

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

# Caracterização Física, Mineralógica e Mecânica do Solo do Campo Experimental I do Centro Tecnológico em Engenharia Civil de Furnas

Jaqueline Rodrigues Ferreira

M.Sc. Eng.<sup>a</sup> Civil, Furnas Centrais Elétricas S.A., Aparecida de Goiânia, Brasil, [jaquerf@furnas.com.br](mailto:jaquerf@furnas.com.br)

Renato Marques Cabral

D.Sc. Eng.<sup>o</sup> Civil, Furnas Centrais Elétricas S.A., Aparecida de Goiânia, Brasil, [renatocg@furnas.com.br](mailto:renatocg@furnas.com.br)

José Camapum de Carvalho

D.Sc. Eng.<sup>o</sup> Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, [camapumdecarvalho@gmail.com](mailto:camapumdecarvalho@gmail.com)

Marlon Silva Schlieuwe

M.Sc. Eng.<sup>o</sup> Civil, Furnas Centrais Elétricas S.A., Aparecida de Goiânia, Brasil, [marlonss@furnas.com.br](mailto:marlonss@furnas.com.br)

**RESUMO:** O Campo Experimental I do Centro Tecnológico em Engenharia Civil de Furnas, localizado na cidade de Aparecida de Goiânia, foi criado com objetivo de avaliar a influência dos esforços dinâmicos em torres eólicas e nos elementos de fundação que as sustentam. Assim, o presente trabalho tem como finalidade a caracterização física e mecânica do solo deste campo. Para tanto, realizou-se ensaios de granulometria, limites de Atterberg, massa específica dos grãos, densidade natural, permeabilidade, adensamento, triaxial adensado drenado natural e saturado, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-x em amostras coletadas entre 1,0 a 7,0 m de profundidade. Os resultados mostraram que as características físicas e mecânicas encontradas estão de acordo com aquelas esperadas para o solo da região em estudo quando analisada sua constituição geológica – trata-se de um silte arenoso, de alta plasticidade e compressibilidade, baixa permeabilidade e rigidez, bem como mineralogia composta por quartzo, mica e caulinita.

**PALAVRAS-CHAVE:** Campo Experimental, Caracterização Geotécnica, Parâmetros de Resistência.

**ABSTRACT:** The Experimental Facility I of the Furnas Civil Engineering Technological Center, located in the city of Aparecida de Goiânia, aims to assess dynamic efforts influence in wind towers and in foundation elements that support these towers. This study focus on the physical and mechanical characterization of the Experimental Facility soil. Grain size distribution, Atterberg limits, specific mass of grains, natural density, permeability, consolidated drained triaxial compression (natural and saturated condition), scanning electron microscope (SEM) and x-ray diffraction tests were performed in samples collected at depths between 1.0 and 7.0 m. The results showed that the physical and mechanical characteristics are in agreement with those expected for the region soil when analyzed its geological constitution - sandy silt with high plasticity and compressibility, low permeability and stiffness, as well as mineralogy composed of quartz, mica and kaolinite.

**KEYWORDS:** Experimental Facility, Geotechnical Characterisation, Parameters of Resistance.

## 1 Introdução

A principal razão para a criação de um campo experimental é a busca por soluções para os mais diversos problemas da engenharia geotécnica – aterros, desempenho de fundações, comportamento de solos moles, solos colapsíveis (Cavalcante *et al.*, 2007). Baseado nisto, criou-se o Campo Experimental I do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas, localizado na cidade de Aparecida de Goiânia e com uma área de aproximadamente 1200 m<sup>2</sup>, na qual estão localizadas duas torres eólicas com 10 e 40 m de altura, duas plataformas de coleta de dados meteorológicos e uma área de estudos de provas de carga. Tal campo foi concebido com o propósito de estudar a influência dos esforços dinâmicos exercidos pelo vento nas torres

eólicas e nas fundações que as suportam. Assim, o presente trabalho tem como objetivo dar continuidade a caracterização físico-mecânica do solo do campo experimental em estudo, buscando a obtenção de parâmetros que, posteriormente, serão utilizados em modelos numéricos.

## 2 Aspectos Geológicos

De acordo com Lacerda Filho *et al.* (1999) a geologia da cidade de Aparecida de Goiânia, onde está localizado o campo experimental, é composta por um grupo de rochas metamórficas, denominado de Grupo Araxá. Tal grupo é identificado pela presença de xistos – rochas repletas de micas – e quartzitos – rochas com bastante quartzo e algumas concentrações de mica. A localidade do campo experimental, em específico, encontra-se em uma área de rochas de micaxisto (Rodrigues *et al.*, 2005). Além disso, a pedologia da região do campo experimental indica latossolo vermelho distrófico, caracterizado por acúmulos de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e alterações dos silicatos, que fazem com que o solo seja mais frágil, consideravelmente permeável e menos plástico (Rodrigues *et al.*, 2005).

Para realizar a caracterização do perfil de solo do campo experimental escavou-se um poço de inspeção e amostragem, em Janeiro de 2019, até a profundidade de 7,5 m; e realizaram-se duas sondagens à percussão do tipo SPT, a primeira, executada em Julho de 2017, atingiu profundidade de 15,27 m e nível d'água em 5,40 m, enquanto a segunda, executada em Novembro de 2019, atingiu profundidade de 15,45 m e nível d'água em 4,44 m. Na Figura 1 são apresentadas as características do perfil baseadas na amostragem obtida nas sondagens.

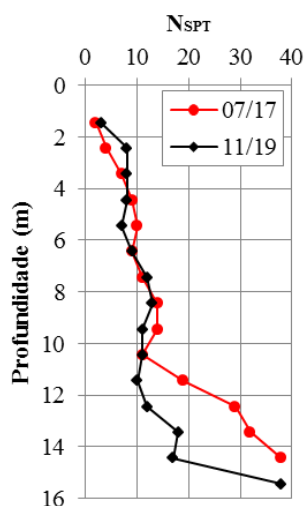


Figura 1. Perfil de sondagem e descrição geológica.

## 3 Caracterização Física e Mineralógica

Conforme as análises granulométricas realizadas, o solo em estudo é classificado como areia argilosa, na camada superficial e como silte arenoso, para as profundidades de 2,0 a 7,0 m. Em tais análises é possível observar a existência de pedregulhos em toda a profundidade, bem como a presença de argila agregada, indicada pelos diferentes resultados das análises com defloculante (CD) e sem defloculante (SD). Já para os limites de Atterberg, classifica-se o solo como silte argiloso de alta plasticidade e compressibilidade, com limite de liquidez ( $w_L$ ), plasticidade ( $w_p$ ) e índice de plasticidade (IP) variando de 51,0 a 59,0%, 28,0 a 39,0% e 19,0 a 27,0%, respectivamente, conforme apresentado na Figura 2.

A Figura 2 ainda apresenta a caracterização física do solo em estudo, realizada em amostras entre 1,0 e 7,2 m de profundidade, nela é possível observar que peso específico natural ( $\gamma_n$ ) e o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) estão entre 17,3 e 17,8 kN/m<sup>3</sup> e 13,5 e 14,5 kN/m<sup>3</sup>, nesta ordem, enquanto o teor de umidade natural ( $w$ ) varia de 20,9 e 28,9% e o peso específico dos grãos está entre 25,8 e 27,0 kN/m<sup>3</sup>. Quanto ao índice de



vazios (e), a porosidade e ao grau de saturação (GS), estes estão entre 0,8 e 1,0; 43,9 e 49,6% e 70,3 e 80,0%, respectivamente (Ferreira *et al.*, 2019). Destaca-se que os pontos de inflexão apresentados nas curvas de peso específico aparente seco, índice de vazios, porosidade e grau de saturação são oriundos do baixo teor de umidade natural (20,9%) encontrado na profundidade de 3,6 m.

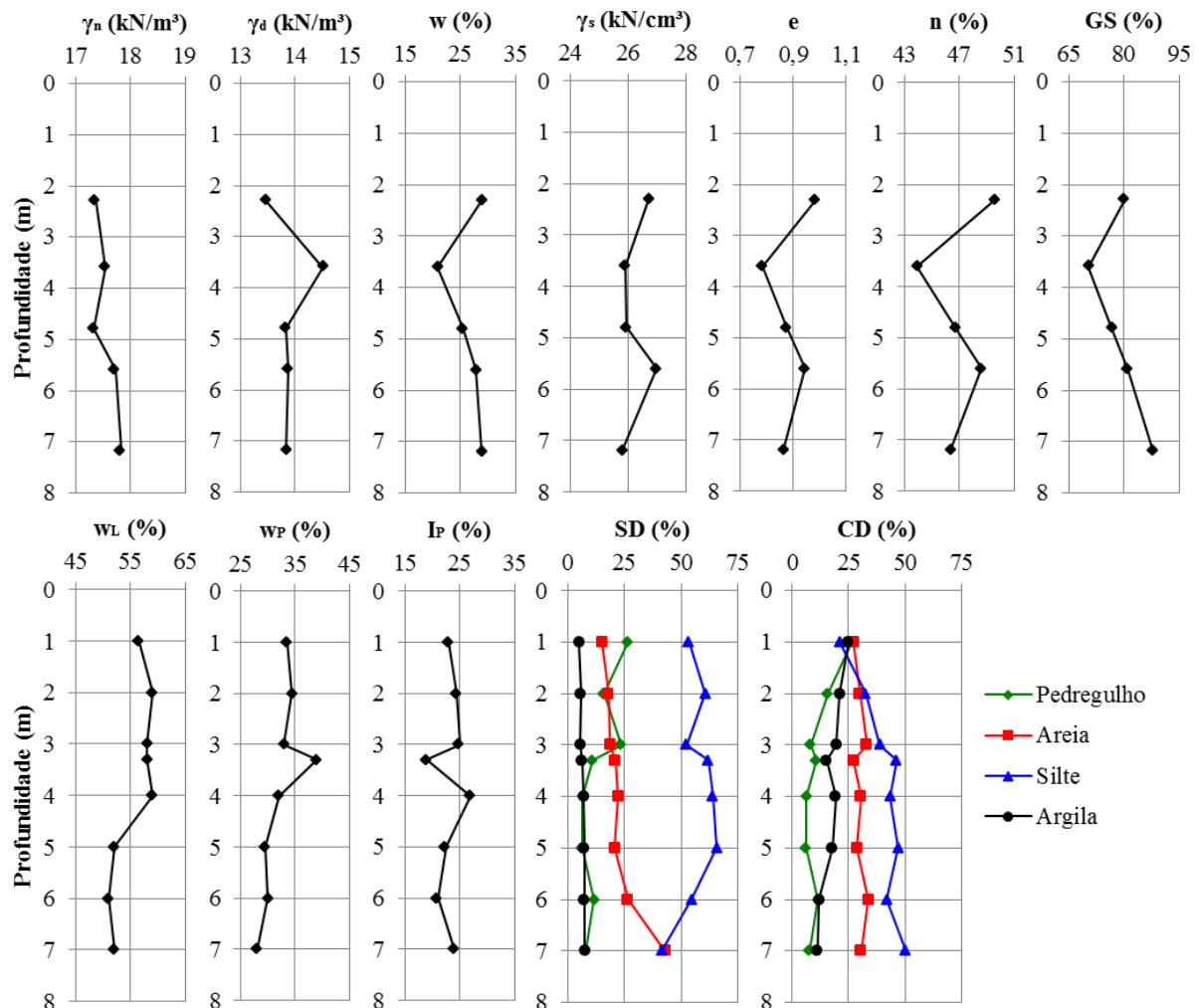


Figura 2. Caracterização física do solo.

Foram realizados, também, doze ensaios de permeabilidade à carga variável em corpos de prova de 10 cm de diâmetro e 12 cm de altura, para as profundidades de 2,3 a 6,9 m, sendo metade destes na direção vertical e metade na direção horizontal. Observa-se que a permeabilidade vertical do solo em estudo varia entre  $1,4 \times 10^{-7}$  e  $1,0 \times 10^{-6}$  m/s, apresentando mesma ordem de grandeza da permeabilidade horizontal, entre  $1,9 \times 10^{-7}$  e  $1,6 \times 10^{-6}$  m/s. Tais valores são típicos de solos silto arenosos (Bowles, 1997; Lambe, Whitman, 1979) e estão em conformidade com a ordem de grandeza esperada para a região em estudo, entre  $10^{-7}$  e  $10^{-5}$  m/s (Rodrigues *et al.*, 2005).

Para avaliação da constituição mineralógica do solo em estudo foram realizados ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-x em três amostras, nas profundidades de 2,3; 4,8 e 7,2 m. As imagens obtidas no MEV estão apresentadas na Figura 3. Nestas é possível observar a presença de canais biológicos, sendo alguns destes visíveis a olho nu para a amostra superficial; a presença de caulinita e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, em menor quantidade e sem aglomerações para a amostra de 7,2 m, a boa orientação da rocha de origem, confirmada pela orientação das camadas de micaxisto; a morfologia do quartzo, em forma de cristais; e a homogeneidade dos poros. Quanto às difrações de raios-x, estas apresentaram resultados equivalentes para todas as amostras, sendo os três principais minerais constituintes quartzo, mica e caulinita, previamente observados na Figura 3 e devidamente quantificados na Tabela 1.

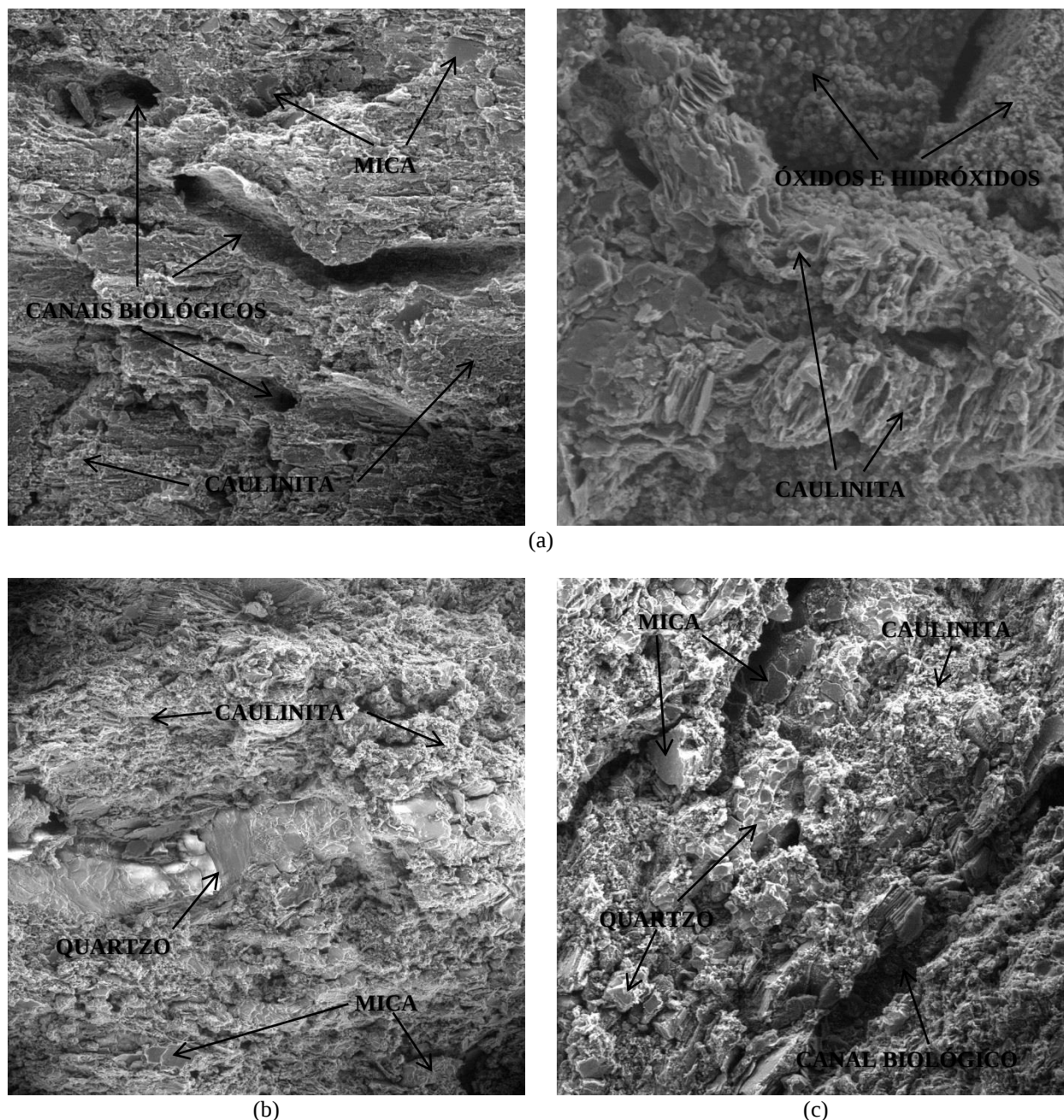


Figura 3. Imagens obtidas com microscopia eletrônica de varredura, para amostras a: (a) 2,3 m de profundidade – imagem à esquerda: ampliação de 110x, imagem à direita: ampliação de 3000x; (b) 4,8 m de profundidade – ampliação de 102x; (c) 7,2 m de profundidade – ampliação de 149x.

Tabela 1. Difração de Raios-x – Quantificação de Rietveld.

| Profundidade (m) | Quartzo (%) | Mica (%) | Caulinita (%) |
|------------------|-------------|----------|---------------|
| 2,3              | 52,2        | 19,4     | 12,1          |
| 4,8              | 66,8        | 17,8     | 4,5           |
| 7,2              | 56,5        | 14,8     | 13,3          |



#### 4 Caracterização Mecânica

Realizou-se, ao todo, onze séries de ensaios triaxiais consolidados drenados, sendo seis deles com corpos de prova saturados e cinco com corpos de prova naturais, de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, com tensões confinantes de 100, 150, 200 e 250 kPa, nas profundidades de 2,3 a 7,2 m; com os quais foram obtidas as propriedades apresentadas na Figura 4. Nesta observa-se que para as amostras saturadas a coesão ( $c$ ) e o ângulo de atrito ( $\phi'$ ) encontram-se entre 15 e 52 kPa e 24,3 e 31,2°, respectivamente, enquanto o módulo de elasticidade secante para 50% da tensão máxima aplicada ( $E$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) estão entre 8,83 e 28,99 MPa e 0,25 e 0,49, nesta ordem. Já as amostras naturais apresentaram coesão entre 62 e 85 kPa, ângulo de atrito variando de 19 a 27°, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson entre 7,61 e 37,56 MPa e 0,2 e 0,5, na devida ordem.

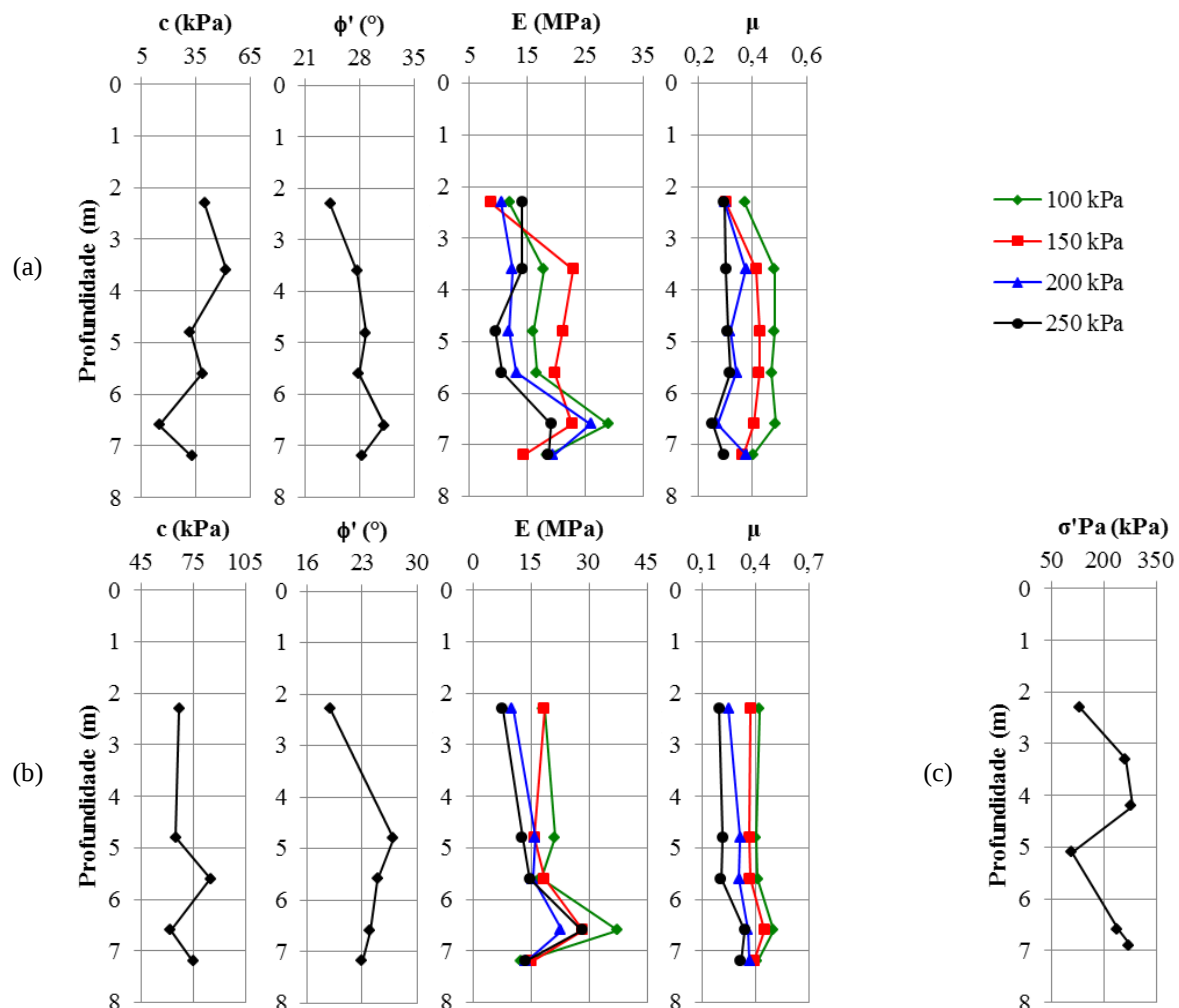


Figura 4. Caracterização mecânica do solo para corpos de prova: (a) parâmetros saturados; (b) parâmetros naturais; (c) tensão de pré-adensamento.

Foram realizados, também, seis ensaios de adensamento com corpos de prova de 3 cm de altura e 10 cm de diâmetro, inundados na tensão de 12,5 kPa, nas profundidades de 2,3 a 6,9 m. Com estes, constata-se que as tensões de pré-adensamento ( $\sigma'Pa$ ) do solo em estudo estão entre 109 e 281 kPa, conforme Figura 4.

Da comparação das curvas tensão *versus* deformação, obtidas para cada corpo de prova através dos ensaios triaxiais, com as tensões de pré-adensamento, determinadas por meio dos ensaios de adensamento, observa-se que o solo apresenta o comportamento ideal – nas amostras normalmente adensadas, crescimento lento das tensões axiais em relação as deformações com pico de tensão para deformações superiores a 15%; e



nas amostras pré-adensadas, pico de tensão axial em menores deformações, tanto menores quanto maior a razão de sobre adensamento (Pinto, 2006).

## 5 Conclusões

Neste trabalho foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica do solo do Campo Experimental I do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas. Dos resultados obtidos, constata-se que o solo em estudo é classificado, de acordo com as análises granulométricas, como silte arenoso e que os resultados dos ensaios de permeabilidade estão de acordo com tal classificação, bem como com a geologia da região em que se situa o campo. Além disso, os parâmetros de resistência obtidos, em especial os módulos de elasticidade, representam um material frágil, assim como esperado na localidade em estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bowles, J. E. (1997) *Foundation analysis and design*, 5nd ed., McGraw Hill, 1168 p.
- Cavalcante, E. H., Danziger, F. A. B., Giacheti, H. L., Coutinho, R. Q., Souza, A., Kormann, A. C. M., *et al.* (2007). Campos experimentais brasileiros. *Geotecnia*, A Sociedade, Vol. 111, p. 99-205.
- Ferreira, J. R., Schlieve, M. S.; Cabral, R. M.; Côrtes, H. A. (2019) Caracterização do campo experimental I do centro tecnológico em engenharia civil de Furnas. In: *Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro Oeste*, 5, Brasília. *Anais... ABMS*. p. 161-164.
- Lacerda Filho, J. V. de; Rezende, A e Silva, A. da. (1999) *Geologia e Recursos Minerais do Estado de Goiás e Distrito Federal*, CPRM, Brasília, DF, BR, 200 p.
- Lambe, T., Whitman, R. V. (1979) *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 553 p.
- Pinto, C. S. (2006) *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*, 3 ed, Oficina de Textos, São Paulo, SP, BR, 354 p.
- Rodrigues, A. P.; Almeida, L. de; Resende, L.; Magalhães, L. F.; Sá, M. A. M. e Campos, J. E. G. (2005). *Caracterização do Meio Físico, dos Recursos Minerais e Hídricos do Município de Aparecida de Goiânia*, Goiânia: Superintendência de Geologia e Mineração, Goiânia, GO, BR, 106 p.