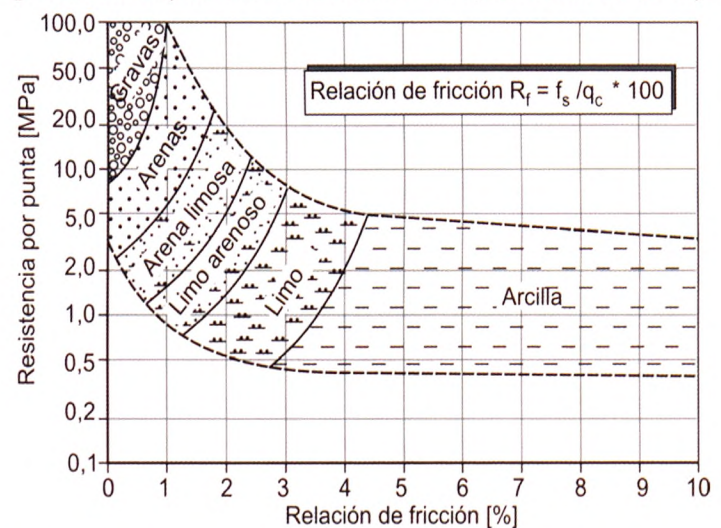


Figura 8: Interpretación de los resultados del ensayo CPT según la norma DIN 4094

Análisis e interpretación de resultados

Antes de hacer la interpretación detallada de los resultados se deben considerar características particulares de los depósitos de suelo que puedan afectar las mediciones. En especial las condiciones locales en el momento de realizar el sondaje pueden influir en los resultados. El análisis y la interpretación de ensayos de penetración de cono estático que se realizan en mar abierto deben ser llevadas a cabo por personal altamente calificado, debido a la complejidad y a los requerimientos que se exigen en las fundaciones en mar abierto.

El tipo de estructura de los granos tiene una gran influencia en los parámetros del suelo. Arenas con gran compresibilidad presentan valores muy bajos de resistencia por punta y en algunos casos valores altos en la resistencia por fricción lateral. Esta resistencia por fricción lateral depende del

tipo de arena. Las arenas con algún contenido de carbón presentan valores bajos en esta resistencia, en cambio en arenas incompresibles con contenido de cuarzo, estos valores son altos. Además una cementación de los granos lleva a una disminución en la compresibilidad del suelo y con esto a un aumento en la resistencia por punta. Esto se presenta ante todo en depósitos geológicamente muy antiguos y por consiguiente se debe considerar este hecho durante la interpretación de los resultados. Un aumento brusco de la resistencia por punta puede ser causado por una reducción de la compresibilidad del suelo. Si el tamaño de los granos del suelo representan una fracción significativa del diámetro de la sonda, entonces éste se debe interpretar como un cuerpo rígido. Debido al choque de la sonda con guijarros o cuerpos rocosos, se pueden originar saltos en el perfil del ensayo, por lo tanto esto también debe tenerse en cuenta durante el análisis de resultados. Además partículas gruesas de gravas se pueden incrustar en la sonda, con lo que pueden dañarla.

Algunas veces no es fácil reconocer el límite entre diferentes estratos en los perfiles de un ensayo CPT. Ensayos de laboratorio han mostrado que el material encontrado al introducir la punta de la sonda antes y después del límite entre dos estratos de suelo, tiene una gran influencia en la resistencia por punta. Por lo tanto, antes del avance de la sonda en estratos adyacentes, éstas deben ser tenidas en cuenta. De igual forma, a pesar que la sonda ha alcanzado un nuevo estrato, las propiedades del estrato anterior deben ser consideradas durante el registro de los valores. En consecuencia, cuando existe la presencia de intercalaciones de lentes de suelos, no siempre se registran las propiedades mecánicas reales de estos lentes durante el ensayo. Este efecto se da muy frecuentemente en suelos rígidos y corresponde a una zona de influencia entre 10 y 20 veces el diámetro de la sonda. En suelos blandos se presenta esta zona de influencia entre 2 y 3 veces el diámetro de la sonda. Por consiguiente es posible registrar la resistencia máxima por punta en estratos de suelos blandos a partir de espesores mayores a 100 mm y en capas de suelos duros en espesores superiores a los 750 mm. Por lo tanto los lentes de suelo son difíciles de distinguir, por ello es necesario hacer una perforación de referencia.

Durante el análisis de resultados se pueden originar errores, si la velocidad constante de penetración no es tenida en cuenta. Un aumento de 10 veces la velocidad exigida del

ensayo de 2 cm/s, tiene como consecuencia un aumento de la resistencia por punta entre un 10 a 20% en arcillas duras y entre un 5 a 10% en arcillas blandas.

Antes de hacer el análisis final de los resultados se debe examinar la diferencia entre las mediciones de referencia antes y después del ensayo para ver si se encuentran en un rango razonable. Hay que considerar la medición de referencia de los equipos en el sitio donde se realizó el ensayo. Además la inclinación de las barras no debe sobrepasar el valor máximo permitido de 1 mm/m y durante el análisis de resultados es necesario relacionar la inclinación medida, para poder determinar los espesores de los estratos. Un control aproximado para determinar discrepancias en la medición es teniendo en cuenta la presión por punta en el subsiguiente estrato de suelo. Esta presión no debe ser menor que la tensión efectiva σ'_{v0} , así que se tiene que cumplir la condición de $\gamma'z = \sigma'_{v0} < q_c$, donde γ' es el peso unitario sumergido del suelo y z es la profundidad del sondaje.

Comentarios finales

Una interpretación adecuada del comportamiento del suelo de fundación es la base para un dimensionamiento económico y seguro de las obras en mar abierto, especialmente para fundaciones de aerogeneradores. Por medio de las exploraciones geofísicas y especialmente por medio de las exploraciones geotécnicas como perforaciones y ensayos CPT y apoyado en los ensayos de laboratorios de mecánica de suelos, los ingenieros deben tomar todas las consideraciones necesarias para la construcción de estas obras y escoger los modelos de cálculo más adecuados para la determinación de las características del suelo. Los diferentes tipos de exploraciones que se disponen actualmente, son usados especialmente en proyectos en mar abierto de gran envergadura, como son los parques para la generación de energía eólica. En este tipo de proyectos se debe considerar las condiciones climáticas más favorables durante las investigaciones geotécnicas, ya que con esto se pueden reducir considerablemente los costos de exploración y por ello del proyecto. Estas exploraciones son llevadas a cabo desde pontones o barcos, según a la profundidad que se encuentre el lecho marino. Para una buena interpretación geotécnica del subsuelo es importante diferenciar que las perforaciones

sirven para la extracción de muestras y los ensayos CPT para determinar indirectamente los parámetros de resistencia del suelo. Además es necesario considerar que la interpretación de los resultados se debe ajustar a las condiciones locales donde se encuentra la obra.

Referencias

Achmus, M. und Abdel-Rahman, K. (2004). Numerische Untersuchung zum Tragverhalten horizontal belasteter Monopile-Gründungen für Offshore-Windenergieanlagen. 19. Christian Veder Kolloquium, Graz, Österreich.

Achmus, M. und Abdel-Rahman, K. (2005). Numerische Untersuchung zum Tragverhalten von Bucketgründungen für Offshore-Windenergie-Anlagen. Abaqus Benutzerkonferenz, Nürnberg.

Achmus, M. und Abdel-Rahman, K. (2007). Numerical Modelling of Vertical Piles under Inclined Compression Loading. 12th International Colloquium on Structural and Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt.

Alpha Ventus (2010) <http://www.alpha-ventus.de>.

API American Petroleum Institute (1993). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design. API RP 2A – WSD, 20th Edition, Dallas.

BSH Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2010). <http://www.bsh.de>

BSH Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2007). Standard – Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen, Hamburg und Rostock.

BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2009). Erneubare Energie Deutschlands erste Offshore-Windräder am Netz www.erneuerbare-energien.de/inhalt/44738/4591, Nr.263/09, Berlin, 13.08.2009

dena Deutsche Energie-Agentur GmbH (2010). Interaktive Nord- und Ostseekarte zum Status der Projekte, Energiesysteme und Energiedienstleistungen, Berlin, <http://www.offshore-wind.de>, <http://www.dena.de>

DNV Det Norske Veritas (2004). Offshore Standard: DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures. Horvik, Norway.

DIN Deutsches Institut für Normung (2002). DIN 4094 Felduntersuchungen, Europäisches Komitee für Normung. Beuth Verlag Berlin.

DIN Deutsches Institut für Normung (1990). DIN 4021 Aufschluß durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben, Beuth Verlag Berlin.

GL Germanischer Lloyd (2005) Rules and Guidelines, IV Industrial Services, Part 2: Guideline for Certification of Offshore Wind Turbines, Germanischer Lloyd Industrial Services Hamburg.

GL Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH (2010). Fino – Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee <http://www.fino-offshore.de>

Jamiolkowski, M., Ghionna, V. N., Lancellotta, R., and Pasqualini E. (1988). New correlations of penetration tests for design practice. Penetration Testing 1988, ISOPT-1, DeRuiter (ed.), Balkema, Rotterdam.

Lesny, K. (2008). Gründung von Offshore-Windenergieanlagen - Werkzeuge für Planung und Bemessung, VGE Verlag GmbH, Universität Duisburg, Essen

Lesny, K. (2008b). Foundations for offshore wind energy converters - Recommendations for concept and design. *Bautechnik* **85**, Heft 8, 503-511 (en alemán)

Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Spon Press

RAVE Research at Alpha Ventus (2010) <http://rave.iset.uni-kassel.de>

Schaumann, P., Böker, C., Rutkowski, T. und Wilke, F. (2007). Tragstrukturen für Windenergieanlagen, in: Stahlbau-Kalender. Verlag Ernst&Sohn

Schaumann P., Wilke F. und Lochte-Holtgreven, S. (2008). Grout-Verbindungen von Monopile-Gründungsstrukturen-Trag- und Ermüdungsverhalten. Stahlbau, 647-658, Ernst & Sohn

Sindowiski, K.-H. (1970). Das Quartär im Untergrund der Deutschen Bucht (Nordsee). Eiszeitalter und Gegenwart: Jahrbuch der Deutschen Quartärvereinigung, Band 21, 33-46

Villalobos, F.A. (2009). Foundations for offshore wind turbines. *Revista Ingeniería de Construcción* **24** (1), 33-48