



Modelos Físicos de Fundações para Torres Eólicas *Offshore*

Maria Fernanda Wamser Barra

COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, maria.barra@coc.ufrj.br

Naiala Fidelis Gomes

COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, naiala@poli.ufrj.br

Silvia Polido Lemos

COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, polidolemos@gmail.com

Jéssica dos Santos Carlos

PPE/Poli/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, jessica.carlos@poli.ufrj.br

Maria Cascão Ferreira de Almeida

Poli/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, mariacascão@poli.ufrj.br

Marcio de Souza Soares de Almeida

COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, marciossal@gmail.com

RESUMO: A oportunidade de produção de energia eólica *offshore* no Brasil é uma realidade cada vez mais próxima. As torres eólicas *offshore* são estruturas sujeitas a carregamentos característicos devido ao ambiente em que são instaladas. Os principais esforços, provenientes da combinação de ondas, correntes marítimas e ventos, atuam horizontalmente na estrutura, levando a carregamentos cíclicos e momentos fletores de grande magnitude nas fundações. Dada a complexidade na realização de experimentos dessas estruturas em escala real, a modelagem física em centrífuga geotécnica tem sido amplamente usada buscando compreender os mecanismos envolvidos no comportamento solo-fundação-estrutura. Esse trabalho apresenta o projeto de modelagem física de fundação do tipo *monopile*, descrevendo os principais aspectos envolvidos. Uma simulação do ensaio centrífugo é feita no PLAXIS 3D, buscando os deslocamentos e esforços envolvidos no experimento.

PALAVRAS-CHAVE: Torre eólica *offshore*, *monopile*, modelagem centrífuga.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a energia eólica já representa 8% da matriz energética, atingindo em 2018 a geração de 14,7 GW (Poder 360, 2019). O país conta com 534 parques eólicos, dos quais 95 estão localizados na região Sul (FAPESP, 2019).

No entanto, esses dados se referem somente à energia eólica *onshore*, pois ainda não há no país parques eólicos *offshore*. Estudos de Ortiz e Kempel (2011) apontam que a capacidade de geração de energia eólica *offshore* na costa

brasileira é 12 vezes maior que na área continental, mostrando ser uma fonte de energia renovável com grande potencial. A Europa, por exemplo, tem aproximadamente 18,5 GW de capacidade *offshore* instalada (Wind Europe, 2019). Dentro desse cenário, a Petrobras prevê a instalação de um protótipo de torre eólica *offshore* na costa nordestina para entrar em operação até 2022 (Petrobras, 2018).

Buscando eficiência na produção de energia, as torres eólicas *offshore* (TEO) têm se tornado cada vez mais potentes. A maior turbina *offshore*



está instalada no Reino Unido e tem capacidade de geração de 8,8 MW (Wind Europe, 2019). Crescendo a capacidade das turbinas, crescem também sua altura, a necessidade de fundações para suporte dessas estruturas, bem como os desafios de projeto. Uma das principais incertezas nos projetos de turbinas eólicas *offshore* é a previsão do desempenho de longo prazo das fundações, isto é, o efeito de milhares de ciclos e carregamentos dinâmicos nas fundações.

As torres eólicas *offshore* são estruturas relativamente novas, e pouco se conhece sobre seu comportamento de longo prazo. Neste contexto, a modelagem física em centrífuga se mostra como uma opção eficiente para aprimorar as atuais metodologias de dimensionamento.

O objetivo desse trabalho é apresentar a concepção da modelagem física para fundações de torres eólicas *offshore* da COPPE. Este Projeto de Pesquisa denominado *Benchmark* está inserido em uma rede de estudo com outras instituições ao redor do mundo. Os resultados da 1ª etapa do Projeto de *Benchmark* serão publicados no XVI Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

2 TURBINAS EÓLICAS *OFFSHORE*

2.1 Tipos de Fundação

As fundações para torres eólicas *offshore* podem ser de diferentes tipos, sendo a escolha por determinado tipo feita, geralmente, com base na profundidade de instalação e nas condições geológicas do local. Os tipos de fundação mais comumente utilizados são de gravidade, sucção, *monopile*, tripé, jaqueta e flutuante. Na Europa, em 2018, aproximadamente 75% das fundações eram do tipo *monopile* (Wind Europe, 2019).

O *monopile* é o tipo mais simples e econômico de fundação para águas rasas (10 a 30 m). São compostos por tubos de aço circular com relação entre comprimento (L) e diâmetro (D) igual a 5.

As dimensões típicas são diâmetros de 3 a 6 m e comprimentos de 22 a 40 m.

2.2 Esforços Atuantes

Os principais carregamentos aos quais as torres eólicas *offshore* estão sujeitas compreendem: ventos, ondas e rotação das pás da turbina. Cada um destes carregamentos tem características únicas em termos de magnitude, frequência e número de ciclos aplicados à fundação (Arany et al, 2015; Nikitas et al, 2016), resultando em elevadas cargas laterais e grandes momentos fletores ao nível do solo.

Segundo Byrne e Houlsby (2003), uma turbina com capacidade de 3,5 MW, com altura de 90 m, instalada a uma profundidade de 20 m, tendo como fundação um *monopile* de 4 m de diâmetro, está sujeita às seguintes cargas: carga vertical relativa ao peso próprio, que pode variar de 6 – 10 MN; carga de vento atuando no eixo da turbina: 1 MN; combinação de corrente e ondas atuando a 10 m acima do leito marinho por um período de 10 segundos: 1 ± 2 MN.

Assim, como mostra a Figura 1, a resultante dessas forças atuando no topo do *monopile* seria:

$$P = 2 \pm 2 \text{ MN}$$

$$V = 6 \text{ MN}$$

$$M = 100 \pm 20 \text{ MNm}$$

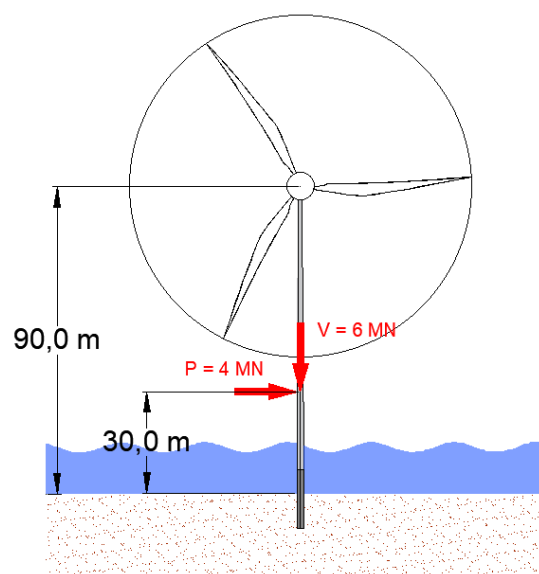


Figura 1. Esforços atuantes em uma turbina de 3,5 MW (adaptado de Byrne e Houlsby, 2003).



2.3 Metodologias de Dimensionamento

O dimensionamento de fundações tipo *monopile* para TEO em termos de estado limite de serviço (ELS) é realizado considerando a estrutura como uma viga suportada pelo solo, cuja reação é representada por uma série de molas elásticas (Milititsky, 2019). No caso em que essa reação é considerada não linear, o comportamento do solo é modelado pelas curvas p-y, que são sugeridas pelas principais normas de projeto, API (2011) e DNV (2014).

As curvas p-y foram desenvolvidas a partir de estudos de estacas carregadas lateralmente, considerando diferentes níveis de mobilização da resistência do solo em função do deslocamento sofrido pela estaca (Velloso e Lopes, 2010).

Esta metodologia tem sido adotada com sucesso para fundações em estacas de estruturas da indústria de petróleo e gás. No entanto, questiona-se (e.g., Klinkvort, 2012) a adequação dessas curvas para *monopiles*, que são estruturas com maior diâmetro e mais rígidas do que as estacas para as quais essas curvas foram desenvolvidas.

Muitas pesquisas vêm sendo realizadas para avaliar a transferência desta metodologia para o projeto de fundações de torres eólicas *offshore*. Klinkvort (2012), após ensaios centrífugos de carregamento lateral em estacas rígidas, sugere algumas alterações na metodologia usada para as curvas p-y da API (2011) e DNV (2014). Byrne *et al.* (2015) também descrevem um novo método de análise para carregamento lateral em *monopiles*, sugerido por um projeto conjunto da indústria, denominado PISA (Pile Soil Analysis).

3 MODELAGEM FÍSICA DE MONOPILES

A modelagem centrífuga constitui uma ferramenta importante que pode auxiliar na resolução de diversos problemas de engenharia. Na Geotecnia, especificamente, é bastante

eficiente para situações onde as condições do solo são consideradas difíceis, e quando os modelos constitutivos dos solos não são bem definidos (Madabhushi, 2014).

Idealmente, a modelagem física seria combinada com ensaios em escala real e validada por modelagem numérica. No caso de *monopiles*, no entanto, testes em escala real são de difícil execução por questões técnicas e econômicas.

Nos últimos 10 anos, diversos autores têm estudado o efeito de cargas horizontais em *monopiles* por meio da modelagem física.

3.1 Leis de Escala em Centrífuga

O princípio fundamental da modelagem centrífuga é reproduzir, em um modelo reduzido, o mesmo estado de tensões de um protótipo em escala real.

Essa similaridade de tensões entre protótipo e modelo pode ser atingida colocando-se o modelo em uma centrífuga submetida a uma aceleração radial igual a N vezes a aceleração gravitacional. Esse aumento na aceleração é calculado a partir da Equação 1 (Taylor, 2005):

$$N = \frac{\omega^2 \cdot R}{g} \quad (1)$$

onde ω é a frequência rotacional, R é o raio da centrífuga, e g é a aceleração da gravidade.

As leis de escala relacionam o comportamento do modelo físico com o protótipo, e podem ser deduzidas através de análises dimensionais (Madabhushi, 2014; Ng, 2014). Sendo N o fator de escala, as leis de escala para os principais parâmetros estão apresentadas na Tabela 1.

Mais detalhes sobre os princípios da Modelagem Física em Centrífuga podem ser encontrados em Taylor (2005) e Madabhushi (2014).



Tabela 1. Leis de escala em modelos centrífugos.

Parâmetro	Modelo/protótipo	Unidades
Aceleração	N	g (m/s ²)
Comprimento	1/N	m
Área	1/N ²	m ²
Volume	1/N ³	m ³
Massa	1/N ³	kg
Tensão	1	N m ⁻²
Deformação	1	-
Força	1/N ²	N
Momento de inércia	1/N ⁴	m ⁴
Rigidez flexural	1/N ⁴	N m ²

3.2 Parâmetros Adimensionais

Klinkvort *et al.* (2018) apresentam os principais parâmetros a serem considerados na modelagem física de *monopiles* em areia, destacando aqueles em que ainda são necessárias mais informações para melhor entendimento. Segundo os autores, uma análise dimensional da resposta de *monopiles* mostra que a resistência lateral dessas estruturas é função dos parâmetros apresentados na Equação 2, que devem ser constantes entre modelo/protótipo:

$$\frac{P}{\gamma_w D^3} = f\left(\frac{Y}{D}, \frac{L}{D}, \frac{l_e}{D}, \frac{I_p}{D^4}, \frac{E_p}{\gamma_w D^2}, \frac{G_0}{\gamma_w D^2}, \frac{M_R k t}{\gamma_w D^2}, \varphi', \frac{l_t}{d_{50}}, \frac{D}{d_{50}}, \frac{R_a}{d_{50}}\right) \quad (2)$$

onde, P = carga lateral aplicada; Y = deslocamento da cabeça da estaca; D = diâmetro da estaca; γ' = peso específico efetivo; L = comprimento da estaca; l_e = comprimento livre; I_p = momento de inércia da estaca; E_p = rigidez da estaca; M_R = módulo de rigidez; k = permeabilidade; t = tempo; γ_w = peso específico da água; φ' = ângulo de atrito efetivo; l_t = espessura da parede da estaca; d_{50} = diâmetro médio das partículas da areia; R_a = fator de rugosidade da estaca.

Ao dimensionar um modelo a ser ensaiado em centrífuga geotécnica, algumas considerações

devem ser feitas com relação a efeitos de escala e efeitos de borda.

Todas as dimensões do modelo são escaladas por um fator N, exceto o diâmetro médio das partículas d_{50} . Caso esse parâmetro fosse também reduzido pelo fator de escala, o solo modelado e, conseqüentemente seu comportamento, seriam diferentes do caso de protótipo. Assim, o efeito do tamanho médio dos grãos é um fator importante a ser analisado, garantindo que as dimensões críticas em contato com o solo sejam maiores que o d_{50} (Madabhushi, 2014). Garnier *et al.* (2007) indicam que, para problemas de estacas carregadas lateralmente, a relação entre o diâmetro da estaca (D) e o d_{50} deve ser maior que 60 ($D/d_{50} > 60$). Já Klinkvort (2012), analisando essa relação para o caso específico de *monopiles*, demonstrou que essa relação deve ser maior que 88 ($D/d_{50} > 88$).

Já os efeitos de borda podem ocorrer caso a caixa do modelo, onde o ensaio é realizado, seja muito pequena para o problema em questão. A distância entre o modelo e a parede da caixa (S) deve ser tal que evite esse efeito. Ainda não existe um consenso sobre qual deva ser esse valor para a modelagem de *monopiles*.

4 ELABORAÇÃO DOS ENSAIOS FÍSICOS

A seguir são detalhados os equipamentos e materiais a serem utilizados na modelagem física de *monopiles* no Projeto de Pesquisa de Fundações de Torres Eólicas *Offshore*.

4.1 Centrífuga Geotécnica da COPPE

Os ensaios serão realizados na centrífuga geotécnica de braço, da marca Broadbent (Figura 2), instalada no Laboratório Multiusuário de Modelagem Centrífuga (LM²C) da COPPE/UFRJ.



Figura 2. Centrífuga de braço da COPPE-UFRJ.

O LM²C conta ainda com uma centrífuga de tambor, em uso desde 1996. A centrífuga de braço foi adquirida em 2013 e, desde então, os dois equipamentos vêm sendo utilizados principalmente em estudos relacionados à indústria de óleo e gás (Almeida *et al.*, 2015).

A centrífuga de braço possui diâmetro de 1,2 m e capacidade de aceleração máxima de 300g, podendo atingir até 638 rpm. Um sistema de controle permite que a centrífuga seja operada e os resultados monitorados através de um *software*.

4.2 Preparação do Solo

O solo a ser utilizado para os ensaios em centrífuga será a areia de São Francisco (Figura 3), em estudo na COPPE desse 1987. Trata-se de uma areia fina, selecionada pelo vento, proveniente da praia de São Francisco, Niterói (RJ) (Oliveira Filho, 1987).

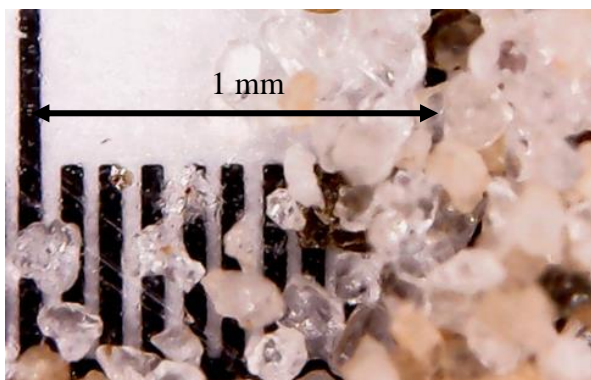


Figura 3. Foto de microscópio eletrônico da Areia da Praia de São Francisco - Niterói - RJ.

A areia foi inicialmente peneirada na peneira de malha nº 60 (abertura 0,250 mm) e posteriormente lavada na peneira de nº 200 (abertura 0,074 mm), de modo a utilizar a fração granulométrica compreendida entre essas peneiras, obtendo-se, assim, um material fino e uniforme. Dessa forma, foi possível diminuir o diâmetro médio das partículas, obtendo uma relação $D/d_{50} > 100$, adequada para o desenvolvimento do modelo físico.

A Tabela 2 apresenta os principais índices físicos do solo, onde G_s é o peso específico dos grãos, $e_{máx}$ o índice de vazios máximo e $e_{mín}$ o índice de vazios mínimo do solo.

Tabela 2. Caracterização da Areia da Praia de São Francisco.

Solo	G_s	d_{50} [mm]	$e_{máx}$ [kN/m ³]	$e_{mín}$ [kN/m ³]
Areia de São Francisco	2,638	0,18	0,915	0,602

Guimarães (2014) obteve, para o mesmo solo, ângulo de atrito de 40,1° e coesão nula a partir da envoltória de ruptura obtida de resultados de ensaios triaxiais. No entanto, a fração granulométrica estudada pela autora não é a mesma que será utilizada nesse estudo. Portanto, novos ensaios triaxiais serão realizados após o peneiramento.

Como os estudos realizados com a areia de São Francisco envolvem apenas parâmetros estáticos do solo, serão executados ensaios centrífugos e triaxiais com *bender elements* para obtenção do módulo cisalhante máximo ($G_{máx}$) e de coluna ressonante para obter, além do $G_{máx}$, a razão de amortecimento do solo.

Para moldagem da areia na caixa cilíndrica foi desenvolvido um pluviador automático, com mecanização em dois eixos, de forma a obter repetibilidade e garantir a homogeneidade nos modelos físicos.

4.3 Caixa do Modelo Cilíndrica

Uma estaca carregada lateralmente não constitui um problema axissimétrico, devendo ser analisada numa abordagem 3D. De forma a



considerar corretamente todos os aspectos envolvidos nesse tipo de problema, será utilizada a caixa cilíndrica apresentada na Figura 4. As dimensões da caixa são: diâmetro de 220 mm e altura de 140 mm.



Figura 4. Caixa cilíndrica usada para os ensaios.

4.4 Dimensionamento do Modelo

Foi adotado como protótipo um *monopile* de 2,0 m de diâmetro externo. O *monopile* tem comprimento enterrado $L = 5D$ e comprimento livre $l_e = 4D$. Dadas as limitações do tamanho da caixa, adotou-se uma aceleração centrífuga correspondente a $N = 100$.

Além disso, de forma a atender o Projeto de *Benchmark*, a rigidez à flexão do protótipo deve ser de 20 GNm^2 , o que levou à escolha do alumínio como o material do modelo, com diâmetro externo de 19,05 mm e espessura de 1,58 mm, conforme apresentado na Tabela 3 e na Figura 5.

Tabela 3. Dimensões e propriedades do modelo e protótipo.

Parâmetro	Protótipo	Modelo
Diâmetro externo (D)	1,91 m	19,05 mm
Espessura (t)	0,16 m	1,58 mm
Material	Alumínio	Alumínio
Módulo de Young (E)	70 GPa	70 GPa
Rigidez à flexão (EI)	23,35 GNm^2	0,2335 kNm^2
Massa específica	2,7 g/cm^3	2,7 g/cm^3
Coefficiente de Poisson ν	0,33	0,33
Comprimento enterrado (L)	9,53 m	95,25 mm

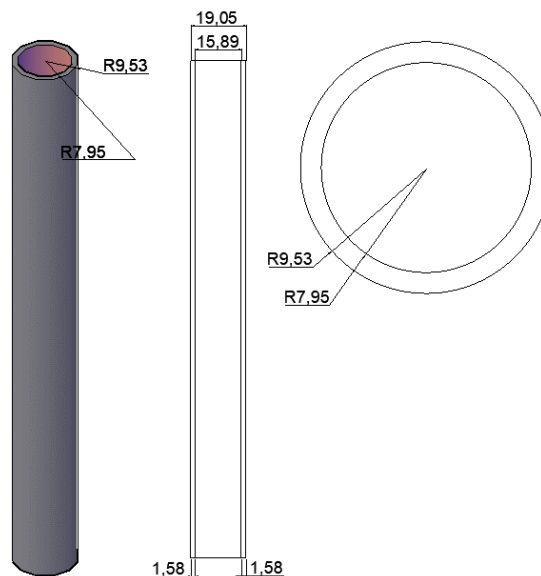


Figura 5. Dimensões do modelo.

Com isso, foi obtida a relação $D/d_{50} = 105$, superior ao valor recomendado por Klinkvort (2012). Quanto ao efeito de borda, a relação $S/D=5$ também está dentro dos limites recomendados pela literatura.

4.5 Medidas e Instrumentação

Como exposto no item 2.2, os principais esforços atuantes nas torres eólicas *offshore* são esforços laterais cíclicos, consequência da ação de ondas e ventos. Dessa forma, a modelagem física dessas estruturas pressupõe a aplicação de um



carregamento cíclico, capaz de simular a condição do protótipo. No entanto, de acordo com Klinkvort *et al.* (2018), a aplicação de um esforço monotônico também é relevante para o entendimento dos mecanismos de ruptura e da distribuição das forças atuando ao longo da fundação. Além disso, a definição da amplitude do carregamento a ser utilizada para os ensaios cíclicos é obtida com base no ensaio monotônico, sendo um percentual da carga de ruptura do solo ou da estaca.

Para os ensaios monotônicos, a força lateral no topo do *monopile* será aplicada através de um motor que atua no eixo horizontal, com deslocamento controlado, conforme esquema apresentado na Figura 6.

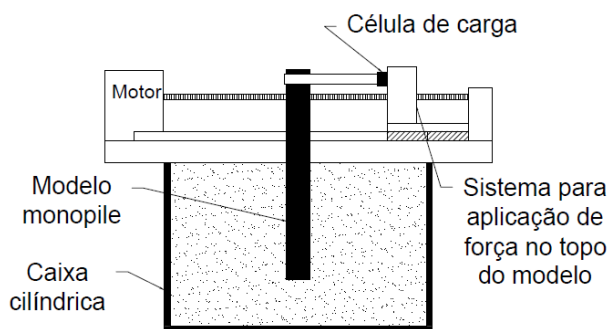


Figura 6. Esquema do atuador com sistema de deslocamento controlado para aplicação da força horizontal.

Uma célula de carga acoplada ao atuador faz a leitura da força aplicada e sensores a laser instalados em duas alturas (topo e base do solo) no sentido oposto ao atuador farão as leituras de deslocamento.

A medida do momento fletor ao longo do modelo de *monopile* será realizada através de uma série de *strain gages*, colados em ½ ponte de Wheatstone.

A partir da leitura de momento fletor M , é possível obter a reação do solo p a cada profundidade z e o deslocamento no topo do modelo y , através da Equação 3 e da Equação 4.

$$p(z) = \frac{d^2 M(z)}{dz^2} \quad (3)$$

$$y(z) = \frac{1}{E_p I_p} \iint M(z) dz^2 \quad (4)$$

Com os valores de p e y , é possível obter as curvas p - y experimentais, para posterior comparação com as curvas teóricas.

4.6 Modelagem numérica

Os resultados obtidos nos ensaios físicos em centrífuga serão comparados aos obtidos em modelos numéricos. A modelagem numérica tem papel fundamental na investigação de problemas complexos de engenharia e a comparação numérico-experimental propicia a sua validação para utilização em projetos futuros.

Ao longo da última década diversos autores desenvolveram modelos numéricos para avaliação do comportamento de TEO sobre *monopiles*. Não obstante o gasto computacional superior, somente uma modelagem 3D pode ser capaz de simular mais realisticamente o problema em questão, incluindo a consideração da interação solo-estrutura.

4.6.1 Modelagem do ensaio em centrífuga

Buscando validar o modelo físico a ser ensaiado na centrífuga, bem como estimar os deslocamentos e esforços atuantes no solo e na estaca, foi criado um modelo numérico no *software* PLAXIS 3D, versão 2013, com as mesmas dimensões do modelo físico.

A composição do modelo foi semelhante à utilizada por Velarde e Bachynski (2017) que avaliaram a interação solo-estaca pelo PLAXIS 3D de um *monopile* com capacidade para suporte de uma TEO de 10 MW.

A estaca metálica foi definida como elemento de placa, o solo como elemento sólido e uma placa rígida foi acoplada no topo da estaca. A placa é responsável por receber os carregamentos pontuais monotônicos e distribuí-los pela circunferência do *monopile* de maneira uniforme. As propriedades da estaca necessárias aos cálculos estão apresentadas na Tabela 3.

Por tratar-se de uma análise preliminar, foi



escolhido o modelo constitutivo de Mohr Coulomb. Os parâmetros do solo para o modelo Mohr-Coulomb estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros da areia usados no Modelo Mohr Coulomb.

Parâmetro	Solo
Peso específico não saturado γ [kN/m ³]	16,5
Módulo de elasticidade E' [MPa]	40,0
Coefficiente de Poisson	0,30
Coesão efetiva c' [kN/m ²]	0
Ângulo de atrito efetivo [°]	40
Ângulo de dilatação [°]	0

As condições de contorno também foram computadas e influenciam na resposta do modelo. As dimensões da caixa cilíndrica foram adotadas como os limites do corpo sólido. A superfície de contorno do modelo teve seus deslocamentos horizontais impedidos e o vertical liberado. Já a base, correspondente ao fundo da caixa, teve seus movimentos horizontais e verticais impedidos.

O *software* é capaz de reproduzir o ensaio centrífugo. Conforme descrito em PLAXIS (2013), o parâmetro $\sum M_{weight}$ deve ser modificado de acordo com o acréscimo de gravidade estabelecido. Para o ensaio com $N = 100$, o parâmetro foi alterado para 100.

4.6.2 Resultados

O ensaio monotônico foi simulado com o processamento de diversas fases de cálculo. Um incremento gradual da carga horizontal aplicada no topo da estaca foi considerado.

Segundo Achmus *et al.* (2009), em projetos adota-se usualmente uma rotação máxima do *monopile* ao nível do solo de 0,5°.

Esta rotação foi obtida ao se aplicar uma carga de 130 N ao modelo (1,3 MN em protótipo). Os deslocamentos da estaca (em dimensões de protótipo) ao nível do solo e no topo foram de 0,06 m e 0,15 m, respectivamente (Figura 7).

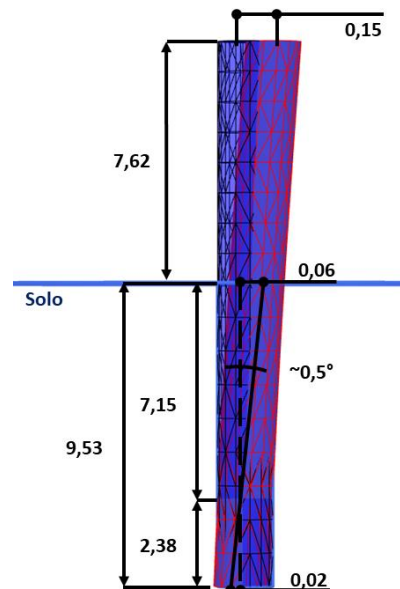


Figura 7. Rotação e deslocamentos da estaca ao se aplicar a carga de 1,3 MN ao protótipo (dimensões em m).

A evolução do deslocamento no topo da estaca em função do carregamento imposto é apresentada na Figura 8, para dimensões de protótipo. Estes dados serão utilizados como balizadores do ensaio na centrífuga.

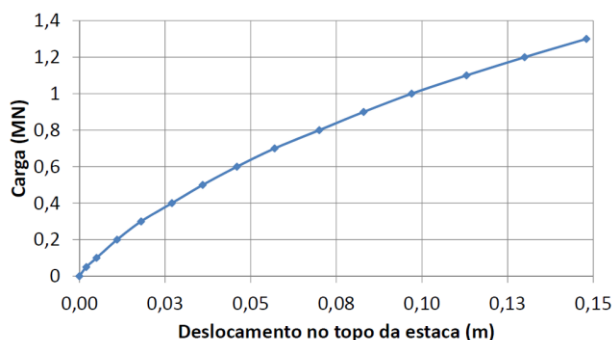


Figura 8. Relação Deslocamento-Carga aplicada (dimensões de protótipo).

A distribuição do momento fletor gerado ao longo do modelo pelo carregamento de 130 N é exibido na Figura 9. O valor máximo encontra-se a aproximadamente 1D abaixo do nível do solo. Este perfil de distribuição do momento fletor está de acordo com o obtido por Kirkwood (2015) e Zhu *et al.* (2016).

O resultado da distribuição do momento auxiliará na definição da distribuição dos *strain*



gates no modelo físico.

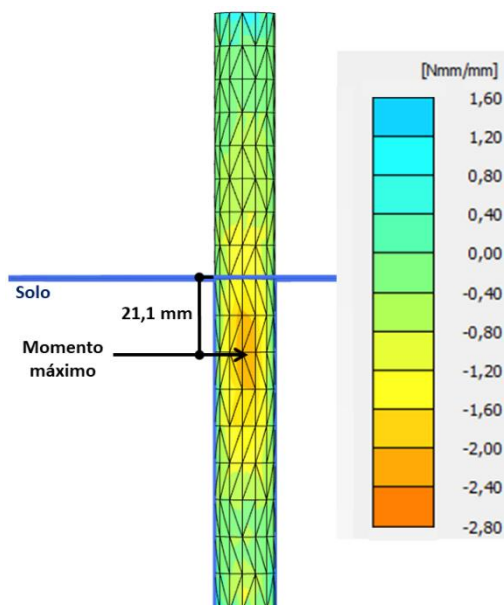


Figura 9. Distribuição de momento fletor ao longo do modelo.

A relação S/D adotada garantiu a não ocorrência dos efeitos de borda. Os deslocamentos totais nulos em parte considerável do solo no entorno do *monopile* (Figura 10), indicam não haver influência da caixa na resposta da estaca e do solo ao seu redor. A baixa magnitude da tensão normal x (σ_{xx}) nas regiões próximas aos limites laterais do solo (Figura 11) reforçam essa conclusão.

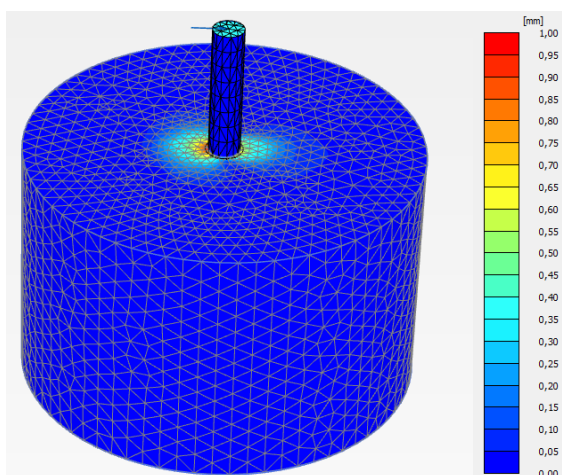


Figura 10. Deslocamentos horizontais do solo em dimensões de modelo.

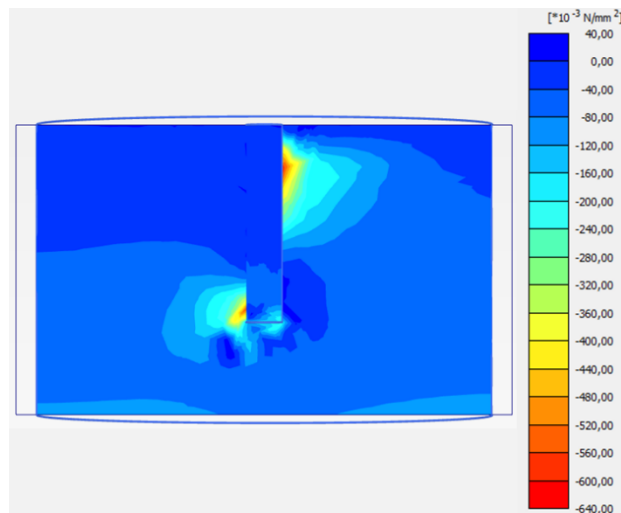


Figura 11. Distribuição de σ_{xx} em corte no eixo central de modelo/protótipo.

5 CONCLUSÕES

A modelagem física de estruturas como *monopiles* envolve aspectos importantes e complexos, de forma a garantir que o comportamento de protótipo seja simulado de forma mais realista possível. Uma extensa revisão da bibliografia permitiu identificar esses aspectos e transportá-los para a realidade da centrífuga de braço da COPPE/UFRJ, com o desenvolvimento de equipamentos específicos para esse projeto.

A modelagem numérica realizada de forma preliminar, permitiu prever os deslocamentos e esforços desenvolvidos durante o ensaio, além de auxiliar na distribuição da instrumentação.

Espera-se que os resultados obtidos a partir dos ensaios físicos contribuam para o melhor entendimento do comportamento dessas estruturas e dos mecanismos de interação solo-estrutura que se manifestam nestes tipos de problemas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de



Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Achmus, M.; Kuo, Y.; Abdel-Rahman, K. (2009). Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load, *Computers and Geotechnics*, Elsevier, Vol. 36, p. 725–735.
- Almeida, M. S. S.; Almeida, M. C. F.; Oliveira, J. R. M. S. (2015). Twenty years of Centrifuge Modeling at the Federal University of Rio de Janeiro, 3rd European Conference on Physical Modelling in Geotechnics.
- API (2011). RP 2GEO: Geotechnical and Foundation Design Considerations, Washington DC: American Petroleum Institute.
- Arany, L.; Bhattacharya, S.; Macdonald, J.; John Hogan, S. (2015). Simplified critical mudline bending moment spectra of offshore wind turbine support structures, *Wind Energy*, Wiley & Sons, Vol. 18, p. 2171–2197.
- Byrne, B. W.; Houlsby, G. T. (2003). Foundations for Offshore Wind Turbines, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 361, p. 2909–2930.
- Byrne, B. W.; McAdam, R.; Burd, H. J.; Houlsby, G. T.; Martin, C. M.; Zravkovic, L.; Taborda, D. M. G.; Potts, D. M.; Jardine, R. J.; Sideri, M.; Schroeder, F. C.; Gavin, K.; Doherty, P.; Igoe, D.; Muir Wood, A.; Kallehave, D.; Skov Gretlund, J. (2015). New design methods for large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications, Third International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG 2015).
- DNV (2014). DNV-OS-J101: Design of Offshore Wind Turbine Structures, Norway, Det Norske Veritas.
- FAPESP (2019). Ventos promissores a caminho, Edição 275, São Paulo. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/2019/01/10/ventos-promissores-a-caminho/>. Acesso em: 07/06/2019.
- Garnier, J.; Gaudin, C.; Springman, S. M.; Culligan, P. J.; Goodings, D.; Konig, D.; Kutter, B.; Phillips, R.; Randolph, M. F.; Thorel, L. (2007). Catalogue of Scaling Laws and Similitude Questions in Geotechnical Centrifuge Modelling, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol. 3, p. 01–23.
- Guimarães, M. P. P. (2014). *Modelagem Centrífuga da Movimentação Lateral de Dutos em Areia*, Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Kirkwood, P. (2015). *Cyclic Lateral Loading of Monopile Foundations in Sand*, PhD Thesis, University of Cambridge.
- Klinkvort, R. T. (2012). *Centrifuge Modelling of Drained Lateral Pile – Soil Response. Application for Offshore Wind Turbine Support Structures*, PhD Thesis, DTU Report R-271.
- Klinkvort, R. T.; Black, J. A.; Bayton, S. M.; Kaigh, S. K.; Madabhushi, G. S. P.; Blanc, M.; Thorel, L.; Zania, V.; Bienen, B.; Gaudin, C. (2018). A review of modelling effects in centrifuge monopile testing in sand, *Physical Modelling in Geotechnics*, London.
- Madabhushi, G. (2014). *Centrifuge Modelling for Civil Engineers*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 283 p.
- Milititsky, J. (2019). *Fundações de Torres: aerogeradores, linhas de transmissão e telecomunicações*, Oficina de Textos, São Paulo, 239 p.
- Ng, C. W. W. (2014). The state-of-the-art centrifuge modelling of geotechnical problems at HKUST, *Journal of Zhejiang University Science A*, Vol. 15/1, p. 1–21.
- Nikitas, G.; Vimalan, N. J.; Bhattacharya, S. (2016). An Innovative Device to Study Long Term Performance of Offshore Wind Turbines, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 82, p. 154–160.
- Oliveira Filho, W. (1987). *Considerações sobre ensaios Triaxiais em areias*, Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Ortiz, G. P.; Kampel, M. (2011). Potencial de Energia Eólica Offshore na Margem do Brasil, V SBO – Simpósio Brasileiro de Oceanografia, Santos.
- Petrobras (2018). “Estamos desenvolvendo o primeiro projeto piloto de energia eólica offshore do Brasil.” Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/estamos-desenvolvendo-o-primeiro-projeto-piloto-de-energia-eolica-offshore-do-brasil.htm>. Acesso em: 11/06/2019.
- PLAXIS 3D (2013). *Reference Manual*, Delft, Netherlands.
- Poder 360 (2019). Disponível em: <https://www.poder360.com.br/tecnologia/energia-eolica-ja-representa-8-da-matriz-energetica-brasileira/>. Acesso em: 21/05/2019.
- Taylor, R. N. (2005). *Geotechnical Centrifuge Technology*, Blackie Academic & Professional, London, 306 p.
- Velarde, J.; Bachynski, E. (2017). Design and fatigue analysis of monopile foundations to support the DTU 10 MW offshore wind turbine, *Energy Procedia*, Elsevier, Vol. 137, p. 3–13.
- Velloso, D. A.; Lopes, F. R. (2010). *Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas*, Oficina de Textos, São Paulo, 568 p.
- Wind Europe (2019). Offshore Wind in Europe – Key Trends and Statistics 2018.
- Zhu, B.; Li, T.; Xiong, G.; Liu, J. C. (2016). Centrifuge Model Tests on Laterally Loaded Piles in Sand, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, ICE, Vol. 16/4, p. 160–172.