

Primeiros Ensaios com o Pressiômetro Ménard no Depósito de Argila Mole do Sarapuí – RJ

Erinaldo Hilário Cavalcante

Professor Titular, Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, Brasil, erinaldo@ufs.br

Fernando M. de Arruda Damasco Penna

Engenheiro Civil, Damasco Penna, São Paulo, Brasil, fernando@damascopenna.com.br

Graziella M. Faquim Jannuzzi

Professora Adjunta, Escola Politécnica da UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, jannuzzi@poli.ufrj.br

Fernando Artur Brasil Danziger

Professor Titular, Escola Politécnica da UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, danziger@coc.ufrj.br

RESUMO: O pressiômetro é, possivelmente, dos equipamentos de ensaios de campo, o mais indicado para a avaliação do comportamento tensão-deformação dos solos *in situ*. O pressiômetro de Ménard (PMT) foi desenvolvido na segunda metade da década de 1950 para uso em pré-furo, e, dependendo da qualidade da perfuração, com a menor perturbação possível do terreno, o módulo de deformabilidade obtido passa a ser a referência para os demais ensaios, podendo ser utilizado em qualquer tipo de solo e rocha. Em solos residuais, especialmente acima do nível do lençol freático, os dados obtidos invariavelmente são os melhores possíveis. Para o caso de solos argilosos saturados, como as argilas moles ou muito moles, as dificuldades de realização desse tipo de ensaio aumentam significativamente, e os cuidados com o processo de perfuração e instalação da sonda no solo devem ser muito maiores do que em solos residuais ou em solos compactados. Neste contexto, o presente trabalho tem o objetivo de publicar a primeira experiência de aplicação do PMT em um depósito de argila mole do Rio de Janeiro, na área de exploração do grupo de pesquisa em Geotecnia da COPPE/UFRJ, denominado Sarapuí II. Na presente campanha de ensaios foi possível estimar o módulo pressiométrico (E_M) numa vertical até à profundidade de 4,5 metros, aproximadamente a metade do depósito investigado. A comparação dos valores obtidos com o Módulo Dilatométrico (E_D), através dos ensaios de Dilatômetro Sísmico (SDMT) produziu uma boa concordância dos resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaios de campo, pressiômetro Ménard, Módulo pressiométrico, Dilatômetro.

ABSTRACT: The pressuremeter test is, possibly, one of the field test equipments, the most suitable for evaluating the stress-strain behavior of soils *in situ*. The Ménard pressuremeter testing (PMT) was developed in the second half of the 1950s for use in pre-hole drilling, and, depending on the quality of the drilling, with the least possible disturbance of the ground, the deformability modulus obtained becomes the reference for the other tests, and can be used on any type of soil and rock. In residual soils, especially above the water table, the data obtained are invariably the best possible. In the case of saturated clayey soils, such as soft or very soft clays, the difficulties in carrying out this type of test increase significantly, and care must be taken with the drilling process and installation of the probe in the ground than in residual or compacted soils. In this context, the present work aims to publish the first experience of applying PMT in a soft clay deposit in Rio de Janeiro, in the exploration area of the Geotechnics research group at COPPE/UFRJ, called Sarapuí II. From the present test campaign it was possible to estimate the pressuremeter Ménard modulus (E_M) in a vertical up to a depth of 4.5 meters, approximately half of the deposit investigated. Comparison of the values obtained with the Dilatometric Module (E_D), through the Seismic Dilatometer (SDMT) tests, produced a good agreement of the results.

KEYWORDS: Site investigations, Ménard pressuremeter, Pressuremeter modulus, Flat Dilatometer.

1 INTRODUÇÃO

O ensaio pressiométrico se constitui em um dos poucos ensaios geotécnicos *in situ* com fundamentação teórica muito bem estabelecida, cuja interpretação está baseada na teoria da elasticidade aplicada aos solos (LAMÉ, 1852; BISHOP et al., 1945), conforme mencionado CLARKE (1995). Tal fato confere ao pressiómetro muita confiabilidade quando o objetivo é se avaliar o comportamento tensão x deformação dos solos em campo (Baguellin et al., 1978; Briaud, 1992, Clarke, 1995). Entretanto, o seu uso no mundo ainda é limitado, quando comparado a outros métodos de investigação mais comuns nos dias atuais no meio geotécnico, como, por exemplo, o Standard Penetration Test (SPT) e o Cone Penetration Test (CPT ou CPTU). Em que pese o fato do pressiómetro ter sido desenvolvido na França, ao longo dos anos 50, já na década de 1970 o equipamento começava a ser usado no Brasil no campo da pesquisa científica no meio acadêmico (p. ex. BRANDT, 1978; SCHNAID e ROCHA FILHO, 1994; MÁNTARAS, 1995; NAKAHARA, 1995; CAVALCANTE, 1997; DOURADO; 2005), de onde são provenientes as maiores experiências com a técnica pressiométrica nas investigações do subsolo. Desde aquela época, algumas universidades brasileiras adquiriram o equipamento para desenvolver trabalhos de pesquisa em seus cursos de mestrado e/ou doutorado, produzindo uma quantidade significativa de dissertações e teses que servem de referência para as gerações que se sucedem (por exemplo, BRANDT, 1978; ORTIGÃO e ALVES, 1994; SCHNAID e ROCHA FILHO, 1994; MÁNTARAS, 1995; NAKAHARA, 1995; CAVALCANTE, 1997; DOURADO; 2005; IAMAMURA, 2017; MACHADO, 2020; REZENDE 2020, entre outros). Como se observa, a maior parte dos trabalhos sobre o assunto se restringe quase que totalmente aos centros de pesquisa localizados nas regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste do país, a exemplo da Pontifícia Universidade Católica/RJ, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, da Universidade de São Paulo e UNICAMP/SP, da Universidade Federal de Goiás e a COPPE/UFRJ, exceto na região Nordeste, a Universidade Federal da Paraíba, no antigo Campus II, sediado na cidade de Campina Grande (CAVALCANTE, 1997; SOARES, 1999; Paiva, W., 2000). Além dos trabalhos já citados, outros como Bosch (1996), Iamamura (2017), Machado (2020), Rezende (2020), bem como algumas empresas privadas atuantes no ramo, têm contribuído de forma significativa para a disseminação do ensaio pressiométrico no Brasil, embora de maneira ainda bastante tímida. Apesar da pouca divulgação do ensaio pressiométrico no país, a literatura já registra o desenvolvimento de uma versão do pressiómetro Ménard na PUC/RJ, conforme citado por BRANDT (1978), e a utilização e aperfeiçoamento de uma outra versão utilizada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/Geotecnia da UFRGS, a qual pertence à CIENTEC (Nakahara, 1995; Bosch, 1996). Ortigão e Alves (1994) relatam o uso de uma versão do Pressiómetro Ménard na região de Brasília. Quaresma *et al.* (1996) reportam a existência de um pressiómetro do tipo auto-perfurante de propriedade da Universidade de São Paulo, que até onde se sabe encontra-se inoperante. Recentemente foi adquirida um exemplar do pressiómetro de pré-furo, do tipo Ménard, pelo grupo de pesquisa em Geotecnia da Universidade Federal do Ceará, conforme informado por Moura (2023).

Visando contribuir com o uso do pressiómetro Ménard em depósitos de solos moles, o presente trabalho se vale de uma parceria em fase preliminar entre o grupo de Geotecnia da COPPE/UFRJ e uma empresa da área de ensaios geotécnicos *in situ* sediada em São Paulo, a Damasco Penna – Engenharia Geotécnica. Os ensaios iniciais foram realizados de maneira pioneira em um depósito de argila muito mole, denominado SARAPUÍ II, na área da baixada Fluminense, município de Duque de Caxias – RJ.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Características geotécnicas do terreno no local do estudo

O depósito no qual foram feitos os ensaios preliminares para este trabalho é composto eminentemente por argila orgânica muito mole. Na Figura 1 são apresentadas algumas características físicas do material. De acordo com Danziger *et al.* (2019), a espessura do depósito varia de 6,5 m a 10,0 m, e o nível do lençol freático oscila numa faixa de $\pm 0,3$ m em relação ao nível do terreno natural, com teor de umidade na faixa de 130% a 180%.

Trata-se de uma argila siltosa orgânica muito mole, constituída de 60% de argila, 35% a 40% de silte e, no máximo, 5% de areia, características que conferem ao solo valores de índice de plasticidade variando em 60% e 170%, registrando-se teores de matéria orgânica entre 6% e 16% e atividade entre 1,4 e 2,2, aproximadamente. Na Figura 2 são mostradas a composição granulométrica do solo, o teor de matéria orgânica, de sais e as frações dos argilominerais presentes em sua microestrutura (esmectita, ilita e caulinita), com a predominância de ilita e caulinita.

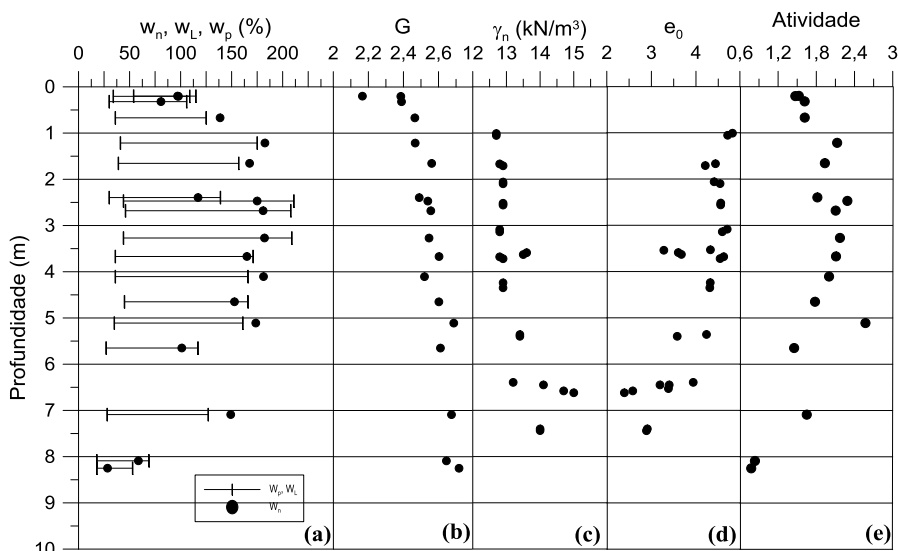


Figura 1. Caracterização geotécnica do depósito de argila muito mole do Sarapuí II (Adaptado de Januzzi *et al.*, 2012a; Danziger *et al.*, 2019).

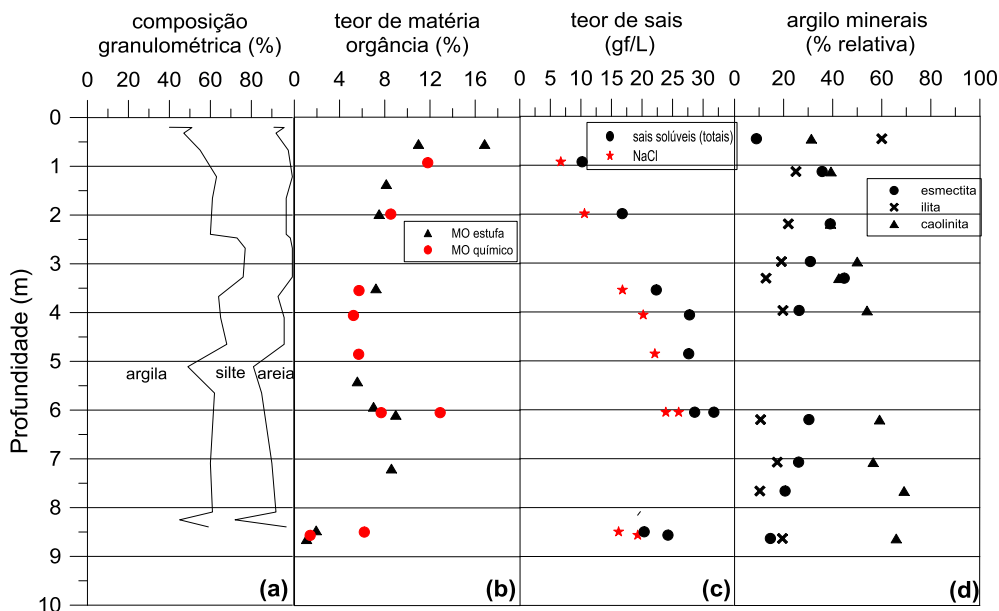


Figura 2. Caracterização geotécnica do depósito de argila muito mole do Sarapuí II: (a) granulometria; (b) teor de matéria orgânica; (c) teor de sais; (d) frações de argilominerais presentes na microestrutura (adaptado de Januzzi *et al.*, 2015; Danziger *et al.*, 2015).

2.2 Ensaios e metodologias empregadas

O ensaio pressiométrico do tipo Ménard, realizado em pré-furo, não possui norma brasileira. Para tanto, são empregadas no Brasil as normas francesa NF P94-110-1 (2000), a americana ASTM D-4719

(2000) ou a ISO 22476-4 (2021). Os ensaios com o PMT analisados neste trabalho foram realizados em vertical precedida de perfuração manual, fazendo-se uso de um trado helicoidal, de aproximadamente 66 mm de diâmetro. Imediatamente após ser alcançada a profundidade de cada ensaio, a sonda era inserida no terreno, com pouco esforço, sendo mantida na posição até o final do procedimento de expansão e esvaziamento. Apesar de se tratar de solo de difícil exploração (argila muito mole), especialmente com o emprego do pressiómetro de pré-furo, o método de perfuração empregado possibilitou a realização de ensaios em três profundidades do depósito: 2,77 m; 3,85 m e 4,50 m, uma faixa correspondente à porção central do depósito. A sonda empregada foi o tipo BX, de aproximadamente 60 mm de diâmetro externo e 450 mm de comprimento. Os ensaios foram realizados em estágios de tensão variando entre 0 e 100 kPa, com incrementos sucessivos de 12,5 kPa. As fotos da Figura 3 mostram detalhes de localização da área na qual foram realizados os primeiros ensaios de PMT num depósito de argila orgânica muito mole do Rio de Janeiro, situado às margens da BR 040 (Rodovia Washington Luiz), sentido Niterói, uma área exaustivamente investigada pelo grupo de pesquisa em Geotecnia do LACI – Laboratório de Ensaios de Campo e Instrumentação Professor Márcio Miranda Soares, da COPPE.

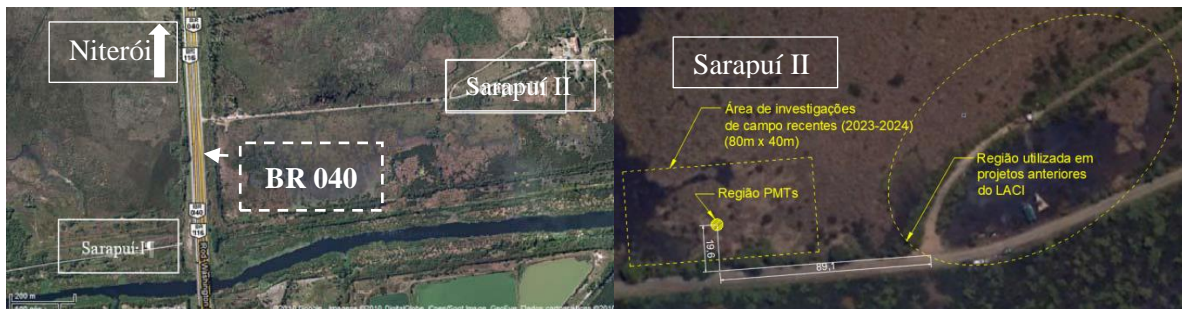


Figura 3. Localização do sítio experimental Sarapuí II (adaptado de Januzzi *et al.*, 2012b).

A foto da Figura 4 mostra detalhes da aparelhagem do pressiómetro Ménard durante os procedimentos iniciais de preparação para a realização dos ensaios no campo experimental de Sarapuí II.



Figura 4. Posicionamento do equipamento para a realização do ensaio no campo experimental de Sarapuí II.

Para a interpretação dos dados dos ensaios pressiométricos, foram adotadas as metodologias disponíveis nas normas relacionadas ao ensaio. Ou seja, para a estimativa do módulo pressiométrico, E_M , empregou-se a equação:

$$E_M = 2(1 + \nu) \cdot V_m \cdot \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (1)$$

em que,

ν = coeficiente de Poisson (adotado valor igual a 0,5);

V_m = volume médio da sonda expandida;

ΔP = variação da pressão na cavidade referente ao trecho pseudo-elástico da curva; e

ΔV = variação do volume da sonda expandida, referente ao trecho pseudo-elástico da curva pressiométrica.

Com relação à pressão limite, P_L , pelo fato do solo ser de baixíssima resistência, fazendo com que o consumo de água na expansão da sonda tenha sido excessivo, sua estimativa ficou comprometida.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 5 é mostrada uma curva típica do ensaio PMT obtida no depósito em estudo, na profundidade igual a 3,85m. Muito provavelmente esta é a primeira experiência brasileira relacionada ao emprego do PMT em solo de tão baixa resistência, com S_u na faixa de 8 kPa a 15 kPa (Januzzi, 2009; Januzzi et al. 2012b). Conforme se pode observar (Fig. 5), para uma pressão da ordem de 100 kPa, a sonda do pressiómetro estava completamente inflada, consumindo praticamente todo o volume de água disponível no reservatório do equipamento, que tem capacidade de aproximadamente 700 cm³. Observa-se ainda um comprometimento da curva na região de transição entre o final da parte em que a sonda toca as paredes da cavidade e o início do trecho considerado pseudo-elástico, o que se pode atribuir ao processo de perfuração com trado manual (sem revestimento), que pode resultar em amolgamento do solo nessa faixa de sollicitação do terreno. Apesar disso, o trecho correspondente ao comportamento linear da curva possibilitou, com a devida correção da pressão consumida pela rigidez da membrana, uma avaliação do módulo pressiométrico, E_M .

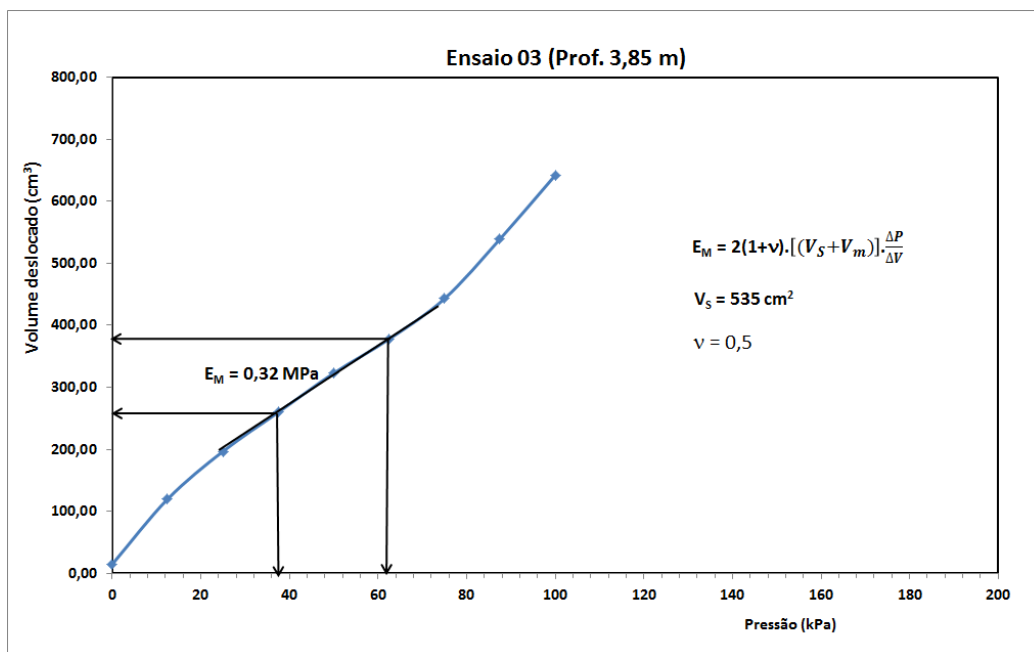


Figura 5. Curva típica de um ensaio com o PMT em depósito de argila orgânica muito mole do Sarapuí II.

A Tabela 1 mostra os valores de E_M estimados a partir dos ensaios PMT no depósito de argila orgânica muito mole do Sarapuí II. Pode-se observar valores muito baixos para o módulo de deformabilidade pressiométrica, variando de 0,03 MPa na menor profundidade (2,77 m) a valores praticamente constantes, na faixa de 0,32 – 0,33 MPa, entre 3,85 e 4,50 m de profundidade.

Tabela 1. Valores de E_M estimados a partir dos ensaios PMT no depósito do Sarapuí II.

| Profundidade (m) | E_M (MPa) |
|------------------|-------------|
| 2,77 | 0,03 |
| 3,85 | 0,32 |
| 4,50 | 0,33 |

A comparação dos valores de E_M mostrados na Tabela 1 com dados de ensaios provenientes de SDMT (dilatômetro sísmico) realizados no local por Januzzi *et al.* (2015) permitem avaliar que os ensaios pressiométricos realizados nesse solo em condições tão adversas ao uso do PMT produziram valores de módulo de deformabilidade relativamente satisfatórios, conforme mostrado na Figura 6. Na mencionada figura foram inseridos os valores de E_M obtidos com o pressiômetro Ménard para a comparação com os valores de E_D disponíveis na literatura, além dos outros índices do dilatômetro, como índice do material, I_D , índice de tensão horizontal, K_D , bem como o coeficiente de empuxo em repouso, K_0 (aplicando aos dados do DMT a correlação de Lacasse e Lunne, 1988), obtidos por Januzzi *et al.* (2015).

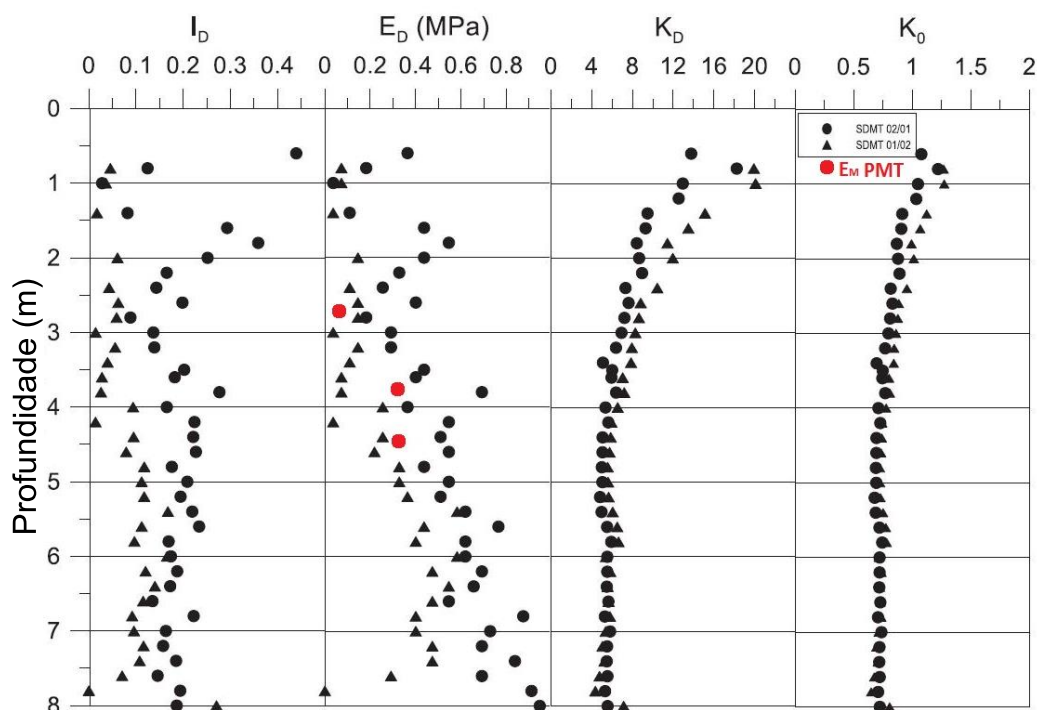


Figura 6. Valores de parâmetros dos ensaios de SDMT e PMT obtidos do depósito de argila orgânica muito mole Sarapuí II (adaptado de Januzzi *et al.*, 2015).

Na segunda coluna do gráfico da Figura 6 ainda se pode destacar que, além da concordância nos valores entre E_M e E_D , a tendência de variação do módulo pressiométrico com a profundidade se assemelha bastante com o observado em relação ao módulo dilatométrico obtido por Januzzi *et al.* (2015). Por fim, vale ressaltar que os ensaios de pressiômetro apresentados neste trabalho são os primeiros resultados obtidos nesse campo experimental, mas que sugerem a ampliação das investigações com o pressiômetro no depósito, preferencialmente empregando um método de perfuração e de estabilização do furo que possibilite curvas de PMT mais bem definidas, avaliando-se também os valores da pressão limite até profundidades já alcançadas por outros métodos de investigação do depósito. Recomenda-se fortemente o emprego do pressiômetro autoperfurante, que pode superar os problemas relacionados ao pré-furo do PMT, mas, sobretudo, para uma avaliação mais acurada dos parâmetros E_M e P_L , bem como outros de igual importância, a exemplo da tensão horizontal *in situ*, o coeficiente de empuxo em repouso e a resistência ao cisalhamento não drenada.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta resultados de ensaios preliminares com o pressômetro Ménard em um depósito de argila orgânica muito mole da Baixada Fluminense, denominado Sarapuú II.

As peculiaridades locais do terreno se constituíram num fator desafiador para a realização de ensaios com o PMT, razão pela qual no dia escolhido apenas três ensaios numa vertical foram possíveis. Pelo fato do solo ser muito mole, ficou comprometida a avaliação da pressão limite.

Os valores de módulo pressiométrico obtidos a partir dos ensaios PMT quando comparados aos valores de E_D disponíveis na literatura apresentaram concordância satisfatória, assim como a tendência de variação com a profundidade no trecho do perfil analisado.

Em virtude das limitações referente à perfuração para realização de ensaios com o pressômetro Ménard no tipo de solo investigado, sugere-se uma nova campanha de ensaios no depósito, preferencialmente empregando um método de perfuração e de estabilização das paredes da vertical que possibilite curvas de PMT mais bem definidas, avaliando-se também os valores da pressão limite, inclusive até profundidades já alcançadas por outros métodos de investigação do depósito.

Finalmente, recomenda-se fortemente o emprego do pressômetro autoperfurante, que é capaz de superar os problemas relacionados ao pré-furo para o PMT, mas, sobretudo, para uma avaliação mais acurada dos parâmetros E_M e P_L , bem como outros de igual importância, a exemplo da tensão horizontal *in situ*, o coeficiente de empuxo em repouso e a resistência ao cisalhamento não drenada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação COPPETEC e à PETROBRÁS pelo suporte financeiro à pesquisa, bem como à empresa Damasco Penna Engenharia Geotécnica pela parceria durante a realização dos ensaios de PMT e à equipe do Laboratório de Ensaios de Campo e Instrumentação Professor Márcio Miranda Soares da COPPE/UFRJ, pela ajuda na realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM International (2000). ASTM D-4719. *Standard test method Standard Test Method for Prebored Pressuremeter Testing in Soils*.
- Baguelin, F., Jezequel, J.F., Shields, D.H. (1978), *The Pressuremeter and Foundation Engineering*, 1st ed. Clausthal, Germany: Trans. Tech. Publication, 617p.
- Bishop, R.F.; Hill, R. & Mott, N.F. (1945). *The Theory of Indentation and Hardness Test*. Proceedings of the Physical Society. London, Eng. v.57, n.321, p.147-159.
- Brandt, J.R.T. (1978). *Utilização de um Novo Pressômetro para Determinação do Comportamento Elástico de Solos Residuais e Gnáissicos Jovens e de Estratos do Terciário Paulista*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro - RJ.
- Bosch, D. R. (1996). *Interpretação do Ensaio Pressiométrico em Solos Coesivo-Friccionais Através de Métodos Analíticos*. Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre-RS.
- Cavalcante, E. H. (1997). *Uma Contribuição ao Estudo do Comportamento Tensão-Deformação de um Depósito de Argila Mole da Cidade do Recife, Através da Utilização do Pressômetro Ménard*. Dissertação de Mestrado. UFPB - Campus II, Campina Grande-PB.
- Clarke, B. G. (1995). *Pressuremeter in Geotechnical Design*. Chapman & Hal. Cambridge, Grã-Bretanha, 362p.

- Danziger, F. A. B., Jannuzzi, G. M. F. e Martins, I. S. M. (2019). *The relationship between sea-level change, soil formation and stress history of a very soft clay deposit*. Geosciences, 5(3): 461–479.
- Dourado, K. C. A. (2005). Utilização do Pressiômetro Ménard na Identificação e Previsão de Recalques em Solo Colapsível. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPE. Recife-PE.
- Imamura, F. B. T. (2017). *Utilização do Pressiômetro de Ménard na Avaliação da Capacidade de Carga de Estacas em Solo Tropical*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, Campinas-SP.
- ISO 22476-4 (2021). *Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 4: Prebored pressuremeter test by Ménard procedure*.
- Jannuzzi, G. M. F. (2009). The Characterisation of Sarapuí II Soft Clay Site by In-Situ Testing. Dissertação de Mestrado. COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ.
- Jannuzzi G. M. F, Danziger FAB, Martins I.S.M. e Guimarães, G. V. M. (2012a). *The ability of in situ tests to detect the soil region affected by an embankment on soft clay*. Proc. IV International Conference on Site Characterization, Porto de Galinhas, v. 1, pp. 515-521.
- Jannuzzi G. M. F., Danziger, F.A.B. e Martins, I. S. M. (2012b). *Cyclic T-Bar Tests to Evaluate the Remoulded Undrained Shear Strength of the Sarapuí II Soft Clay*. Soils & Rocks, vol. 35, n. 3: 279–294.
- Jannuzzi G. M. F., Danziger, F.A.B. e Martins, I. S. M. (2015). *Geological-geotechnical characterisation of Sarapuí II clay*. Eng. Geology 190: 77–86.
- Lamé, G. (1952). *Leçons Sur la Théorie Mathématique L'élasticité des Corps Solides*. Bachelier, Paris, France (citado por CLARKE, 1995).
- Machado, R. R. (2020). *Ensaio Pressiométricos para Estimativa de Parâmetros de Resistência e Deformabilidade em um Perfil se Solo Tropical*. Dissertação de Mestrado. UFG/PPGECON, Goiânia-GO.
- Mántaras, F.M. (1995). *Análise Numérica do Ensaio Pressiométrico Aplicada à Previsão do Comportamento de Fundações Superficiais em Solos não Saturados*. Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre-RS.
- Medeiros, J. L. G. (1998). Estudo do Comportamento tensão-deformação de um depósito arenoso, através dos ensaios de SPT, Pressiômetro de Menárd e Placa Helicoidal. Dissertação de Mestrado. UFPB - Campus II, Campina Grande-PB.
- Moura, A. S. (2023). Comunicação Pessoal aos autores.
- Nakahara, S.M. (1995). *Determinação de Propriedades de um Solo não Saturado Através de Ensaio Pressiométricos e de Laboratório*. Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre-RS.
- NF P94-110 (2000). Sols: reconnaissance et essais - Essai pressiométrique Ménard - Partie 1: essai sans cycle.
- Ortigão, J.A.R. & Alves, L.S. (1994). Análise de Ensaio Pressiométricos na Argila Porosa de Brasília, In: Anais X COBRAMSEF, ABMS, Vol. II, Foz do Iguaçu-PR.
- Paiva, W. (2000). Influência do Processo de Instalação da Sonda nos Resultados de Ensaio com o Pressiômetro Ménard. Dissertação de Mestrado. UFPB - Campus II, Campina Grande-PB.
- Rezende, C.H. (2000). Estudo do Comportamento Geotécnico de Material Assoreado em Cava Exaurida de Mineração através de Ensaio Pressiométricos. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas de Ouro Preto. Ouro Preto-MG.
- Schnaid, F. e Rocha Filho, P. (1994). Experiência de Aplicação do Ensaio Pressiométrico em Solos Estruturados Parcialmente Saturados, X COBRAMSEF, ABMS, Vol. II, Foz do Iguaçu-PR.
- Soares, J. M. (1999). Emprego do SPT-T e Pressiômetro de Ménard em Solo Arenoso no Litoral de João Pessoa. Dissertação de Mestrado. UFPB - Campus II, Campina Grande-PB.