

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Avaliação do Desempenho das Estacas de Sucção com o Aumento da Rugosidade Externa

Cássia Maria de Assis Rangel Melo

Professor EBTT, Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes/RJ, Brasil, cassia.melo@ifff.edu.br

Sérgio Tibana

Professor Associado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes/RJ, Brasil, tibana@uenf.br

Fernando de Albuquerque Saboya Junior

Professor Titular, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes/RJ, Brasil, saboya@uenf.br

Rodrigo Martins Reis

Professor Associado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes/RJ, Brasil, reis@uenf.br

RESUMO: Este trabalho teve como objetivo avaliar com testes em modelos reduzidos, o efeito da “rugosidade” do fuste de estacas de sucção quando submetidas ao arrancamento vertical. Os testes foram realizados com modelos de estacas com diferentes níveis de rugosidade até à estaca com fuste totalmente liso. Os resultados foram obtidos em cada ensaio utilizando uma estaca lisa e uma estaca rugosa. A estaca mais rugosa possui toda a área lateral (100% - 17 ranhuras) com ranhuras, a estaca rugosa tem 50% da área lateral com ranhuras (8 ranhuras), a menos rugosa tem 25% da área lateral com ranhuras (5 ranhuras). A partir dos resultados obtidos em cada um dos ensaios pode-se observar um aumento da força de arrancamento em função do aumento da rugosidade da parede externa. Os testes foram realizados em uma centrífuga geotécnica a 40g, a montagem dos ensaios, a instalação e o arrancamento vertical das estacas são apresentadas neste trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: estacas de sucção; fundação *offshore*; modelos centrífugos.

ABSTRACT: This work aimed to evaluate with tests in reduced models, the effect of the "roughness" of the shaft of suction caissons when subjected to vertical pullout. The tests were carried out with caisson models with different levels of roughness up to the caisson with totally smooth shaft. An increase in the load capacity was observed with the increase of roughness. The roughest caisson has the whole side area (100% - 17 grooves) with grooves, the roughest caisson has 50% of the lateral area with grooves (8 grooves); the least rough has 25% of the lateral area with grooves (5 grooves). From the results obtained in each of the tests it can be observed an increase of the pullout force as a function of the increase of the external wall roughness. The tests were performed in a 40g geotechnical centrifuge, the assembly of the tests; the installation and the vertical removal of the caissons are presented in this paper.

KEYWORDS: suction caissons, offshore foundation, centrifugal modeling.

1 Introdução

As estacas de sucção, desenvolvidas pelo NGI (*Norwegian Geotechnical Institute*) na década de 90, são instaladas como a própria denominação sugere, por aplicação de sucção. A sucção, além de proporcionar a cravação, possibilita a formação de uma bucha de solo no seu interior, aumentando a capacidade de suporte da estaca no leito marinho, garantindo assim a ancoragem das estruturas flutuantes. A estaca de sucção consiste de uma camisa metálica com grande diâmetro, e comprimento de até 6 vezes o diâmetro (Andersen *et al.*, 2005). A ponta desta estaca é aberta e o topo fechado, onde são posicionadas a válvula de saída de água/ar e a

bomba de sucção. Inicialmente é cravada com o seu peso próprio no leito marinho, com as válvulas no topo abertas. Então, após a estabilização dos deslocamentos decorrentes do peso próprio, a sucção é aplicada para que a estaca seja cravada totalmente no leito marinho (Figura 1).

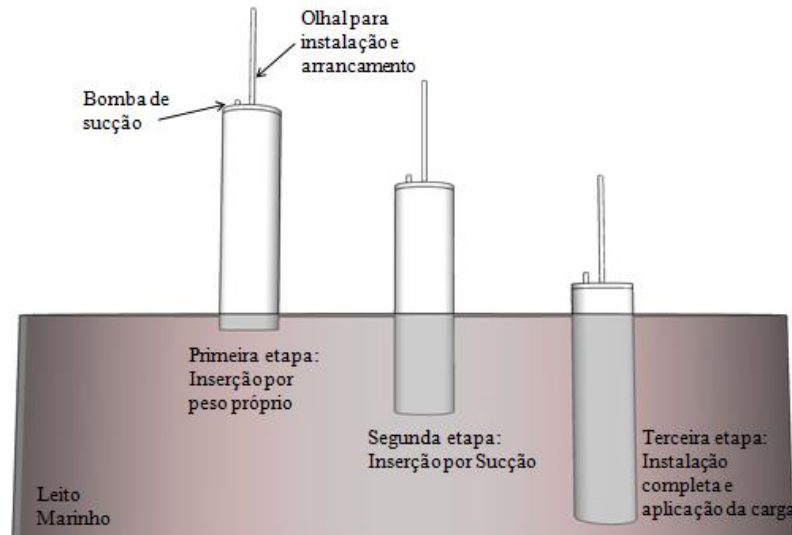


Figura 1. Instalação das estacas de sucção.

Após a instalação, a estaca permanece descarregada por um período de tempo, permitindo assim, que as condições do solo ao redor desta sejam recuperadas, pois estas foram alteradas durante a sua inserção. A estaca é então amarrada à estrutura flutuante através das linhas de ancoragem, podendo esta ser no topo ou na lateral da estaca.

Apesar da aparente simplicidade, estes projetos são complexos, possuem uma grande variedade de incertezas, estas oriundas do meio físico e também das solicitações ambientais. Assim, os estudos com modelos físicos reduzidos associados à modelagem numérica podem contribuir para soluções de projetos de estacas de sucção mais arrojados sem os custos e riscos que existem nos estudos realizados com protótipos.

O sucesso do uso das estacas de sucção em diferentes tipos de estruturas *offshore* leva a uma maior demanda no seu uso e, conseqüentemente, mais estudos devem ser realizados para analisar todas as incertezas que ainda envolvem este tipo de ancoragem. As estacas de sucção são uma boa solução como fundação *offshore*, pelo seu simples procedimento de instalação, que minimiza o uso de equipamentos pesados utilizados na cravação e necessários para estacas comuns ou outros tipos de fundações (Chen, 2013).

Atualmente muitas fundações de turbinas eólicas *offshore* são estacas de sucção únicas enterradas no leito marinho com profundidade a partir de 30 m. A utilização das estacas de sucção está sendo uma boa opção nestes casos devido a sua facilidade de instalação. A estabilidade e o bom desempenho da turbina eólica e da fundação são importantes para prevenir desastres e maximizar a eficiência da infraestrutura geradora de energia (Kim et al., 2014).

2 Instalação das Estacas de Sucção

Os equipamentos utilizados para a instalação das estacas de sucção são considerados leves e menos onerosos quando comparados com equipamentos utilizados para a cravação de estacas em alto mar (Sparrevik, 1998). Os equipamentos utilizados consistem em uma bomba recuperável e um sistema remoto (*Remotely Operated Vehicles – ROV*) para a monitoração e controle da aplicação da sucção.

Como não é possível a realização de nenhuma prova de carga, é importante a realização da monitoração da instalação respeitando todas as tolerâncias de projeto. A prova de carga não é necessária, pois já se tem o conhecimento da pressão de sucção e, portanto, a força transferida à estaca de sucção por ocasião de sua cravação. Os parâmetros monitorados são principalmente: posição, verticalidade, carga, sub pressão e a



profundidade de penetração (Sparrevik, 1998; Colliat *et al.*, 1998; El – Gharbawy *et al.*, 1999; Audibert *et al.*, 2003).

A prática corrente para prever a resistência à penetração é baseada assumindo a resistência não drenada na ponta da estaca, usando o fator capacidade de carga e calculando o atrito lateral ao longo da parede interna e externa. A força que penetra a estaca para o interior do leito marinho consiste no peso submerso da estaca e na pressão diferencial gerada pela sucção aplicada.

3 Capacidade de suporte das estacas de sucção

O projeto das estacas de sucção envolve primeiramente os métodos para o projeto de fundação com estacas, em função do mecanismo de transferência de carga ser semelhante na maioria dos casos. Como o procedimento de instalação é diferente, isso pode influenciar as propriedades do solo e consequentemente, a capacidade de suporte da estaca de sucção. Os métodos teóricos, numéricos e empíricos utilizados para estimar a capacidade de suporte das estacas de sucção são constantemente modificados em função de conhecimentos adquiridos em experiências de campo, testes em laboratórios e modelagem numérica.

Alguns institutos internacionais têm padrões com práticas recomendadas para o projeto de fundações *offshore*, sendo os padrões americanos os mais conservadores. Mas nem todos têm práticas relevantes para o projeto de estacas de sucção.

3.1 Capacidade de carga axial das estacas de sucção

O cálculo da capacidade de carga axial das estacas de sucção (compressão ou tração) pode ser realizado utilizando o método Alpha (α), que considera as componentes do atrito lateral e da capacidade de carga do solo na base da estaca (Equação 1). Esse método Alpha também é conhecido como o método API (*American Petroleum Institute*) por ser muito utilizado por esse instituto para o projeto de estacas *offshore* (Celestino *et al.*, 2019).

$$Q = Q_{\text{atrito}} + Q_{\text{ponta}} = f \cdot A_{\text{lateral}} + q \cdot A_{\text{ponta}} \quad (1)$$

Sendo Q_{atrito} a parcela referente ao atrito lateral, Q_{ponta} a parcela referente à resistência na ponta da estaca, f o atrito unitário obtido por $\alpha \cdot S_u$, onde α é o fator atrito adimensional e S_u a resistência ao cisalhamento não drenado do solo, A_{lateral} é área lateral da estaca, q a resistência de ponta unitária, A_{ponta} é a área da ponta da estaca.

De acordo com o documento de recomendação da API (*American Petroleum Institute*), API-RP2A, o cálculo do fator atrito lateral α pode ser utilizado em função da resistência ao cisalhamento não drenado médio e da tensão efetiva do solo. Para argilas normalmente adensadas, α é aproximadamente 1,0 e para argilas sobre adensada (OCR) os valores obtidos são entre 0,4 a 0,6 (Randolph and Gourvenec, 2011). A recomendação para o fator capacidade de carga (N_c) pela API é de 9,0 baseado na teoria da capacidade de carga após a correção dos fatores de forma e profundidade (Skempton, 1951). Entretanto, muitas investigações concluíram, que o fator atrito lateral deve ser reduzido devido ao efeito da instalação por sucção. Pois este tipo de instalação reduz as tensões na parede externa da estaca, acompanhado pelo movimento do solo para o interior da estaca, mesmo depois da dissipação da poropressão gerada por este procedimento (Andersen e Jostad, 1999 e 2004). Estudos independentes deduziram uma redução do fator atrito lateral, ficando este entre 0,25 e 0,8, acompanhado por um fator capacidade de carga variando entre 6 e 16 (Olson *et al.*, 2003; Randolph and House, 2001; Sukumaran *et al.*, 1999). A grande diferença entre esses valores de α se deve as condições assumidas em cada caso estudado. Como por exemplo: as propriedades do solo, as relações de aspecto, o tempo de setup, a escala da modelagem física, o estado de tensões do solo e algumas vezes o grau de adensamento do solo. Entretanto, a maioria destes estudos não separou as medidas das duas parcelas analisadas. Portanto, os valores de N_c e de α são subjetivos para as suposições feitas nesses estudos e também à incerteza do peso da bucha do solo (Luke *et al.*, 2005).

4 Materiais e Métodos

4.1 Modelagem Física

Foram realizados três ensaios na centrífuga geotécnica da UENF com uma aceleração da gravidade de $40 \times g$, utilizando quatro tipos de estacas, sendo uma com a parede externa lisa e as outras três com paredes externas rugosas. Esta rugosidade foi imposta com o intuito de aumentar a força de arrancamento estática e assim analisar a componente relacionada ao atrito lateral na força de arrancamento axial. Os ensaios eram realizados com duas estacas, sempre uma estaca lisa e uma estaca rugosa para efetuar a comparação dos resultados e assim analisar o efeito do atrito lateral.

As estacas foram confeccionadas em alumínio com 145 mm de comprimento e 40 mm de diâmetro externo cada, dando uma relação de aspecto (L/D) de 3,6. A espessura da parede da estaca é de 2 mm, apresentando um índice de esbeltez (L/t) de 72,5. Os dentes das estacas possuem o mesmo comprimento (7,5 mm) e a mesma profundidade (1 mm), dando uma inclinação de aproximadamente $82,5^\circ$. As estacas são classificadas em função do espaçamento da rugosidade ficando a nomenclatura em: (a) mais rugosa (17 ranhuras), (b) rugosa (8 ranhuras) e (c) menos rugosa (5 ranhuras) (Figura 2). A estaca mais rugosa tem toda a sua área lateral (100%) com ranhuras, a estaca rugosa tem 50% da sua área lateral com ranhuras, a menos rugosa tem 25% da sua área lateral com ranhuras. No topo da estaca é posicionado o olhal de amarração e o furo para ventilação e aplicação de vácuo. O orifício da ventilação é utilizado durante a inserção por peso próprio (aberto) e para aplicação de vácuo durante a inserção por sucção (fechado).

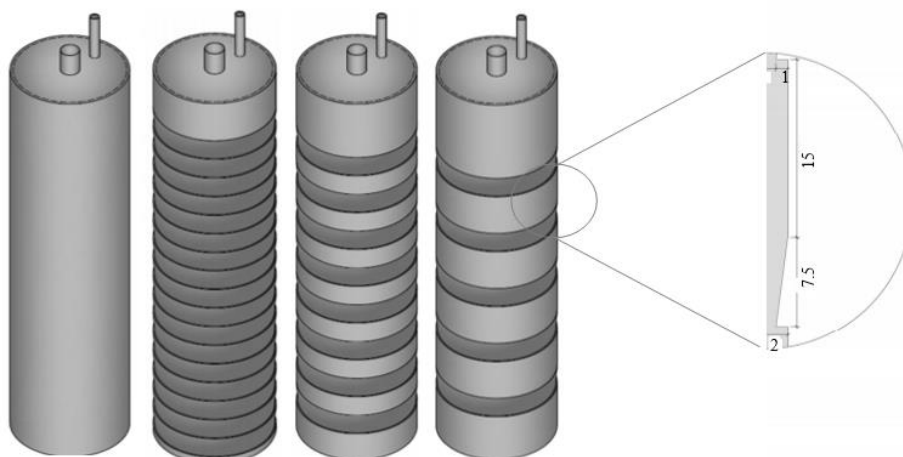


Figura 2. Estacas utilizadas nos ensaios de arrancamento.

O solo foi preparado utilizando uma mistura de 60% metacaulim com 40% caulim. O processo de preparação da amostra foi a mesma utilizada por Melo (2010) utilizando um misturador coloidal e uma betoneira adaptada para aplicação de vácuo. O limite de liquidez, o índice de plasticidade e a densidade dos grãos são respectivamente, 62,5%, 35,7% e 2,64.

Inicialmente foi desenvolvido um sistema capaz de preparar uma amostra de solo normalmente adensado, para os ensaios centrífugos, através de adensamento hidráulico, com a aplicação de vácuo na base da amostra. Após o adensamento do solo, foi realizado o ensaio com o mini penetrômetro T-bar com a gravidade induzida de $40 g$, determinando assim a resistência não drenada ao longo da profundidade na mesma condição do ensaio de arrancamento.

Após o ensaio, as estacas foram instaladas em 1g usando um dispositivo especial projetado para este fim específico combinando carga e vácuo (Figura 3 (a) e (b)), simulando o processo real de instalação do protótipo. Em cada ensaio eram cravadas duas estacas, uma lisa e uma rugosa, para que se determinasse a diferença da força de arrancamento em função da rugosidade imposta. O ensaio 1 corresponde à estaca lisa e a mais rugosa (a), o ensaio 2 corresponde à estaca lisa comparada com a estaca rugosa (b) e o ensaio 3 foi realizado com a estaca lisa e a estaca menos rugosa (c).

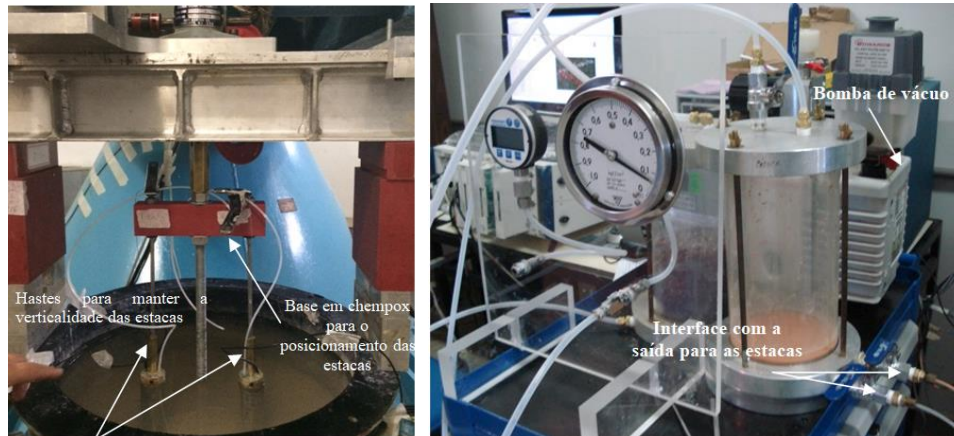


Figura 3. (a) Cravação das estacas simulando o peso próprio. (b) Aparato do sistema de aplicação da sucção.

Para os ensaios do arrancamento a 40 g foi utilizado um adaptador que consiste de uma barra de alumínio com dois orifícios onde são conectadas as células de carga, esta viga é presa diretamente no pistão do atuador hidráulico.

Após atingir a aceleração inercial equivalente à gravidade desejada, o pistão do atuador hidráulico era completamente recolhido e o modelo era deslocado com uma velocidade que assegurasse a equivalência com as condições não-drenadas do protótipo através da velocidade normalizada V (House et al. 2001). O arrancamento das estacas é realizado a uma velocidade constante de 2,6 mm/s.

5 Resultados dos ensaios de arrancamento

Os ensaios de arrancamento (Figura 4) foram realizados aproximadamente 20 horas depois da instalação das estacas por sucção, permitindo assim a dissipação da poropressão gerada no solo durante a instalação das estacas. Em todos os ensaios as estacas de sucção estavam seladas, mantendo assim a sucção em seu interior e a bucha de solo no interior da estaca.



Figura 4. Ensaio de arrancamento das estacas

A partir dos resultados dos ensaios (Figura 5), foi comprovado que a estaca com a parede rugosa obtém uma força maior de arrancamento quando comparada com a de parede lisa, independentemente do espaçamento das ranhuras.

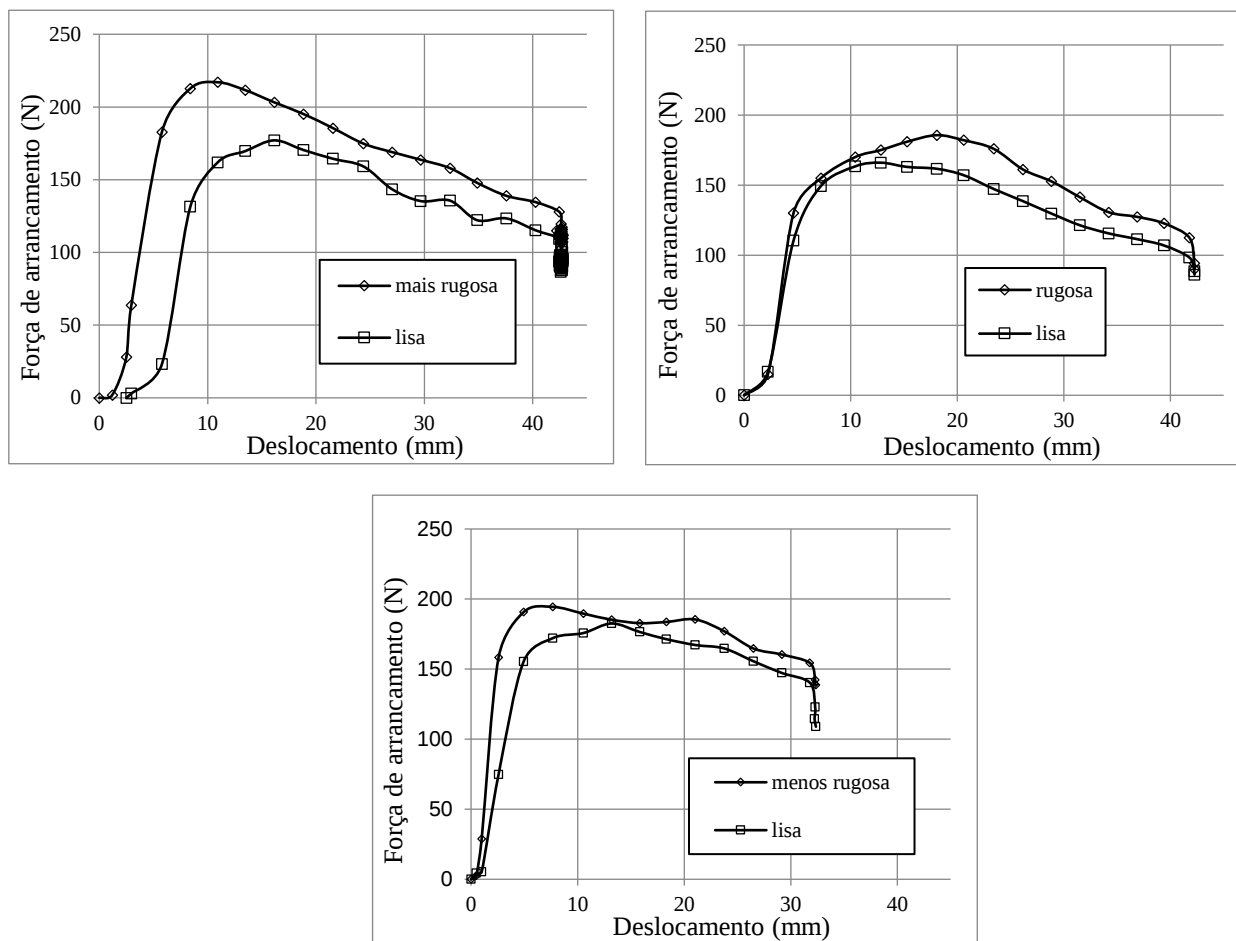


Figura 5. Resultados dos ensaios de arrancamento das estacas

A Tabela 1 apresenta os resultados da força de arrancamento em cada modelo de estaca de sucção e os valores estimados para os respectivos protótipos. Os valores dos protótipos serão utilizados para determinação das parcelas das componentes da força de arrancamento em cada tipo de estaca.

Tabela 1. Força de arrancamento dos modelos e estimativa dos protótipos.

Teste	Rugosa		Lisa	
	Modelo (N)	Protótipo (kN)	Modelo (N)	Protótipo (kN)
1	217.10	347.36	177.04	283.26
2	185.60	296.96	165.90	265.44
3	194.40	311.04	182.50	292.00

6 Análise dos Resultados

As formulações para determinar a força de arrancamento das estacas de sucção são baseadas no equilíbrio de forças que atuam na estaca durante o arrancamento, essas são compostas por três parcelas: o peso da estaca mais o peso da bucha de solo; a resistência de ponta da estaca e a resistência lateral. Com a obtenção do peso da estaca mais a bucha do solo após cada ensaio, esta parcela da força é conhecida. A resistência de ponta em cada ensaio foi determinada a partir da equação 2, utilizando a resistência ao cisalhamento não



drenado obtido no ensaio T-bar. O valor de N_c igual a 9, adotado pela API (API RP 2SK), foi adotado pois não foi possível obtê-lo a partir de ensaios nesta pesquisa.

$$F_{ponta} = [(N_c S_{u\ pont a} - \sigma_{v\ pont a}) A_b] \quad (2)$$

Separando essas duas parcelas da força de arrancamento em cada protótipo, pôde-se determinar a parcela da resistência lateral conforme é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Parcelas componentes da força de arrancamento em relação ao protótipo.

Teste	Peso da estaca + bucha (kN)		Resistência de ponta (kN)		Resistência lateral (kN)	
	Rugosa	Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa	Lisa
1	111.85	109.97	80.59	80.59	156.80	90.82
2	107.46	108.72	64.23	64.23	125.30	92.49
3	109.97	111.23	87.87	87.87	113.20	92.90

A partir destes resultados pode-se assim afirmar que a estaca com menor espaçamento entre as ranhuras obteve um melhor desempenho devido à parcela maior da resistência lateral comparando com as outras estacas. Ela foi seguida pela estaca com espaçamento médio e, com menor eficiência, a estaca com maior espaçamento entre as ranhuras.

7 Conclusão

Neste trabalho, foram apresentados os procedimentos e resultados de uma pesquisa experimental que teve como objetivo principal avaliar o desempenho das estacas de sucção submetidas a carregamento monotônico axial com geometrias (rugosidades) diferentes no fuste. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o sistema de aplicação da sucção desenvolvido para a cravação das estacas à 1g foi satisfatório, criando no interior destas uma bucha de solo, assim como o sistema de arrancamento, garantindo a verticalidade tanto na cravação como durante o arrancamento axial das estacas.

A eficiência da imposição da rugosidade na parede externa da estaca foi comprovada, aumentando a resistência ao arrancamento vertical. A parcela referente à resistência lateral passou a ser maior quando a estaca rugosa é comparada com a estaca lisa, quanto maior a quantidade de ranhuras, maior a parcela do atrito lateral. Considera-se que o modo de ruptura da estaca de sucção mais rugosa pode ocorrer no contato solo/solo e não mais no contato estaca/solo, alterando, assim, a superfície de ruptura da estaca mais rugosa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e a PETROBRAS pelo apoio financeiro a essa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Petroleum Institute (1991). *Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms*, API RP2A, 19th ed., August1.
- Andersen, K.H. and Jostad, H.P. (1999). Foundation design of skirted foundations and anchors in clay. *Proc. 31st Annual Offshore Technology*, Houston, TX. OTC 10824.
- Andersen, K.H., and Jostad, H.P. (2004). Shear strength along inside of suction anchor skirt wall in clay, *Proceedings of the 36th annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, OTC 16844, May 3-6, pp. 1-13.



- Andersen, K.H., Jeanjean, P., Luger, D., Jostad, H.P. (2005) Centrifuge Tests on Installation of Suction Anchors in Soft Clay”. *Ocean Engineering* 32: 845-863.
- Audibert, J.M.E., Clukey, E., and Huang, J. (2003). Suction caisson installation at Horn Mountain – a case history, *Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu, Hawaii, May 25-30, pp. 1309-1316.
- Celestino, V., Jorge, S., Alfonso, S., Carlos, G., Gilberto, O. (2019). Numerical evaluation of the combined capacity of suction caissons of subsea systems for deep water hydrocarbon exploitation 2 *Ingeniería Investigación y tecnología*, volumen XX (número 1), enero-marzo 2019: 1-10. <http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n1.004>
- Chen, C. H, (2013). *Performance of Suction Caissons with a Small Aspect Ratio*. Ph.D. Dissertation. The University of Texas at Austin.
- Colliat, J.L., Boisard, P., Sparrevik, P., Gramet, J.C., (1998). Design and installation of suction anchor piles at soft clay site, *Journal of Waterway, Port, Coastal & Ocean Engineering*, Vol. 124, No. 4, July/August 1998, pp. 179-188.
- El-Gharbawy, S.L., Olson, R.E., and Scott, S.A. (1999). Suction anchor installations for deep Gulf of Mexico applications, *Proceedings of the 31st annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, OTC 10992, May 3-6, pp. 747-754.
- Kim, Y., Teodosio, B., & Ahn, J. (2014). Investigation of Behavior of Suction Caisson Anchors based on Single-Wall and Double-Wall Model Caissons. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 14(2), 107–113. <https://doi.org/10.9798/kosham.2014.14.2.107>
- LeBlanc, C. (2004). *Design of Offshore Wind Turbine Support Structures*, Ph. D. Thesis, Aalborg University, Denmark.
- Luke, A.M., Rauch, A.F., Olson, R.E. and Mecham, E.C. (2005). Components of suction caisson capacity measure in axial pullout tests. *Ocean Engineering*, 32, 878-891.
- Melo, C. M. A. R. (2010), *Avaliação de desempenho e desenvolvimento de metodologias para estudos de ancoragem de estruturas flutuantes com estacas de sucção*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goitacazes/RJ, 162p.
- Olson, R.E., Rauch, A.F., Mecham, E.C., and Luke, A.M. (2003). Self-weight consolidation of large laboratory deposits of clay, *Proceedings of the 12th Pan- American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Cambridge, Mass., June, pp. 703-708.
- Randolph, M.F., House, A.R. (2001). *The Complementary roles of physical and computational modeling*. Report n. G: 1522, the University of Western Australia, Australia.
- Randolph, M., and Gourvenec, S. (2011). *Offshore Geotechnical Engineering*. UK: Spon Press.
- Santos, A. L. F., 1997, *Âncoras de Sucção*, Tese de Mestrado COPPE/UFRJ - Programa de Engenharia Civil.
- Skempton, A.W. (1951). The bearing capacity of clays, *Proceedings, Building Research Congress*, London, pp. 180-189.
- Sukumaran, B., McCarron, W.O., Jeanjean, P. and Abouseeda, H. (1999). Efficient finite element techniques for limit analysis of suction caissons under lateral loads. *Computers & Geotechnics*, 24(2), 89-107