

Sonda piezométrica como ferramenta de investigação geotécnica: o caso da Lagoa Rodrigo de Freitas

Diovana Patias Della Flora
Pesquisadora, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, diovana.flora@coc.ufrj.br

Arthur Veiga Silvério Pinheiro
Pesquisador, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, arthur.veiga@coc.ufrj.br

Graziella Maria Faquim Jannuzzi
Docente, Escola Politécnica e COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, jannuzzi@coc.ufrj.br

Fernando Artur Brasil Danziger
Docente, COPPE e Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, danziger@coc.ufrj.br

RESUMO: Ensaios com sonda piezométrica e piezocone permitem a obtenção da poro-pressão durante a penetração e a dissipação após interrupção da penetração. Embora a sonda piezométrica tenha como principal finalidade determinar a poro-pressão de equilíbrio, é possível através do excesso gerado durante a penetração avaliar o comportamento do solo, uma vez que os valores obtidos pela sonda e pelo piezocone apresentam a mesma tendência. De um modo geral, em areias a poro-pressão medida apresenta valores próximos à poro-pressão hidrostática, e em argilas a diferença entre a poro-pressão medida e a poro-pressão hidrostática apresenta valores significativos. O presente estudo compara as poro-pressões obtidas durante ensaios de sonda piezométrica e de piezocone realizados na Lagoa Rodrigo de Freitas, no estado do Rio de Janeiro, atravessando camadas de materiais argilosos e arenosos e atingindo cerca de 33 m de profundidade. Conclui-se que a sonda piezométrica, de custo muito menor que o piezocone e de mais fácil operação, é capaz de obter resultados de grande utilidade.

PALAVRAS-CHAVE: ensaio de sonda piezométrica, ensaio de piezocone, medida de poro-pressão, comportamento dos solos.

ABSTRACT: The use of piezometric probes and piezocone tests allows pore pressure to be obtained during penetration and dissipation after penetration has stopped. Although the main purpose of the piezometric probe is to determine the equilibrium pore pressure, it is possible to evaluate the behaviour of the soil through the excess pore pressure generated during penetration, since the values obtained by the probe and the piezocone show the same trend. In general, in sands the measured pore pressure is close to the hydrostatic pore pressure, and in clays the difference between the measured pore pressure and the hydrostatic pore pressure is significant. This study compares the pore pressures obtained during piezometric probe and piezocone tests carried out in the Lagoa Rodrigo de Freitas, Rio de Janeiro state, through layers of clay and sandy materials, reaching a depth of approximately 33 m. It is concluded that the piezometric probe, less costly than the piezocone penetrometer, and simpler to operate, is capable of obtaining useful results.

KEYWORDS: Piezometric probe test, piezocone test, pore pressure measurement, soil behaviour.

1 INTRODUÇÃO

A importância de estudar o comportamento geotécnico ganha especial relevância à medida que se projetam estruturas que solicitam cada vez mais a capacidade de carga do solo ou localizadas em regiões com presença de solos moles, conseqüentemente, o uso de equipamentos de investigação geotécnica com baixo custo e elevada aplicabilidade torna-se cada vez mais atrativo e estudado. Neste cenário, torna-se essencial a realização de ensaios de campo econômicos e confiáveis, que permitam a determinação precisa de parâmetros de projeto.

Este artigo tem como caso de estudo a Lagoa Rodrigo de Freitas, situada em área nobre de lazer na cidade do Rio de Janeiro. Há décadas, o entorno da lagoa sofre com recalques em diversos trechos, um problema diretamente relacionado à existência de aterros sobre solos moles de grande espessura. A análise dessas condições geotécnicas, aliada à necessidade de expansão urbana sustentável, evidencia a importância de uma abordagem técnica rigorosa no estudo do comportamento dos solos nas zonas costeiras do Brasil, com especial atenção aos desafios e soluções aplicáveis no entorno da Lagoa Rodrigo de Freitas. Dentre as alternativas existentes para tratamento do solo com a finalidade de estabilizar as movimentações em alguns trechos ao redor da lagoa, Mello (2013) apresenta em seu trabalho a execução da técnica de consolidação profunda radial (CPR) aplicada em região próxima as verticais de ensaio.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento do solo através do perfil de poro-pressão obtido com a utilização do ensaio de sonda piezométrica e piezocone.

3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

A sonda piezométrica foi introduzida por Torsntensson (1975) e Wissa et al. (1975). Sua característica principal é uma ponta afunilada, cujo objetivo é reduzir o tempo necessário para a dissipação das poro-pressões geradas durante a sua instalação e, conseqüentemente, obter a poro-pressão de equilíbrio mais rapidamente que por meio de um penetrômetro convencional. No que diz respeito saturação da sonda piezométrica e do elemento poroso utilizou-se como fluido de saturação água destilada e deaerada. A saturação foi realizada por meio da aplicação de vácuo em recipiente de calibração/saturação por um período de 24 horas (eg. Campanella e Robertson, 1988). O elemento filtrante utilizado na sonda piezométrica (figura 1a) foi fornecido pela fabricante da sonda (GROM acústica), fabricada de bronze sinterizado e com grãos de diâmetro da ordem de 100 microns.

O piezocone utilizado para este estudo, pertence ao Laboratório de Ensaio de Campo e Instrumentação Prof. Márcio Miranda Soares. Trata-se de um equipamento fabricado pela empresa holandesa Van den Berg. Os sinais de saída analógica dos sensores do piezocone são convertidos em sinais digitais dentro do próprio equipamento, de acordo com o fabricante. O equipamento possui dimensões padronizadas, seguindo as recomendações da norma ISO 22476-1 (2022), diâmetro de 35,7 mm, seção de 10 cm², comprimento total de 39,50 cm, incluindo o comprimento a luva de atrito. Denominado ICONE 10 cm², o equipamento possui um elemento poroso localizado na base da ponta cônica. O equipamento mede: a resistência de ponta (q_t), o atrito lateral (f_s), a poropressão (u_2) e a inclinação X e Y. A relação de área é de $\alpha = 0,75$. O elemento filtrante utilizado no cone (figura 1b) foi fornecido pela fabricante do piezocone, sendo confeccionado de aço sinterizado com abertura dos poros de 100 microns e a permeabilidade de 10^{-4} m/s. A deaeração e saturação do elemento poroso do piezocone foram realizadas de acordo com os procedimentos do fabricante. O fluido de saturação utilizado foi o Xiameter PMX-200 Silicone Fluid 50 cs (óleo de silicone).

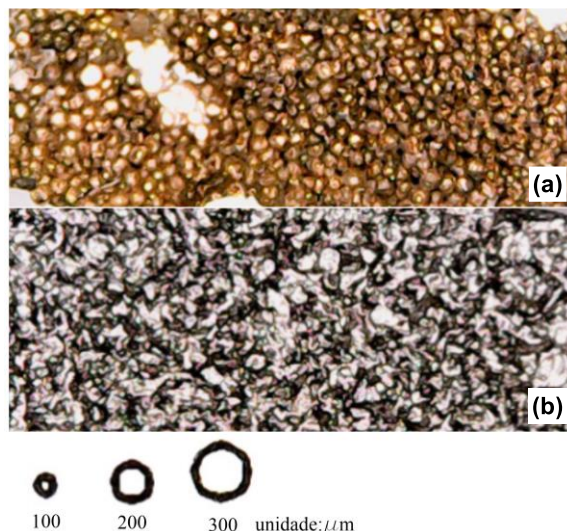


Figura 1. Imagem de microscópio digital dos elementos porosos da sonda piezométrica (a) e do piezocone (b).

4 ÁREA DE ESTUDO

A Lagoa Rodrigo de Freitas está localizada na zona sul da cidade do Rio de Janeiro (entre as latitudes $22^{\circ}51'02''$ e $22^{\circ}58'09''$ S e as longitudes $43^{\circ}11'09''$ e $43^{\circ}13'03''$ W) conforme apresentado na Figura 2. O local de realização dos ensaios fica às margens da lagoa, em frente ao Parque do Cantagalo. O Parque do Cantagalo é um parque urbano, com aproximadamente 14.000 m^2 de área, situado em uma das margens de um trecho da Avenida Epitácio Pessoa, a sudeste da Lagoa Rodrigo de Freitas.

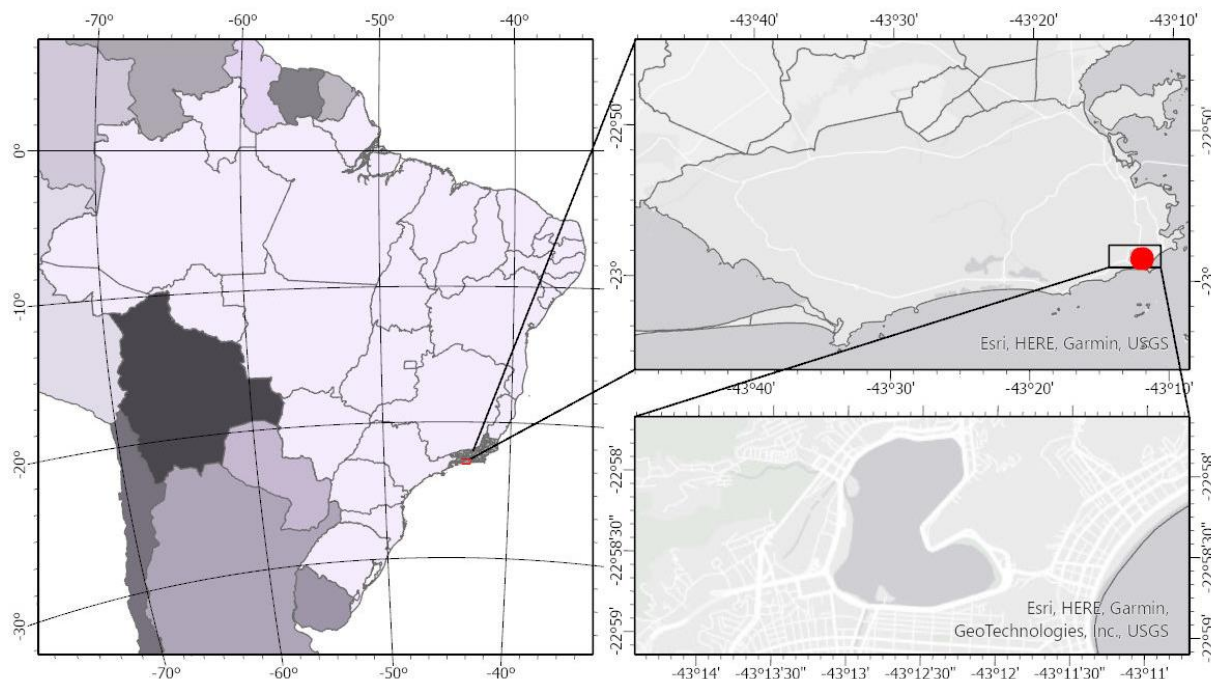


Figura 2. Localização da área de estudo (FLORA, 2023).

Com o aumento do nível do mar, os pequenos vales fluviais foram transformados em enseadas e sacos, que mais tarde seriam adornados por restingas e praias. Essas condições propiciaram o desenvolvimento da Lagoa Rodrigo de Freitas, assim como as lagoas de Maricá e Itaipu, que foram fechadas pelo desenvolvimento de cordões de restingas regressivos (AMADOR, 1997).

O processo de urbanização do Rio de Janeiro somado aos sucessivos aterros lançados às margens da Lagoa, de acordo com a Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (2002), fez com que cerca de 1/3 da área total da Lagoa tenha sido alterada, tendo como resultado a descaracterização do seu entorno, a perda da sua vegetação e fauna originais. A figura 3 apresenta o avanço dos sucessivos aterros ao longo dos anos na região.

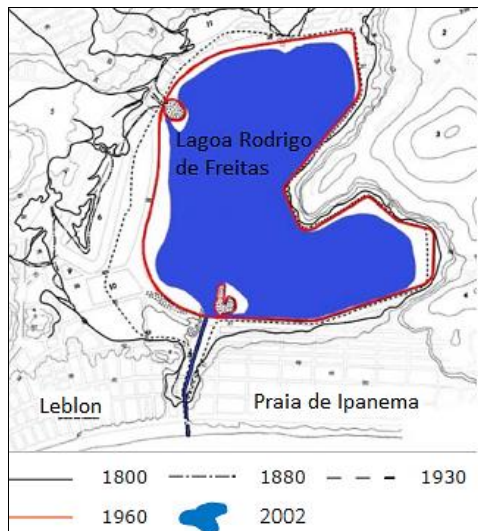


Figura 3. Sucessivos aterros realizados na região da Lagoa Rodrigo de Freitas. Fonte (AGRAR *apud* MELLO, 2013)

5 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Foram realizadas duas verticais de ensaio, uma de piezocone e outra de sonda piezométrica (figura 4) no aterro. A cravação dos penetrômetros foi realizada com a máquina de cravação modelo TG 63-150 da fabricante italiana Pagani. Os ensaios foram executados de forma contínua, com hastes de 1 m de comprimento e velocidade de $2 \pm 0,5$ cm/s, seguindo as diretrizes da ISO 22476-1 (2022).



Figura 4. Disposição dos ensaios na região do parque dos pedalinhos (FLORA, 2023).

O pré-furo no aterro, para ambos os ensaios, foi realizado com a própria máquina de cravação da Pagani, com o emprego de uma haste helicoidal. No caso da sonda piezométrica, o pré-furo foi conduzido até a profundidade de 6 m. Já para o ensaio de piezocone, até a profundidade de 7 m. Ao retirar a haste helicoidal, somente o trecho superior do pré-furo ficou estável, tanto na vertical do ensaio de piezocone como na vertical da sonda. Inseriu-se o revestimento de 3” no comprimento do pré-furo que ficou estável de 1,86 m (para o piezocone) e 2,50 m (para a sonda). A principal função do revestimento, mesmo que não tenha sido executado em todo o trecho do pré-furo, foi permitir elevar o nível da água até a superfície, de modo que o piezocone e a sonda fossem inseridos no pré-furo sem perda de saturação no início do ensaio. A máquina de cravação foi posicionada, ancorada e o furo preenchido com água. As figuras 5 (a) e (b) registram os procedimentos para manter a saturação do elemento poroso da sonda e as figuras 5 (c) e (d) do elemento poroso do piezocone.



Figura 5. Etapas que antecederam o início do ensaio conservação da saturação do elemento poroso da sonda piezométrica (a) e (b) e piezocone (c) e (d).

6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A figura 6 apresenta os perfis de poro-pressão obtidos nas duas verticais de ensaio, por meio dos quais pode-se identificar a presença de duas camadas distintas abaixo do aterro.

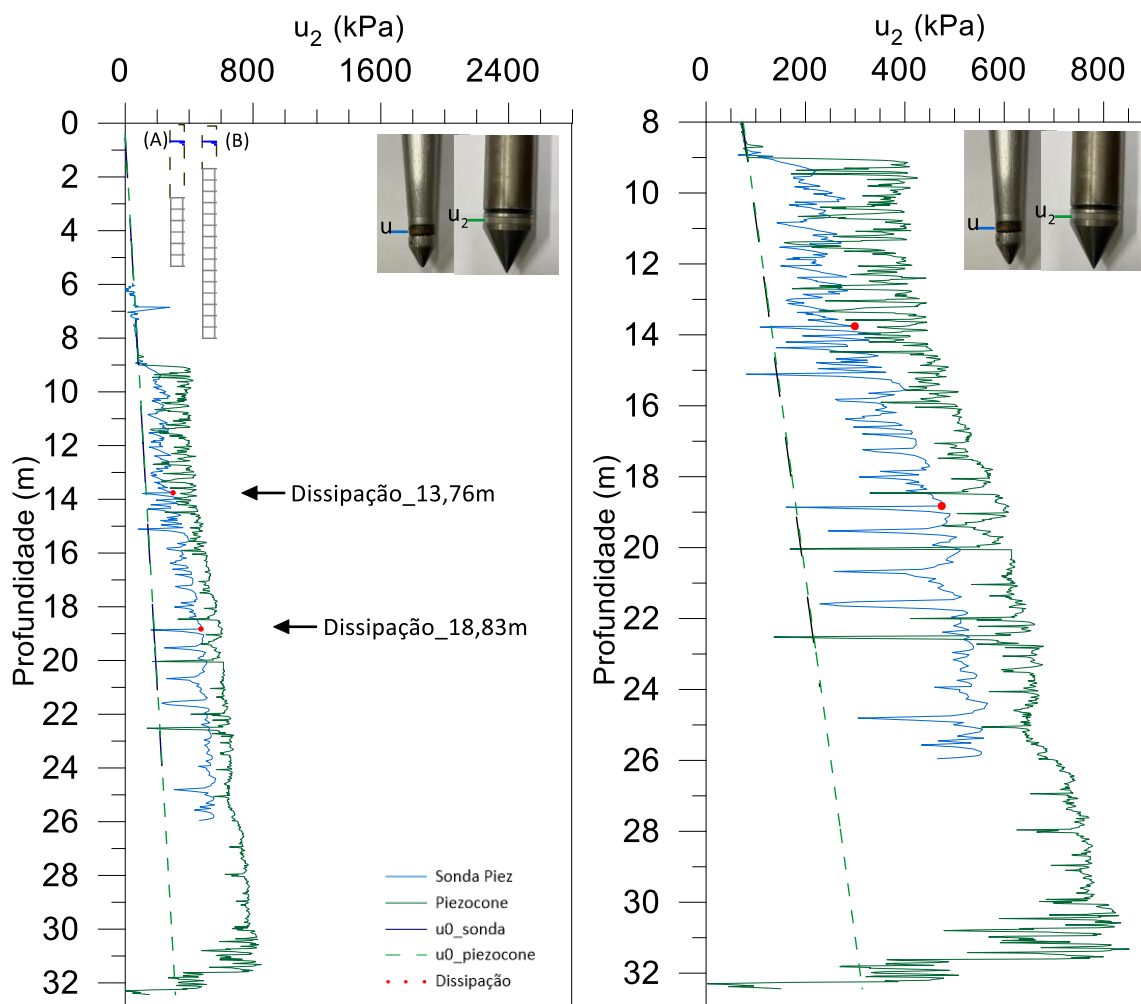


Figura 5. (a) Perfil estratigráfico com poro-pressão medida através do uso da sonda piezométrica e piezocone; (b) destaque para a camada de solo argilo.

Na figura 6 percebe-se que para as profundidades de 4,75 a 9,00 m, a poro-pressão medida pela sonda piezométrica apresentou valores muito próximos à poro-pressão hidrostática, com geração de poro-pressão negativa em alguns pontos, indicando uma camada de predominância arenosa. De 9 a aproximadamente 30 m observa-se excesso de poro-pressão positivo, com queda súbita até atingir pressão hidrostática indicando a presença de lentes de areia na camada de argila. Entre 31 e 32 m, a poro-pressão registrada pelo piezocone foi negativa em alguns pontos, o que de acordo com Torsntensson (1975) é um comportamento de areia com alto grau de compactação. A poropressão medida pela sonda piezométrica ao longo do perfil, de modo geral, foi menor do que a medida pelo piezocone, de acordo com Sills et al. (1988), esse comportamento pode ser atribuído a posição do elemento poroso.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A partir do perfil de poro-pressão versus profundidade (figura 6) dos dois ensaios, verifica-se a mesma tendência de variação de poro-pressão com os dois equipamentos, apenas com diferença de magnitude. Essa diferença é atribuída às diferentes posições do elemento poroso na sonda e no piezocone, como observado por Vargas et al. (2023) e Sills et al. (1988). Danziger (1990) compara os valores de poropressão previstos teoricamente por Baligh e Levadoux (1980) com os medidos por Campanella e Robertson (1988) e demonstrou que o excesso de poro-pressão medido é menor à medida que se distancia da base do cone. Este é o caso da sonda, cujo elemento poroso está localizado a 1,6 raios da base do cone, enquanto a posição u_3 no ensaio de piezocone corresponde à relação 7,5, ou seja, o caso da sonda representa uma situação intermediária entre u_2 e u_3 , porém muito mais próxima de u_2 .

Portanto, percebe-se que os valores de poro-pressão medidos durante a penetração da sonda tiveram a mesma tendência que os medidos pelo piezocone, embora inferiores em magnitude. A diferença foi atribuída às distintas posições dos elementos porosos da sonda e do piezocone. Os resultados com a sonda piezométrica atestam a sua utilidade para investigações geotécnicas, especialmente no que diz respeito a sua sensibilidade para se avaliar a estratigrafia do local e o comportamento do solo, sendo um equipamento mais simples e de muito menor custo de fabricação do que o piezocone.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo auxílio financeiro e à Fundação Parques e Jardins por autorizar a utilização da área para a realização do estudo, a toda equipe do Laboratório de Ensaios de Campo e Instrumentação Professor Márcio Miranda Soares por não medir esforços para a realização do estudo proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amador, E. S. (1997). *Baía de Guanabara e Ecossistemas Periféricos: Homem e Natureza*. Editora Reproarte. Rio de Janeiro.
- Baligh, M.M., Levadoux, J.-N. (1980). *Pore Pressure Dissipation after Cone Penetration*. Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering. Cambridge, Massachusetts. Research Report R80-11.
- Campanella, R. G. R. P. (1988). Current status of the piezocone test. In Proc. 1st Int. Symp. on Penetration Testing Vol. 1. ISOPT.
- Danziger, F. A. B. (1990). Desenvolvimento de equipamento para realização de ensaio de piezocone: aplicação a argilas moles. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- Flora, D. P. D. (2023). *Caracterização geotécnica da argila da região do Parque do Cantagalo - Lagoa Rodrigo De Freitas/RJ através de ensaios de campo*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- ISO, E. (2022). 22476-1: 2022 *Geotechnical Investigation and Testing—Field Testing—Part 1: Electrical Cone and Piezocone Penetration Test*. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.
- Mello, M. A. de (2013). *A consolidação profunda radial aplicada em solo compressível na Lagoa Rodrigo de Freitas/RJ*. Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro.
- Robertson, P K, Campanella, R G, Gillespie, D and Greig, J, (1986). Use of piezometer cone data, *Proceedings of Use of In-situ Testing in Geotechnical Engineering* (IN-SITU'86).
- Torstensson, B.A. (1975). Pore pressure sounding instrument. *Proc., Specialty Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties*, ASCE, Vol. II.
- Vargas, J.W.S., Danziger, F.A.B., Lopes, F.R., Lunne, T. (2023). Inflow and outflow permeability tests in a very soft clay under low stresses, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Wissa, A.Z.E., Martin, R.T., Garlander, J.E. (1975). The piezometer probe. *Proc., Specialty Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties*, ASCE, Vol. I.