

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
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

USO DO PIEZOCONO NO PROJETO DE FUNDAÇÃO DE UM EDIFÍCIO NO RECIFE, BRASIL

Carolina de Araújo Gusmão

Doutoranda em Engenharia, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil, carolina.argusmao@usp.br

Willians Perley Alexandre da Silva

Graduando em engenharia civil, Escola Politécnica da UPE, Recife, Brasil, williansperley@gmail.com

Alexandre Duarte Gusmão

Professor Associado, Escola Politécnica da UPE, Recife, Brasil, alexandreduartegusmao@gmail.com

RESUMO: O ensaio de piezocone tem sido cada vez mais usado em projetos geotécnicos no Brasil. No entanto, há poucos casos de projetos de fundações de edifícios publicados nos eventos técnicos brasileiros. Há vários métodos desenvolvidos para correlacionar os dados do piezocone com a estratigrafia do terreno e suas propriedades tais como pressão de pré-adensamento, resistência não drenada, entre outros, que são fundamentais para o desenvolvimento do projeto de fundações de edifícios. O presente trabalho tem como objetivo apresentar um caso de obra, na qual o ensaio piezocone foi decisivo na escolha de uma solução geotécnica com menor custo. Foram desenvolvidas duas soluções de fundação, sendo uma estaca pré-moldada com comprimento de 12 m, e outra estaca metálica com comprimento de 42 m. Foi possível optar pela estaca pré-moldada, o que acarretou numa redução de 70% dos custos, devido ao uso do ensaio CPTU, que comprovou que o depósito de argila mole entre 24 e 33 m de profundidade era sobreadensado, acarretando em desempenho satisfatório da fundação.

PALAVRAS-CHAVE: CPTU, Piezocone, investigação geotécnica, parâmetros geotécnicos.

ABSTRACT: The piezocone test has increasingly been applied in geotechnical projects in Brazil. However, there are few cases of building foundation projects published in Brazilian technical events. There are several methods developed to correlate the piezocone data with the soil stratigraphy and its properties such as pre-consolidation stress, undrained strength, among others, which are fundamental for the development of building foundation design. The present work presents a building case study, in which the piezocone test was decisive in the decision of a cheaper geotechnical solution. Two foundation solutions were presented, one being a precast pile with a length of 12 m, and the other a steel pile with a length of 42 m. It was possible to choose the precast pile, which resulted in a 70% cost reduction, due to the application of the CPTU test, which confirmed that the soft clay deposit between 24 and 33 m deep was pre-consolidated, leading to a satisfactory performance of the foundation.

KEYWORDS: CPTU, Piezocone, geotechnical investigation, geotechnical parameters.

1 Introdução

A cidade do Recife/PE tem uma área de planície composta por cerca de 50% de depósitos de argila / solos orgânicos de consistência mole a média. Esses depósitos foram formados durante a penúltima (Pleistoceno) e última (Holoceno) transgressão marinha, apresentando idade máxima de 10 mil anos (Lima Filho, M. F.; Alheiros 1990). Em consequência da baixa altitude da planície em relação ao nível do mar, esses depósitos costumam se apresentar saturados e devido ao seu processo de formação, geralmente possuem turfas, siltes e concha. Devido ao acelerado crescimento urbano atrelado ao desenvolvimento econômico da cidade, são executadas cada vez mais obras de engenharia sobre solos com espessos depósitos dessas argilas orgânicas de consistência mole, acarretando na busca por soluções geotécnicas que viabilizem economicamente suas execuções (Oliveira, M. S. *et al.* 2016).



Desse modo, as argilas orgânicas moles da cidade do Recife vêm sendo objeto de estudo de diversos trabalhos (Carvalho 1975; Ferreira 1982; Coutinho, R. Q.; Oliveira 1994; Coutinho, R. Q.; Oliveira, J. T. R.; Oliveira 2000; Coutinho, R. Q., Oliveira, J. T. R., Danziger 1993). Nas últimas décadas, foram apresentados trabalhos relevantes na construção de um banco de dados de argilas orgânicas em Recife a partir de um estudo aprofundado de caracterização física, química, mineralógica, de compressibilidade e resistência (Coutinho, R. Q.; Oliveira, J. T. R.; Oliveira 2000; Ferreira, S. R. M., Amorim Júnior, W. M.; Coutinho 1986). A partir desses trabalhos, observa-se que há uma grande diversidade de perfis geotécnicos no Recife, ainda que em regiões próximas, o que evidencia a acentuada heterogeneidade dos solos da cidade. A Figura 1 mostra a carta geotécnica do Recife/PE.

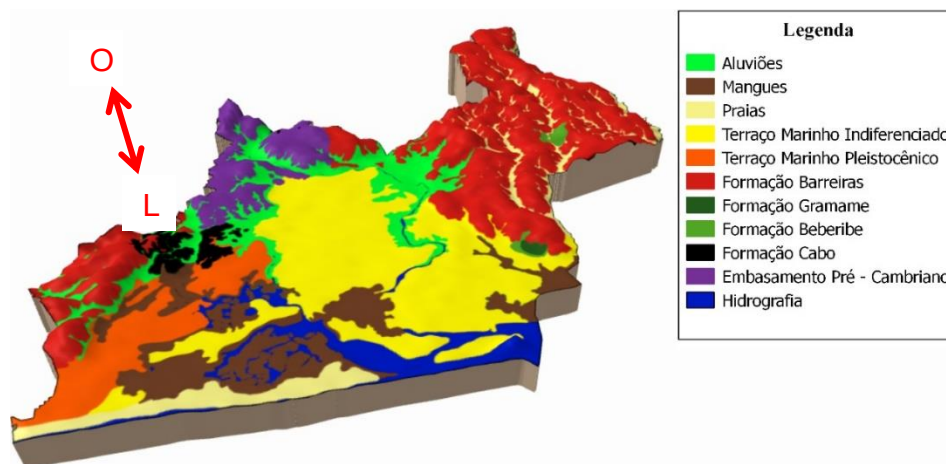


Figura 1. Planície da cidade do Recife (Oliveira 2018).

Nesse contexto, torna-se evidente a relevância da apresentação de casos de obra na cidade do Recife sobre solos contendo espessas camadas de argila orgânica mole, os desafios enfrentados, os meios de investigação geotécnica definidos no estudo dos parâmetros desse solo e, por fim, as soluções geotécnicas alcançadas. Assim, o presente trabalho tem como objetivo a apresentação de um caso de obra de um edifício com 25 pavimentos construído no Recife, onde os resultados do ensaio piezocone foram decisivos na escolha de uma solução de fundação com menor custo que a prevista inicialmente.

2 Metodologia

Para apresentação da metodologia, foram utilizados os resultados de investigação geotécnica de uma prédio residencial de 25 lajes, com 81 metros de altura, localizado no bairro da Ilha do Retiro, Recife/PE. O edifício possui 14 pilares na lâmina (cargas verticais de 5.281 a 8.455 kN) e 38 pilares na periferia (cargas vertical de 24 a 473 kN). Na campanha inicial de prospecção geotécnica, foram realizadas cinco sondagens de reconhecimento a percussão (SPT), que mostraram duas camadas de solos argilosos com baixa consistência: (i) 7,0 a 10,0 m; (ii) 23,0 a 33,0 m. A Figura 2 exibe o perfil geotécnico do terreno.

Posteriormente foram coletadas duas amostras indeformadas tipo *shelby* da argila inferior, e realizados ensaios de caracterização e adensamento edométrico para subsidiar a previsão dos recalques do prédio. A Figura 3 mostra os ensaios de adensamento realizados com amostras retiradas a 25,0 e 30,4 m de profundidade. A Tabela 1 mostra os resultados dos ensaios. Observa-se em ambas as amostras uma razão de pré-adensamento próximo à unidade ($OCR = 1$), ou seja, seriam argilas normalmente adensadas.

Considerando esses valores, foi feita a previsão dos recalques de cada um dos pilares, obtendo-se um recalque máximo, médio e mínimo iguais a 134,2; 116,5; e 96,5 mm, respectivamente. Para esses valores de recalque, as distorções angulares eram altas e havia previsão de patologias no prédio. Com isso, optou-se inicialmente pelo uso de estacas metálicas longas, acarretando em maior custo e tempo de execução.

Contudo, sabe-se que o amolgamento das argilas reduz a sua pressão de pré-adensamento. Essa suposta condição das argilas serem normalmente adensadas acarreta em recalques elevados, que podem não condizer com a realidade. Assim, considerou-se relevante avaliar a qualidade da amostra e seu grau de amolgamento.



Para avaliar a qualidade das amostras, calculou-se e_v a partir da Equação 1 (Lunne, T., Robertson, P.K.; Powell 1997), na qual e_0 corresponde ao índice de vazios inicial do corpo de prova em laboratório; e_{v0} é o índice de vazios correspondente à tensão vertical efetiva em campo. A Tabela 2 (Oliveira 2002), desenvolvida especialmente para argilas brasileiras, avalia a qualidade da amostra em função do e_v calculado.

$$\varepsilon_v = \frac{e_{v0} - e_0}{e_0} \quad (1)$$

Foi encontrado um valor $\varepsilon_v = 0,15$ para ambas as amostras, o que sugere baixa qualidade, segundo a Tabela 2. Assim, como os resultados dos ensaios de adensamento mostraram sinais de amolgamento das amostras coletadas, optou-se por realizar uma vertical de piezocone até 36 m de profundidade, para averiguar a história de tensões do solo mole inferior.

Foi realizado um ensaio piezocone (CPTU) até 36,3 m de profundidade. O ensaio CPTU fornece os parâmetros de resistência de ponta q_t , resistência ao atrito lateral f_s , e poropressão u_2 , mostrados na Figura 4. A partir desses parâmetros, é possível obter a partir de correlações empíricas consolidadas na literatura parâmetros geotécnicos de resistência, compressibilidade, classificação de solo, entre outros. Vale ressaltar que um desses parâmetros é a razão de pré-adensamento OCR, parâmetro determinante na avaliação dos recalques e, conseqüentemente, da determinação das soluções de fundação possíveis.

A pressão de pré-adensamento (σ'_{vm}) foi estimada a partir da Equação 2 (Agaiby e Mayne 2019) e a tensão efetiva foi calculada a partir dos pesos específicos das camadas de solo estimados a partir do perfil geotécnico e do nível d'água. O q_t foi fornecido pelo ensaio CPTU e fator m' foi determinado a partir da Tabela 3 (Agaiby e Mayne 2019), em função do tipo de solo exibido no perfil geotécnico. A Figura 5 exibe o gráfico do OCR estimado em função da profundidade.

Tabela 2. Qualidade das amostras (Oliveira, 2002)

Qualidade da amostra	ε_v
Muito boa	< 0,05
Boa a regular	0,05 - 0,08
Pobre	0,08 - 0,14
Muito pobre	> 0,14

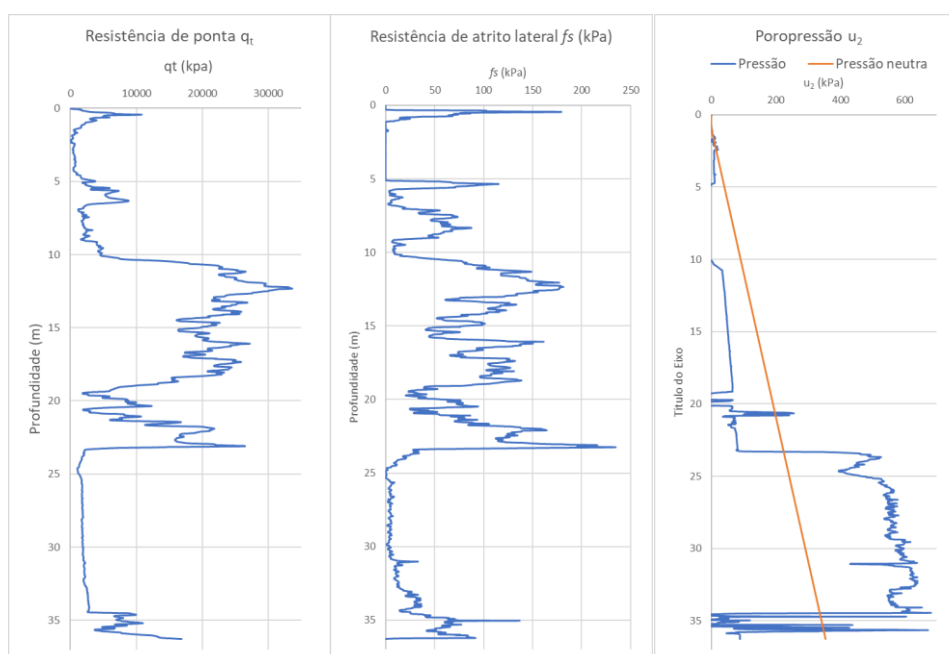


Figura 4. Resultados do ensaio CPTU: (a) resistência de ponta q_t ; (b) resistência lateral f_s ; (c) poropressão u_2 .



$$\sigma'_{vm} (kPa) = 0,33 \times (q_t - \sigma_{v0})^{m'} \quad (2)$$

Tabela 3. Fator m' em função do tipo de solo (Agaiby and Mayne 2019)

Qualidade da amostra	m'
Argila fissurada	1,10
Argila intacta	1,00
Argila orgânica	0,90
Argila sensível	0,90
Siltes	0,85
Areia siltosa	0,80
Areia limpa	0,72

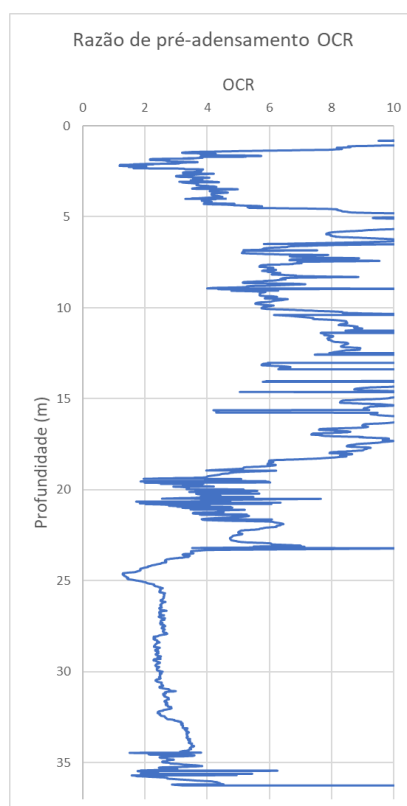


Figura 5. Razão de pré-adensamento OCR em função da profundidade.

A partir da Figura 5, observa-se que no depósito de solo mole localizado entre 23 e 33 m de profundidade o OCR é tem valor próximo a 2, o que sugerindo que a camada de argila mole está pré-adensada e não normalmente adensada, como mostraram os ensaios de adensamento. Desse modo, admitindo-se $OCR = 2$, foram estimados os novos valores de recalque, considerando como solução de fundação estaca pré-moldada de concreto com comprimento de 11 m, com ponta subjacente ao depósito de solo mole superior. O recalque máximo, médio e mínimo foram iguais a 22,5; 19,5; e 15,6 mm. Para esses valores de recalque, as distorções angulares ficaram inferiores aos limites para surgimento de patologias no prédio.

Diante dos resultados análises, foi viabilizada a solução com estacas mais curtas e bem mais baratas. Isso só foi possível após a realização do ensaio CPTU.



3 Resultados e discussões

O projeto de fundação do edifício foi desenvolvido com 109 estacas circulares pré-moldadas de concreto com comprimento de 11,0 m e seção 370/100 mm (diâmetro externo / espessura da parede). A carga de trabalho foi de 900 kN. A Figura 6 mostra o projeto de estaqueamento.

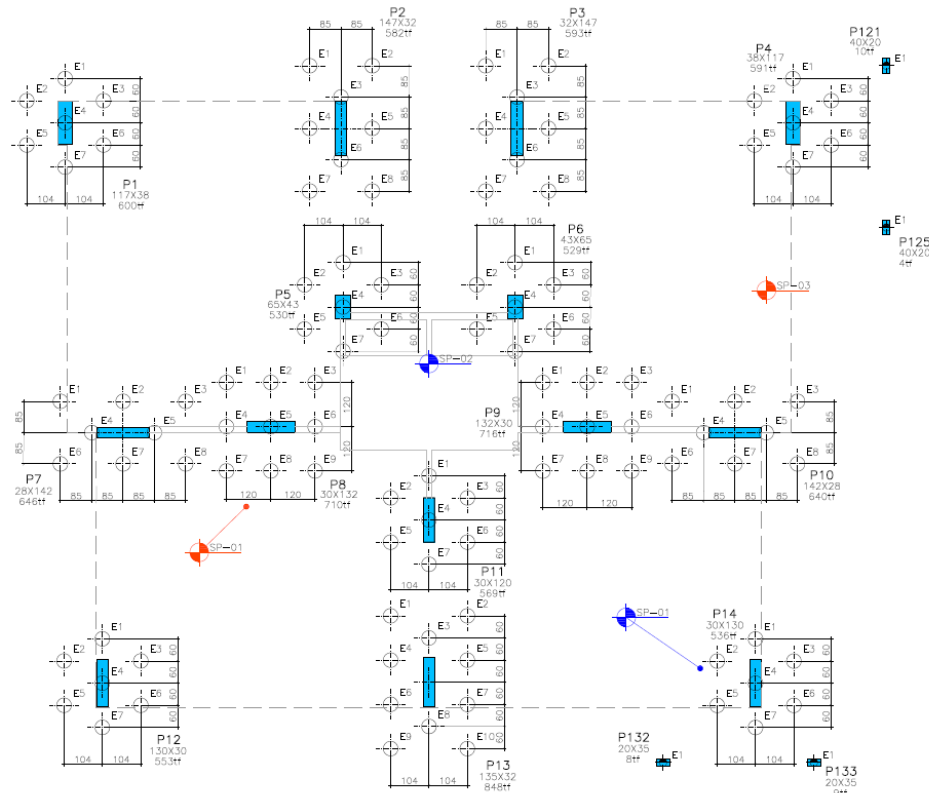


Figura 6. Projeto de estaqueamento.

Para validar a solução projetada, foram executadas inicialmente algumas estacas piloto. Todas as estacas atingiram a profundidade de projeto, e foram realizados ensaios de carregamento dinâmico, cujos resultados são mostrados na Tabela 4. Todas as estacas ensaiadas apresentaram fator de segurança global superior a 2.

Tabela 4. Análises Capwap dos ensaios de carregamento dinâmico

Estaca	Diâmetro / Parede (mm)	Resistência lateral (kN)	Resistência de ponta (kN)	Resistência total mobilizada (kN)
P14/E4	370/100	1.158	1.391	2.549
P21/E1	370/100	922	1.178	2.100
P6/E5	370/100	1.147	933	2.080
P4/E5	370/100	1.011	1.019	2.030
P1/E2	370/100	1.243	827	2.040

Finalmente, durante a execução da obra, foram feitas medições dos recalques para avaliar o desempenho do prédio ao longo do tempo, e comparar com os valores previstos e medidos. A Figura 7 mostra a evolução do recalque no tempo. Observa-se que as medições confirmaram que o depósito de argila mole é, de fato, levemente sobreadensado.

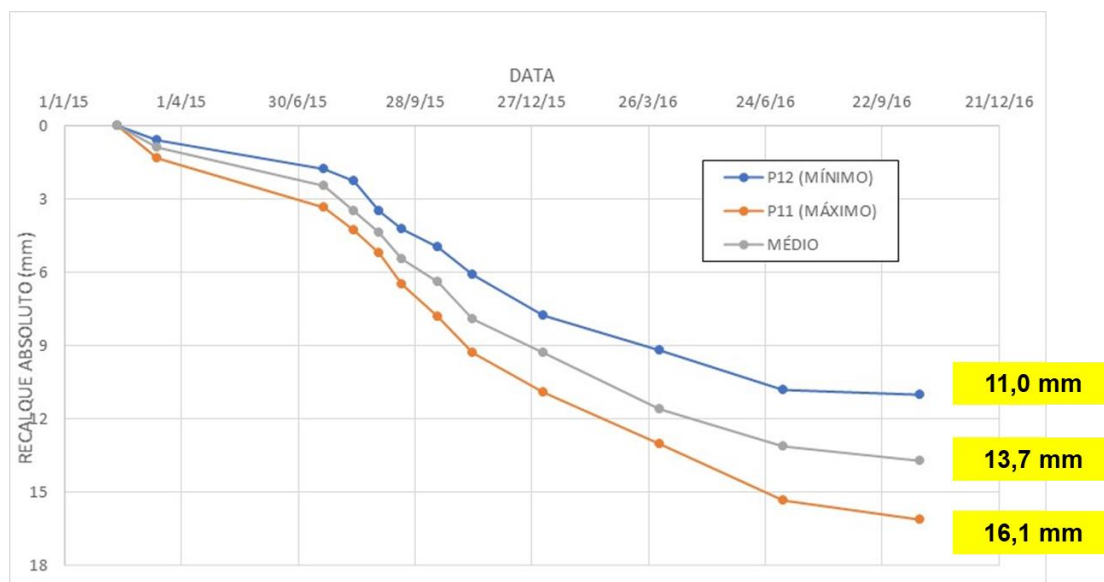


Figura 7. Medição dos recalques em campo ao longo do tempo.

4. Conclusão

O desempenho das fundações do prédio através das medições de recalque confirmou que o depósito de argila inferior era de fato sobreadensado (OCR em torno de 2), como previsto através das correlações com os dados do piezocone. Esse ensaio foi fundamental na decisão de ser projetada uma solução com estacas pré-moldadas mais curtas para o prédio, ao invés de estacas metálicas longas, uma vez que pelos ensaios previamente realizados de SPT e shelby, eram previstos valores superiores de recalque que inviabilizavam a solução com estacas pré-moldadas mais curtas. É importante destacar que a solução adotada foi cerca de 30% do custo da solução com estacas mais longas, demonstrando a importância do ensaio piezocone na determinação de soluções geotécnicas de menor custo e desempenho satisfatório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agaiby, S. S. & Mayne, P. W. CPT Evaluation of Yield Stress Profiles in Soils. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 145, 04019104 (2019).
- Carvalho, J. B. . Algumas propriedades física- químicas e de engenharia de uma argila orgânica do Recife. (Universidade Federal da Paraíba, 1975).
- Coutinho, R. Q.; Oliveira, J. T. R. Propriedades Geotécnicas das Argilas do Recife – Banco de Dados. in *Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* 563–572 (1994).
- Coutinho, R. Q; Oliveira, J. T. R; Oliveira, A. T. J. Geotechnical properties of Recife soft clays. *Solos e Rochas* 23, 177–204 (2000).
- Coutinho, R. Q., Oliveira, J. T. R., Danziger, F. A. B. Caracterização geotécnica de uma argila mole de Recife. *Solos e Rochas* 255–266 (1993).
- Ferreira, S. R. M. Compressibilidade de uma Argila Orgânica do Recife. (Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1982).
- Ferreira, S. R. M., Amorim Júnior, W. M.; Coutinho, R. Q. Argila Orgânica Mole do Recife – Banco de Dados. in *VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações - ABMS* 183–197 (1986).
- Lima Filho, M. F.; Alheiros, M. M. Planície do Recife: Origem e Características Geotécnicas. in *ABMS-NE* 502–517 (1990).

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
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
 23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

- Lunne, T., Robertson, P. K.; Powell, J. J. M. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. in *Blackie Academic & Professional* 312 (1997).
- Oliveira, M. S., Rocha, F. M. A., Ferreira, S. R. M. e Oliveira, J. T. R.. Identificação e Classificação de Perfis Típicos de Solos na Planície do Recife. in *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica* (2016). doi:10.20906/cps/cb-05-0085.
- Oliveira, M. S. De. Influência geológico-geotécnica na escolha dos tipos de fundações do bairro de boa viagem / recife e elaboração de banco de dados de medições de recalques em edifícios. (Universidade de Pernambuco, 2018).
- Oliveira, J. T. R. Influência da Qualidade da Amostragem no Comportamento TensãoDeformação-Tempo das Argilas Moles. (Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002).