
Utilização de ensaios pressiométricos ménard para avaliação de um perfil de solo tropical

Use of Ménard pressiometric tests to evaluate a tropical soil profile

Uso de pruebas presiométricas de Ménard para evaluar un perfil de suelo tropical

Romulo Rodrigues Machado

Universidade Federal de Goiás
romulorodrimachado@gmail.com

Luiz Carlos Galvani Junior

Universidade Federal de Goiás
luizgalvanijr@gmail.com

Renato Resende Angelim

Universidade Federal de Goiás
angelim@ufg.br

Maurício Martines Sales

Universidade Federal de Goiás
mmartines@ufg.br

Resumo

O ensaio pressiométrico (PMT) é considerado internacionalmente um dos melhores ensaios de campo para determinação dos parâmetros de tensão-deformação de solos. O objetivo deste artigo é comparar os resultados dos ensaios de dois furos de sondagem pressiométricas realizados no Campo Experimental da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás (EECA/UFG), em Goiânia. Os ensaios foram realizados em período seco e chuvoso do regime pluviométrico local, de modo a verificar a influência do teor de umidade nos resultados de deformabilidade e de resistência, que são expressos pelo Módulo Ménard (E_M) e pela Pressão Limite (p_L), respectivamente. Além disso, avaliar a influência da sucção total nas duas diferentes situações para os ensaios realizados. Em cada furo de sondagem, foram realizados 6 ensaios pressiométricos, sendo um ensaio para cada camada de um metro até 6 m de profundidade. Durante a realização dos furos de sondagem, foram coletadas amostras deformadas de solo a cada metro de profundidade, por meio das quais foi possível determinar o teor de umidade e a sucção total do solo. Por meio da comparação entre os valores obtidos em cada período do regime pluviométrico, percebeu-se que os parâmetros de deformabilidade e de resistência

apresentaram uma queda considerável quando comparado o período seco ao chuvoso, de forma que essa variação deve ser considerada na elaboração dos projetos de engenharia geotécnica.

Palavras-chave: Pressiômetro Ménard. Módulo de Deformabilidade do Solo. Pressão Limite. Teor de Umidade e Sucção de Solos Tropicais. Efeito da Pluviometria em Ensaios de Campo.

Abstract

The PressureMeter Test (PMT) is considered internationally one of the best in situ test for determining soil stress-strain parameters. The objective of this article is to compare the results of the tests of two pressuremeter boreholes carried out at the Experimental Field of the Escola de Engenharia Civil e Ambiental of the Universidade Federal de Goiás (EECA/UFG), in Goiânia, carried out in a dry and rainy period of the pluviometric regime local, in order to verify the influence of the moisture content in the results of deformability and resistance, which are expressed by the Ménard Module (E_M) and the Limit Pressure (p_L), respectively, and, in addition, to evaluate the influence of the total suction in the two different situations for the tests performed. In each borehole, 6 pressuremeter tests were carried out, one test for each layer of one meter up to a total of 6 m deep. During the drilling of the boreholes, deformed soil samples were collected from each meter of depth, through which it was possible to determine the moisture content and the suction of the soil. Through the comparison between the values obtained in each period of the pluviometric regime, it was noticed that the parameters of deformability and resistance showed a considerable decrease when compared to the dry to the rainy season, so this variation must be considered in the elaboration of the geotechnical engineering projects.

Keywords: Ménard Pressuremeter. Soil Deformability Module. Limite Pressure. Moisture and Suction of Tropical Soils. Effect of Rainfall in in situ Tests.

Resumen

El ensayo presiométrico Ménard (PMT) se considera, internacionalmente, una de las mejores pruebas de campo para determinar los parámetros de tensión-deformación del suelo. El objetivo de este artículo es comparar los resultados de las pruebas de dos perforaciones presiométricas realizadas en el Campo Experimental de la Escuela de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Federal de Goiás (EECA / UFG), en Goiânia. Los ensayos fueron realizadas en un período seco y lluvioso del régimen pluviométrico local, para verificar la influencia del contenido de humedad en los resultados de deformabilidad y resistencia, que se expresan mediante el Módulo Ménard (EM) y la Presión límite (p_L), respectivamente. Y, además, para evaluar la influencia de la succión total en las dos situaciones diferentes para las pruebas realizadas. En cada pozo, se realizaron 6 pruebas presiométricas, una prueba para cada capa de un metro hasta un total de 6 m de profundidad. Durante las perforaciones de pozos, se recogieron muestras de suelo deformadas de cada metro de profundidad, a través de las cuales fue posible determinar el contenido de humedad y la succión del suelo. Por medio de la comparación entre los valores obtenidos en cada período del régimen pluviométrico, se observó que los parámetros de deformabilidad y resistencia mostraron una caída considerable al comparar el período seco con el lluvioso. Esa variación debe considerarse en la elaboración de los proyectos de ingeniería geotécnica.

Palabras clave: Presiometro Ménard. Módulo de Deformabilidad del Suelo. Presión Limite. Humedad y succión del suelo tropical. Efecto de la lluvia en las pruebas de campo.

Introdução

As propriedades dos solos tropicais podem ser determinadas por meio de ensaios de laboratório e de ensaios de campo, sendo muitas vezes necessário o emprego de ambos. Apesar de os ensaios de laboratório ainda serem considerados a maneira mais satisfatória de estudar os solos, vale ressaltar que eles requerem a retirada de amostras, o que nem sempre é possível devido às dificuldades operacionais e à desvantagem de demandarem mais tempo para a sua execução, de forma que, em muitos casos, os ensaios *in situ* se mostram mais vantajosos.

Os ensaios de campo conseguem incorporar, em seus resultados, todas ou quase todas as influências das propriedades naturais do solo *in situ*, como tensões confinantes, umidade natural, saturação, densidade, sucção e fluxo d'água e de ar. Ademais, por envolverem uma massa/volume de solo mais considerável quando comparados às amostras utilizadas em laboratório, os ensaios de campo conseguem reproduzir de maneira mais realista o comportamento do maciço do solo, objeto de estudo geotécnico. Essas aptidões dos ensaios de campo os tornam mais capazes de verificar, por exemplo, as variações que a estação pluviométrica pode ocasionar na resistência e na deformabilidade de um solo (DIEMER, 2014).

Destaca-se, assim, o ensaio pressiométrico (*PressureMeter Test* - PMT), considerado um dos melhores ensaios disponíveis para determinação dos parâmetros de tensão-deformação de solos *in situ*. O PMT se sobressai em razão do fato de apresentar uma base de interpretação teórica bem definida por expansão de cavidade cilíndrica e, permite, com relativa rapidez e facilidade, a obtenção dos parâmetros Pressão Limite (p_L) e Módulo de Deformabilidade (E_p), ambos aplicáveis ao cálculo da capacidade de carga e do recalque de fundações (ANGELIM; CUNHA; SALES, 2016).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi verificar se o efeito da pluviometria, representada indiretamente por meio do teor de umidade e da sucção total no solo, pode ser avaliado pelo pressiómetro Ménard através de seus parâmetros de resistência e deformabilidade, p_L e E_M .

Revisão bibliográfica

O pressiômetro foi inventado por Louis Ménard em 1955 e consistia de um elemento de forma cilíndrica projetado para aplicar uma pressão uniforme nas paredes de um furo de sondagem através de uma membrana flexível composta por três células independentes. Duas delas são as células de guarda, que moldavam a célula central para promover a expansão de uma cavidade cilíndrica na massa de solo (GAMBIN, 1995).

Ménard (1967) mostrou, ao realizar ensaios e correlações empíricas, que seu equipamento era capaz de balizar projetos da maioria dos tipos de fundação. Em seguida, utilizando a teoria da expansão de cavidade, diversos autores substituíram gradualmente as bases empíricas do ensaio por bases teóricas (VÉSIC, 1972; BAGUELIN; JÉZÉQUEL; SHIELDS, 1978; CUNHA, 1994; 1996).

Os estudos realizados posteriormente permitiram o desenvolvimento de novos tipos de pressiômetro (autoperfurante e cravado), com o objetivo de minimizar as incertezas decorrentes da instalação da sonda em pré-furo e de obter medições mais confiáveis de pressão e deformação, além de possibilitar a realização do ensaio pressiométrico em solos duros e rochas frágeis.

Apesar de ser internacionalmente reconhecido como o ensaio de campo mais adequado para a determinação dos parâmetros de tensão-deformação de solos e de apresentar uma base teórica bem definida pela teoria de expansão de cavidade, o PMT não é muito utilizado na rotina de projetos da engenharia geotécnica brasileira, tendo sua utilização restrita a pesquisas do âmbito acadêmico e a obras especiais de grande porte. Acredita-se que os principais motivos para essa restrição estão no preço da aparelhagem e na necessidade de envolver técnicos especializados para realização do ensaio, o que o torna dispendioso, além da falta de tradição do seu uso em solos tropicais brasileiros.

Nas universidades brasileiras, tem-se estudado a aplicabilidade desse ensaio em solos tropicais e buscado difundir o ensaio pressiométrico para o meio técnico como uma alternativa complementar para as campanhas de investigação geotécnica. Dentre as pesquisas realizadas no Brasil, destacam-se o trabalho de Brandt (1978), um dos primeiros realizados no Brasil, os realizados pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

(SCHNAID; ROCHA FILHO, 1994; SCHNAID; CONSOLI; MÁNTARAS, 1996; KRATZ DE OLIVEIRA; SCHNAID; GEHLING, 1999; SCHNAID; MÁNTARAS, 2003; MÁNTARAS 1995; 2000) e os trabalhos realizados pela Universidade de Brasília (UnB) (ORTIGÃO; CUNHA; ALVES, 1996; CUNHA; COSTA; PASTORE, 2000; VECCHI et al., 2000; MOTA, 2003; ANGELIM, 2011; ANGELIM; SALES; CUNHA, 2016).

Materiais e métodos

O equipamento utilizado foi o pressiômetro tipo Ménard, fabricado pela empresa francesa APAGEO (Figura 1). Este aparelho possui uma tubulação de 25 m de comprimento que liga a sonda à unidade central de controle de pressão e volume (CPV); fonte de pressão em cilindro de gás nitrogênio comprimido de 1 m³ e sonda tipo G (de células encaixadas), codificação BX, diâmetro de 60 mm e montada com membrana de borracha de 3 mm de espessura especificada para baixas pressões (ANGELIM, 2011).



Figura 1 – Vista geral do pressiômetro Ménard

Fonte: MACHADO (2020)

Para a expansão da sonda pressiométrica, são aplicados incrementos de pressão de uma mesma magnitude e, para a adoção desse incremento, verifica-se o tipo de solo estudado. Os incrementos de pressão correspondem a um décimo da pressão limite estimada. Conforme são realizados os

incrementos, registram-se as leituras do nível do volumímetro aos 15, 30 e 60 segundos. O ensaio é finalizado quando a deformação máxima da sonda é alcançada (volume da CPV é esgotado). O resultado é uma curva que relaciona o volume injetado ao final dos 60 segundos com a pressão aplicada (SCHNAID; ODERBRECHT, 2012).

A sonda pressiométrica utilizada é formada por um núcleo cilíndrico de aço e por três células independentes formadas por duas membranas de borracha sobrepostas. O tubo metálico oco permite, por meio de pequenos orifícios, a passagem de água pressurizada para a célula central e de gás nitrogênio para as células de guarda. A sonda também possui pequenos orifícios em sua extremidade inferior com a função de permitir a drenagem de água caso necessária. Os procedimentos para a utilização do pressiómetro Ménard, incluindo a calibração e a obtenção de dados, estão presentes nas normas internacionais D-4719 (ASTM, 2000), NF P 94-110-1 (AFNOR, 2000) e EN 22476-4 (ISO, 2009).

Os furos experimentais para a realização dos ensaios pressiométricos foram realizados no Campo Experimental da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás (EECA/UFG), encontrada na porção sudoeste da quadra 86 da Escola de Engenharia Civil e Ambiental, entre o edifício do Centro de Aulas das Engenharias e o alambrado da divisa com a 5ª Avenida, no Setor Leste Universitário, em Goiânia-Goiás (Figura 2).



Figura 2 – Localização da área de estudo (Campo Experimental da EECA/UFG)

Fonte: Adaptado de Google Maps (2019).

Neste mesmo local, foram realizadas sondagens de simples reconhecimento tipo SPT (*Standard Penetration Test*) e tipo PANDA 2 (penetrômetro dinâmico de cone leve com energia variável), apresentadas por Machado et al. (2018) e Rodrigues et al. (2018), respectivamente, além de provas de carga estáticas em estacas metálicas tubulares feitas por Nascimento (2019). A Figura 3 ilustra a locação dos furos para os ensaios de campo realizados no local e a posição dos dois furos de sondagem PMT, sendo a sondagem PMT 1 (em azul) realizada em período chuvoso, de 29 a 30/04/2019, e a PMT 2 (em vermelho) realizada em período seco, de 19 a 21/08/2019, conforme verifica-se no Gráfico 1, que apresenta os dados de pluviometria em Goiânia para ano de 2019, e uma média dos dados do período entre 1961 e 1990.

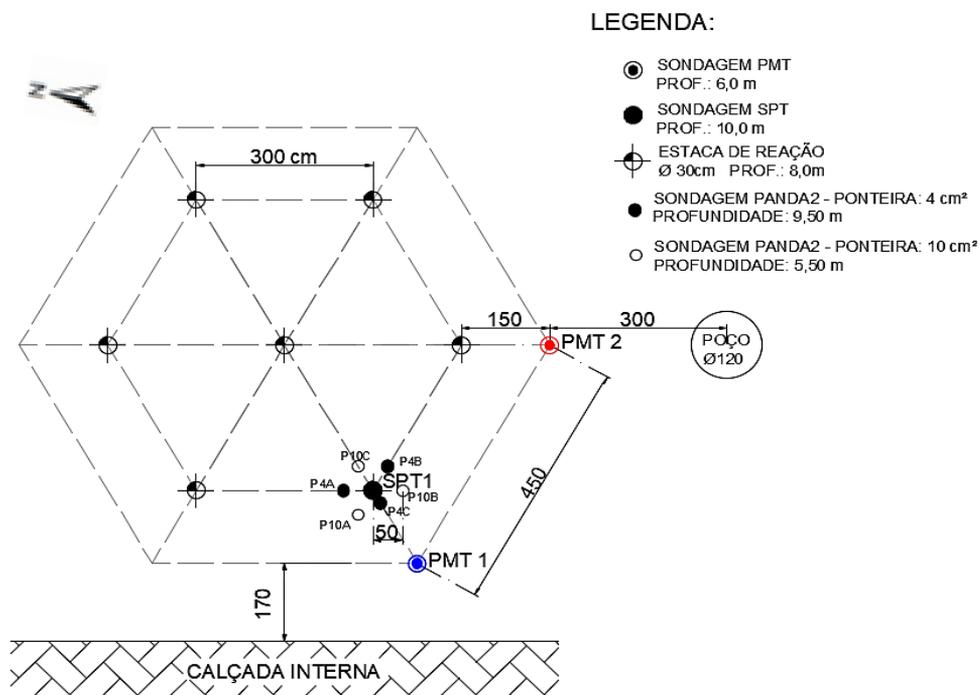


Figura 3 – Locação dos ensaios experimentais no Campo Experimental da EECA/UFMG

Fonte: MACHADO (2020)

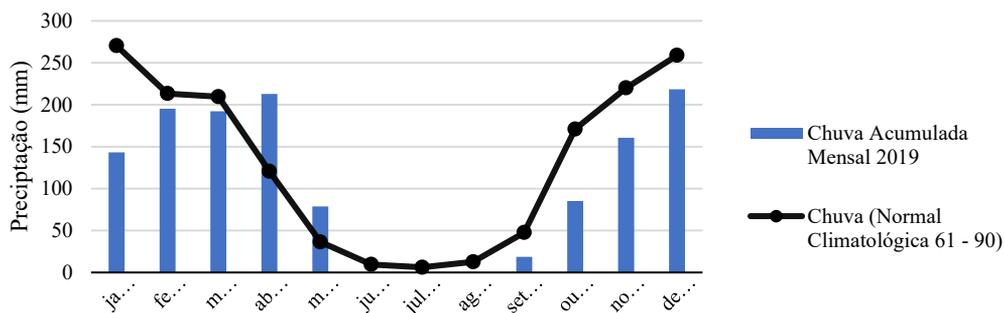
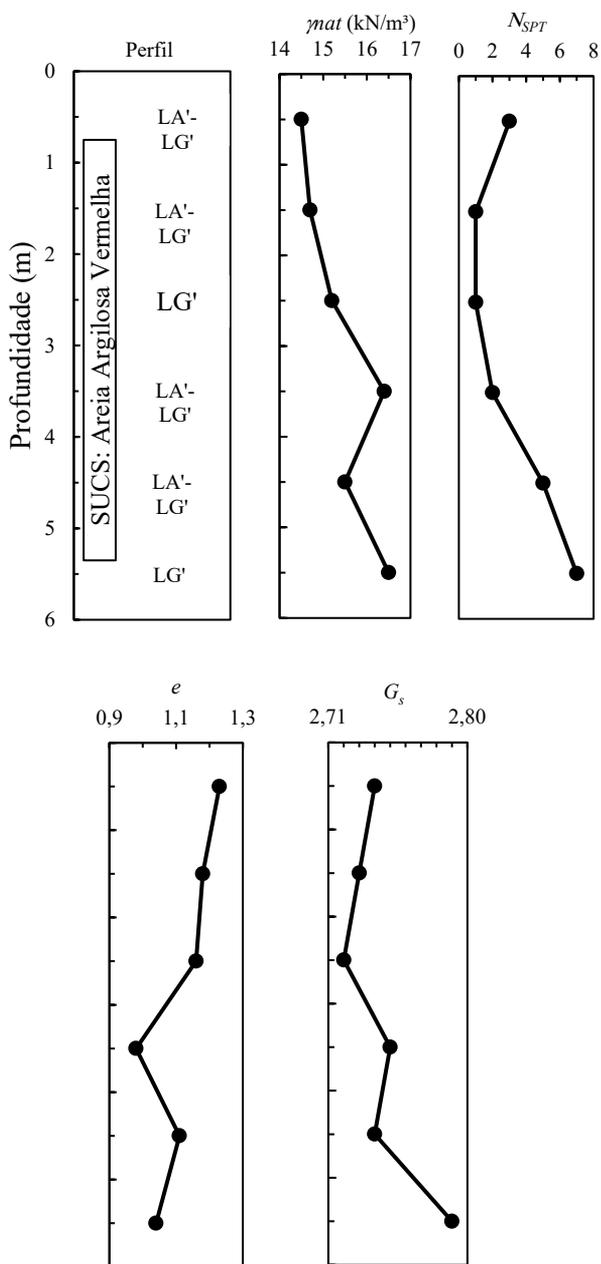


Gráfico 1 – Distribuição mensal de chuvas em Goiânia para o ano de 2019 e média histórica. Estação OMM 83423 localizada a 2,41 km do Campo Experimental da EECA/UFG

Fonte: Adaptado de INMET (2020).

As estacas de reação executadas por Nascimento (2019) delimitam um formato hexagonal, com lado de 3,0 m, no Campo Experimental. Os furos de sondagem PMT estão distanciados em 1,5 m de duas dessas estacas, em alinhamento radial ao centro do hexágono, e com 4,5 m entre si. As sondagens pressiométricas foram feitas a cada camada de 1 m do perfil até 6 m de profundidade, o que possibilitou a determinação do E_M e da p_L representativos de cada metro do perfil, além da determinação da sucção total do solo (ψ), por meio do equipamento WP4C (*Dewpoint PotentiaMeter*), seguindo as recomendações da norma americana D-6836 (ASTM, 2004), e do teor de umidade natural das amostras deformadas, retiradas durante a realização dos pré-furos, seguindo os procedimentos da NBR 6457 (ABNT, 2016).

A Figura 4 apresenta um resumo dos resultados de caracterização do solo. A classificação granulométrica SUCS e MCT foram realizadas por Nascimento (2019). Cabe salientar que o nível d'água não foi encontrado na sondagem SPT realizada até 9,5 m de profundidade no dia 29 de janeiro de 2018.



Nota: LA'-LG' = arenoso ou argiloso laterítico; LG' = argiloso laterítico; N_{SPT} = Índice de resistência à penetração da sondagem de simples reconhecimento SPT.

Figura 4 – Resultados da caracterização do solo do perfil do Campo Experimental da EECA/UFG

Fonte: Elaborado pelo autor.

Salienta-se que a sucção total fornecida pelo WP4C é mais precisa a partir de 500 kPa e que, para valores acima de 1000 kPa, esta pode ser relacionada diretamente com a sucção matricial em solos tropicais, pois as curvas características de ambas as sucções desses tipos de solos são muito semelhantes a partir desse valor (KÜHN, 2014).

O ensaio pressiométrico Ménard também é conhecido como ensaio pressiométrico de pré-furo, de maneira que, para realização dos furos de sondagem, foram utilizados dois trados manuais, apresentados na Figura 5, sendo um trado tipo copo e o outro tipo helicoidal. O trado tipo copo possui 63 mm e o trado tipo helicoidal 58 mm de diâmetro, o que resultou em furos com diâmetros de aproximadamente 67 mm, ou seja, com espaço anular teórico (espaçamento entre a sonda pressiométrica e a borda do furo) menor do que 9 mm, conforme prescrito na norma NF P 94-110-1 (AFNOR, 2000), e com um diâmetro menor do que 1,20 vezes o diâmetro da sonda, como prescrito na norma D-4719 (ASTM, 2000). Durante a execução do pré-furo de sondagem PMT 1, realizado em clima chuvoso, foi utilizado o trado helicoidal e para a realização do pré-furo de sondagem PMT 2, no período seco, foi utilizado o trado tipo copo, pois o solo não apresentava coesão o suficiente para ser retirado do furo com a utilização do trado helicoidal.



Figura 5 – Trados do tipo copo e helicoidal utilizados para realização dos pré-furos

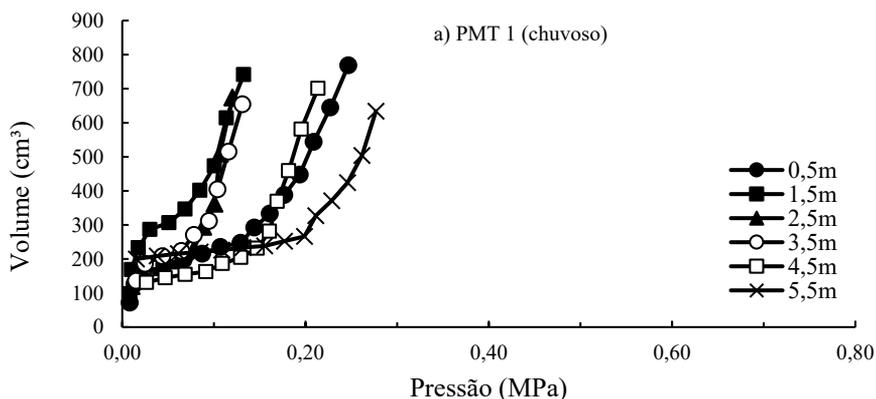
Fonte: MACHADO (2020).

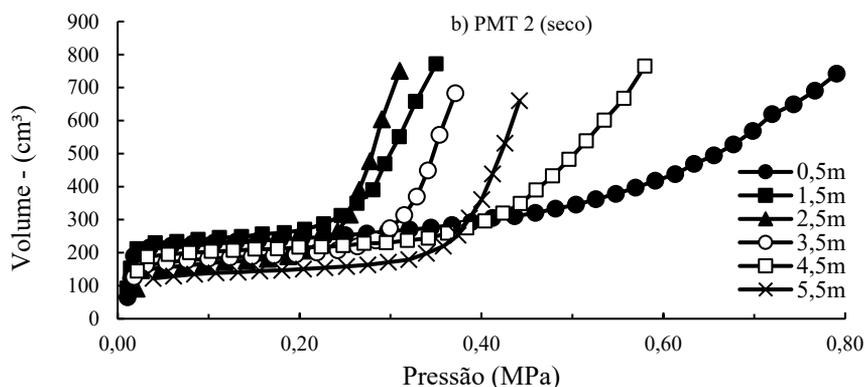
Os dados obtidos em campo durante os ensaios foram corrigidos, ou seja, foram descontadas a inércia da membrana, a dilatação das tubulações e a pressão hidrostática na profundidade do ensaio relativa à CPV, conforme orientado pelas normas pertinentes. A partir das curvas pressiométricas corrigidas, expressas em pressão (kPa) *versus* volume (cm³) (notação europeia), foi possível determinar os parâmetros principais E_M e p_L .

Na curva pressiométrica como parâmetros complementares, p_1 e p_2 são pontos que determinam o início e o fim do trecho pseudo-elástico da curva, respectivamente e p_f é a pressão de fluência ou de início da deformação plástica, ou seja, a tensão a partir da qual o comportamento do solo passa do regime linear-elástico para o regime plástico. Essa pressão de fluência é obtida pela análise do gráfico do diagrama pressão *versus* variação do volume injetado entre 30 e 60 segundos. A σ_h é a tensão horizontal *in situ* estimada ao analisar a curva pressiométrica corrigida por meio do método de Briaud (1992), o qual consiste em escrever os dados obtidos em campo em função da pressão (kPa) e da deformação radial da sonda (%) (notação norte-americana).

Resultados e discussões

A Figura 6 demonstra a evolução, apresentada por meio da notação europeia, das curvas pressiométricas corrigidas das duas sondagens com o aumento da profundidade. É válido salientar que, na extremidade das curvas, está apresentada a pressão limite, o ensaio é interrompido antes da obtenção dessa pressão e esse valor é obtido por meio de extrapolação.





**Figura 6 – Evolução das curvas pressiométricas com a profundidade: a) PMT 1 (chuvoso)
 b) PMT 2 (seco)**

Fonte: Elaborado pelo autor.

As curvas pressiométricas referentes às profundidades de 1,5, 2,5 e 3,5 m se assemelham tanto para o PMT 1 (chuvoso) quanto para o PMT 2 (seco), o que gera parâmetros de tensão-deformação semelhantes para essas profundidades da mesma sondagem. Elas se estendem por uma faixa menor que as demais curvas, indicando valores menores e muito próximos dos parâmetros de resistência (p_L).

As curvas pressiométricas referentes às profundidades de 4,5 e 5,5 metros, com maior influência da tensão confinante, apresentaram maior resistência (p_L). Para a sondagem PMT 2 (seco), a curva referente à profundidade de 0,5 m superou todas as outras no que tange à resistência.

Nota-se que as curvas pressiométricas do PMT 2 (seco) se estendem por uma faixa maior de pressões do que as do PMT 1 (chuvoso), indicando maiores valores de p_1 , p_2 , p_f e p_L e demonstrando a influência da pluviometria no comportamento do solo. Para ambas as sondagens, a curva pressiométrica correspondente à profundidade de 0,5 m se mostrou uma das mais prolongadas, o que indica parâmetros de resistência maiores nessa camada superficial. Essa situação ocorre, provavelmente, devido a camada mais superficial do solo ser mais susceptível aos efeitos do intemperismo, apresentando cimentações e agregações conforme descrito por Nogami e Villibor (1995). Para o período seco tem-se, ainda,

o efeito de altas sucções superficiais, que ocorrem para os baixos teores de umidade, como verifica-se nos Gráficos 2 e 3.

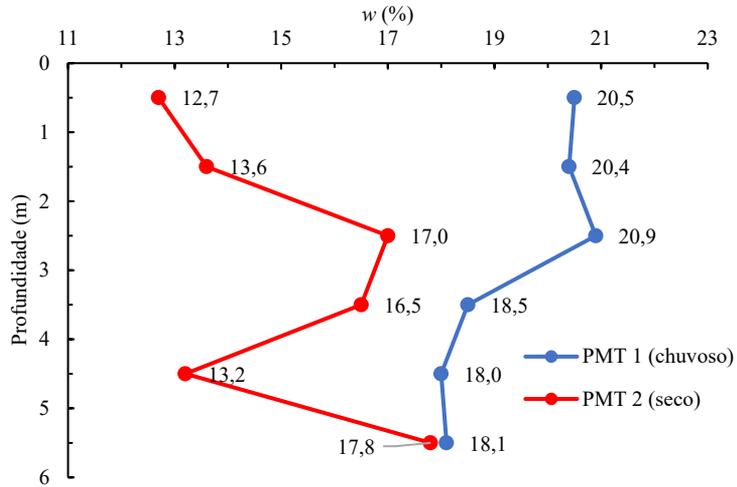


Gráfico 2 –Perfil de w

Fonte: Elaborado pelo autor.

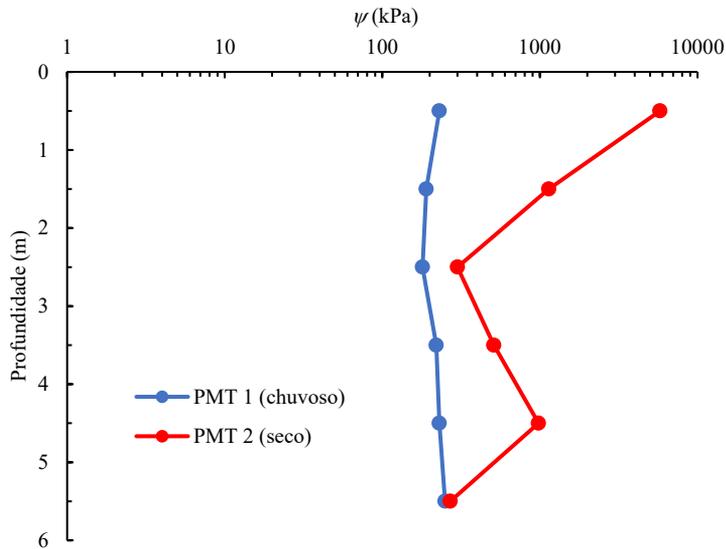


Gráfico 3 –Perfil de ψ

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme se verifica no Gráfico 2, os teores de umidade obtidos para o PMT 2 (seco) são inferiores aos encontrados para o PMT 1 (chuvoso) em todo perfil, com exceção da profundidade 5,5 m, em que podem ser considerados numericamente iguais. Percebeu-se uma tendência de redução da diferença entre os valores de teor de umidade dos períodos seco e chuvoso com o aumento da profundidade, com exceção à profundidade de 4,5 m, o que pode ser justificado por ter sido encontrada maior presença de pedregulho nessa camada para o PMT 2 (seco), deixando o material mais drenante e com dificuldade para reter a umidade na estiagem. Para a profundidade de 5,5 m, os teores de umidade encontrados praticamente se igualaram, indicando que, talvez, essa profundidade seja um ponto de redução da influência da pluviometria no comportamento mecânico do solo estudado.

No que tange à sucção, Gráfico 3, os valores determinados foram maiores para o PMT 2 (seco) em relação ao PMT 1 (chuvoso) em todo o perfil, destacando-se a profundidade de 0,5 m e com exceção da profundidade de 5,5 m, que apresentou valores de sucção pequenos e praticamente iguais, indicando uma redução da influência da sucção no comportamento do solo nessa profundidade e foi verificada, novamente, uma tendência de aproximação entre os valores encontrados com o aumento da profundidade, com exceção novamente da profundidade de 4,5 m.

A Figura 7 apresenta uma comparação entre as curvas pressiométricas das diferentes estações juntas para os casos de 3,5 e 5,5 m separadamente, o que possibilita visualizar a aproximação das curvas pressiométricas sob diferentes condições climáticas e a influência do aumento da profundidade.

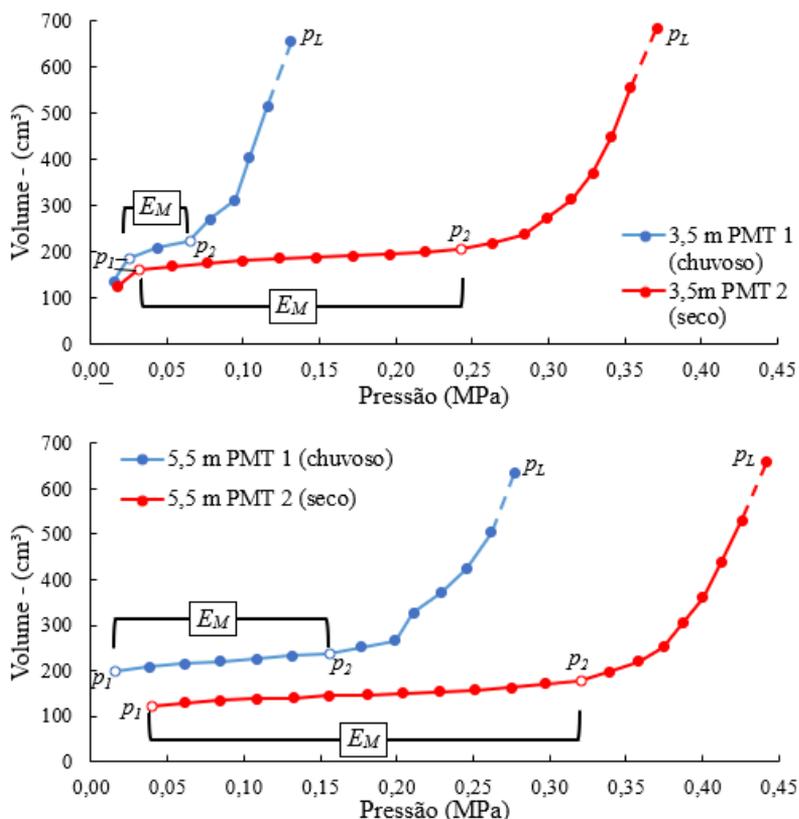


Figura 7 – Comparação entre as curvas pressiométricas de 3,5 e 5,5 m

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na profundidade de 3,5 metros, a declividade e a extensão dos trechos pseudo-elásticos das curvas pressiométricas são muito diferentes, e os pontos finais das curvas se encontram muito afastados, sempre com maior ganho de resistência para a sondagem PMT 2 (seco). Na profundidade de 5,5 metros, percebeu-se a semelhança entre as declividades do trecho pseudo-elásticos (módulo E_M) das curvas pressiométricas. Embora a diferença entre os pontos finais das curvas seja menor em relação à de 3,5 metros, o ganho de resistência ainda é considerável, em torno de 60%.

As curvas pressiométricas corrigidas, mostradas na Figura 6, permitiram a determinação dos parâmetros de tensão-deformação do perfil de solo. O Gráfico 4 apresenta os valores de p_1 e p_2 , que são os limites do trecho pseudo-elástico da curva pressiométrica corrigida obtidos para o

PMT 1 e para o PMT 2. Os valores p_1 , com média geral de 32,6 kPa, são próximos para as duas sondagens realizadas. Os valores de p_2 são muito maiores, entre aproximadamente 2 a 4 vezes, para o PMT 2 (seco) em relação ao PMT 1 (chuvoso).

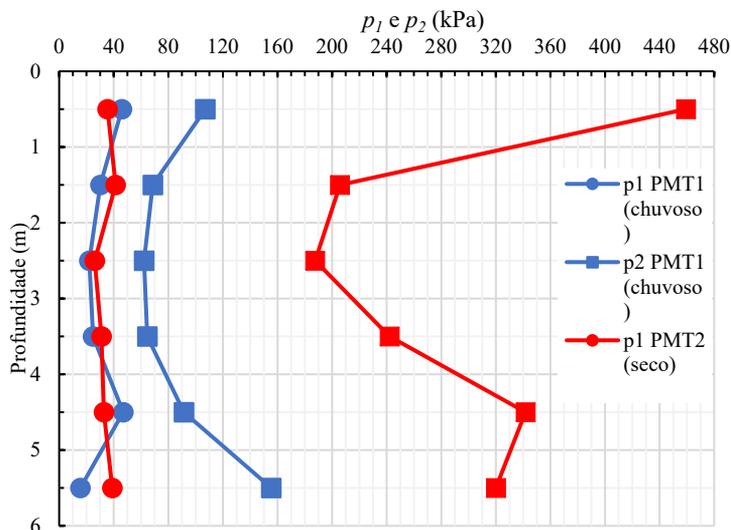


Gráfico 4 – Valores de p_1 e p_2 para o PMT 1 e para o PMT 2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa situação faz com que a extensão do trecho pseudo-elástico dos ensaios pressiométricos realizados em período úmido correspondam, praticamente, de 1/2 a 1/7 da extensão dos trechos pseudo-elásticos do período seco. Esse comportamento mostra que o solo mais úmido se deformou muito mais sob tensões muito menores impostas pelo equipamento, com discreto trecho elástico antes de plastificar-se, principalmente para os ensaios realizados até 3,5 m de profundidade. Acredita-se que a água em maior quantidade presente nos vazios do solo, apesar de a pressão ser aplicada lentamente durante o ensaio, fluiu radialmente, escapando da zona plastificada junto à membrana para a zona elástica, que, ao receber a água, aumenta sua saturação e se plastifica mais rapidamente do que ocorreria na massa de solo em período seco.

Os Gráficos 5 e 6 apresentam os resultados obtidos em termos de p_f e σ_h . Em ambos os gráficos, os valores referentes ao período seco (PMT 2) são consideravelmente maiores que os valores referentes ao período chuvoso (PMT 1).

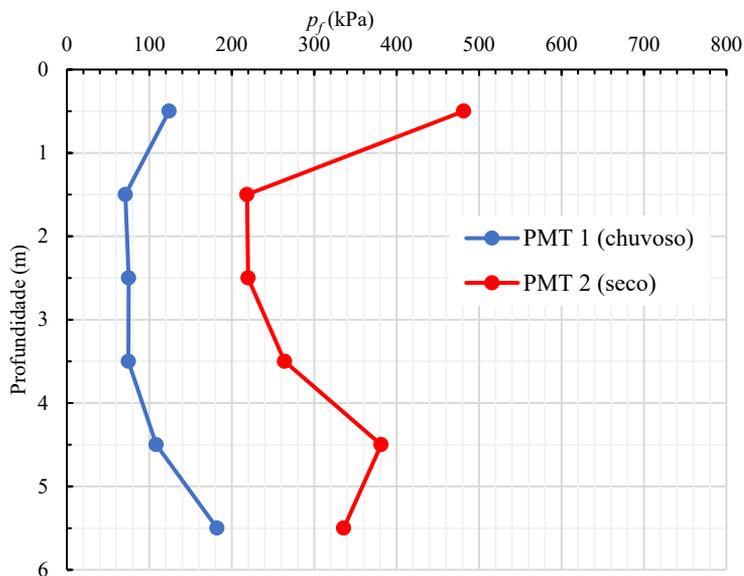


Gráfico 5 – Perfil de p_f

Fonte: Elaborado pelo autor.

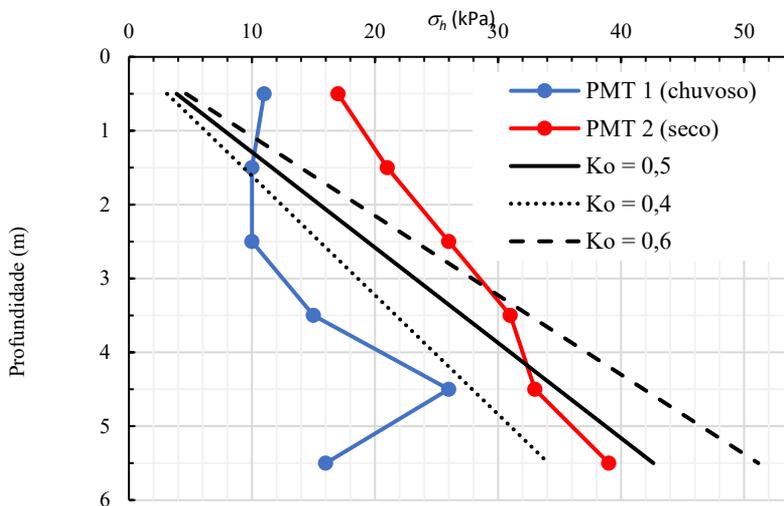


Gráfico 6 – Perfil de σ_h

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como a p_f simboliza a transição entre o regime pseudo-elástico e o regime plástico, é importante, em casos de projetos geotécnicos, perceber que, para todas as profundidades estudadas, os valores de p_f do PMT 2 (seco) foram entre aproximadamente 2 e 4 vezes maiores que para o PMT 1 (chuvoso) no Gráfico 5.

Por meio de amostras indeformadas retiradas em poço de inspeção (locação apresentada na Figura 4), determinou-se um valor médio de $15,5 \text{ kN m}^3$ para o peso específico natural do solo e, adotando para K_0 os valores de 0,4, 0,5 e 0,6, foi possível estimar curvas teóricas da tensão horizontal (σ_h) pela profundidade, dada pelas retas (de cor preta) no Gráfico 6. Isso possibilitou uma comparação entre os resultados de campo e as estimativas teóricas de K_0 .

O comportamento de σ_h com a profundidade, obtido das curvas pressiométricas, segundo Briaud (1992), para a sondagem PMT 1 (chuvoso) e para a sondagem PMT 2 (seco) foram diferentes entre elas, mas notou-se que a faixa entre os valores das duas praticamente conteve a curva teórica para K_0 igual 0,5. Os valores de σ_h encontrados para PMT 2 (seco) foram superiores aos encontrados para o PMT 1 (chuvoso), demonstrando, novamente, a influência do teor de umidade e da sucção nos parâmetros obtidos por meio de ensaios pressiométricos. Vale ressaltar que não se esperava que o comportamento de σ_h apresentasse o mesmo comportamento que as retas teóricas, pois sabe-se que o solo superficial, até a profundidade de 2,5 m, no caso analisado, sofre intensos processos de ressecamento que ocasionam um efeito de pré-adensamento na superfície, impedindo que a σ_h se aproxime de zero na superfície e fazendo com que o comportamento ideal para representar esse tipo de solo seja uma reta vertical (provavelmente até a profundidade de 2,5 m) seguida de uma reta com K_0 constante, conforme apresentado por Lambe e Whitman (1969).

Os Gráficos 7 e 8 mostram os resultados obtidos para os principais parâmetros de interesse nos ensaios pressiométricos, o E_M e a p_L . Percebeu-se comportamento similar entre os dados apresentados nos dois gráficos, o que também pode ser notado ao compará-los à p_f do Gráfico 5.

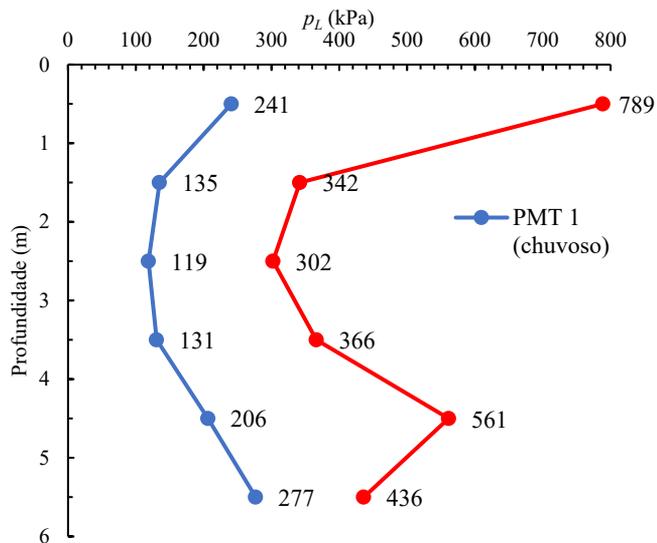


Gráfico 7 –perfil de P_L

Fonte: elaborado pelo autor.

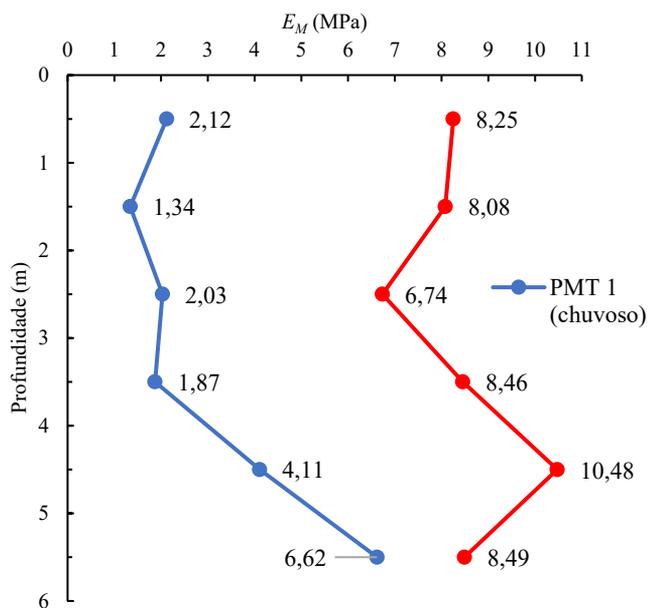


Gráfico 8 –Perfil de E_M

Fonte: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 7, na profundidade de 0,5 m, assim como encontrado para p_f , o valor de p_L obtido para o PMT 2 (seco) é mais do que 3 vezes maior que o obtido para o PMT 1 (chuvoso). De 1,5 até 4,5 m de profundidade, os valores de p_L do PMT 2 (seco) estão aproximadamente entre 2 e 3 vezes maiores que os de PMT 1 (chuvoso). Uma tendência de aproximação entre os valores de p_L só é verificada nos ensaios realizados na profundidade de 5,5 m, que possuíam praticamente a mesma umidade independentemente da estação.

No Gráfico 8, os valores de E_M encontrados para o PMT 2 (seco) estão entre aproximadamente 3 e 4 vezes maiores do que os valores encontrados para o PMT 1 (chuvoso) até a profundidade de 4,5 m, indicando que as condições pluviométricas que ocasionaram diferenças de umidade e de sucção entre os dois ensaios influenciam na deformabilidade do solo. Em relação à profundidade de 5,5 m, visualiza-se uma aproximação entre os valores de E_M encontrados, assim como no Gráfico 7 para p_L , indicando que, nessa profundidade, a pluviometria não influenciou tanto no comportamento mecânico do solo estudado, o que é comprovado pelos valores praticamente iguais de umidade e de sucção apresentados nos Gráficos 2 e 3.

Vale ressaltar que, para a profundidade de 4,5 m, o furo PMT 2 (seco) apresentou um solo com maior presença de pedregulho (fragmentos de quartzo), o que pode ter influenciado os resultados apresentados para essa profundidade, como, por exemplo, a redução do teor de umidade (w), o aumento da sucção total (ψ) e os aumentos de p_L e E_M nessa profundidade.

Conclusões

Neste trabalho, a pluviometria, observada de forma indireta pelo teor de umidade natural *in situ*, presente no solo no momento do ensaio pressiométrico, e pela sucção total influenciou o comportamento mecânico do solo tanto em termos de tensão quanto de deformação. Dentre as principais observações verificou-se:

- uma tendência de redução da diferença entre os valores de teor de umidade e de sucção dos períodos seco e chuvoso com o

aumento da profundidade. Para a profundidade de 5,5 m, os teores de umidade e as sucções encontradas para os diferentes períodos convergiram para valores semelhantes, indicando que essa profundidade é um ponto de término da influência da pluviometria (faixa ativa de sucção) no comportamento mecânico do perfil de solo estudado;

- que os valores de módulo Ménard (E_M) e pressão limite (p_L) determinados para o período seco superaram os obtidos para o período chuvoso na ordem de 3 a 4 vezes para E_M e de 2 a 3 vezes para p_L , notando-se ainda um decréscimo da variação com a profundidade para os 2 parâmetros até 5,5 m do perfil estudado;
- que os resultados do ensaio pressiométrico de Ménard se mostraram sensíveis às variações de umidade e de sucção no perfil do solo, demonstrando o potencial do equipamento para investigação geotécnica de solos tropicais não saturados no que tange ao comportamento tensão-deformação;
- que o equipamento WP4C foi eficiente e rápido para determinação da sucção total *in situ* do perfil a partir das amostras deformadas de solo retiradas dos pré-furos;
- a importância de considerar a influência da pluviometria no resultado dos ensaios de campo em solo tropical para a realização de projetos e de obras geotécnicas, realizando assim a investigação geotécnica, sempre que possível, em duas diferentes estações climáticas (seca e chuvosa) e determinando perfis de umidade e de sucção.

Referências

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

AFNOR (Association Française de Normalisation). NF P 94-110-1: Sols: reconnaissance et essais. Essai pressiométrique Ménard. Partie 1: essai sans cycle. Paris, 2000.

ANGELIM, R. R.; CUNHA, R. P.; SALES, M. M. Determining the elastic deformation modulus from a compacted earth embankment via laboratory and Ménard Pressuremeter Tests. *Soil and Rocks*, São Paulo, v. 39, n. 03, p. 285-300, 2016.

ANGELIM, R. R. Desempenho de ensaios pressiométricos em aterros compactados de barragens de terra na estimativa de parâmetros geotécnicos. 2011. 291 f. Tese de doutorado – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

ASTM (American Society for Testing and Materials). D4719: Standard test method for pre-bored pressuremeter testing in soils. Philadelphia, 2000.

ASTM (American Society for Testing and Materials). D6836: Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge. Philadelphia, 2004.

BAGUELIN, F. J.; JÉZÉQUEL, J.; SHIELDS, D. H. The pressuremeter and foundation engineering. Clausthal: Trans Tech Publications S.A, 1978.

BRANDT, J.R.T. Utilização de um novo pressiômetro para determinação do comportamento elástico de solos residuais e gnáissicos jovens e de estratos do terciário paulista. 1978. Dissertação de Mestrado, departamento de Engenharia Civil, PUC, Rio de Janeiro, 1978.

BRIAUD, J. L. The pressuremeter. Rotterdam: Balkema Publ., 1992.

CUNHA, R.P. Interpretation of Selfboring Pressumeter Tests in Sand. 1994. 279 f. Ph.D.Thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Canada, 1994.

CUNHA, R.P. A New Cavity Expansion Model to Simulate Sefboring Pressuremeter Tests in Sand. *Solos e Rochas*, v. 19 n.1 p. 15-27, 1996.

CUNHA, R.P., COSTA, A.F. & PASTORE, E.L. Ensaio Pressiométrico em Ardósia Alterada para o Estudo do Prolongamento do Metrô em Brasília-DF. Solos e Rochas, ABMS/ABGE, v. 23 n. 1 p. 57-67, 2000.

DIEMER, F. Caracterização da resistência de um solo tropical a partir do ensaio de penetração dinâmica de cone com energia variável (panda). 2014. 223 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

GAMBIN, M. Reasons for the Success of Ménard Pressuremeter, In: 4TH INT. SYM. ON PRESSUREMETERS, 1995, Sherbrooke, Anais... Sherbrooke Canada, 1995.

ISO (International Organization for Standardization). ISO/DIS 22476: Geotechnical Investigation and Testing: Field Testing - part 4: Ménard Pressuremeter Test, 2009.

KRATZ de OLIVEIRA, L. A.; SCHNAID, F; GEHLING, W. Y. Y. Uso de ensaios pressiométricos na previsão do potencial de colapso de solos. Solos e Rochas, ABMS, v.22, n. 3, p.143-165, 1999.

KÜHN, V. O. Resistência ao Cisalhamento de Um Solo Tropical Não Saturado. 2014. 279 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. Soil Mechanics. New York: J. Wile, 1969.

MACHADO, R. R. Ensaios pressiométricos para estimativa de parâmetros de resistência e deformabilidade em um perfil de solo tropical. 2020. 203 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.

MACHADO, R. R.; NASCIMENTO, B. B.; RODRIGUES, J. L. M.; ANGELIM, R. R.; SALES, M. M.; LIMA Jr, J. C.; MERIGHI, V. A.; FONSECA, A. L. E. Medição de energia em ensaio SPT realizado no campo experimental da EECA/UFG. In: XIX COBRAMSEG. 2018, Salvador. Anais... São Paulo, ABMS, 2018.

MÁNTARAS, F. M. Análise numérica do ensaio pressiométrico aplicado à previsão do comportamento de fundações superficiais em solos não saturados. 1995. 150 f. Dissertação (Mestrado) - PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 1995.

MÁNTARAS, F. M. Expansão de cavidade cilíndrica em solos de natureza coesiva-friccionante. 2000. 185f. Teses (Doutorado) - PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2000.

MÉNARD, L. Rules for the use of pressuremeter techniques and processing the results obtained for the calculation of foundations. Paris: Centre d'etudes geotechniques Louis Menard, 1967.

MOTA, N. M. B. Ensaios avançados de campo na argila porosa de Brasília: interpretação e aplicação em projetos de fundação. 2003. 335 f. Tese (Doutorado) – UnB, Brasília, 2003.

NASCIMENTO, B. B. Provas de carga em estacas tubulares de ponta aberta em um solo tropical. 2019. 159 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

NOGAMI, J. S.; VILLBOR, D. F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo: Ed. Villibor, 1995.

ORTIGÃO, J.A.R; CUNHA, R.P; ALVES, L.S. In Situ Test in Brasília Porous Clay. Canadian Geotechnical Journal, v. 33 n.1 p. 189-198, 1996.

RODRIGUES, J. L. M.; NASCIMENTO, B. B.; MIRANDA, A. F. G. C. M.; CUNHA; L. M; MACHADO, R. R; ALVES, T. C.; ANGELIM, R. R. Ensaios com penetrômetro leve – PANDA 2 – em campo experimental da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da UFG. In: XIX COBRAMSEG. Salvador, 2018, Salvador. Anais... São Paulo, ABMS, 2018.

SCHNAID, F.; CONSOLI, N. C.; MÁNTARAS, F. M. O uso do ensaio pressiométrico na determinação de parâmetros de solos não saturados. Solos e Rochas. V. 18, n. 3, p. 129-137, 1996.

SCHNAID, F.; MÁNTARAS, F. M. Cavity expansion in cemented materials: structure degradation effects. Géotechnique, v. 53, n. 9, p. 797-807, 2003

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. Ensaios de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SCHNAID, F.; ROCHA FILHO, P. Experiência de aplicação do ensaio pressiométrico em solos estruturados parcialmente saturados. In: CONGR. BRASILEIRO MEC. SOLOS ENG. FUND., 10., Foz do Iguaçu. Anais... Rio de Janeiro: ABMS, 1994. p. 475-482.

VECCHI, P.P.L.; CUNHA R.P.; PEREIRA, J.H.F.; SCHNAID, F.; & KRATZ DE OLIVEIRA, L.A. Aplicação do ensaio pressiométrico tipo ménard na previsão de parâmetros geotécnicos da argila porosa de Brasília. In: SEFE IV e BIC – Seminário brasileiro de investigação de campo, 4., 2000, São Paulo. Anais... São Paulo, ABMS, 2000. p. 312-325.

VÉSIC, A. S. Expansion of cavities in infinite soil mass. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, v. 98, n. SM3, p. 265-290, 1972.