

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DA ARGILA POROSA DE BRASÍLIA ATRAVÉS DO MODELO DE LADE

SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN BEHAVIOUR OF THE BRASÍLIA POROUS CLAY BY THE LADE ELASTO-PLASTIC MODEL

Marques, Fernando, *FCTUC, Coimbra, Portugal, ferm@dec.uc.pt*
Almeida e Sousa, Jorge, *FCTUC, Coimbra, Portugal, jas@dec.uc.pt*
Assis, André, *UnB, Brasília, Brasil, aassis@unb.br*

RESUMO

Para o estudo do comportamento dos túneis do metro de Brasília, escavados numa camada de argila porosa, foram aplicados modelos por elementos finitos apropriados para a análise de equilíbrios tridimensionais. Para simular o comportamento mecânico da argila porosa de Brasília, interessada pela obra, foi utilizado o modelo elasto-plástico de Lade, ilustrando-se neste artigo o procedimento seguido para a sua calibração e mostrando-se o seu desempenho na reprodução de alguns dos ensaios efectuados, nomeadamente dos ensaios de compressão isotrópica e dos ensaios convencionais de compressão triaxial drenados. Por fim, mostra-se a comparação de alguns dos resultados obtidos nas análises numéricas com os fornecidos pela instrumentação da obra.

ABSTRACT

The behaviour of the tunnels of the Brasília metro, excavated in a porous clay layer, was studied through the accomplishment of three-dimensional analyses, using the finite element method. The Lade elasto-plastic model was used to model the behaviour of the Brasília porous clay. In this article the procedure followed for its calibration, using the experimental results obtained in the isotropic compression tests and in the conventional triaxial compression tests are presented. It is also presented the validation of the parameters obtained, through the numeric simulation of the different tests used for its definition, using the finite element method. Finally, the results obtained in the three-dimensional analyses are compared with the observation results.

1. INTRODUÇÃO

Um trecho da linha do metro de Brasília foi executado em subterrâneo utilizando o método NATM. A escavação deste trecho envolveu em grande parte da sua extensão uma camada de argila bastante porosa, conhecida localmente como argila porosa de Brasília. Os resultados fornecidos pela instrumentação da obra indicaram um comportamento atípico. Para além de serem muito superiores aos previstos na fase de projecto, os assentamentos à superfície observados foram maiores que os ocorridos nas proximidades da cavidade, como a Figura 1 ilustra. Tal comportamento motivou a realização de um estudo *à posteriori* desenvolvido em colaboração pelas Universidades de Coimbra e de Brasília.

Esse estudo exigiu a realização de uma campanha de caracterização geotécnica, a qual envolveu a realização de vários ensaios *in situ* (*SPT-T*, *CPT* e *DMT*) e de um extenso programa de ensaios laboratoriais, que incluiu, além dos ensaios de identificação e classificação e de determinação dos principais índices físicos, análise mineralógica através de raios-X, análise química,

determinação da curva característica, ensaios edométricos e ensaios drenados de compressão isotrópica e triaxial.

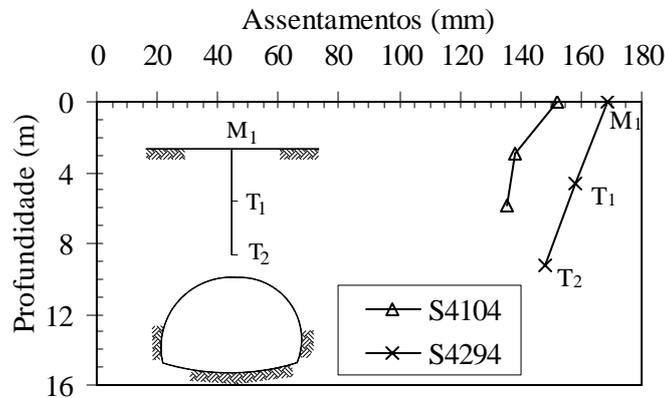


Figura 1 – Evolução em profundidade dos assentamentos máximos observados no eixo do túnel do metro de Brasília em duas das secções instrumentadas da obra

Na Figura 2 ilustra-se a evolução em profundidade de alguns dos índices físicos da argila porosa de Brasília. A análise da figura permite verificar que ela apresenta índice de vazios elevados, em especial nos primeiros metros, verificando-se uma tendência para um decréscimo em profundidade. Os elevados índices de vazios aliados aos teores de humidade relativamente baixos leva a que a argila porosa se encontre numa condição não saturada, mesmo na época mais chuvosa.

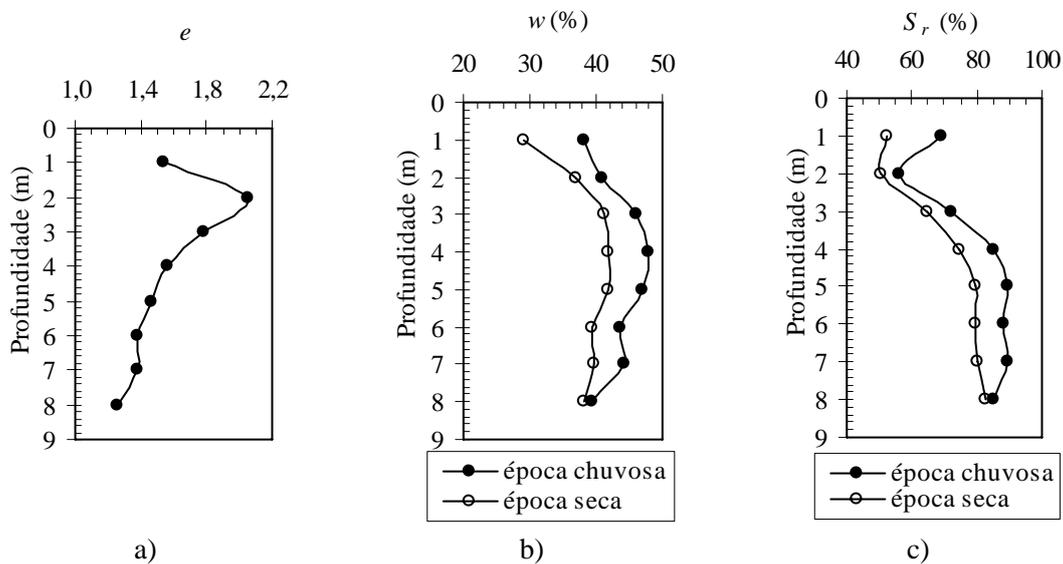


Figura 2 – Índices físicos da argila porosa de Brasília: a) índice de vazios; b) teor de humidade; c) grau de saturação

Nos solos não saturados a sucção desempenha um papel extremamente importante no seu comportamento. Para avaliar a variação da sucção da argila porosa com o teor de humidade (e conseqüentemente com o grau de saturação) foram obtidas, a partir de amostras indeformadas colhidas às profundidades de 2 e 6 m, as curvas características representadas na Figura 3. A análise conjunta desta figura e da Figura 2 permite verificar que a sucção da argila porosa poderá oscilar entre 10 e 100 kPa.

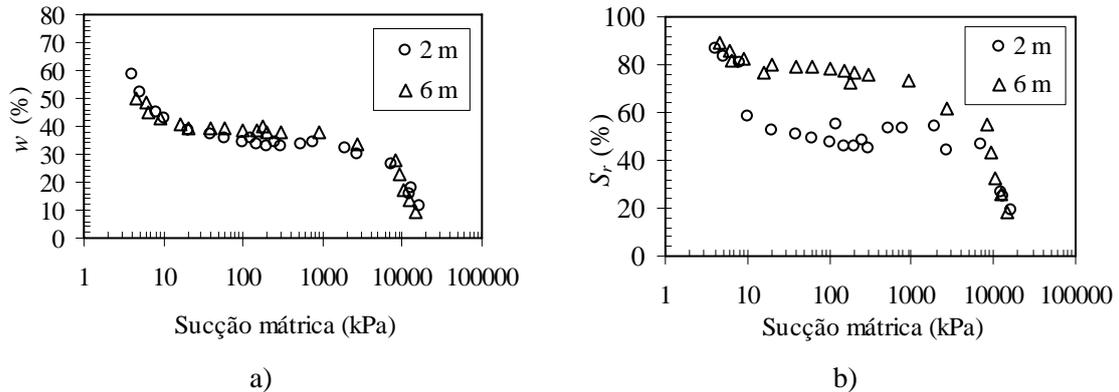


Figura 3 – Curvas características da argila porosa de Brasília: a) teor de humidade; b) grau de saturação

De modo a procurar avaliar o efeito da variação da sucção, os ensaios de compressão isotrópica e triaxial foram realizados com amostras submetidas a três níveis de sucção: 20, 60 e 100 kPa. Os parâmetros dos diferentes modelos empregues para simular, nas análises numéricas tridimensionais efectuadas, o comportamento mecânico da argila porosa, nomeadamente o modelo elasto-plástico desenvolvido por Lade ([1]; [2]), foram definidos para os três valores da sucção.

No ponto seguinte apresenta-se o procedimento seguido para a calibração do modelo de Lade para a série de ensaios realizada com amostras colhidas à profundidade de 6,0 m e submetidas a uma sucção de 20 kPa.

2. CALIBRAÇÃO DO MODELO ELASTO-PLÁSTICO DE LADE

O modelo de Lade considera que o incremento total das deformações é composto por duas parcelas: uma elástica e outra plástica. A parcela correspondente à deformação plástica é por sua vez dividida em duas componentes: uma de contracção, que procura traduzir o efeito de carregamentos isotrópicos, e outra, designada de expansão, que representa o efeito da tensão de desvio e controla a rotura e o comportamento dilatante do material.

São três os parâmetros necessários à avaliação da componente elástica da deformação (K , n e ν), calculada pela lei de Hooke. O coeficiente de Poisson, ν , foi considerado constante e de valor igual a 0,25 e os outros dois parâmetros foram estimados a partir dos módulos de deformabilidade tangentes iniciais obtidos nos ensaios de compressão triaxial para diferentes tensões de confinamento, σ_3 , e aplicando logaritmos à expressão de Janbu ([3]) que toma a forma:

$$\log\left(\frac{E_{ii}}{p_a}\right) = \log(K) + n \cdot \log\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right) \quad (1)$$

sendo p_a a pressão atmosférica (Figura 4a).

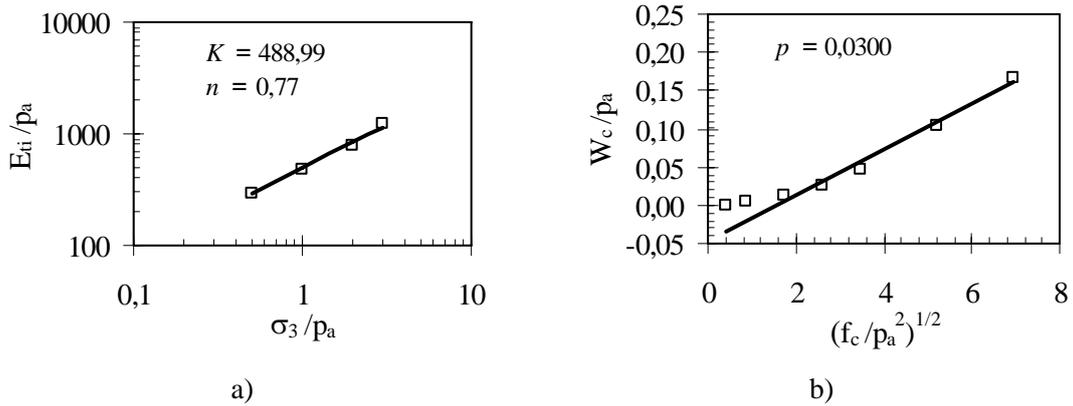


Figura 4 – Determinação dos parâmetros do modelo: a) parâmetros elásticos; b) parâmetro plástico de contracção

As deformações plásticas de contracção são calculadas usando uma lei de fluxo associada, pelo que a função potencial plástico coincide com a função de cedência expressa por:

$$F_c(\{\sigma\}, W_c) = f_c(\{\sigma\}) - Y_c(W_c) = I_1^2 + 2I_2 - Y_c(W_c) = 0 \quad (2)$$

na qual I_1 e I_2 são, respectivamente, o primeiro e o segundo invariante do tensor das tensões, W_c é o trabalho plástico de contracção e $Y_c(W_c)$ é uma função empírica que define a lei de endurecimento isotrópico e que é caracterizada através de um parâmetro adimensional p , que é o coeficiente angular da recta traduzida pela equação:

$$\frac{W_c}{p_a} = C + p \cdot \sqrt{\frac{f_c}{p_a^2}} \quad (3)$$

O valor de p é definido através dos resultados do ensaio de compressão isotrópica, uma vez que neste ensaio as deformações plásticas de expansão são nulas, pelo que as deformações plásticas de contracção, ε_v^c , são obtidas deduzindo às deformações totais, ε_v , obtidas experimentalmente, as deformações elásticas, ε_v^e , calculadas através da expressão:

$$\varepsilon_v^e = \frac{3 \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - n) \cdot K} \cdot \left(\frac{\sigma_c}{p_a} \right)^{(1-n)} \quad (4)$$

onde σ_c representa a tensão de confinamento.

Conhecidas as deformações plásticas de contracção, o correspondente trabalho plástico é avaliado por:

$$W_c = \int \sigma_c \cdot d\varepsilon_v^c \approx \sum (\sigma_c \cdot \Delta\varepsilon_v^c) \quad (5)$$

Considerando os valores de f_c e de W_c correspondentes a cada ponto da curva experimental, pode-se representar graficamente a equação 3, como a Figura 4b ilustra, daí resultando a obtenção do parâmetro p .

No que respeita às deformações plásticas de expansão, elas são obtidas definindo uma função de cedência expressa pela equação:

$$F_p(\{\sigma\}, W_p) = f_p(\{\sigma\}) - Y_p(W_p) = \left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27\right) \cdot \left(\frac{I_1}{p_a}\right) - Y_p(W_p) = 0 \quad (6)$$

variando f_p entre zero, no eixo hidrostático, até à rotura quando se tem:

$$\left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27\right) \cdot \left(\frac{I_1}{p_a}\right)^m = \eta_1 \quad (7)$$

Nas expressões anteriores I_3 é o terceiro invariante do tensor das tensões e m e η_1 são os dois parâmetros do material que definem a superfície de rotura, cujos valores podem ser definidos a partir das tensões de desvio máximas obtidas nos ensaios de compressão triaxial e aplicando logaritmos à equação 7 (Figura 5).

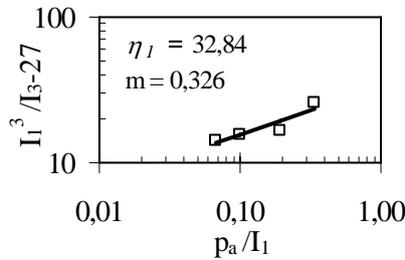


Figura 5 – Determinação dos parâmetros de rotura

Ainda na equação 6, W_p é o trabalho plástico de expansão, que, no caso particular dos ensaios convencionais de compressão triaxial, pode ser calculado através de:

$$W_p \approx \sum (\sigma_1 \cdot \Delta \varepsilon_1^p + 2 \cdot \sigma_3 \cdot \Delta \varepsilon_3^p) \quad (8)$$

sendo as deformações plásticas expansivas definidas subtraindo às deformações totais as deformações elásticas e plásticas de contração, e $Y_p(W_p)$ uma função empiricamente definida, que estabelece a lei de endurecimento isotrópico, expressa por:

$$Y_p(W_p) = b_1 \cdot e^{-b_2 W_p} \cdot \left(\frac{W_p}{p_a}\right)^{1/q} \quad (9)$$

onde b_1 , b_2 e q são constantes para um dado valor da tensão de confinamento, σ_3 , e q é necessariamente positivo.

Os parâmetros b_1 e b_2 são determinados através das seguintes expressões:

$$b_1 = \eta_1 \cdot \left(\frac{e \cdot p_a}{W_{p\max}}\right)^{1/q} \quad (10)$$

$$b_2 = \frac{1}{q \cdot W_{p \max}} \quad (11)$$

sendo $W_{p \max}$ o valor do trabalho plástico expansivo na rotura, obtido das curvas que relacionam W_p com f_p , e que pode ser definido em função da tensão de confinamento através da expressão:

$$W_{p \max} = P \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^l \quad (12)$$

onde P e l são parâmetros do material.

O valor de q varia linearmente com a tensão de confinamento, σ_3 , de acordo com:

$$q = \alpha + \beta \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right) \quad (13)$$

sendo α e β outros dois parâmetros do material.

Os parâmetros P e l são obtidos aplicando logaritmos à equação 12 e definindo para cada tensão de confinamento o valor do trabalho plástico expansivo na rotura, $W_{p \max}$ (Figura 6a).

Os outros dois parâmetros, α e β , necessários à definição da lei de endurecimento, são obtidos representando graficamente a equação 13 (Figura 6b), sendo que para cada uma das curvas que relacionam W_p com f_p , os valores de q são calculados através da expressão ([4]):

$$q = \frac{\log \left(\frac{W_{p \max}}{W_{p \%}} \right) - \left(1 - \frac{W_{p \%}}{W_{p \max}} \right) \log e}{\log \left(\frac{\eta_1}{f_{p \%}} \right)} \quad (14)$$

onde $\log e$ corresponde à base do logaritmo natural e $(W_{p \%}, f_{p \%})$ representa um ponto da curva $f_p(W_p)$ para uma determinada percentagem mobilizada, tendo Lade ([1]) sugerido para esta percentagem um valor de 60%.

Como a lei de fluxo adoptada na determinação dos incrementos das deformações plásticas expansivas é do tipo não associada, considera-se uma função potencial plástico distinta da função de cedência dada por:

$$g_p(\{\sigma\}) = I_1^3 - \left[27 + \eta_2 \cdot \left(\frac{p_a}{I_1} \right)^m \right] \cdot I_3 \quad (15)$$

relacionando-se η_2 com o nível de tensão expansivo, f_p , através de:

$$\eta_2 = S \cdot f_p + T \quad (16)$$

que representa uma recta de inclinação S e ordenada na origem T .

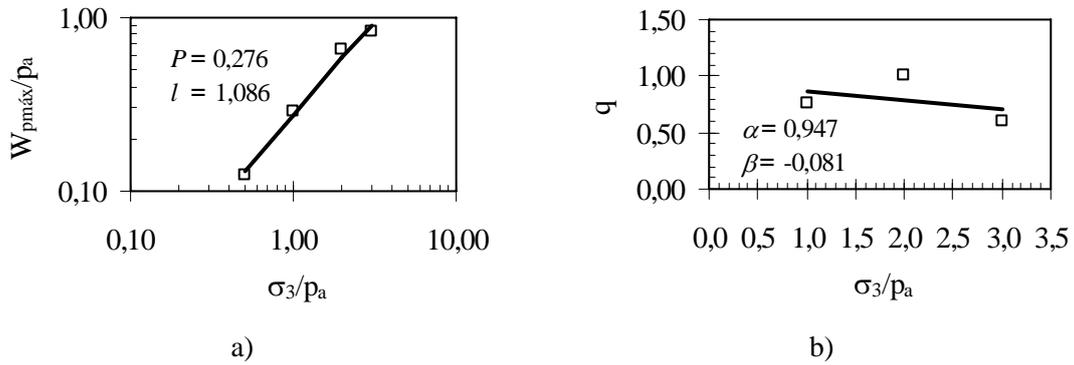


Figura 6 – Determinação dos parâmetros plásticos de expansão: a) P e l ; b) α e β

Os parâmetros S e T podem variar com a tensão de confinamento ([1]; [4]), de acordo com:

$$S = s_1 + s_2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_3}{p_a}} \quad (17)$$

$$T = t_1 + t_2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_3}{p_a}} \quad (18)$$

Para o estabelecimento da relação entre η_2 e f_p , definida pela equação 16, recorre-se ao conceito de “coeficiente de Poisson plástico”, definido como ([1]):

$$\nu^p = - \frac{\Delta \varepsilon_3^p}{\Delta \varepsilon_1^p} \quad (19)$$

O valor de η_2 é então obtido através da expressão:

$$\eta_2 = \frac{3(1 + \nu^p) I_1^2 - 27 \sigma_3 (\sigma_1 + \nu^p \sigma_3)}{\left(\frac{p_a}{I_1}\right)^m \left[\sigma_3 (\sigma_1 + \nu^p \sigma_3) - \frac{I_3}{I_1} m (1 + \nu^p) \right]} \quad (20)$$

onde para um dado nível de tensão expansivo, se conhecem os valores de todas as variáveis.

A Figura 7 mostra para dois dos ensaios triaxiais de compressão realizados, as relações obtidas entre η_2 e f_p . Nas Figuras 8a e 8b expressa-se a dependência de S e T da tensão de confinamento, traduzida pelas equações 17 e 18, respectivamente, possibilitando a determinação dos parâmetros s_1 , s_2 , t_1 e t_2 , que caracterizam por completo a função potencial plástico.

3. REPRODUÇÃO DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO ISOTRÓPICA E TRIAXIAL

Nas Figuras 9 e 10 mostra-se a comparação entre os resultados da simulação numérica dos ensaios realizados, compressão isotrópica e compressão triaxial, e os correspondentes valores experimentais. A correspondência é razoável, o mesmo acontecendo para as outras séries de

ensaios efectuadas sobre as amostras colhidas a diferente profundidade e (ou) com níveis de sucção diferentes.

Deve referir-se que, por ser a argila porosa de Brasília ligeiramente sobreconsolidada, admitiu-se que as superfícies de plastificação foram anteriormente accionadas, pelo que as suas posições iniciais foram estabelecidas adoptando para tensão principal máxima o valor da tensão de pré-consolidação obtido de um ensaio edométrico e para a tensão principal mínima um valor a partir do coeficiente de impulso em repouso, tomado igual a 0,55.

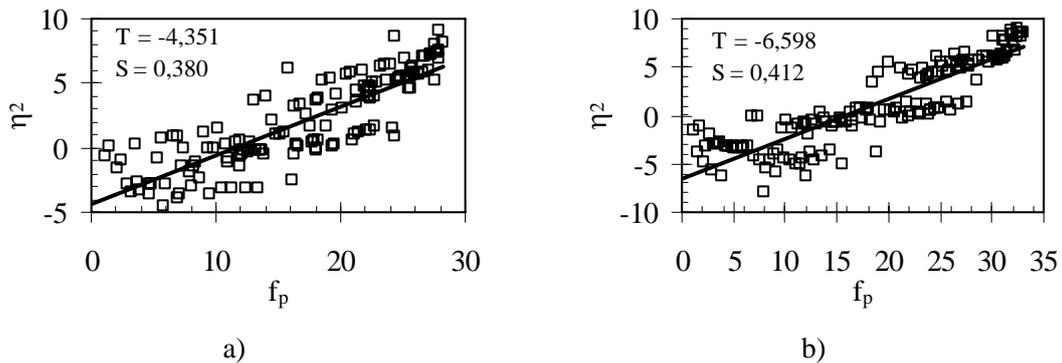


Figura 7 – Relação entre η_2 e f_p : a) $\sigma_3 = 100$ kPa; b) $\sigma_3 = 200$ kPa

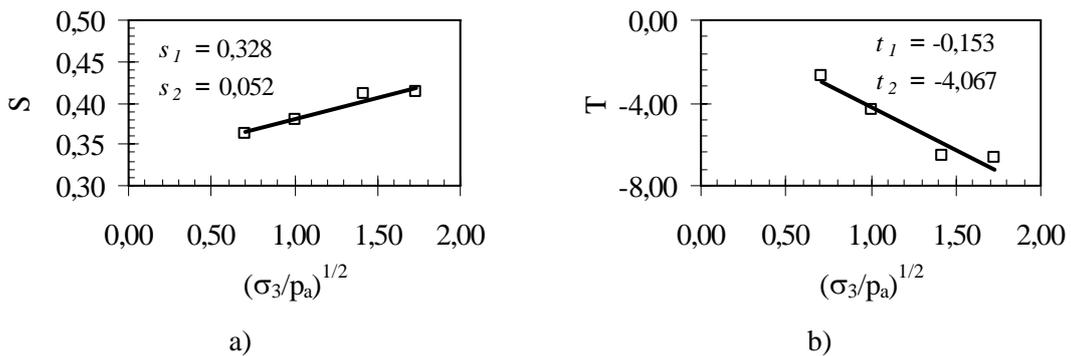


Figura 8 – Determinação dos parâmetros plásticos de expansão: a) s_1 e s_2 ; b) t_1 e t_2

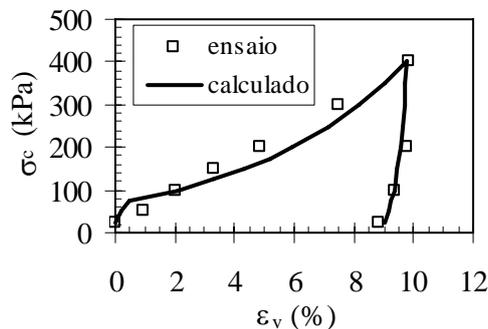


Figura 9 – Reprodução do ensaio de compressão isotrópica

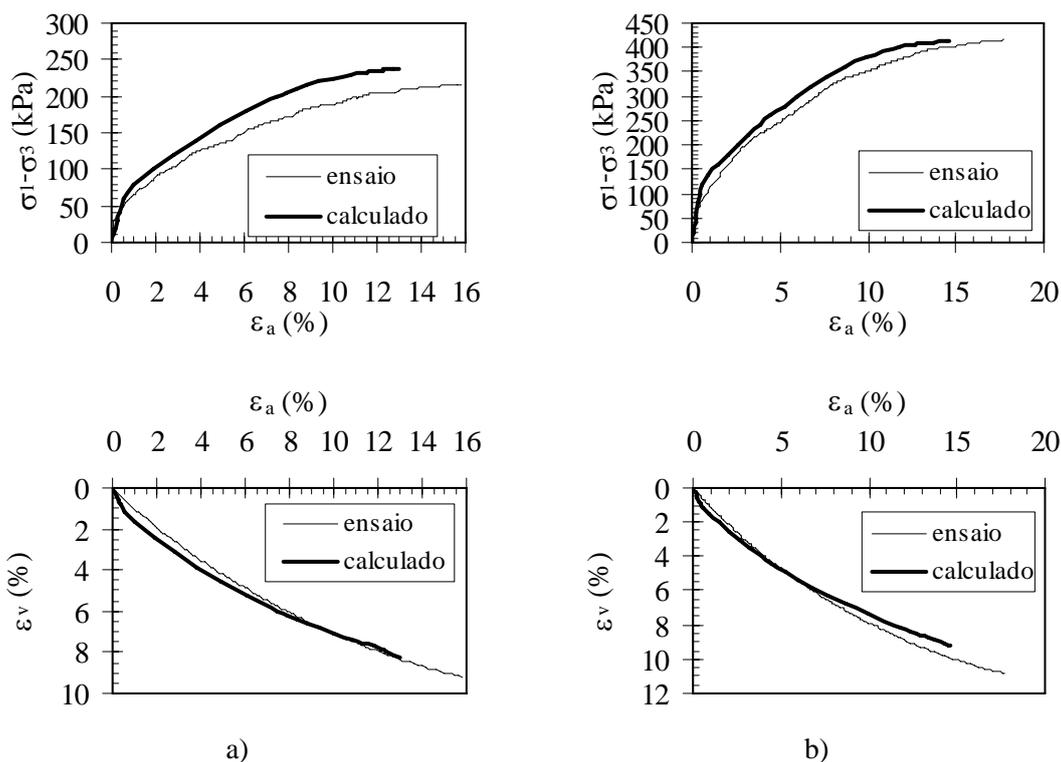


Figura 10 – Comparação entre os resultados da simulação numérica dos ensaios de compressão e os valores experimentais: a) $\sigma_3 = 100$ kPa; b) $\sigma_3 = 200$ kPa

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA ABERTURA DO TÚNEL

Para o estudo dos campos de tensões e de deformações induzidos pela escavação do túnel foi aplicado o método dos elementos finitos. Os cálculos foram efectuados através de análises tridimensionais, com as quais se procurou reproduzir toda a sequência construtiva empregue em obra. Procurando diferenciar em profundidade as características da argila porosa interessada pela escavação, na discretização do meio utilizada foram consideradas cinco camadas de solo. Às duas primeiras, correspondentes ao maciço localizado acima do tecto do túnel, foi atribuído um comportamento elasto-plástico reproduzido através do modelo de Lade. Às três restantes camadas foi atribuído um comportamento elástico perfeitamente plástico, tendo os respectivos parâmetros sido definidos com base nos resultados dos diversos ensaios *in situ* efectuados.

Na Figura 11 são comparados com os observados os assentamentos em pontos localizados no coroamento do túnel – a diferentes profundidades – obtidos em três cálculos. Estes cálculos diferiram uns dos outros apenas nos parâmetros caracterizadores do modelo de Lade empregues. Nos cálculos 1, 2 e 3 aqueles parâmetros foram definidos com base nas séries de ensaios realizadas com sucções de 20, 60 e 100 kPa, respectivamente.

A análise da figura permite verificar que: i) ao contrário do que seria espectável, os resultados dos três cálculos não são muito diferentes, o que parece significar não ser muito grande a influência da sucção no comportamento da argila porosa; ii) a concordância entre os assentamentos medidos e os calculados é bastante razoável, evidenciando os cálculos, de forma idêntica à observada, que os assentamentos à superfície do terreno são maiores que os ocorridos na vizinhança da abertura.

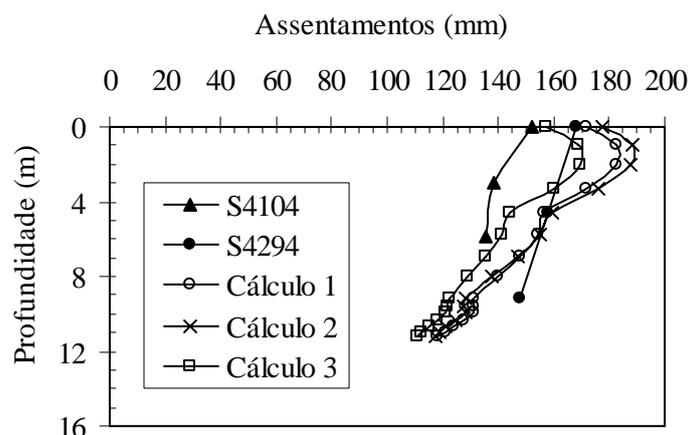


Figura 11 – Evolução em profundidade dos deslocamentos verticais sobre o eixo do túnel

5. CONCLUSÕES

Apresentou-se o procedimento utilizado na obtenção dos parâmetros definidores do modelo elasto-plástico de Lade, com o qual se pretendeu reproduzir o comportamento mecânico da argila porosa interessada pela abertura dos túneis do metrô de Brasília. Esses parâmetros foram validados através da reprodução dos ensaios de compressão isotrópica e triaxial que estiveram na base da sua definição.

No fim do artigo são mostrados alguns resultados decorrentes de análises tridimensionais efectuadas. A comparação destes resultados com os fornecidos pela instrumentação da obra permite concluir que o modelo foi capaz de simular de modo adequado as principais características do problema em análise.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam manifestar o seu agradecimento ao Metrô/DF pela amável colaboração e pela autorização concedida para a publicação dos resultados obtidos. Agradecimentos são também devidos à Fundação para a Ciência e a Tecnologia e ao Fundo Social Europeu, pelo apoio financeiro concedido a este estudo, através da Bolsa de Doutorado SFRH/BD/4862/2001 no âmbito do III Quadro Comunitário de Apoio e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

REFERÊNCIAS

- [1] Lade, P. V. (1977). *Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces*. International Journal of Soils and Structures, Vol. 13, pp. 1019-1035.
- [2] Lade, P. V. (1979). *Stress-strain theory for normally consolidated clay*. Proceedings 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Aachen, Vol. 4, pp. 1325-1337.
- [3] Janbu, N. (1963). *Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests*. Proc. 3rd European Conf. on Soil Mechanics and Found. Engineering, Wisbaden, Vol. 1, pp. 19-25.
- [4] Azevedo, R. F. (1983). *Centrifugal and Analytical Modeling of Excavations in Sand*. Ph. D. Thesis, University of Colorado, Boulder.