

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

Retroanálise de ensaios pressiométricos tipo Ménard por meio de método analítico de expansão de cavidade

Jessica Buzolo Câmara

Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás (UFG) - Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Goiânia, Brasil, E-mail: jessicacamara@discente.ufg.br

Renato Resende Angelim

Professor Dr. da Universidade Federal de Goiás, Universidade Federal de Goiás (UFG) - Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPGGECON), Goiânia, Brasil, E-mail: angelim@ufg.br.

José Carlos Frazão Merabet Júnior

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPGGECON), Universidade Federal de Goiás (UFG), E-mail: jose_merabet@discente.ufg.br.

RESUMO: Reconhecido como ferramenta útil na determinação do comportamento tensão-deformação de solos *in situ*, o ensaio com Pressiômetro Ménard, quando aliado à interpretações analíticas baseadas em modelos constitutivos de solos coesivos-friccionais não saturados (comuns em regiões tropicais), possui ótimo potencial na determinação de parâmetros geomecânicos que são imprescindíveis na realização de qualquer projeto geotécnico. Neste trabalho, buscou-se estudar a adequabilidade da ferramenta analítica, que utiliza a Teoria de Expansão de Cavidade Cilíndrica, na previsão de parâmetros geomecânicos do solo a partir de resultados de ensaios pressiométricos Ménard. Utilizou-se da metodologia analítica proposta por Yu & Houlsby (1991) na interpretação de ensaios pressiométricos realizados por Machado (2020), em perfil de solo tropical, no campo experimental da EECA/UFG na cidade de Goiânia. Essa solução, por sua vez, baseia-se em formulações matemáticas para obtenção da curva pressão-expansão, implementada em planilha do Microsoft Excel®, requerendo seis parâmetros de entrada de resistência e deformabilidade do solo, os quais se resumiram especialmente na estimativa da coesão, do ângulo de atrito e do módulo de deformação. A partir do estudo, observou-se que as curvas se apresentaram bem ajustadas às curvas do ensaio *in situ*, comprovando assim a aplicabilidade da ferramenta analítica apresentada para estudos geotécnicos.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio Pressiométrico, Solução Analítica, Teoria da Expansão de Cavidade, Solos Tropicais, Pressiômetro Ménard.

ABSTRACT: Recognized as a useful tool in determining the stress-strain behavior of soils *in situ*, the Ménard pressuremeter test, when combined with analytical interpretations based on constitutive models of unsaturated cohesive-frictional soils (common in tropical regions), has great potential in determining geomechanical parameters that are essential in the realization of any geotechnical project. In this work, searched to study the suitability of the analytical tool, which uses the Cylindrical Cavity Expansion Theory, in predicting soil geomechanical parameters from the results of Ménard pressuremeter tests. The analytical methodology proposed by Yu & Houlsby (1991) was used in the interpretation of pressuremeter tests performed by Machado (2020), in a tropical soil profile, in the experimental field of EECA/UFG in the city of Goiânia. This solution, in turn, is based on mathematical formulations for obtaining the expansion pressure curve, implemented in a Microsoft Excel® spreadsheet, requiring six input parameters of strength and deformability of the soil, which were summarized especially in the estimation of cohesion, friction angle and modulus of deformation. From the study, it was observed that the curves presented a good fit to the *in situ* test curves, thus proving the applicability of the analytical tool presented for geotechnical studies.

KEYWORDS: Pressiometric Test, Analytical Solution, Cavity Expansion Theory, Tropical Soils, Ménard Pressuremeter



1 Introdução

O projeto geotécnico é o fruto de um conjunto de análises, interpretações e conclusões sobre as investigações realizadas *in situ* e em laboratório. No entanto, devido ao cronograma sempre rigoroso das obras e pela busca em reduzir custos, os ensaios geotécnicos, geralmente são restritos aos métodos mais convencionais, mas que nem sempre são capazes de fornecer todos os parâmetros necessários a uma análise mais precisa e acurada das características do solo. Em virtude disso, as interpretações analíticas de ensaios pressiométricos *in situ* podem auxiliar na determinação de parâmetros de resistência e deformabilidade do solo.

Entretanto, de acordo com Schnaid; Lehane e Fahey, (2004), ressalta-se a dificuldade da aplicabilidade de ensaios de campo no estudo de solos tropicais, sendo necessário avaliar as abordagens teóricas desenvolvidas para solos sedimentares, com o objetivo de demonstrar a viabilidade de métodos de interpretação para obras de engenharia.

Dentre os ensaios *in situ* que se utilizam de soluções analíticas, destaca-se o ensaio com Pressiômetro Ménard (Ménard PressureMeter - MPM) associado a Teoria de Expansão da Cavidade, que baseia-se em formulações matemáticas que analisam a variação das tensões e deslocamentos produzidos pela expansão de uma cavidade cilíndrica no interior de um maciço de solo. Este, por sua vez, pode ser representado como um meio linearmente elástico ou perfeitamente plástico, o que gera inúmeras hipóteses simplificadoras para obtenção da solução matemática do problema.

Este trabalho se deterá na solução analítica proposta por Yu e Houlsby (1991), em que o solo é modelado como um material elástico-plástico dilatante e por isso, obedece à lei de Hooke até o início da ruptura, que é determinado pelo critério de Mohr Coulomb. Ou seja, parte-se da teoria de pequenas deformações na fase elástica e por fim, tem-se um procedimento bastante simples para construção da relação pressão-expansão, que é derivada de uma expansão de uma série infinita.

Assim, partindo-se de resultados de ensaios pressiométricos Ménard (de inserção em pré-furo), realizados em perfil de solo da cidade de Goiânia, por meio das formulações matemáticas que requeriam seis parâmetros de entrada, são eles: módulo pressiométrico (E), tensão horizontal *in situ* (σ_{ho}), coeficiente de Poisson (ν), coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e de dilatância (Ψ). Assim foi possível realizar a interpretação direta em termos de propriedades geomecânicas do solo.

2 Metodologia

2.1 Ensaios pressiométricos realizados no campo experimental da EECA

O pressiômetro Ménard utilizado por Machado (2020) para a realização das sondagens PMT no campo experimental da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) está apresentado na Figura 1. O aparelho possui uma tubulação geminada (gás-água) de 25 m de comprimento que liga a sonda à unidade de controle de pressão e volume (CPV), uma fonte de pressão de gás nitrogênio comprimido de 1 m³ e uma sonda tipo G (células encaixadas), que tem codificação BX, diâmetro de 60 mm (ANGELIM, 2011) e foi montada com membrana de borracha de 3 mm de espessura, a qual é destinada para baixas pressões tida como mais adequada para o solo do perfil. O equipamento foi fabricado pela empresa francesa APAGEO e adquirido via projeto de pesquisa de FURNAS Centrais Elétricas S.A. com a participação da Universidade Federal de Goiás (UFG).

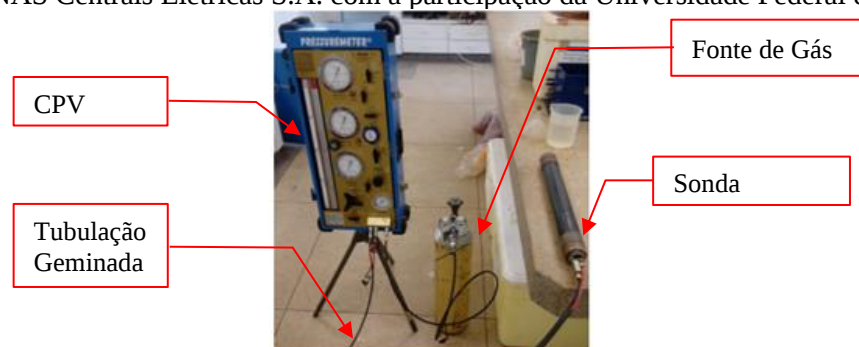


Figura 2. Vista geral do equipamento utilizado (adaptado de Machado, 2020).



Giacheti (2001) afirma que a técnica com pré-furo, requerida pelo pressiómetro Ménard, utilizada nesta pesquisa, é uma opção viável para realização do ensaio em solos não saturados, apesar de suas limitações, uma vez que o uso do fluido de lavagem ou o ar comprimido, utilizado nos outros tipos de ensaios pressiométricos com equipamentos auto perfurantes, produzem mudanças na poropressão de água ou na poropressão de ar, o que afeta a sucção do solo *in situ* ao redor da sonda pressiométrica. Cabe salientar que todos os pré-furos de sondagens abertos na campanha de Machado (2020) e utilizados neste estudo foram abertos na região não-saturada do perfil e unicamente com uso de trado, sem a necessidade de lavagem durante a escavação.

O campo experimental da EECA/UFG, onde foram realizadas as sondagens, localiza-se nas coordenadas geográficas de 16°40'41" S e 49°14'31" W. A classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) do solo foi realizada por Nascimento (2019) que observou a predominância do solo laterítico arenoso, com um alto teor de agregação das partículas e com a presença de pedregulhos (veios de quartzo) à 4,5 m de profundidade e que a partir dos 7 m de profundidade, inicia o horizonte saprolítico com solo não-laterítico. Nos ensaios SPT, realizados até a profundidade de 10,45 metros não foi encontrado o nível d'água.

Seguindo as normas norte-americana D-4719 (ASTM, 2000), a francesa NF P 94-110-1 (AFNOR, 2000) e a europeia EN 22476-4 (ISO, 2009) foram realizados por Machado (2020) 42 ensaios pressiométricos, distribuídos em 7 furos de sondagens e um poço de inspeção até 6 m de profundidade para retirada de amostras indeformadas para realização de ensaios triaxiais e determinação da Curva Característica Solo-Água (CCSA), além da coleta de amostras deformadas para determinação do teor de umidade.

Os ensaios pressiométricos foram realizados, sendo 3 pré-furos de sondagem na estação seca e 4 pré-furos na estação chuvosa do regime pluviométrico local, sendo um ensaio à cada camada de 1 metro de profundidade até 6 metros do perfil. Na Figura 3 está apresentado a locação dos furos das sondagens pressiométricas e do poço de inspeção. Cabe salientar que neste estudo são abordados exclusivamente os ensaios realizados no furo PMT4 (estação seca) e os demais serão publicados oportunamente no futuro

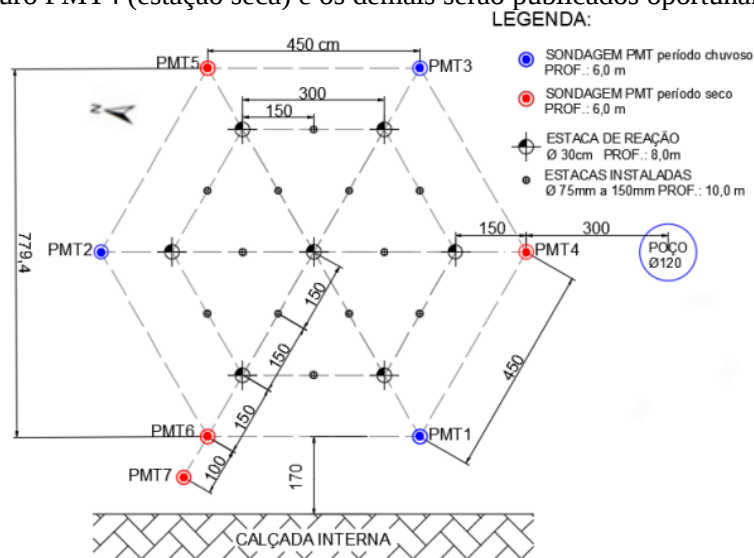


Figura 3. Locação dos furos de sondagem pressiométricas e do poço de inspeção (Machado, 2020).

De posse das curvas pressiométricas corrigidas realizados no furo de sondagem PMT4 (estação seca) construídas por Machado (2020) e de todo conjunto de dados decorrentes destas curvas, dentre eles o módulo Ménard (E_M) e a pressão limite (p_l), foi possível construir as curvas teóricas de ajuste de pressão x volume da cavidade e por meio do processo analítico formulado por Yu e Housbly (1991), utilizando o Microsoft Excel® como ferramenta.

2.2 Método analítico proposto por Yu e Houlsby (1991)

Considerou-se uma cavidade cilíndrica de comprimento infinito localizada em forma vertical dentro de uma massa de solo infinita, homogênea e isotrópica. Inicialmente, no interior da cavidade cilíndrica de raio " r_0 " existe uma pressão " p_0 ". Um incremento de pressão " Δp " aumenta a pressão na cavidade de " p_0 " a " p ",



onde “ $p = p_0 + \Delta p$ ”, causando uma expansão na cavidade de forma tal que uma partícula localizada inicialmente a uma distância “ r_0 ” do eixo da cavidade se deslocará na direção radial a uma distância “ r ”, ou seja, “ $r = r_0 + \Delta r$ ”, onde “ Δr ” é o deslocamento produzido pela partícula (BOSCH, 1996).

Yu e Houlsby (1991) apresentam uma solução explícita para representar a relação pressão-expansão, sem restrições quanto à magnitude das deformações, mediante a integração das equações constitutivas utilizando a solução de uma série matemática. Em consequência a pressão limite, quando o raio da cavidade aumenta indefinidamente, pode ser obtida analiticamente também pela solução de uma série infinita.

A seguir são apresentados conceitos essenciais para o entendimento das formulações que são utilizados na interpretação dos ensaios pressiométricos executados nesta pesquisa (Carter et al., 1986; Yu e Houlsby, 1991). As hipóteses adotadas pela formulação analítica de Yu e Houlsby são descritas na Figura 4:

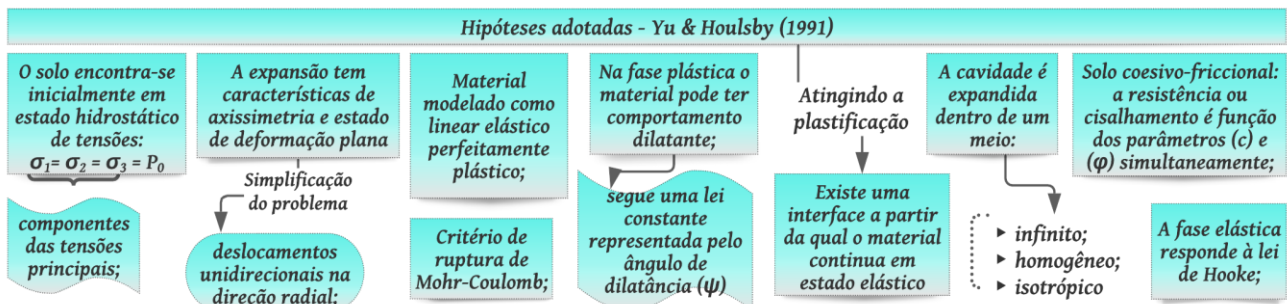


Figura 4. Hipóteses da fórmulação analítica proposta por Yu e Houlsby (1991).

Os referidos autores dividiram a abordagem em uma análise elástica e outra elasto plástica. Mediante a análise puramente elástica são obtidas relações tensão deformação para o estado inicial, em que os incrementos de pressões não produzem deformações plásticas no solo. Quando as pressões continuam aumentando, o solo da parede da cavidade começa a plastificar, formando-se uma zona plástica entre a parede da cavidade e a interface elasto plástica, a partir da qual o solo continua em estado elástico. Neste caso as tensões e deformações produzidas nas duas zonas (elástica e plástica) são consideradas de forma separadas. As deformações totais são dadas pela soma das componentes elásticas e plásticas.

As variáveis envolvidas na formulação analítica proposta por Yu e Houlsby (1991) são: p : pressão limite do ensaio; G : módulo de cisalhamento; c : coesão; p_0 : tensão *in situ*; ϕ : ângulo de atrito; ψ : ângulo de dilatação; e v : coeficiente de Poisson.

A expressão geral que descreve o comportamento pressão-expansão juntamente com as equações complementares é apresentada na Figura 5:

$$R = \frac{(1+\alpha) \cdot [Y + (\alpha-1)p]}{2\alpha \cdot [Y + (\alpha-1)p_0]}$$

$$Y = \frac{2c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad \alpha = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

$$\delta = \frac{Y + (\alpha-1) \cdot p_0}{2 \cdot (1+\alpha) \cdot G} \quad \beta = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad \gamma = \frac{\alpha \cdot (\beta+1)}{\beta \cdot (\alpha-1)}$$

$$\frac{a}{a_0} = \left\{ \frac{R^{-\gamma}}{(1-\delta)^{(\beta+1)/\beta} - (\gamma/\eta) \Lambda_1(R, \xi)} \right\}^{\beta/(\beta+1)}$$

$$\eta = \exp \left\{ \frac{(\beta+1) \cdot (1-2v) \cdot [Y + (\alpha-1)p_0] \cdot [1+v]}{E \cdot (\alpha-1) \cdot \beta} \right\}$$

a : raio da cavidade durante o carregamento;
 a_0 : raio durante o estado inicial de carregamento
 R : Raio de pressão da cavidade;
 Λ_1 : série de potencia infinita;
 Y : equação da coesão e ângulo de atrito;
 α : equação do ângulo de atrito;
 δ, γ, ξ e η : equação das propriedades do material;
 β : equação do ângulo de dilatação;

Figura 5. Formulações matemáticas da interpretação analítica de Yu e Houlsby (1991).

Os parâmetros de entrada podem ser obtidos em laboratório ou *in situ*, assumindo que podem ser utilizados em problemas de deformações plana. Segundo Carter e Yeung (1985) este procedimento não é totalmente rigoroso, porém os valores assim obtidos fornecem uma estimativa aceitável do comportamento do material submetido a expansão de cavidade.

De posse dos resultados obtidos pelo ensaio pressiométrico, utilizou-se da formulação de Yu e Houlsby (1991) implementada na ferramenta do software Microsoft Excel®. Após a inserção dos dados obtidos nos ensaios foi possível obter as curvas experimentais (dos ensaios) e em seguida, com base nas anteriores por



meio do método analítico, foi possível construir as curvas estimadas (dos ajustes). Assim foi possível comparar os resultados encontrados para o solo deste estudo.

Para realizar a simulação teórica da curva pressão-expansão proposta por Yu e Houlsby (1991) são necessários os seguintes parâmetros: módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), intercepto coesivo (c), ângulo de atrito interno (ϕ), ângulo de dilatação (ψ) e a tensão horizontal *in situ*. (σ_{h0}).

2.2.1 Módulo de Elasticidade (E)

O módulo de Elasticidade utilizado como ponto de partida para a simulação da curva teórica (de ajuste) foi o módulo Ménard determinado nos ensaios pressiométricos de Machado (2020) por meio da metodologia da norma francesa NF P 94-110 1 (AFNOR, 2000). Assim, ao realizar o ajuste de curvas a partir dos módulos obtidos diretamente dos ensaios *in situ*, aumenta-se a probabilidade de estimativas de valores de entrada mais coerentes.

2.2.2 Coeficiente de Poisson (ν)

Para o coeficiente de Poisson do solo, cuja faixa varia entre 0,1 a 0,5, foi adotado o valor de 0,3, bastante utilizado por vários autores em estudos com soluções analíticas, como em Ortigão (1994). Mesmo que seja um resultado estimado, um estudo paramétrico feito por Bosch (1996) relatou a sua pouca influência na curva pressão-expansão quando utilizado na solução de Yu e Houlsby (1991).

2.2.3 Ângulo de Dilatação (ψ)

O ângulo de dilatação foi considerado nulo pois, com base na análise de resultados de ensaios triaxiais adensados drenados não saturados obtidos por Kühn (2014), que estudou um solo laterítico do estado de Goiás e percebeu que a tendência para dilatação se manifestou mais explicitamente em ensaios realizados com altas sucções. Além disso, considerar o ângulo de dilatação igual a zero é em análises usual de acordo com as experiências relatadas por Ortigão (1994), Mántaras (1995) e Bosch (1996), que também estudaram solos tropicais. Nos estudos apresentados por esses autores essa suposição é sustentada pela não ocorrência da resistência de pico na realização de ensaios de cisalhamento direto.

2.2.4 Tensão horizontal inicial (σ_{h0})

Segundo Bosch (1996), pela interpretação do ensaio pressiométrico, a magnitude da pressão aplicada às paredes do furo inicialmente (P_0) é considerada numericamente igual à tensão horizontal em repouso *in situ* (σ_{h0}).

Assim, este parâmetro foi estimado por meio da relação entre o coeficiente de empuxo em repouso (K_0) e a tensão vertical (σ_v), sendo que para determinação do K_0 utilizou-se a expressão simplificada de Jaki (1944) (Eq. 1), utilizada no caso de solos sedimentares normalmente adensados. No caso de solos residuais e solos que sofreram transformações pedológicas posteriores, o valor de K_0 é muito difícil de ser obtido pois apresentam tensões horizontais que dependem das tensões internas da rocha ou do processo de evolução sofrido. Mesmo assim, essa condição foi adotada como dado de entrada inicial por ser dependente do ângulo de atrito e não requerer a estimativa de um parâmetro adicional independente.

$$K_0 = (1 - \sin \phi') \quad (1)$$

Em seguida, calculou-se a tensão vertical total, que no caso do perfil é igual a efetiva pela ausência do freático, para a profundidade em questão a partir da expressão (Eq. 2):

$$\sigma_v = \gamma_{nat} \cdot z \quad (2)$$

onde:

γ_{nat} : peso específico natural do solo (kN/m³) e z: profundidade (m).

Com isso, obteve-se o valor de tensão horizontal efetiva, que no caso do perfil é igual a total pela ausência do freático a partir da expressão (Eq. 3):

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad (3)$$

Para simular a curva teórica (de ajuste), deve-se partir de um volume inicial, esse, por sua vez, é obtido na curva experimental (do ensaio), sendo o volume correspondente ao ponto de pressão horizontal (P_0) escolhida no ajuste proposto, conforme demonstrado na Figura 6. A razão de expansão, então, é convertida em deformação volumétrica pela fórmula apresentada na Figura 5. Esse procedimento foi feito baseado na metodologia utilizada por Bosch (1996).

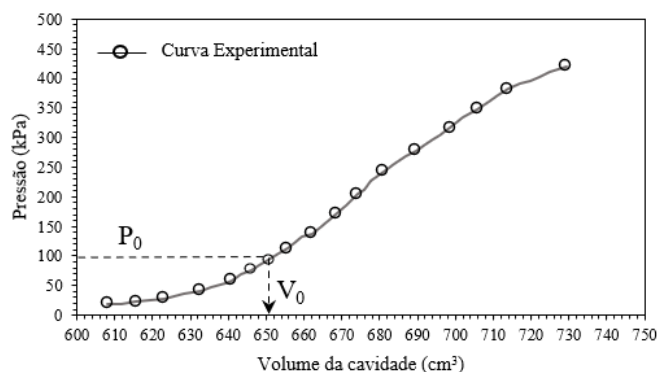


Figura 6. Obtenção do ponto de referência (P_0 , V_0) – (adaptado de BOSCH,1996).

2.2.5 Intercepto Coesivo (c) e Ângulo de atrito (ϕ)

Os valores de coesão e o ângulo de atrito interno para o ajuste da curva teórica foram arbitrados e seus valores orbitaram inicialmente dentro de intervalos típicos de parâmetros característicos de solos tropicais locais e regionais e de acordo com resultados anteriores dos parâmetros obtidos do campo experimental deste estudo.

Com os parâmetros selecionados, a curva pressão-expansão teórica foi plotada no mesmo gráfico que a curva experimental, onde verificou-se a aproximação entre a curva teórica e a curva experimental. Dessa forma, o intercepto coesivo e o ângulo de atrito interno foram estimados até que a curva teórica estivesse com o aspecto o mais similar possível ao da curva experimental. A Figura 7 abaixo ilustra o resumo do processo de análise.

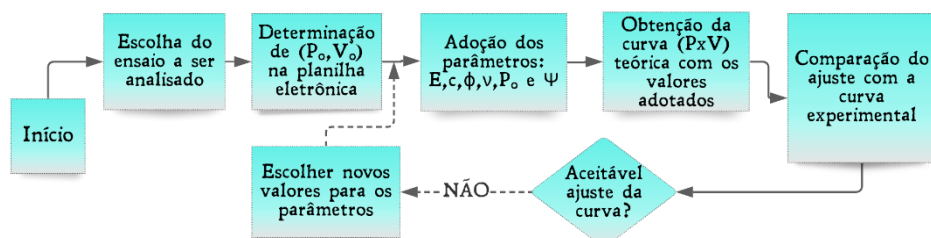


Figura 7. Esquema resumido do processo de análise.

2.3 Análise do coeficiente de empuxo em repouso (K_0)

Como a camada superficial do perfil (primeiro metro) passa por processo contínuo de variação de umidade e temperatura, o solo sofre uma espécie de pré-adensamento aumentando inclusive sua resistência conforme estudo mostrado por Salager et al., (2008) e por isso é comum apresentar um valor atípico mais elevado para o coeficiente de empuxo em repouso (K_0), que reflete na tensão horizontal *in situ*. Em vista disso, realizou-se uma análise separada do coeficiente de empuxo em repouso para essa primeira camada na busca de ajuste mais coerente à curva pressiométrica corrigida do ensaio realizado a 0,5 m de profundidade. Os parâmetros, módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e de



dilatância (Ψ) foram mantidos constantes para as variações estimadas para os valores de K_0 com o intuito de se comparar a evolução do ajuste das curvas.

3 Resultados e Discussão

3.1 Análise do coeficiente de empuxo em repouso (K_0) para a camada superficial

Para a camada do primeiro metro de profundidade do campo experimental da EECA realizou-se uma análise para os valores de K_0 , como pode ser observado na Figura 8.

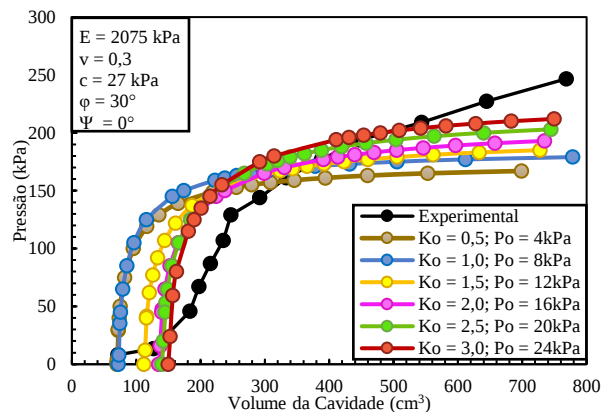


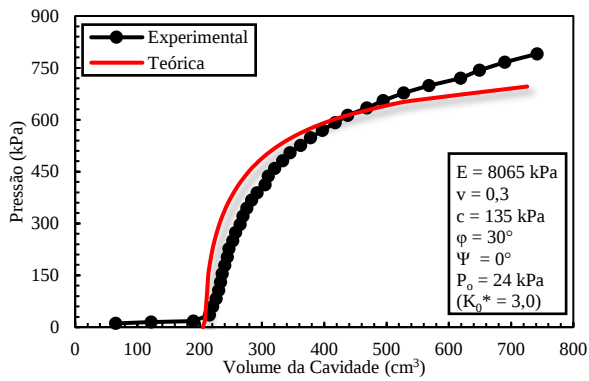
Figura 8. Variação de K_0 na profundidade de 0,5 m: na estação seca.

Após os ajustes realizados, observou-se que o melhor deles foi para K_0 igual a 3,0 para a curva pressiométrica na profundidade de 0,5 m (estação seca) correspondente a pressão inicial (pressão horizontal) de 24 kPa. Tal valor leva a uma estimativa de uma razão elevada de sobre-adensamento (RSA) da ordem de 279 kPa.

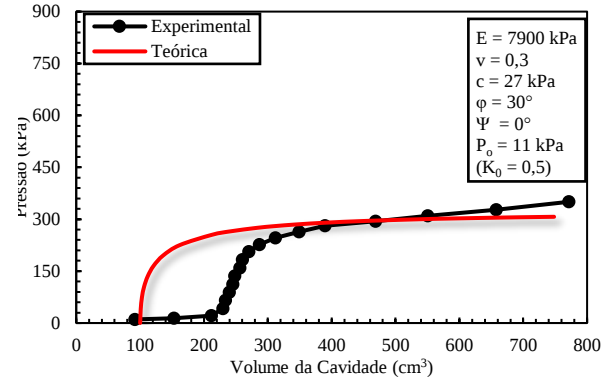
Tendo-se os parâmetros de ajuste para a primeira profundidade de 0,5 m, prosseguiu-se para os ajustes das profundidades seguintes e para isso, manteve-se o mesmo valor de ângulo de atrito de 30° (ver Figura 11) estimado na primeira camada e alterando apenas os parâmetros de módulo e coesão, para um melhor ajuste. Adotou-se como ponto de partida para o módulo o valor do módulo pressiométrico obtido da curva pressiométrica, restando para o ajuste apenas a coesão. Os resultados mostraram-se muito satisfatórios. A Figura 12 apresenta os ajustes de curva (teórica) em relação às curvas *in situ* (experimental).

Observando-se a Figura 9, conclui-se que as curvas apresentaram bom ajuste à curva experimental, contudo, o comportamento da curva no início apresenta-se de difícil ajuste devido ao amolgamento do solo com a abertura do pré-furo, ou seja, as variações de umidade e de resistência podem ser compreendidas por meio do comportamento do gráfico e suas variações influenciaram no comportamento da curva.

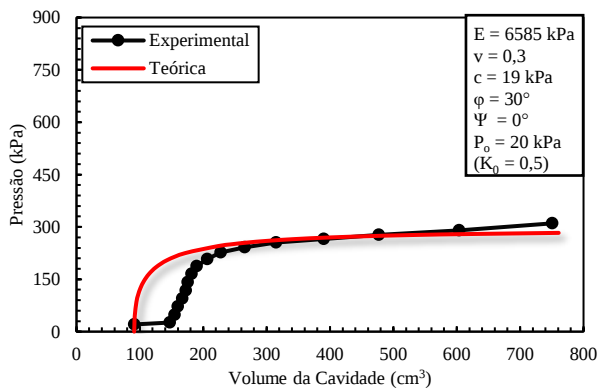
Após a obtenção de todos os ajustes obteve-se as análises para parâmetros como: sucção, coesão total, tensão horizontal inicial, coeficiente de empuxo e ângulo de atrito em relação aos valores obtidos por Machado (2020) pela metodologia de Briaud, (1992), como pode ser observado na Figura 10.



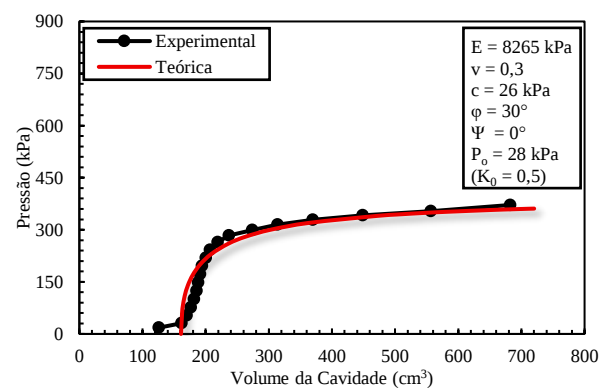
a) Profundidade de 0,5 m



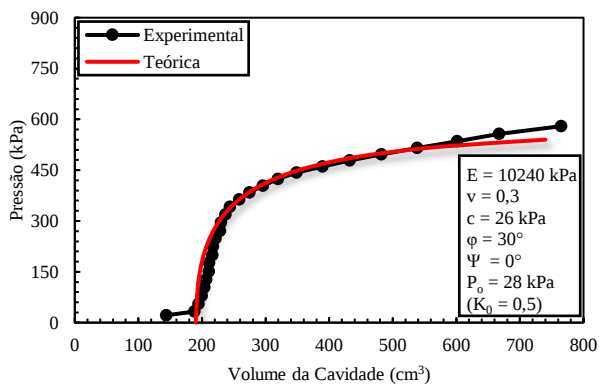
b) Profundidade de 1,5 m



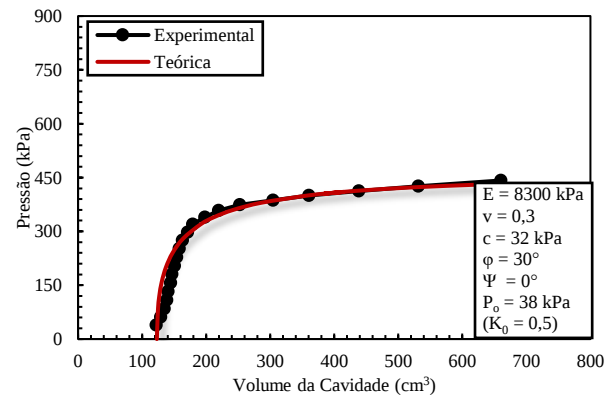
c) Profundidade de 2,5 m



d) Profundidade de 3,5 m



e) Profundidade de 4,5 m



f) Profundidade de 5,5 m

Figura 9. Curvas tensão – deformação na estação seca a diferentes profundidades. a) 0,5m; b) 1,5m; c) 2,5m; d) 3,5m; e) 4,5m; f) 5,5m.

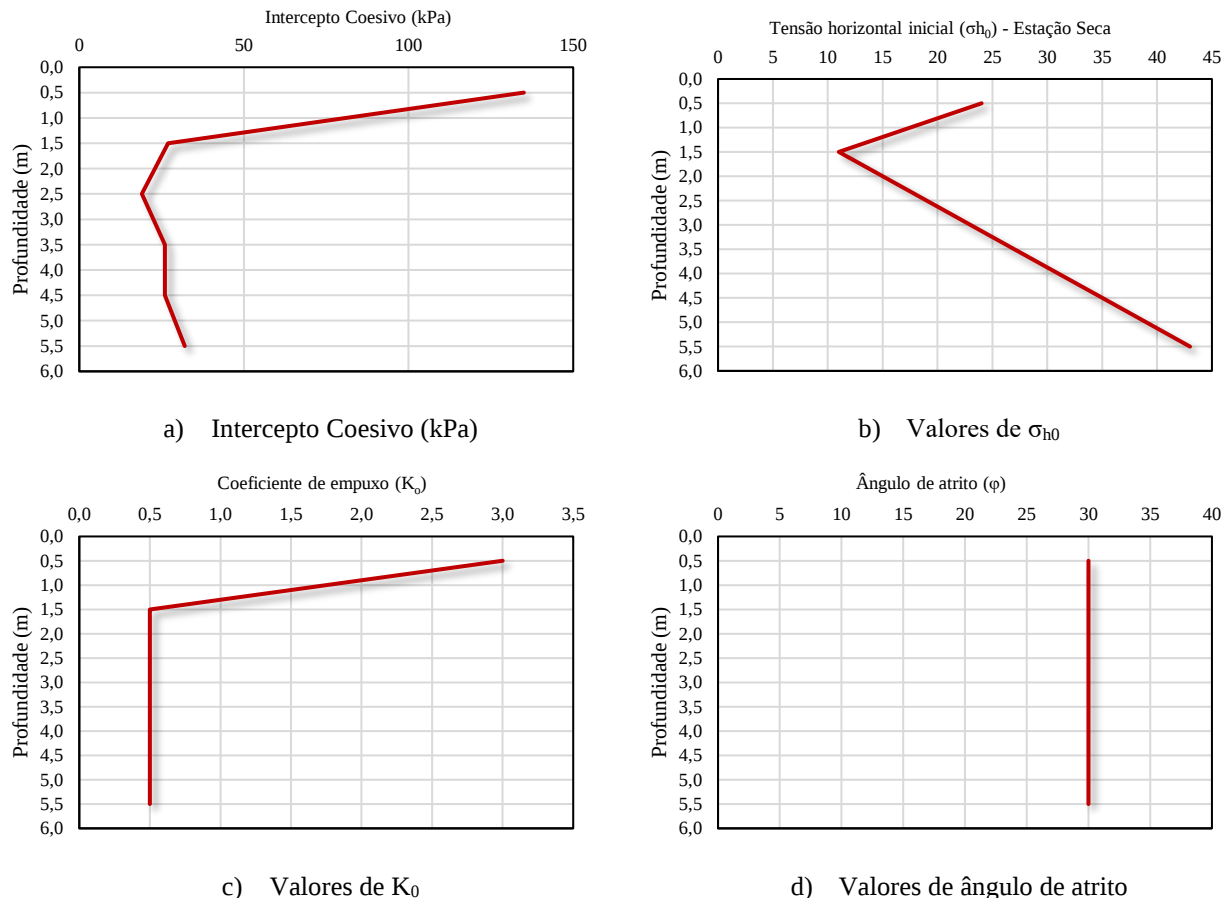


Figura 10. Parâmetros do solo versus profundidade.

Analisando a Figura 10 notou-se que a coesão total, o K_0 , e a tensão horizontal foram maior à 0,5 m de profundidade devido à tensão sucção e também ao pré-adensamento do solo nesta camada superficial que se justifica nos processos cíclicos de retração/expansão volumétrica devido as variações de umidade ambiente ao longo das estações do ano. Entretanto, a partir de 1,5m, conforme esperado, esses parâmetros foram crescentes com a profundidade. O ângulo de atrito adotado de 30° permitiu um excelente ajuste para todas as curvas obtidas e sua variação até 2° não influenciaram muito o ajuste conforme testado durante análises prévias de sensibilidade deste parâmetro.

4 Conclusões

Neste trabalho estudou-se a interpretação dos ensaios pressiométricos por meio da metodologia analítica proposta por Yu e Houlsby (1991). Por fim, obteve-se as curvas experimentais e teóricas ajustadas para o perfil do campo experimental, mostrando a evolução dos valores ao longo da profundidade.

Os resultados mostraram a aproximação coerente do ajuste de curvas mediante a utilização da teoria da expansão da cavidade. Conforme aumentava-se a profundidade, obteve-se melhor qualidade dos ajustes, que pode ser atribuída a uma possível influência da sucção da camada de solo mais próxima à superfície.

A determinação de bons resultados do ajuste de curva com a utilização de uma ferramenta computacional simples e de resultados de ensaios pressiométricos, não dispensam a necessidade da realização de coleta de amostras e de ensaios de laboratório, que podem validar os resultados e/ou retroalimentar e refinar ajustes obtidos.

AGRADECIMENTOS



Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Iniciação Científica que contribuiu para o desenvolvimento do trabalho no programa de iniciação à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing And Materials (2020) - ASTM D4719-20. *Standard test methods for prebored pressuremeter testing in soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Angelim, R. R. (2011) *Desempenho de ensaios pressiométricos em aterros compactados de barragens de terra na estimativa de parâmetros geotécnicos*. Tese de doutorado – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, p. 291.
- Bosch, D. R. (1996) *Interpretação do ensaio pressiométrico em solos coesivos-friccionais através de métodos analíticos*. 150 f. Dissertação (Mestrado) – PPGE/UFRGS, Porto Alegre.
- Briaud, J. L. (1992) *The pressuremeter*. Rotterdam: Balkema. 322 p.
- Carter et al. (1986). *Cavity expansion in cohesive frictional soil*. Geotechnique. v. 36. p. 349-358
- Carter, J. P. & Yeung, S. K. (1985). *Analysis of cylindrical cavity expansion in a strain weakening material*. Comput. Geotech., England. p. 161-180.
- EN 22476-4 (ISO, 2009). *Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 4: Ménard pressuremeter test*. 51 p.
- Giacheti, H. L. (2001). *Os ensaios de campo na investigação do subsolo: Estudo e considerações quanto à aplicação em solos tropicais*. Livre-Docência, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 327 p.
- Jaki, J. (1944). *The coefficient of earth pressure at rest*. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, Budapeste, p. 355-358.
- Kühn, V. O. (2014). *Resistência ao Cisalhamento de Um Solo Tropical Não Saturado..* Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 192f.
- Machado, R. R. (2020). *Ensaos pressiométricos para estimativa de parâmetros de resistência e deformabilidade do solo do Campo Experimental da ECCA/UFG..* Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 203 f.
- Mántaras, F. M. (1995). *Análise numérica do ensaio pressiométrico aplicado à previsão do comportamento de fundações superficiais em solos não saturados*. Dissertação (Mestrado) – PPGE/UFRGS, Porto Alegre, 150 f.
- Norme Française. (1989). *Essai pressiométrique Ménard*. Paris, p 94-110.
- Ortigão, J.A.R. (1994). *Dilatometer Tests in Brasília Porous Clay*. 7th International Geology, IAEG, Lisboa, Portugal, PP. 359-365.
- Schnaid F., Odebrecht E. (2012). *Ensaos de campo e suas aplicações à engenharia de fundações*. 2. ed. São Paulo. Oficina de Textos, p. 148-167.
- Schnaid, F.; Lehane, B. M.; Fahey, M. (2004). *In situ test characterization of unusual geomaterials. Proceedings 2nd Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. Rotterdam: Edited by Viana da Fonseca e Mayne, v. 1, p. 49-74.
- Salager S., François B., Youssoufi M., Laloui L., Saix C. (2008). *Experimental Investigations of Temperature and Suction Effects on Compressibility and Pre-Consolidation Pressure of a Sandy Silt, Soils and Foundations*, V. 48, p. 453-466.
- Yu, H. S.; Houlsby, G. T. (1991). *Finite expansion cavity in dilatant soils: loading analysis*. Géotechnique, v. 41, n. 2, p. 173-183.