XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/78

Metodologia de Calibração de Instrumentação em Condutor Modelo

Arthur Veiga Silvério Pinheiro
Pesquisador e Doutorando, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, arthur_veiga@poli.ufrj.br

Fernando Artur Brasil Danziger
Professor Adjunto, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, danziger@coc.ufrj.br

Graziella Maria Faquim Jannuzzi
Professora Adjunta, POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, jannuzzi@coc.ufrj.br

Edgard Luis Bispo dos Santos
Técnico, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, edgardluis2000@yahoo.com.br

Lucio Flavio Rocha Carvalho
Engenheiro, PETROBRAS, Rio de Janeiro, Brasil, lucio.flavio@petrobras.com.br

Fabio Sawada Cutrim
Engenheiro, PETROBRAS, Rio de Janeiro, Brasil, fabiosawada@petrobras.com.br

João Henrique Diniz Guimarães
Engenheiro, MWERT, Rio de Janeiro, Brasil, joao.guimaraes@mwert.com.br

RESUMO: Estacas e condutores modelos têm sido utilizados há muito tempo para observar o comportamento e desenvolver métodos de projeto para diferentes sistemas de carga e tipos de solo. Diferentes tipos de instrumentação, incluindo extensômetros de ponte completa, células de tensão de cisalhamento, células de tensão total e transdutores de poro-pressão tem sido utilizados em estudos recentes na literatura. Este artigo detalha a instrumentação e os procedimentos empregados para calibrar em laboratório extensômetros, células de tensão total em miniatura e células de poro-pressão, para testes de carga vertical e lateral (avaliação do momento fletor). Os sensores foram instalados em um condutor de aço com 178 mm (7 polegadas) de diâmetro, 12 mm de espessura e 6 metros de comprimento (ponta aberta) embutidos na parede da estaca devido à limitação de espaço interno suficiente para passagem do motor de fundo. Um dispositivo especial de saturação foi desenvolvido, permitindo que a saturação do filtro fosse mantida até o início da cravação do condutor no solo saturado. As constantes obtidas a partir da calibração após a instalação dos sensores no condutor foram comparadas com as constantes nominais, que são regularmente utilizadas na prática. Foram obtidas diferenças na faixa de -7% a +5% no caso dos extensômetros e de -15% a +11% no caso das células de tensão total e dos transdutores de poro-pressão.

PALAVRAS-CHAVE: condutor jateado, instrumentação, argila mole.

Model piles and conductors have been used for a long time to observe the behaviour and to develop design methods for different loading systems and soil types. Different levels of instrumentation have been used, including full bridge strain gauges, shear stress cells, total stress cells and pore pressure cells. This paper details the instrumentation and the procedures employed to calibrate in the laboratory strain gauges, miniature total stress cells and pore pressure cells, for vertical and lateral load tests (assessment of bending moment). The sensors were installed in a 178 mm (7-inch) diameter, 12 mm thick, 6-meter-long steel conductor (open ended pile), embedded within the pile wall, due to the constraint of keeping internal space enough for the installation of a mud motor. A special pore pressure device was developed, allowing saturation of the filter to be kept while the conductor has not yet penetrated in the saturated soil. The constants obtained from calibration after installation of the sensors in the conductor have been compared with the nominal constants, which are regularly used in practice. Differences in the range of -7% to +5% were obtained in the case of the strain gauges and -15% to +11% in the case of the total stress cells and pore pressure cells.

Keywords: jetted conductor; instrumentation; soft-clay.

1 INTRODUÇÃO

A primeira seção de um poço de petróleo é denominada revestimento condutor, e o procedimento de instalação mais comum é o jateamento, que utiliza a energia hidráulica da água para escavar o solo até atingir a profundidade desejada, definida no projeto do poço. A capacidade de carga do condutor depende de diversas variáveis associadas ao processo de instalação, as quais têm sido estudadas por vários autores (por exemplo, Beck, 1991; Jeanjean, 2002; Yang et al., 2013; Zakery et al., 2014; Jeanjean et al., 2015; Zhou et al., 2016; Kan et al., 2018).

Os estudos mencionados concentraram-se principalmente na capacidade de carga vertical estática, tanto durante a instalação quanto após um determinado período, considerando o chamado efeito de ganho de resistência ao longo do tempo (*set-up*). Entretanto, poucos trabalhos investigaram o comportamento do condutor sob carregamentos laterais, especialmente carregamentos cíclicos, aspecto crucial na análise da fadiga de *risers*.

Estacas instrumentadas, com diferentes dimensões, têm sido ensaiadas em diversos tipos de solo. Diversos instrumentos têm sido utilizados nesses ensaios, incluindo extensômetros elétricos (*strain gauges*), transdutores de poro-pressão, células de tensão total, células de tensão de cisalhamento e, mais recentemente, sensores de fibra óptica. No caso específico dos condutores, a instrumentação apresenta maior complexidade, pois todos os sensores devem ser instalados no interior da parede do condutor, uma vez que o motor de lama (mud motor) opera internamente ao condutor (por exemplo, Meng et al., 2016).

Além disso, os instrumentos tornaram-se menores, permitindo sua instalação embutida na parede do condutor (ou da estaca), o que não era possível anteriormente. Outro desafio consiste na escolha de um sistema adequado de aquisição de dados, especialmente quando há um grande número de sensores e quando são realizados ensaios com carregamentos cíclicos.

Um amplo projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) foi estabelecido entre a Petrobras e a Universidade Federal do Rio de Janeiro para investigar diversos aspectos do comportamento de condutores. Para isso, foi construída uma estrutura experimental (*test rig*) capaz de reproduzir condições operacionais reais encontradas em plataformas de perfuração offshore, permitindo a realização de ensaios de carregamento em condições controladas (Fernandes et al., 2022).

Os ensaios têm sido conduzidos no campo experimental de argila muito mole e de alta plasticidade Sarapuí II (Jannuzzi et al., 2015; Danziger et al., 2019), cujas características são semelhantes às encontradas em algumas regiões offshore do Brasil. Ressalta-se que, na prática atual de estacas instrumentadas, geralmente são considerados os valores nominais das constantes dos sensores fornecidos pelos fabricantes, ou então a calibração individual de cada instrumento, realizada de forma isolada, ou seja, antes de sua instalação na estaca.

O presente artigo apresenta a instrumentação de um condutor em modelo reduzido, bem como a calibração realizada em laboratório com os sensores já instalados no sistema.

2 METODOLOGIA

2.1 Condutor Instrumentado

O condutor instrumentado é um tubo de aço com 178 mm (7 polegadas) de diâmetro, 12 mm de espessura e 6 metros de comprimento. O modelo utilizado está em uma escala aproximada de 1:5. A Figura 1 apresenta o condutor após uma prova de carga a tração.

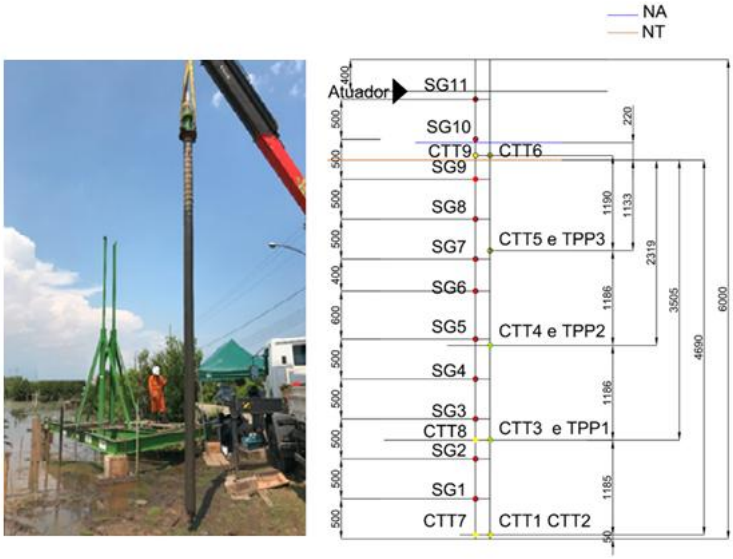


Figura 1. Condutor após ensaio e layout da instrumentação instalada (dimensões em mm).

Ao longo de todo o comprimento do condutor foram instalados 11 extensômetros, 9 células de tensão total (CTT) e 3 transdutores de poro pressão (TPP) (Figura 1 e Tabela 1). Especificamente a CTT1 foi instalada na face interna do condutor para medir a pressão durante o jateamento e detectar um possível entupimento.

Tabela 1. Sensores Instalados.

Sensor	Quantidade
Extensômetros (SG)	11
Célula de tensão total (CTT)	9
Transdutor de poro-pressão (TPP)	3

2.2 Circuito ponte de Wheatstone

O condutor foi instrumentado com 11 níveis de ponte completa de Wheatstone, permitindo a separação dos efeitos de compressão normal e flexão (medindo somente o momento fletor). Equação 1 mostra a relação entre a tensão de saída (sinal) e a tensão de alimentação, onde k é o fator da ponte ("*gaugefactor*").

$$\varepsilon = \frac{1V_o}{k\,V_s} \tag{1}$$

Onde, ε = deformação; V_0 = tensão de saída (sinal); V_s = tensão de alimentação; k = "*gaugefactor*"

A Figura 2 apresenta o procedimento de instalação dos extensômetros. Depois de colado o extensômetro, uma camada de cera foi adicionada, seguida de isolante líquida, protegendo o sensor contra umidade.

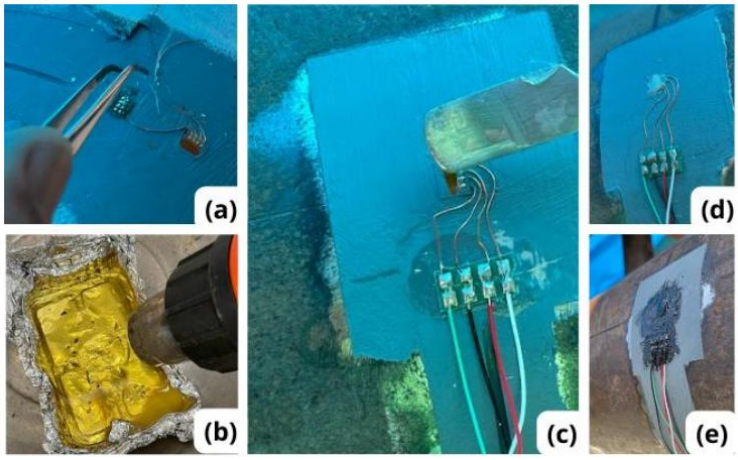


Figura 2. Procedimento de instalação do extensômetro: a) conexão do fio; b) aquecimento da cera; c) proteção do extensômetro com cera; d) Extensômetro protegido; e) proteção com isolante líquida.

2.3 Célula de tensão total (CTT)

Nove células de tensão total em miniatura Kyowa PS-5KC com 500 kPa de capacidade foram utilizadas. (Figura 3). Uma das vantagens desse sensor, além de suas dimensões reduzidas, é a saída do cabo ser paralela à superfície do sensor.

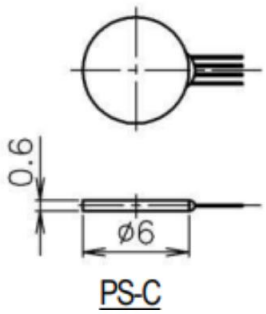


Figura 3. Célula de tensão total PS-5KC (dimensões em mm).

2.4 Transdutor de poro-pressão (TPP)

Uma célula de poro-pressão embutida na parede do condutor foi desenvolvida utilizando as células de tensão total em miniatura, apresentadas na seção anterior e um filtro fabricado com bronze sinterizado. O projeto da célula foi realizado com a principal preocupação de manter a saturação do filtro quando a célula está no ar, ou seja, antes de atingir o nível d'água, que se encontra aproximadamente 0,3 m acima do nível do solo.

Deve-se destacar que em casos anteriores (Guimarães, 2015), uma pequena peça, preenchida com água, era montada externamente à estaca, sendo removida após a estaca atravessar o nível freático. No presente caso, esse procedimento não é possível, pois a taxa de penetração do condutor é contínua.

A Figura 4 ilustra o procedimento de saturação com óleo de silicone, no qual o óleo é inserido pela parte posterior do filtro. A Figura 5 apresenta a célula de tensão total e o transdutor de poro-pressão instalados no condutor antes da operação de jateamento em campo.



Figura 4. Procedimento de saturação da célula de poro-pressão.



Figura 5. Célula de tensão total e poro-pressão antes do jateamento no campo.

2.5 Calibração dos extensômetros de ponte completa (SG) para momento fletor

Em laboratório, foi possível reproduzir a condição de momento fletor constante utilizando 2 pistões hidráulicos posicionados à mesma distância de 2 âncoras (uma de cada lado), conectando o condutor e 2 vigas (Figura 6 e Figura 7). Através deste sistema foi possível a calibração simultânea de todos os extensômetros. A carga aplicada foi medida com células de carga Kyowa. Com este procedimento, obtém-se uma constante específica para cada ponte, ao contrário do caso usual em que são considerados apenas valores nominais. Nesse caso, como o momento fletor é constante, todas as pontes teriam a mesma constante. A calibração dos extensômetros quando já instalados é raramente realizada. Um exemplo de tal calibração foi fornecido por Haugen (1983) em uma montagem diferente, na qual uma carga foi aplicada a uma certa distância do topo da estaca, gerando assim um diagrama de momento fletor com formato triangular. Este autor mencionou que diferentes constantes foram obtidas para os extensômetros instalados.

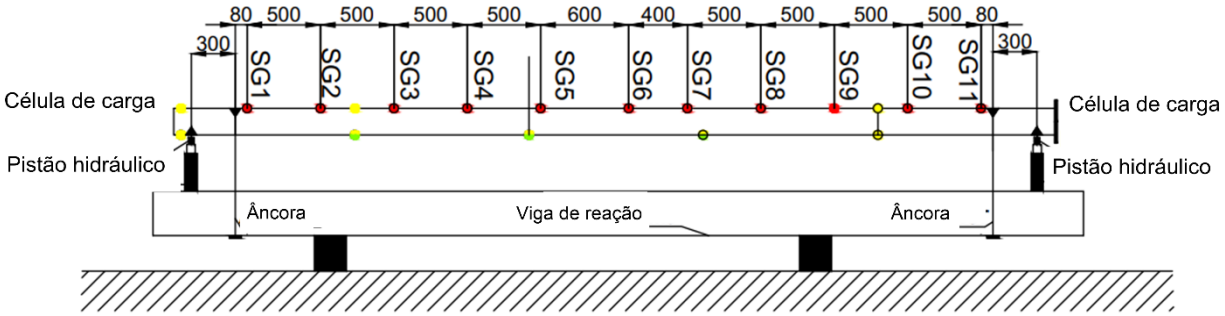


Figura 6. Layout de calibração dos extensômetros (dimensões em milímetros).

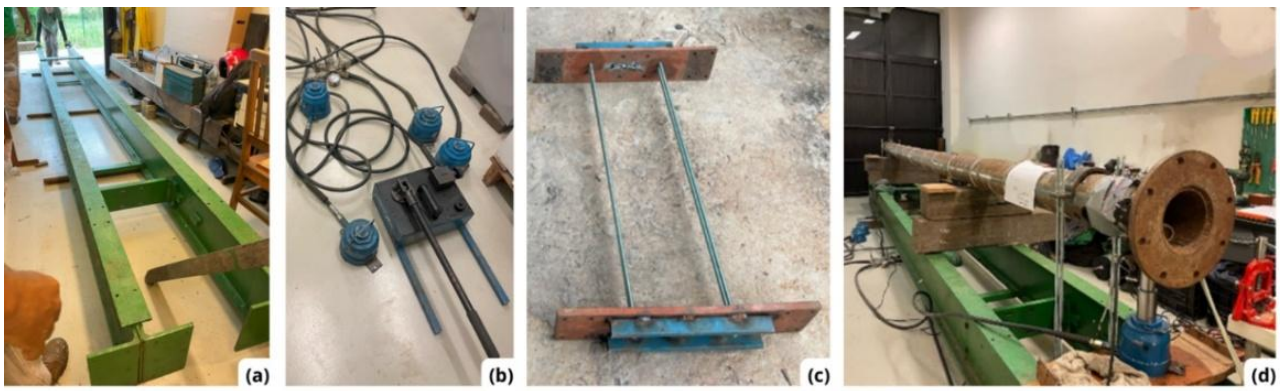


Figura 7. Sistema de calibração de extensômetros: a) 2 vigas de reação; b) pistões hidráulicos; c) âncora; d) sistema montado.

Durante a calibração foram aplicados três ciclos de carregamento-descarregamento com 20 kN.m, o momento fletor esperado durante os testes de carga horizontal em campo. Figura 8 e Tabela 2 apresentam os resultados obtidos, que mostram diferentes valores obtidos para todas as pontes.

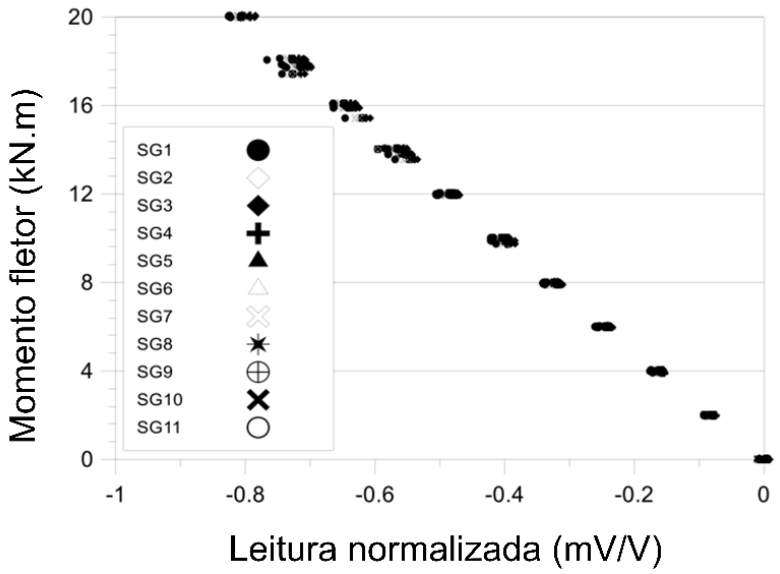


Figura 8. Calibração dos extensômetros com 3 ciclos de 20 kN.m de carregamento e descarregamento.

Tabela 2. Constantes das pontes de *straingauges* (média dos 3 ciclos).

Straingauge	Constante (kN.m)/(mV/V)
SG1	24,287
SG2	24,906
SG3	25,282
SG4	25,050
SG5	24,610
SG6	24,770
SG7	24,833
SG8	25,111
SG9	24,217
SG10	24,519
SG11	22,434

2.6 Calibração simultânea tensão total e poro-pressão

Um sistema foi desenvolvido para calibrar simultaneamente célula de tensão total e transdutor de poro-pressão diametralmente opostos. Nos pontos de instrumentação próximos (Figura 5), cada grupo de 2 sensores pode ser calibrados ao mesmo tempo. O sistema faz parte de uma patente com a Petrobras que está em fase de elaboração, por esse motivo, não serão incluídas informações sobre a calibração das CTTs e dos TPPs.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma comparação entre o valor teórico e o medido das contastes foi feita para o caso da calibração com momento fletor.

$$\varepsilon = \frac{My}{EI} \tag{2}$$

Onde:
M = momento fletor; y=diâmetro externo /2; E = Módulo de Young; I = Momento de inércia

A partir da equação 2 a deformação obtida é $3{,}98 \times 10^{-4}$m/m para 20 kN.m de momento fletor. Já baseado na equação 1, usando o *gaugefactor* de 2,11, o valor esperado de V_0/V_S é 0,83 mV/V. Portanto, a constante nominal é 24,09 kN.m/(mV/V). Comparando esse valor com as constantes incluídas na Tabela 2, a diferença varia entre -7% e +5%.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Um condutor de aço com diâmetro de 178 mm (7 polegadas), 12 mm de espessura e 6 metros de comprimento (estaca de extremidade aberta) foi instrumentado com extensômetros, células de tensão total em miniatura e células de poro-pressão, para testes de carga vertical e lateral (avaliação do momento de flexão). A célula de poro-pressão foi desenvolvida para permitir que a saturação do filtro fosse mantida enquanto o condutor ainda não estivesse penetrado no solo saturado. Todos os sensores foram embutidos na parede da estaca, devido à restrição de manter espaço interno suficiente para a instalação de um motor de fundo usado para a jateamento do condutor. A calibração de todos os sensores foi realizada após a instalação no condutor, em laboratório, ao contrário do procedimento regular de usar os valores nominais das constantes. Diferenças na faixa de -7% a +5% foram obtidas no caso dos extensômetros e de -15% a +11% no caso das células de tensão total e das células de poro-pressão. As diferenças obtidas mostram a importância da calibração da instrumentação após sua instalação no condutor ou estaca sempre que possível, especialmente no caso de testes cíclicos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi fruto de uma parceria entre UFRJ e Petrobras num projeto P&D com participação especial da empresa Mwert atuando em todo suporte de engenharia mecânica. Os autores também agradecem ao Programa de engenharia civil (PEC) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Beck, A.; Jackson, C.D.; Hamilton, T. (1991). Reliable deepwater structural casing installation using controlled jetting. In: Proceedings of the Society of Petroleum Engineers. https://doi.org/10.2118/22542-MS.

Danziger, F.A.B.; Jannuzzi, G.M.F.; Martins, I.S.M. (2019). The relationship between sea-level change, soil formation and stress history of a very soft clay deposit. AIMS Geosciences, v. 5, n. 3. https://doi.org/10.3934/geosci.2019.3.461. p. 461–479.

Fernandes, B.B.L.; Pinheiro, A.V.S.; Guimarães, J.H.D.; Dias, R.; Cutrim, F.S.; Gonçalves, C.J.C.; Danziger, F.A.B. (2022). A test rig for jetted conductors in soft clays. In: Proceedings of the Offshore Technology Conference. https://doi.org/10.4043/31965-MS.

Guimarães, G.V.M. (2015). Comportamento de estaca-torpedo modelo instrumentada em prova de carga horizontal em argila. Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Haugen, T. (1983). Cyclic loading of piles and pile anchors – field model tests, static lateral load tests. NGI Report 40010-24, Norwegian Geotechnical Institute.

Jannuzzi, G.M.F.; Danziger, F.A.B.; Martins, I.S.M. (2015). Geological-geotechnical characterisation of Sarapuí II clay. Engineering Geology, v. 190. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.03.001. p. 77–86.

Jeanjean, P. (2002). Innovative design method for deepwater surface casings. In: Proceedings of the Society of Petroleum Engineers. https://doi.org/10.2118/77357-MS.

Jeanjean, P.; Zakeri, A.; Al-Khafaji, Z.; Hampson, K.; Clukey, E.; Liedtke, E. (2015). Geotechnics for wells top-hole section and conductor. In: Frontiers in Offshore Geotechnics III. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b18442-7. p. 705–791.

Kan, C.; Yang, J.; Yu, X.; Xie, R.; Wu, Y.; Li, Y.; Abimbola, F. (2018). Field experimental investigation of bit stick-out for different soil strengths during deepwater conductor injection. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 169. p. 825–836.

Meng, W.; Yang, J.; Tong, G.; Hu, N.; Zhu, Y.; He, L.; Deng, H.; Zhao, Y. (2016). Simulation experiment and mechanism research on the change of lateral friction against surface conductor in deepwater drilling. In: Proceedings of the Offshore Technology Conference. https://doi.org/10.4043/27085-MS.

Yang, J.; Yan, D.; Tian, R.; Zhou, B.; Liu, S.; Zhou, J.; Tang, H. (2013). Bit stick-out calculation for the deepwater conductor jetting. Petroleum Exploration and Development, v. 40, n. 3. p. 394–397.

Zakeri, A.; Liedtke, E.; Clukey, E.C.; Jeanjean, P. (2014). Long-term axial capacity of deepwater jetted piles. Géotechnique, v. 64, n. 12. https://doi.org/10.1680/geot.14.p.014. p. 966–980.

Zhou, B.; Yang, J.; Liu, Z.; Zhou, R. (2016). Model and experimental study on jetting flow rate for installing surface conductor in deep water. Applied Ocean Research, v. 60. https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.09.008. p. 155–163.