

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  
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



## Estimativa dos parâmetros do modelo Soft Soil Creep da argila da Cidade do México

Weber Anselmo dos Ramos Souza  
Estudante, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, [weberars@hotmail.com](mailto:weberars@hotmail.com)

Juan Felix Rodriguez Rebolledo  
Pesquisador, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, [jrodriguezr72@unb.br](mailto:jrodriguezr72@unb.br)

Lucas Fonseca Fernandes  
Estudante, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, [lucasfonsecafernandes@hotmail.com](mailto:lucasfonsecafernandes@hotmail.com)

Rafaella Fonseca da Costa  
Estudante, Universidade de Nevada, Nevada, EUA, [rafaellafonsecac@gmail.com](mailto:rafaellafonsecac@gmail.com)

**RESUMO:** Os solos da Cidade do México apresentam características atípicas quando comparados a outros solos, como a alta compressibilidade no ensaio odométrico, coeficientes de compressibilidade maiores que dez e a alta sensibilidade na resistência ao cisalhamento não-confinado. Em função disso, os métodos empíricos de previsão de capacidade de carga não apresentam boa precisão, o que reforça a necessidade do uso de modelagens numéricas para estimar os parâmetros. O modelo Soft Soil Creep mostra-se viável, pois acrescenta a parcela de fluência na modelagem numérica, essencial para o solos do México. Assim, o objetivo deste trabalho é calcular os parâmetros da argila do México com esse modelo, a partir de ensaios triaxiais. Para isto, foram analisados os resultados de estudos prévios, em que foram feitos sendo consolidados e não drenados (C.U.) em três velocidades para três tensões de confinamento diferentes. Em seguida, foram feitos ajustes das curvas dos ensaios por meio da função *Parameter Optimisation* do módulo *SoilTest* do programa *Plaxis 3D*. Os resultados mostram que o modelo proposto obteve uma boa acurácia principalmente nos gráficos de tensão desviadora versus deformação, exceto para argilas pré-adensadas. Tendo em vista isso, o modelo Soft Soil Creep apresenta-se como uma boa solução para estimativa de parâmetros das argilas do México.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cidade do México, Argila, Soft Soil Creep, Ensaio Triaxiais.

**ABSTRACT:** Soils of Mexico City have atypical characteristics when compared to other grounds, such as the high compressibility in the oedometer test, compressibility coefficient greater than ten, and high sensitivity in the resistance to unconfined shear. As a result, the empirical methods of load capacity prediction do not have good accuracy, which reinforces the need to use numerical models to estimate the parameters. The Soft Soil Creep model shows itself, then, as a viable model, as it adds the fluency portion in the calculations. Thus, the objective of this work is to calculate the clay parameters of Mexico with this model, using triaxial tests. For this, the results of previous studies were analyzed, in which consolidated and undrained tests (CU) were made at three speeds for three different confinement stresses and then adjustments were made to the test curves, using the *Parameter Optimization* function of the *SoilTest* module of the *Plaxis 3D* program. The results show that the proposed model obtained a satisfying accuracy mainly in the deviation stress versus deformation graphs, except for pre-compacted clays. Thus, the Soft Soil Creep model presents itself as a proper solution for estimating the parameters of clays in Mexico.

**KEYWORDS:** Mexico City, Clay, Soft Soil Creep, Triaxial Tests.



## 1 Introdução

Os solos da Cidade do México apresentam características únicas quando comparadas aos demais solos. As argilas desse lugar podem atingir umidade que excedem 400%, índice de plasticidade superiores a 300%, coeficiente de compressibilidade ( $C_c$ ) maiores que dez e ângulos de atrito comparados com as areias (Lo 1962; Mesri et al. 1975; Díaz-Rodríguez et al. 1992). Mesri et al. (1975) relatam que esse é um clássico exemplo de desafio na geotecnia, pois o solo do México é descrito como altamente orgânico, com presença de montmorilonita, tixotropia e comportamento sensível em relação à taxa de tensão-deformação. Zeevert (1982) detalhou que essas argilas têm duas características distintas das demais: a alta sensibilidade na resistência ao cisalhamento não-confinado e a alta compressibilidade no ensaio odométrico.

Essas características incomuns se devem, principalmente ao processo de formação geológica. De acordo com Zeevert (1982), o vale do México é um local rico em materiais finos resultantes de rochas decompostas, argilas residuais, materiais piroclásticos, pedregulhos e britas transportadas. As cinzas ultrafinas de vulcão e uma grande quantidade de diatomáceas e ostracodes nesse lugar resultam na estrutura porosa do solo da região, com alto índice de vazios e de plasticidade (Zeevert, 1982). Essa estrutura porosa faz com que o peso específico deste solo seja próximo de  $12 \text{ kN/m}^3$  (Cañavate-Grimal, 2019) com uma composição entre 22 a 66%, de compostos de carbonato, matéria orgânica, diatomáceas e ostracodes (Marsal e Mazari (1959) *apud*. Mesri et al. 1975).

A singularidade desse solo acarreta que os métodos empíricos de previsão de capacidade de carga não tenham boa acurácia, sendo assim, a modelagem numérica vem com o intuito de suprimir a necessidade de uma solução nesse problema. Entretanto, os modelos constitutivos mais comuns para as argilas não conseguem simular os ensaios triaxiais da argila do México, principalmente, devido ao comportamento de tensão dependente da taxa de deformação. Tendo em vista isso, o modelo Soft Soil Creep mostra-se um modelo viável, pois acrescenta a parcela de fluência por meio de uma variável denominada de  $\mu^*$ , com relação direta ao coeficiente de adensamento secundário ( $C_\alpha$ ). Brinkgreve *et al.* (2013) comenta que as principais características desse modelo são: a rigidez dependente da tensão, distinção entre o primeiro carregamento e recarregamento, consideração da tensão de pré-adensamento e critério de ruptura de acordo com Mohr-Coulomb.

Assim, o objetivo deste trabalho é calcular os parâmetros da argila do México com o modelo Soft Soil Creep, a partir de ensaios triaxiais consolidados e não drenados. Dessa forma, é possível obter uma estimativa inicial do comportamento do solo mais próxima da realidade por meio de simulações numéricas.

## 2 Materiais e métodos

### 2.1 Ensaios utilizados

Devido a uma série de problemas geotécnicos apresentados nos taludes após três meses do final da construção no lago Texcoco, Alberro e Hiriart (1973) realizaram uma série de ensaios triaxiais para ter aprofundamento dos conhecimentos sobre as propriedades reológicas desta argila. Foram realizados dez ensaios consolidados e não drenados (C.U.), cujas amostras de solo foram retiradas de uma profundidade de 2,5 metros e apresentaram uma tensão de pré-adensamento de 45 kPa. Estes ensaios foram realizados nas velocidades de 94%/h, 1,88%/h e 0,045%/h para três tensões de confinamento diferentes (25kPa, 50kPa e 100kPa), o que possibilitou avaliar o fenômeno da fluência. O comportamento viscoelástico nos solos moles evidencia o fenômeno da fluência e a dependência da taxa de velocidade de carregamento. (Wang *et al.*, 2012)

As conclusões de Alberro e Hiriart (1973) foram que: para diminuição das taxas de velocidade do ensaio constatou-se uma redução de resistência e valores medidos de poropressão, enquanto as deformações na ruptura permanecem praticamente constantes. Foi visto também que para velocidades pequenas de deformação ( $\leq 10^{-4}\%$ ), o material se comporta como viscoelástico. A rigidez e a resistência dos materiais argilosos são mais dependentes das tensões quando atingem valores maiores que  $10^{-2}\%$ . Romo (1995) cita que os parâmetros chave deste comportamento são o índice de plasticidade e o índice de consistência.



## 2.2 Análise de sensibilidade

Para ajuste das curvas dos ensaios com a curva teórica, foi utilizado uma função chamada *Parameter Optimisation* do módulo *SoilTest* do programa *Plaxis 3D*, que realiza análise de sensibilidade descrita na Equação 1. As variáveis apresentadas nesta equação são:  $f(X_{L,R})$  é o valor do resultado depois de alterar valores dos parâmetros de entrada,  $f(x)$  é o valor de referência que neste caso é a curva do ensaio triaxial,  $X_{L,R}$  e  $x$  são valores de entrada. Brinkgreve *et al.* (2013) esclarecem que essa função é utilizada quando o verdadeiro valor não se sabe e que o número de cálculos realizados é duas vezes o número de variáveis mais um.

$$\eta_{SR} = \frac{\left[ \frac{f(X_{L,R}) - f(x)}{f(x)} \right] \cdot 100\%}{\left[ \frac{X_{L,R} - x}{x} \right] \cdot 100\%} \quad (1)$$

A Tabela 1 fornece os valores médios, mínimo e máximo dos 9 parâmetros relacionados ao critério de ruptura e rigidez. Os valores dos intervalos de  $\lambda^*$ ,  $\mu^*$  e  $\kappa^*$  foram retirados de Mersi *et al.* (1975) que apresentaram diversos ensaios odométricos com os valores de  $C_c$ ,  $C_r$  e  $C_\alpha$ . Já para o  $\nu_{ur}$ , foi estimado uma faixa de valores. Os valores de ângulo de atrito ( $\phi$ ),  $M$  e  $K_0^{nc}$  foram previamente obtidos com os ensaios desta pesquisa. Por fim, arbitrou-se um valor para coesão, pois o programa exige um valor diferente de 0.

Tabela 1. Intervalos dos parâmetros considerados na análise.

| Parâmetros       | Valor mínimo | Valor médio | Valor máximo |
|------------------|--------------|-------------|--------------|
| c (kPa)          | -            | 1           | -            |
| $\phi(^{\circ})$ | -            | 41,67       | -            |
| $\Psi(^{\circ})$ | -            | 0           | -            |
| $\lambda^*$      | 0,1660       | 0,4159      | 0,8341       |
| $\mu^*$          | 0,0013       | 0,0094      | 0,0228       |
| $\kappa^*$       | 0,0168       | 0,0416      | 0,0833       |
| $\nu_{ur}$       | 0,1          | 0,15        | 0,3          |
| $K_0^{nc}$       | -            | 0,44        | -            |
| M                | -            | 1,7         | -            |

## 3 Resultados e discussões

### 3.1 Etapa de análise

Os valores otimizados depois de uma análise de sensibilidade completa estão apresentados na Tabela 2. Observa-se grandes valores de sensibilidade nos parâmetros  $\lambda^*$ ,  $\kappa^*$  e  $\nu_{ur}$ , o que indica grande influência na convergência dos resultados.

Tabela 2. Valores dos parâmetros otimizados e da análise de sensibilidade.

| Parâmetros  | Valores otimizados | Sensibilidade |
|-------------|--------------------|---------------|
| $\lambda^*$ | 0,1763             | 100%          |
| $\mu^*$     | 0,01044            | 3,86%         |
| $\kappa^*$  | 0,06647            | 86,30%        |
| $\nu_{ur}$  | 0,1545             | 75,40%        |

As Figuras 1a e 1b mostram as curvas deformação axial versus desviadora dos ensaios de 94%/100kPa e 0,045%/100kPa, respectivamente. Como pode-se notar, as duas curvas obtiveram um bom ajuste. Ademais, a curva que mais se distanciou foi a do ensaio com velocidade 0,045%/25kPa, em que os resultados das simulações superestimaram a curva real do ensaio. Esse comportamento pode ter sido devido às mudanças na tensão de pré-adensamento, tendo em vista que a razão de sobreadensamento pode ter coeficientes de variação de 10% à 35%, de acordo com Harr (1984).

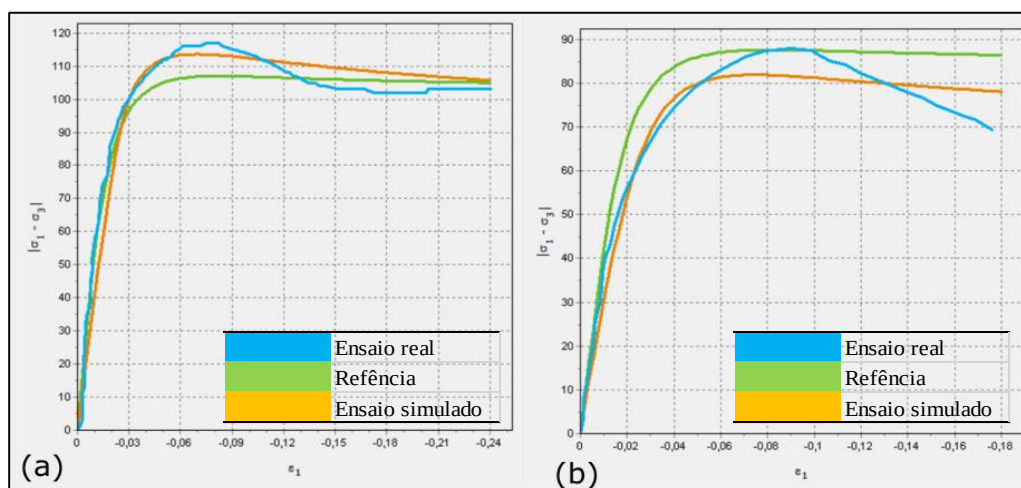


Figura 1. Curvas da deformação axial versus desviadoras reais e estimadas para os ensaios de 94% (a) e 0,045% (b).

As Figuras 2 e 3 mostram a trajetória de tensões dos ensaios triaxiais utilizados com o modelo para 0 dias e 17 dias. As duas curvas mostradas utilizando o modelo Soft Soil Creep tiveram discrepâncias, mas conseguiram simular com uma boa precisão. Contudo, a trajetória de tensões onde o  $p'$  aumentou de valor conjuntamente com  $q'$  não foi simulada, como pode ser visto no ensaio de 94%/h.

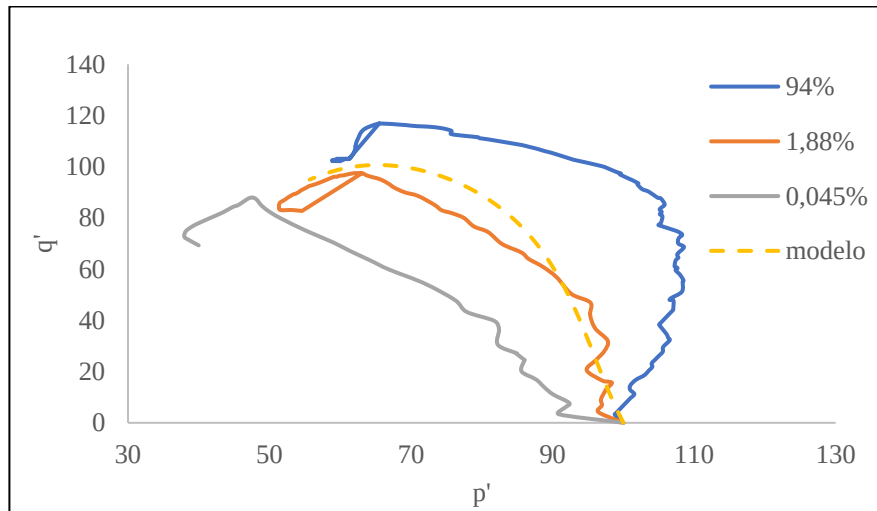


Figura 2. Trajetória de tensões para ensaios isotropicamente e do modelo consolidados até 100 kPa para 0 dias.

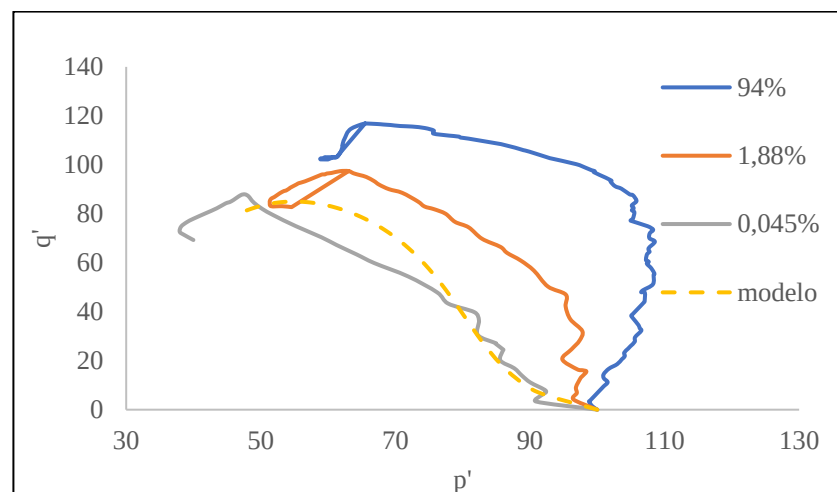


Figura 3. Trajetória de tensões para ensaios isotropicamente e do modelo consolidados até 100 kPa para 17 dias.

As trajetórias de tensão confinante de 50 kPa estão apresentadas nas Figuras 4 e 5. Para esse caso, apresentam-se duas curvas de 94%/h, haja vista que o resultado obtido para o primeiro ensaio teve comportamento muito diferente do esperado. Nota-se também um razoável ajuste visual entre o modelo e as curvas. Novamente, os ensaios de 94%/h deram valores acima da trajetória descrita pelo modelo proposto. Comparando com a trajetória do ensaio de 94% com tensão confinante de 100 kPa, é evidente que a trajetória apresentada com tensão confinante de 50 kPa se aproxima mais do modelo.

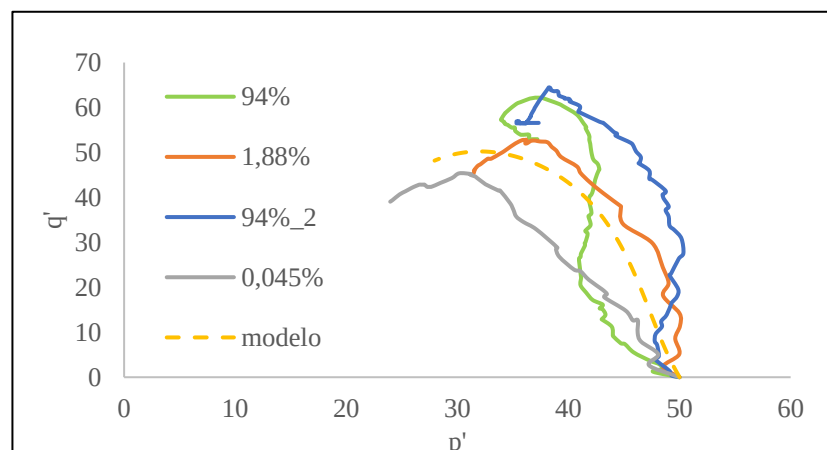


Figura 4. Trajetória de tensões para ensaios isotropicamente e do modelo consolidados até 50 kPa para 0 dias.

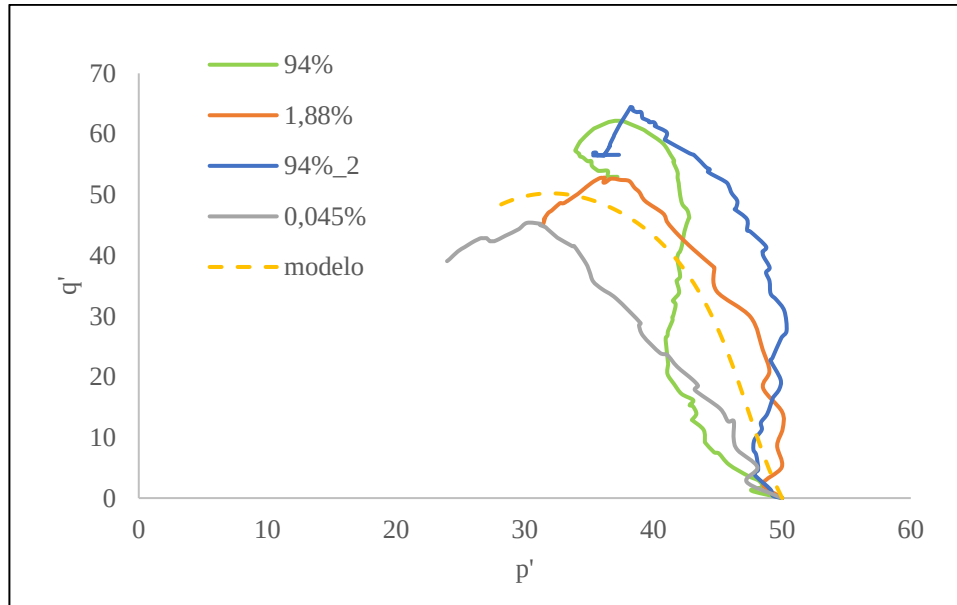


Figura 5. Trajetória de tensões para ensaios isotropicamente e do modelo consolidados até 50 kPa para 14 dias.

Em relação à Figura 6, observa-se um ajuste mais próximo do ensaio de 94%/h do que quando realizado a 1,88%/h. Já na Figura 7, as trajetórias das tensões a 0,045%/h e as do modelo proposto apresentam-se diferentes em relação as demais curvas. Esta explicação pode ser devido à heterogeneidade da tensão de pré-adensamento, como já foi citado anteriormente por Harr (1984).

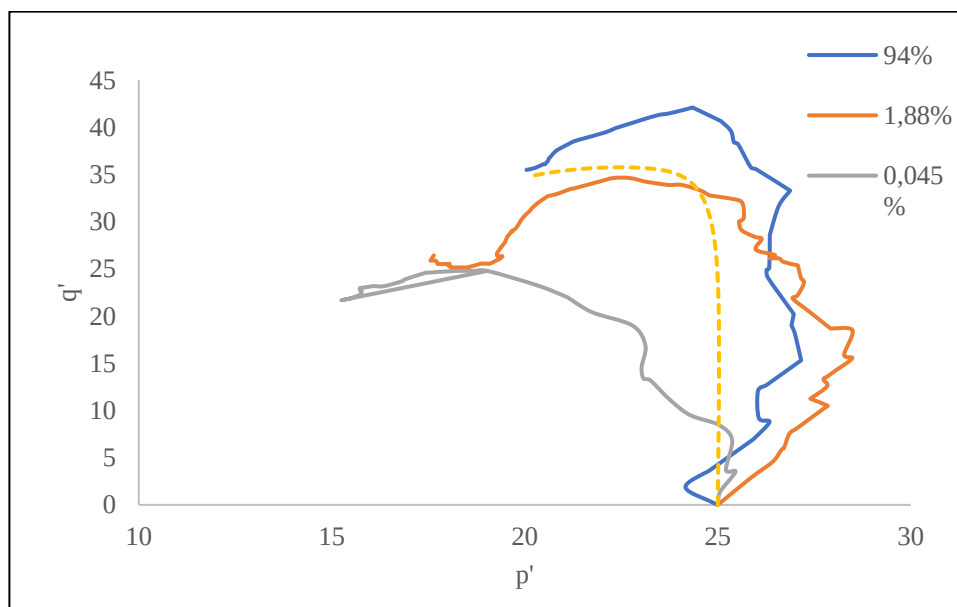


Figura 6. Trajetória de tensões para ensaios isotropicamente e do modelo consolidados até 25 kPa para 0 dias.

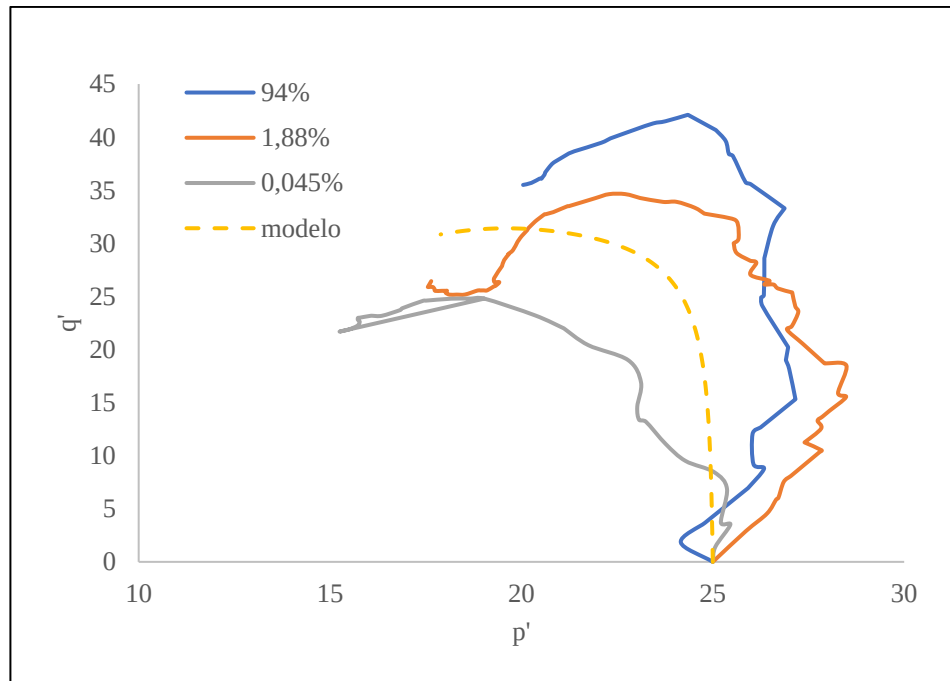


Figura 7. Trajetória de tensões para ensaios isotropicamente e do modelo consolidados até 25 kPa para 9 dias.

### 3.2 Etapa de Validação

A validação dos parâmetros foi realizada com a utilização dos ensaios triaxiais realizados por Diaz-Rodriguez et al. (2009) com tensão confinante de 300 kPa. É evidente na Figura 8 que o modelo proposto teve acréscimo diferente no início das deformações (até 2%), mas em seguida apresenta um comportamento intermediário entre as taxas dos triaxiais. Conclui-se que o modelo teve boa aderência quando se muda a tensão confinante e em outros ensaios da argila do México.

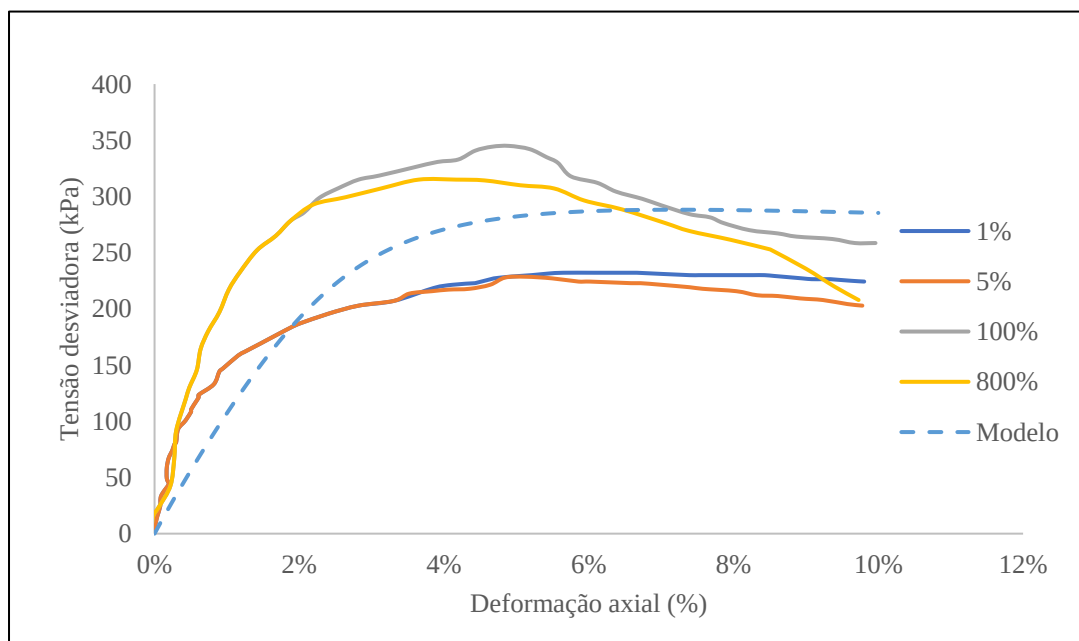






Figura 8. Validação com a utilização dos dados de Diaz-Rodriguez (2009).

#### 4 Conclusão

A cidade do México possui solos complexos que necessitam de estudos intensivos e cuidados especializados quando for necessário realizar obras geotécnicas, principalmente as de grande porte. Os extensos trabalhos encontrados na literatura técnica deram suporte a esse artigo, além dos ensaios triaxiais realizados no Lago de Texcoco por Alberro e Hiriart (1973) que proveram um banco de dados para o ajuste no modelo *Soft Soil Creep*.

Os resultados do modelo proposto obtiveram uma boa acurácia, principalmente nos gráficos de tensão desviadora versus deformação, menos para argilas pré-adensadas (ensaio com tensão confinante de 25 kPa). Ademais, observou-se nas trajetórias de tensões que para maiores tensões confinantes (50kPa e 100kPa), os ensaios realizados a menores velocidades, apresentaram melhor ajuste, sendo a velocidade de 1,88%/h a mais próxima do modelo. Enquanto que para menor tensão confinante (25kPa), a maior velocidade (94%/h) que obteve melhor ajuste.

Chama-se atenção para a necessidade de realização de ensaios para verificação do comportamento real das argilas, mesmo que o modelo *Soft Soil Creep* apresente ajuste muito similar, pois, como visto neste trabalho, há uma variação no comportamento das argilas em função da velocidade aplicada e até mesmo para

uma mesma velocidade, o comportamento pode variar enormemente, haja vista a extrema sensibilidade desse solo.

#### Referências

- Alberro, A., & Hiriart, G. (1973). Resistencia a largo plazo de las arcillas de la ciudad de México. In *Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería* (Vol. 317). UNAM. Instituto de Ingeniería.
- Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., & Swolfs, W. M. (2013). PLAXIS 3D 2013 user manual. *Plaxis bv, Delft*.
- Cañavate-Grimal, A., O'Riordan, N., Ciruela-Ochoa, F., & Kumar, S. (2019). Estimation of Driven Piles Capacity in Texcoco Clay, Mexico City.
- Díaz-Rodríguez, J. A., Martínez-Vasquez, J. J., & Santamarina, J. C. (2009). Strain-rate effects in Mexico City soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(2), 300-305.
- Díaz-Rodríguez, J. A., Cruz, R. L. S., Dávila-Alcocer, V. M., Vallejo, E., & Girón, P. (1998). Physical, chemical, and mineralogical properties of Mexico City sediments: a geotechnical perspective. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(4), 600-610.
- Harr, M.E., 1984, *Reliability-based design in civil engineering*, Henry M. Shaw Lecture, Dept. of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, N.C.
- Lo, K. Y. (1962). Shear strength properties of a sample of volcanic material of the Valley of Mexico. *Geotechnique*, 12(4), 303-318.
- Marsal, R. J. & Mazari, Y. M. (1959). The subsoil of Mexico City. 1st Panam. Conf. Soil Mech. Fdn. Engn. Mexico City.
- Mesri, G., Rokhsar, A., & Bohor, B. F. (1975). Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay. *Geotechnique*, 25(3), 527-554.
- Romo, M. P. (1995). Clay behavior, ground response and soil-structure interaction studies in Mexico City.
- Wang, L. Z., Dan, H. B., & Li, L. L. (2012). Modeling strain-rate dependent behavior of KR 0-consolidated soft clays. *Journal of engineering mechanics*, 138(7), 738-748.
- Zeevaert, L (1982) *Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions*, 2nd Ed. Van Nosrand-Reinhold Co., Nova York, NY.