

# Fundações para Parques Eólicos Marítimos

Inara Cavalcante Avelino

Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, [inara.c.avelino@gmail.com](mailto:inara.c.avelino@gmail.com)

Wagner Rossi de Oliveira

Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, [wagnerossi89@gmail.com](mailto:wagnerossi89@gmail.com)

Julio Augusto Alencar Jr

Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, [julioalencar.1957@gmail.com](mailto:julioalencar.1957@gmail.com)

**RESUMO:** No ano da 21ª Conferência do Clima, período em que as nações discutirão um novo acordo para diminuir a emissão de gases de efeito estufa, ocorre, no Brasil, umas das maiores crises energéticas, bem como uma forte recessão econômica. Neste cenário complexo, a instalação de parques eólicos marítimos, no país, é interessantíssima, haja vista diversos fatores: aproveitamento do potencial eólico marítimo brasileiro, que pode chegar à 1.780 GW; menor dependência da matriz energética hídrica; redução das emissões de gases de efeito estufa; uso de energia limpa, renovável e abundante e que em relação às instalações terrestres são mais eficientes, porquanto os ventos em alto mar são mais fortes e mais regulares do que em terra; além da geração de empregos diretos e indiretos. O objetivo deste trabalho é, portanto, apresentar os métodos de investigação do solo, os tipos de fundações mais utilizados para diferentes ambientes geológico-geotécnicos e realizar uma retroanálise direta da fundação em *Gravity Base Foundation* do parque eólico de Thorntonbank, localizado a 30 km da costa da Bélgica, no mar do norte, através dos modelos teóricos de cálculo de capacidade de carga e da verificação da estabilidade quanto ao tombamento e ao deslizamento. Para tal, além de pesquisa bibliográfica, realizaram-se pesquisas descritiva, através do estudo de caso, e experimental. Os valores calculados de fatores de segurança em relação à estabilidade e à capacidade de carga, pelos autores, indicam que as dimensões e cotas de assentamento da fundação analisada são adequados, em concordância com o desempenho verificado da mesma.

**PALAVRAS-CHAVE:** fundações de turbinas eólicas marítimas, fundações marítimas, fundações.

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade o homem utiliza a força do vento para navegar, bombear água ou moer cereais, porém o uso do vento como fonte de calor e força motriz teve um declínio devido à industrialização no século XIX e, mais recentemente, devido ao uso de novas fontes, tais como os combustíveis fósseis e a energia nuclear. Contudo, ainda no final do século XIX surgiram as primeiras tentativas de geração de eletricidade a partir dos moinhos de vento na Dinamarca, mas somente um século depois, com a crise internacional do petróleo da década de 1970 e a necessidade de redução da emissão

de gases do efeito estufa, houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e a aplicação em escala comercial; assim, naquele período vários países criaram programas de pesquisa no âmbito do aproveitamento da energia eólica para produção de eletricidade (Maia, 2009). Atualmente cerca de 370 GW estão instalados.

Uma das novas áreas neste setor é o uso dessas turbinas em alto mar, devido à maior disponibilidade de ventos mais fortes e mais regulares, além da redução da ocupação do solo. A experiência adquirida do uso das turbinas em terra e a das fundações de plataformas marítimas de petróleo e gás têm propiciado a

instalação dessas turbinas em alto mar. No final de 2013 havia, aproximadamente, 7 GW de capacidade de turbinas eólicas offshore instaladas no mundo todo, com a Europa liderando esta cifra. No Brasil, há apenas um projeto, e em fase de aprovação junto aos órgãos competentes.

Este trabalho tem como objetivos apresentar os métodos de investigação do solo, os tipos de fundações mais utilizados para diferentes ambientes geológico-geotécnicos e realizar uma retroanálise direta da fundação em *Gravity Base Foundation* do parque eólico de Thorntonbank, localizado a 30 km da costa da Bélgica, no mar do norte, através dos modelos teóricos de cálculo de capacidade de carga e da verificação da estabilidade quanto ao tombamento e ao deslizamento. Para tal, além de pesquisa bibliográfica, realizaram-se pesquisas descritiva, através do estudo de caso, e experimental.

## 2 MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO

### 2.1 Estudo Geológico

Esta fase baseia-se na história geológica da área, e quando combinado com o tipo, tamanho e importância da estrutura de turbina eólica e a homogeneidade do depósito de solo, serve como uma base para a extensão e o método da investigação geotécnica local. Perfis e mapas geológicos estão frequentemente disponíveis para fornecer informações gerais do local. Os depósitos de solos superficiais podem ajudar a identificar as zonas de interesse e ajudam na localização de locais de ancoragem para atividades de investigação subsequente.

### 2.2 Levantamento Geofísico

O levantamento geofísico estabelece a batimetria do fundo oceânico, topografia, estratigrafia e identifica áreas de risco no fundo do mar. A estratigrafia superior deve ser avaliada para determinar locais de ancoragem e problemas potenciais com o posicionamento de plataformas autoelevatórias. A topografia deve ser avaliada em uma escala suficiente para identificar os afloramentos, obstruções e

desuniformidades do leito marinho que possam afetar a base da fundação. Isto é importante para minimizar o recalque diferencial da base de fundações de gravidade durante a vida útil da estrutura.

As técnicas utilizadas consistem de mapeamento de batimetria com sondagens convencionais simples, multifeixes ou varredura lateral, mapeamento do leito com sonar de varredura lateral ou leituras de magnetometria e perfil sísmico. Cria-se uma zona de investigação na qual se define grids onde as diversas características identificadas no levantamento geofísico podem ser plotadas (Randolph et al 2001).

### 2.3 Investigação Geotécnica

A investigação geotécnica local (IGL) é realizada seguindo o levantamento geofísico para usar as informações obtidas a fim determinar a estratigrafia e as características específicas do solo. A investigação geotécnica inclui ensaios *in situ* para identificação e estratificação do solo e coleta de amostras para identificação de material, caracterização e ensaios de laboratório subsequente. A IGL caracteriza as propriedades do material em termos de cinco componentes: macroscópica (características históricas e regionais), mecânica (força e tensões), microscópica (tamanho de partícula, arredondamento e forma), química (estrutura molecular) e propriedades da água. O GSI começa com ensaios *in situ* para obter a estratigrafia da área de interesse, normalmente feito com um teste CPT. Uma vez avaliados, a estratigrafia vai orientar o desenvolvimento dos demais ensaios, amostragem e um programa de ensaios de laboratório. Após a conclusão, o levantamento geofísico e dados da IGL se combinam para formar um modelo geotécnico da área para desenvolver os parâmetros de projeto necessários.

Para monoestacas, perfurações e em ensaios *in situ* geralmente devem se estender pelo menos 2x o comprimento da estaca. Para fundações de gravidade, perfurações e em ensaios *in situ* devem se estender a uma profundidade igual a, pelo menos, a maior dimensão horizontal da estrutura da base. Para

parques eólicos, o programa de investigação do solo deve incluir técnicas combinadas.

### 3 TIPOS DE FUNDAÇÕES

#### 3.1 Gravity Base Foundation

Gravity Base Foundation (GBF) é o segundo tipo de fundação marítima mais utilizada e, atualmente, representa 16% do total de fundações de turbinas eólicas em operação, ficando atrás apenas da fundação tipo monoestaca (EWEA, 2013).

GBF são estruturas em aço delgado ou em concreto armado preenchidas com lastro sobre uma única base que pode ser quadrada ou circular. Estas estruturas utilizam o seu peso próprio, incluindo o lastro, e uma base de grande área para estabilizar-se. Essa base contribui na resistência ao momento desestabilizador provocado pelo vento e pelas ondas, pois permite a distribuição das cargas da torre ao solo. Ademais, faz-se um enrocamento em torno da base para a proteção contra erosão devido às correntes.

A fundação de gravidade é projetada para evitar que haja movimentação entre a base da estrutura de suporte e o leito marinho por ter peso próprio suficiente para manter a estabilidade. A resistência ao tombamento é fornecida por um equilíbrio de forças verticais que agem no nível da fundação.

GBF's são economicamente competitivas quando as cargas ambientais são modestas e quando o lastro é fornecido a baixo custo. A adição de material de lastro pode reduzir significativamente o tamanho da fundação necessária para alcançar o equilíbrio de tensões ao longo da base da fundação.

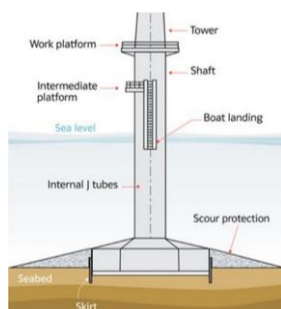


Figura 1. Gravity Base Foundation. Fonte: 4COffshore

Algumas vantagens deste tipo de fundação são: aplicabilidade em diferentes condições de solo, sobretudo em solos homogêneos devido à distribuição de capacidade de carga e recalque, em profundidades de água de 0-25 m, transporte simples, o projeto disponível (ou seja, a profundidade da água) durante o transporte e da disponibilidade de materiais de lastro. Elas também podem ser competitivas, pois não necessitam de embarcações de grande porte para o seu transporte. Fundações de gravidade também são facilmente removidas após o descomissionamento.

Para a preparação do fundo marinho o primeiro passo é a dragagem da primeira camada de material, geralmente argila ou areia solta, cuja espessura varia de 0,5 a 10 m, dependendo da batimetria, litologia, morfologia e propriedades geotécnicas, etc. Assim, a superfície do fundo do mar é removida até um nível em que se encontre solo indeformado. Em alguns projetos, a escavação é feita em duas etapas, dragagem em massa e dragagem de precisão. Se o material escavado é adequado para preencher a fundação na fase de instalação, pode ser colocado nas proximidades a fim de ser utilizado no momento necessário, senão é descartado no mar em local apropriado.

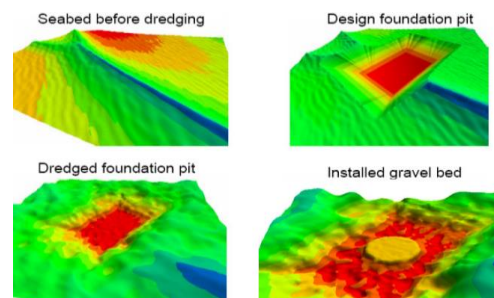


Figura 2. Preparação do Leito Marinho

Quando o nível adequado é atingido, coloca-se uma camada de pedregulho, rocha ou similar. Pode-se realizar uma compactação final e injeções de argamassa. A superfície deve estar perfeitamente horizontal, com precisão de 3 a 5 cm. Após a preparação do leito marinho e do transporte da fundação até o seu local final é o momento de instalar a fundação. Nesta operação, a fundação será colocada, com precisão, no leito marinho e lastrada para

fornecer o peso necessário para suportar as cargas.

A GBF é, então, alocada acima da sua localização final, utilizando sistemas GPS é abaixada até a sua localização final e lentamente até os últimos centímetros. A região escavada na fase de preparação do leito é preenchida com areia ou pedregulho, às vezes proveniente da escavação anterior. Alguns projetos tem uma placa de base de tal forma que o material de backfill a cobre, fornecendo à fundação resistência ao arrancamento. E, por fim, o fuste oco também é preenchido, normalmente, com areia, pedregulho ou material rochoso. Ao usar-se a areia é necessário que ela seja misturada com água no navio para poder ser bombeada para a fundação.

A instalação da GBF no leito marinho modifica o fluxo de água, provocando movimentação dos sedimentos ao redor da estrutura. A erosão de sedimentos no leito marinho pode ocasionar um mau apoio da fundação. Se a erosão ocorre em pedregulho ou areia, os sedimentos são mais susceptíveis de gerar depósitos locais, enquanto que se a erosão ocorre em silte ou argila o material erodido será levado em suspensão, deixando uma depressão.

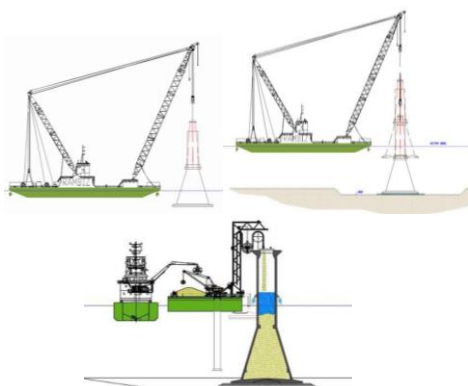


Figura 3. Alocação da Fundação

### 3.2 Monoestacas

O mais popular tipo de fundação marítima, a monoestaca, consiste em uma única estaca cilíndrica em aço, cujo diâmetro varia de 2 a 8 m e espessuras de 150 a 500 mm e cuja cota de assentamento varia de 10 a 20 m abaixo do leito marinho. Este tipo de fundação resiste ao momento desestabilizador através da resistência lateral do solo. Há ainda uma subestrutura de

transição que conecta a fundação à torre da turbina.

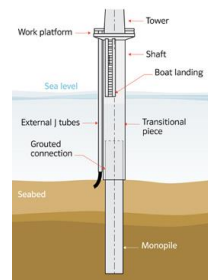


Figura 4. Monoestaca. Fonte: 4COffshore

Este tipo de torre necessita de máquinas de perfuração, principalmente para solos rochosos, e de máquinas de cravação de estacas de grande escala. Por estas razões, as torres monoestacas não são adequadas em terrenos muito rochosos com rochas de grandes dimensões (Manwell et al 2009).

A instalação começa com a colocação de uma camada de filtro para evitar erosões ao redor da monoestaca, imediatamente após a conclusão desta.

Depois de ser colocada na posição vertical e ser alinhada com um sistema de guias, a monoestaca é cravada no leito com martelos hidráulicos até a profundidade de instalação. Se o subsolo apresentar camadas de rocha, perfurações são necessárias. Por fim, componentes temporários pré-fabricados são adicionados à monoestaca para evitarem-se erros verticais e de rotação que podem ocorrer durante a cravação.

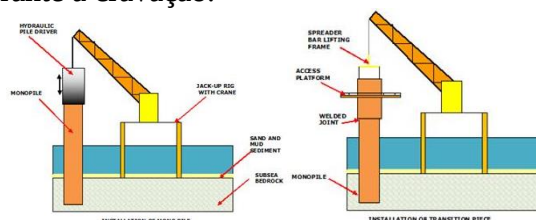


Figura 5. Instalação Monoestaca. Fonte: Willie Scott.

As principais vantagens são: requisitos mínimos de preparação do fundo do mar, resistências a movimentações do leito, erosão e baixos custos de produção. Entretanto, as desvantagens incluem maior flexibilidade da subestrutura que aumenta com a profundidade, alto custo de tempo e recursos financeiros que são função do tamanho da turbina, da geologia do leito marinho e rigidez reduzida em relação a outros tipos de fundação que pode resultar em

degradação do solo e retirada de matéria no entorno da fundação. Monoestacas também são difíceis de remover e podem gerar problemas no descomissionamento. As restrições ao projeto deste tipo são em decorrência da sua deflexão e vibração durante o carregamento. Monoestacas padrão (sem suporte lateral) são indicadas para profundidades de até 25 m. Monoestacas apoiadas são indicadas para profundidades de 20 a 40 m e são mais apropriadas para solos não homogêneos. Elas devem ser, em geral, evitadas em solos moles em altas profundidades devido ao comprimento para instalação

### 3.3 Outros Tipos

As fundações multiestacas consistem em estruturas tripés ou quadripés cilíndricas em aço com *leg piles* angulados ou verticais, sendo adequadas para profundidades de água que variam de 25 a 50 m. Também podem ser construídas em estruturas de gravidade, onde as estacas são cravadas abaixo da base resultando no compartilhamento de carga entre as estacas e a base de gravidade; adequadas para profundidades de água de até 25 m. As principais vantagens são: versatilidade, resistência ao carregamento de ondas e de correntes e um custo inexpressivo de fabricação. Já as desvantagens são custos expressivos de construção e de instalação e dificuldade de remoção das múltiplas estacas.

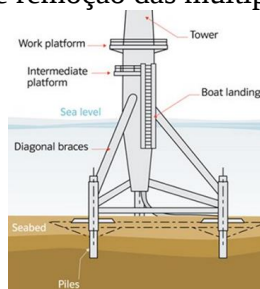


Figura 6. Multi-estaca. Fonte: 4COffshore

Torres treliçadas consistem em fundação multi-leg conectada a uma subestrutura de aço treliçada. As estacas são dirigidas encamisadas até a profundidade necessária para estabilidade estrutural; adequadas para profundidades de água de 20 a 40 m. São ideais para grandes profundidades em condições ambientais extremas. Outra vantagem é a capacidade de ser

completamente montada antes das instalações *float-out*. Elas geralmente requerem menos proteção contra erosão do que os outros tipos de fundações em estacas.

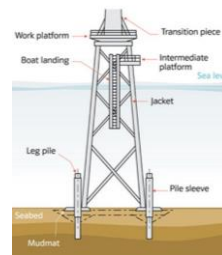


Figura 7. Torres Treliçadas. Fonte: 4COffshore

### 3.4 Caixões de Sucção

Caixões de sucção são semelhantes às fundações de gravidade em forma e em tamanho, mas diferem no método de instalação e no modo primário de estabilidade. Elas são grandes estruturas cilíndricas, geralmente feitas em aço, aberta na base e fechadas no topo. Após uma penetração inicial no fundo do mar causado pelo peso próprio, um sistema de sucção é aplicado dentro do caixão, que força a parte restante do caixão para penetrar no solo, deixando a parte superior nivelada com o fundo do mar.

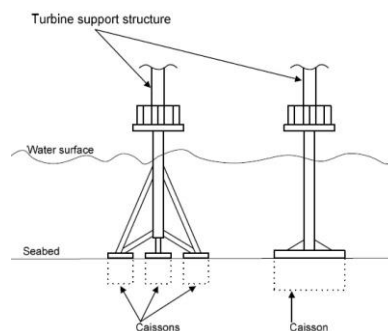


Figura 8. Caixões de sucção. Fonte: Villalobos et al 2004

As dimensões típicas dos caixões de sucção variam de 2 a 4 m no diâmetro para profundidades de água inferiores a 5 m e de 12 a 15 m em águas profundas (Houlsby et al 2000). Também podem ser projetadas em uma configuração tripé ou quadripé, em que os *buckets* substituem as estacas ou a fundação em gravidade em uma estrutura multi-leg convencional, oferecendo as vantagens de aplicabilidade em águas profundas, menores caixões e maior facilidade de nivelar a estrutura.

O fator limitante do projeto para o monopé é o momento de tombamento enquanto que para a configuração multi-leg é a resistência à tração (Byrne et al 2002).

Erosões são mais importantes para caixões de sucção, uma vez que são menos profundas do que as estacas. O tamanho daqueles e o fato de que parte dos caixões se projeta inevitavelmente acima do nível do solo, cria condições bastante agressivas para erosão. O fato de que os caixões podem ser instalados em ambientes de água pouco profunda significa que a devida atenção a este problema é essencial, especialmente nas areias. Experiências práticas sugerem que proteções contra erosões devem ser colocadas logo após a instalação dos caixões já que as erosões podem ocorrer muito rapidamente. Em ambientes altamente móveis, significativas erosões podem, por exemplo, ocorrer devido a correntes em uma única maré.

Caixões de sucção podem ser utilizados em fundações para turbinas eólicas marítimas em um *layout* monopé, tripé ou quadrupé, a primeira é dominada pela carga de momento e o projeto em tripé e quadrupé por carga de tração.

#### 4 RETROANÁLISE DIRETA DA FUNDAÇÃO EM GRAVITY BASE FOUNDATION DO PARQUE EÓLICO DE THORNTONBANK

O parque eólico de Thorntonbank, objeto de estudo deste trabalho, localiza-se a cerca de 30 km da costa belga no Mar do Norte, próximo à fronteira com a Holanda e foi construído pela empresa belga C-Power em 2010, com 60 turbinas de 5 MW, com altura do hub de 94 m TAW e diâmetro do rotor de 126 m, constituem uma capacidade total de 325 MW, fornecendo 1000 GWH de energia (Peire et al 2009).

Para suportar as cargas exigentes e as condições ambientais às quais as estruturas estavam submetidas, as turbinas eólicas foram suportadas por torres em aço conectadas com a fundação por gravidade de concreto pré-moldado e pós-tensionado verticalmente.

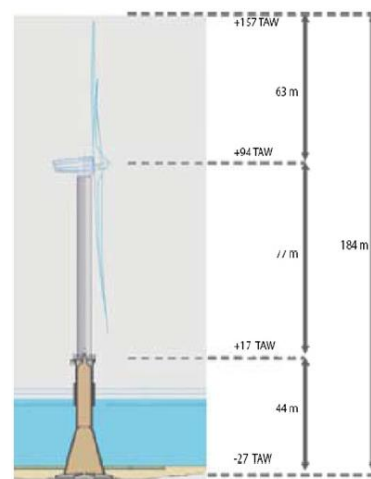


Figura 9. Representação esquemática da turbina eólica concluída. Fonte: (Mengé et al 2008).

Cada fundação consiste em uma seção oca cilíndrica e cônica de concreto, que, após a instalação no leito marinho é preenchida com areia da dragagem. A placa de base em anel tem um diâmetro externo de 23,50 m, um diâmetro interno de 8,50 m e uma altura média de 1,265 m e é preenchida com material incompressível, a fim de obter uma área de contato com o solo. A secção cônica é reduzida de 17,5 m até 6,5 m para continuar com um formato cilíndrico cujo diâmetro externo é 6,5 m. A espessura total da parede é de 0,50 m. A fundação de concreto é de 42 m de altura e pesa cerca de 3.000 toneladas.

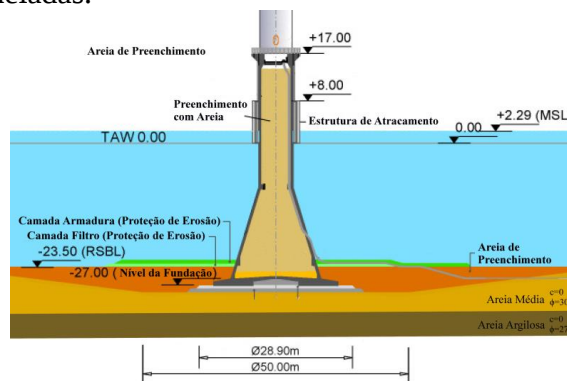


Figura 10. Fundação e Características do solo. Adaptado de Peire et al 2009.

Para o projeto e a execução, realizou-se um vasto programa de investigação no local, que consistiu nos seguintes ensaios:

- Investigação Geológica: batimetria multifeixe; reflexão sísmica; sonar de varredura lateral; magnetometria.
- Investigação Geotécnica: ensaio Piezocone (CPT-U); Poços com amostragem do solo;

Ensaio Pressiométrico; Ensaios laboratoriais incluindo testes estáticos e dinâmicos.

A partir da reflexão sísmica, o topo das camadas terciárias e algumas reflexões mais profundas puderam ser claramente definidos. Na figura 11, nota-se que ocorre uma incisão no topo das formações terciárias, que são preenchidas com sedimentos quaternários.

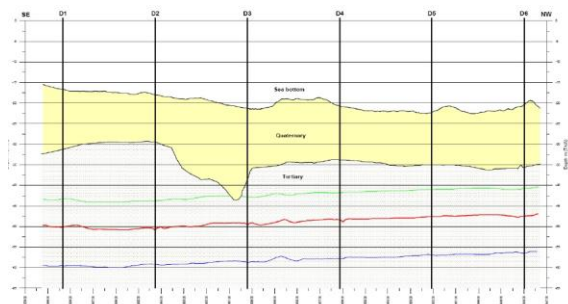


Figura 11. Interpretação sísmica por reflexão. Fonte: Mengé et al 2008.

Os ensaios CPT foram planejados para serem realizados até 45 m abaixo do nível do leito marinho, entretanto encontrou-se uma camada resistente em que foram necessárias perfurações para ultrapassá-la e continuar o ensaio. Este processo teve que ser repetido 2-3 vezes por CPT. Valores de resistência de até 120 MPa foram medidos enquanto cimentação não foi encontrada (Mengé et al 2008)

Esta camada dura foi reconhecida como a formação Aalter, Oedelem member, que consiste em argila marinha e areia, depositados em águas rasas que recobriram a parte norte e central da Bélgica no período Eoceno. Esta formação aflora na região de Flandres, formando uma camada de espessura máxima de 30 metros no subsolo. Assim, podem-se distinguir as seguintes camadas de solo (do topo para a base):

- Areia média a grossa (solta no topo) com um horizonte de pedregulho no fundo;
- Argila rija (camada terciária) e no fundo uma transição para solos mais siltosos ou arenosos;
- Areia densa ligeiramente siltosa a argilosa;
- De muito a extremamente denso silte a areia argilosa fina com áreas em argila;
- Argila terciária rija no fim dos poços.

Além dos ensaios *in situ*, realizaram-se também ensaios em laboratório, quais sejam: Classificação do solo (granulometria, limites de

plasticidade, grau de saturação, massa volumétrica, carbonatos e material orgânico); ensaio de compressão axial (cargas incrementais e ensaios de adensamento com velocidade controlada de deformação – CRS); Ensaio Triaxial (UU, CU e CD); Ensaio Triaxial cíclico

Um exemplo de camadas do solo e suas características para a posição D6 é dada na figura 12, sendo D6 a localização onde a fundação está assente mais profundamente (-27 m).

| Location D6 |               |               |                          |                                 |               |            |             |                   |      |           |       |                 |  |
|-------------|---------------|---------------|--------------------------|---------------------------------|---------------|------------|-------------|-------------------|------|-----------|-------|-----------------|--|
| Unit        | Level from to | Thickness [m] | Soil type                | $\gamma_s$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\theta'$ [°] | $c'$ [kPa] | $c_u$ [kPa] | $E_{s,iso}$ [MPa] | $m$  | $E$ [MPa] | $\nu$ | $G_{iso}$ [MPa] |  |
| 1           | -20.45 -29.25 | 8.8           | Medium SAND              | 20                              | 35            | 0          | 0           | 70                | 0.55 | 46.7      | 0.3   | 50              |  |
| 2           | -29.25 -32.30 | 3.1           | Clayey SAND              | 20                              | 27.5          | 0          | 0           | 15                | 0.75 | 10.0      | 0.3   | 60              |  |
| 3           | -32.30 -34.80 | 2.5           | Fine SAND                | 20                              | 32.5          | 0          | 0           | 30                | 0.60 | 20.0      | 0.3   | 100             |  |
| 4           | -34.80 -37.00 | 2.2           | CLAY (Usel)              | 18.5                            | 20            | 8          | 120         | 5                 | 0.95 | 3.3       | 0.5   | 35              |  |
| 5           | -37.00 -41.00 | 4.0           | Sandy CLAY (Aasc)        | 19.5                            | 22            | 2          | 200         | 7                 | 0.95 | 4.7       | 0.5   | 55              |  |
| 6           | -41.00 -47.80 | 6.8           | Slightly silty fine SAND | 19                              | 32.5          | 0          | 0           | 40                | 0.65 | 26.7      | 0.3   | 120             |  |
| 7           | -47.80 -49.80 | 2.0           | Sandy CLAY               | 18                              | 22            | 5          | 250         | 10                | 0.95 | 6.7       | 0.5   | 60              |  |
| 8           | -49.80 -54.27 | 4.5           | Fine SAND 2              | 19                              | 35            | 0          | 0           | 40                | 0.65 | 26.7      | 0.3   | 120             |  |
| 9           | -54.27 -61.10 | 6.8           | Stiff CLAY               | 19                              | 18            | 10         | 250         | 10                | 0.95 | 6.7       | 0.5   | 75              |  |
| 10          | -61.10 -64.00 | 2.9           | Clayey fine SAND         | 20                              | 32.5          | 0          | 0           | 30                | 0.75 | 20.0      | 0.3   | 120             |  |

Figura 12. Estratificação do solo e características para a posição fundação D6. Fonte: Mengé et al 2008.

Considerou-se o problema como uma fundação superficial, tendo vista que a base está localizada a uma profundidade inferior a duas vezes sua menor dimensão. Também se considerou que é uma sapata, já que foi dimensionada de modo que as tensões de tração nele resultantes sejam resistidas por armadura e isolada, pois não tem associação com nenhuma outra sapata e é dimensionada em função dos esforços de um só pilar, no caso, dos esforços do conjunto torre-nacele-pás. Assim, a fundação está assente a uma profundidade de 3,5 m dentro da primeira camada de solo (Areia média) e cujas características do solo são apresentadas.

Para o cálculo da capacidade de carga admissível do solo, utilizou-se os métodos teóricos de Terzaghi, Meyerhof e Hansen. Também se procedeu à verificação ao tombamento e ao deslizamento.

As cargas nas fundações são da ordem de grandeza de 12.000 kN de esforço horizontal, de 350.000 kNm de momento desestabilizador e 450.000 kN de esforço vertical em ULS.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme dados apresentados anteriormente, tais como, diâmetro da fundação ( $D = 23,5$  m), fundação assente na primeira camada de solo (areia média,  $C' = 0$  e  $\phi' = 35^\circ$ ) e profundidade ( $D = 3,5$  m), obtiveram-se os resultados apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Resultados da capacidade de carga pelos diversos métodos teóricos

| Teorias  | $N_c$ | $N_q$ | $N_\gamma$ | $Q_{adm}$<br>(MPa) |
|----------|-------|-------|------------|--------------------|
| Terzaghi | 57,8  | 41,4  | 42,4       | 1,48               |
| Meyerhof | 46,1  | 33,3  | 37,2       | 2,60               |
| Hansen   | 46,1  | 33,3  | 33,9       | 1,48               |

A tensão solicitante máxima, devido ao momento e ao esforço vertical, utilizando a hipótese de sapada rígida sobre solo de Winkler, é de **1,28 MPa**. Com relação à capacidade de carga última admissível, pode-se observar, conforme a tabela acima, que a tensão admissível do solo é superior à tensão solicitante, em todos os métodos teóricos. O mesmo é válido com relação aos momentos de tombamento e de deslizamento, como indicada a tabela 2.

Tabela 2. Resultados dos momentos de tombamento e de deslizamento.

| Momento      | Estabiliz<br>ante | Desestabili<br>zante | FS<br>(MPa) |
|--------------|-------------------|----------------------|-------------|
| Tombamento   | 5262,88           | 350                  | 15,04       |
| Deslizamento | 193,21            | 12                   | 16,04       |

## 6 CONCLUSÕES

A construção de parques eólicos marítimos no Brasil torna-se além de um excelente mecanismo de combate aos péssimos índices econômicos que o país tem vivido, pois promove geração de empregos diretos e indiretos, desenvolvimento de tecnologias e

créditos de carbono, serve para ratificar o acordo de Paris, assinado recentemente pela Presidência, em que diversas nações buscam a redução da emissão de gases poluentes.

Deste modo, a concepção e construção destes tipos de estruturas são um desafio multidisciplinar e embora um aspecto tenha sido o foco deste trabalho, todos os outros são tão importantes e desafiadores quanto o geotécnico.

Por fim, quanto à fundação em GBF do parque eólico de Thorntonbank, os valores calculados de fatores de segurança em relação à estabilidade e à capacidade de carga indicam que as dimensões e cotas de assentamento da fundação analisada são adequados, em concordância com o desempenho verificado da mesma.

## AGRADECIMENTOS

Aos mestres, especialmente, ao nosso orientador, Prof. Dr Júlio Alencar, pelas orientações, apoio e conselhos.

## REFERÊNCIAS

- Byrne, B.W. e Houlsby, G.T. (2002) *Experimental Investigations of the Response of Suction Caisson to Transient Combined Loading*.
- EWEA (2013): *Building a stable future. Annual Report*.
- Houlsby, G.T. e Byrne, B.W. (2000): *Suction Caisson Foundations for Offshore Wind Turbines and Anemometer Masts*. Wind Engineering, Vol. 24, No. 4, pp 249-255.
- Maia, V.M.J.M. (2009) *Análise e Dimensionamento de Torre Eólica Offshore: Estudo Paramétrico*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2009
- Manwell, J.F., McGowan, J. G., Rogers, A. L. (2009) *Wind Energy Explained*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Mengé, P. e Gunst, N. (2008) *Gravity Base Foundations for the Wind Turbines on the Thorntonbank – Belgium*. 15de Innovatieforum Geotechniek.
- Peire, K., Nonneman, H. e Bosschem, E. (2009) *Gravity Base Foundation for the Thornton Bank Offshore Wind Farm*. Terra et Aqua, number 115.
- Randolph, M.F., Kenkhuis, J. (2001): *Offshore Foundation Systems: Site Investigation Planning – Course Notes*, Center for Offshore Foundation Systems, University of Western Australia.
- Villalobos, F.A., Houlsby, G.T., Byrne, B. W. B. (2004) *Suctions Caisson Foundations for Offshore Wind Turbines*. V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica