

Estudo do Efeito de um Ciclo de Secagem e Saturação na Resistência ao Cisalhamento de um Solo Residual Compactado

Mario Sergio de Souza Almeida

Universidade Federal da Bahia, Salvador/BA, Brasil, mario.almeida@ufrb.edu.br

Sandro Lemos Machado

Universidade Federal da Bahia, Salvador/BA, Brasil, smachado@ufba.br

Tarcísio Machado Barreto do Prado

Universidade Católica do Salvador, Salvador/BA, Brasil, eng.tmachado@gmail.com

RESUMO: Este trabalho objetiva estudar a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado cujos corpos de prova (CPs) foram preparados segundo dois tratamentos distintos: no primeiro tratamento os CPs compactados na umidade ótima para a água foram saturados com o acréscimo de água e, portanto, aproveitando-se a água de compactação existente. No segundo tratamento os corpos de prova compactados na umidade ótima foram secados ao ar e estufa e, posteriormente, saturados. Com esses dois tratamentos procurou-se avaliar a influência do processo de secagem na variação da resistência ao cisalhamento do solo. O solo utilizado foi o residual do granulito-gnaiss, de predominância argilosa, de vasta ocorrência na cidade de Salvador. Para a definição da resistência ao cisalhamento do solo nos dois tratamentos, foram realizados ensaios triaxiais, do tipo consolidado e drenado, executados em corpos de prova cilíndricos, compactados na umidade ótima, na energia do Proctor normal, com diâmetro de 5,0 cm e altura de 10,0 cm, aproximadamente. Estes ensaios triaxiais foram realizados em triplicata para cada nível de tensão de confinamento adotado (50, 100, 200 e 400 kPa). Nos resultados dos ensaios triaxiais em triplicata aplicou-se conceitos de probabilidade para a definição de envoltórias de ruptura com níveis de confiança de 95%. Com essa metodologia foi possível definir, para cada envoltória média encontrada, uma faixa provável de ruptura com o nível de confiança adotado e estabelecer a variação da resistência ao cisalhamento do solo em função dos diferentes tratamentos.

PALAVRAS-CHAVE: resistência ao cisalhamento, secagem e umedecimento de solos, métodos semi probabilísticos.

1 INTRODUÇÃO

Os processos de umedecimento e secagem aos quais os solos estão expostos nas obras de engenharia, principalmente nos aterros, proporcionam constantes variações de volume e de tensões dos maciços, com consequente mudanças no comportamento mecânico dos solos.

No processo de secagem do solo, até um certo ponto, o volume da amostra decresce na medida em que perde água, mantendo-se

saturada. Em umidades menores a amostra não é mais saturada, porém a tensão capilar continua crescendo. Daí por diante um decréscimo de volume insignificante corresponde a um aumento considerável de resistência, pois os grãos já atingiram proximidade entre si de ordem a que a ligação entre eles seja efetivada pelo potencial atrativo das partículas coloidais. Daí o aparecimento da resistência seca das argilas submetidas ao processo de secamento, a qual é uma medida da força atrativa dos colóides presentes no solo (Vargas, 1977).

Machado e Vilar (2003) realizaram ensaios de consolidação isotrópica em amostras saturadas e não saturadas com sucções de 100 e 200 kPa. Conforme relatado pelos autores, os resultados experimentais demonstraram um considerável aumento da tensão de pré adensamento em função dos níveis de sucção impostos ao solo.

Define-se intervalo de confiança aquele baseado em observações de uma amostra e construído de modo que haja uma probabilidade específica de o verdadeiro valor desconhecido de um parâmetro estar contido nesse intervalo. Nível de confiança é a probabilidade de o intervalo conter o verdadeiro valor do parâmetro (Andriotti, 2005).

Este trabalho objetiva estudar as variações de resistência ao cisalhamento experimentadas por um solo residual compactado na umidade ótima, quando saturado com e sem secagem prévia.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Ensaios de Caracterização do Solo

O solo utilizado foi coletado nos fundos da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, sendo de vasta ocorrência na cidade de Salvador e foi submetido a caracterizações Geotécnica, Física e Química.

2.1.1 Preparação das amostras e Caracterização Geotécnica

O solo foi submetido aos ensaios de Granulometria conjunta (NBR 7181/ABNT-1984), Limite de liquidez (NBR 6459/ABNT-1984), Limite de plasticidade (NBR 7180/ABNT-1984) e Massa específica dos sólidos (NBR 6508/ABNT-1984).

Todos os ensaios de curva de retenção de água e de compressão triaxial foram executados com corpos de prova compactados. Para tanto, foi realizado o ensaio convencional de compactação, na energia do proctor normal, de acordo com a norma NBR 7182/ABNT – 1986, o qual definiu os parâmetros a serem reproduzidos nos corpos de prova compactados para o programa experimental ($\gamma_{dm\acute{a}x}$ e w_{ot}). Os

corpos de prova foram compactados com base nesses parâmetros e com dimensões de 5,0 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Vale ressaltar que para os ensaios de curva de retenção os corpos de prova tiveram seu tamanho reduzido após a compactação, sendo que cada CP de 10 cm de altura foi transformado em três CPs de aproximadamente 30 mm.

2.1.2 Caracterização Física

Os ensaios de medição da superfície específica e volume de poros do solo foram realizados no Laboratório de Catálise do Instituto de Química da UFBA, utilizando-se um aparelho Micromeritics ASAP 2020, conforme a Figura 1, com a técnica de fisissorção de N_2 , método B.E.T. (Brunnauer *et al.*, 1938), na qual as amostras foram pré-tratadas a 300°C, por 12h, sob vácuo (≈ 267 Pa), com a finalidade de limpar a superfície das amostras, removendo água e quaisquer outras substâncias fisissorvidas.

Para avaliar os efeitos da textura nos valores de superfície específica e volume de poros foram realizados ensaios com quatro diferentes amostras: 1) passando na peneira nº 10 e retida na peneira nº 16; 2) passando na peneira nº 80; 3) passando na peneira nº 200; e 4) argila pura obtida num processo de sedimentação.



Figura 1 - Equipamento para ensaio de superfície específica (B.E.T.).

2.1.3 Caracterização Química

O ensaio de composição química do solo foi feito no Laboratório de Catálise do Instituto de

Química da UFBA, no qual utilizou-se a técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X por dispersão de energia (EDX). Para isso, foi utilizado um equipamento, EDX-720 Shimadzu, conforme a Figura 2, com fonte de radiação de ródio operando a 15 kV (Na a Sc) ou 50 kV (Ti a U), e fenda colimadora de 10 mm. As amostras foram analisadas na forma de pó em suportes de polipropileno com diâmetro de 5 mm, vedados com filme de polipropileno de 5 µm de espessura. Os espectros de fluorescência de raios-X foram coletados sob vácuo.

O ensaio foi realizado em uma mesma batelada em dezesseis amostras retiradas de um corpo de prova compactado, sendo quatro do topo, quatro da base e oito da porção média.



Figura 2 - Espectrômetro de fluorescência de raios-X por energia dispersiva.

Para auxiliar na caracterização química do solo estudado as amostras foram avaliadas para os seguintes atributos químicos: pH em água e em KCl (relação solo:solução de 1:2,5); cátions trocáveis Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} , por titulação após extração com solução de 1 mol L^{-1} KCl; Na^{+} e K^{+} por fotometria de chama, após extração com Mehlich-1; H^{+}Al extraídos com acetato de cálcio 0,5 mol L^{-1} a pH 7,0 e determinado com NaOH 0,025 mol L^{-1} . Baseado nestes dados e no teor de argila do solo foram calculados a capacidade de troca de cátions (CTC), pela soma do resultado de bases trocáveis ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$) e acidez (H^{+}Al); o valor de ΔpH ($\text{pHKCl} - \text{pHH}_2\text{O}$) e da atividade da argila (T), referente à capacidade de troca de cátions correspondente à fração argila, calculada pela Equação 1. Estes

cálculos serviram de base para um melhor entendimento das características do argilomineral presente no solo estudado. Além disso, foram avaliados os teores de óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , presentes na fração argila do solo, determinados por meio de digestão sulfúrica. A partir destes teores foi possível calcular as relações moleculares K_i e K_r , que são relações entre os óxidos, os quais podem indicar a presença de determinados argilominerais presentes no solo, conforme Embrapa (2013), através das Equações 2 e 3.

$$T = \frac{\text{CTC} \cdot 100}{\text{teor de argila} (\%)} \quad (1)$$

$$K_i = 1,70 \cdot \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3} \quad (2)$$

$$K_r = 1,70 \cdot \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + (\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 0,6375)} \quad (3)$$

2.2 Curva de Retenção de Água no Solo

Para a definição da curva de retenção de água no solo utilizou-se a técnica do papel filtro para altos valores de sucção e as técnicas do tensiômetro e da placa de pressão (câmara de Richards) para determinação de sucções até 70 kPa e 400 kPa, respectivamente. Para avaliar o efeito da histerese foram realizados ensaios com a técnica do papel filtro com contato, por secagem e umedecimento dos CPs.

Para ajuste dos pontos da curva de retenção foi utilizado o modelo proposto por Fredlund e Xing (1994), conforme Equação 4, em que θ_r é o teor de umidade volumétrico residual, θ_{sat} é o teor de umidade volumétrico de saturação, ψ é a sucção, ψ_r é sucção correspondente à umidade volumétrica residual e a, n e m são constantes empíricas.

$$\theta = \theta_r \left[\frac{1 - \ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\ln\left(e + \frac{\psi^n}{a}\right)} \right]^m \quad (4)$$

2.3 Ensaios Triaxiais

Todos os ensaios triaxiais executados foram do tipo consolidado isotropicamente e drenado, em corpos de prova saturados com água. Foram realizados ensaios triaxiais do tipo deformação controlada e tensão controlada.

No experimento foram adotados dois tratamentos. No primeiro os corpos de prova, após compactados na umidade ótima, foram levados para a câmara triaxial e submetidos a saturação por contrapressão, sem secagem prévia. Cada CP foi mantido nessa fase por cinco dias, em média. Após a fase de consolidação, os corpos de prova foram submetidos à fase de cisalhamento numa prensa de deformação controlada, com taxa de deslocamento axial de 0,05 mm/min.

No segundo tratamento os corpos de prova, após compactados na umidade ótima, foram submetidos ao processo de secagem ao ar por cinco dias e mais dois dias na estufa a 60°C. Posteriormente foram levados para a câmara triaxial e submetidos a saturação por contrapressão, também por cinco dias. Após a fase de consolidação, os corpos de prova foram submetidos à fase de cisalhamento em uma prensa de tensão controlada, em função de quebra da primeira prensa, com taxa de carregamento entre 5 e 9 kPa/min, de forma que a duração mínima dessa fase fosse de 120 min.

Os ensaios triaxiais foram realizados com tensões de confinamento de 50, 100, 200 e 400 kPa. Para cada tensão de confinamento adotada realizou-se ensaios em triplicata e a envoltória média de resistência ao cisalhamento do solo nessa condição de saturação foi definida utilizando os doze ensaios realizados.

Os valores de resistência obtidos em triplicata, nos dois tratamentos, foram utilizados no ajuste da envoltória média de resistência e na obtenção do desvio padrão (σ_τ) dos valores em torno do valor ajustado. Desta forma foi possível obter, para um nível de confiança de 95%, uma região provável de resistência ao cisalhamento do solo. Sendo assim, para cada grupo de envoltórias, determinou-se um valor máximo (média + 1,96 x σ_τ) e um valor mínimo (média - 1,96 x σ_τ). Para obtenção das envoltórias máxima e mínima considerou-se

que a variação na resistência se dá, estritamente, na coesão, mantendo-se, portanto, o ângulo de atrito constante.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização Geotécnica

Os resultados dos ensaios de caracterização, englobando granulometria conjunta, composto pelas fases de peneiramento e sedimentação, limites de consistência (W_L , W_P e IP), compactação ($\gamma_{dm\acute{a}x}$ e W_{ot}), massa específica dos sólidos, além dos parâmetros obtidos dos corpos de prova compactados na umidade ótima (índice de vazios e porosidade), estão apresentados nas Tabelas 1 a 3.

Tabela 1. Granulometria Conjunta.

Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
26	18	56

Tabela 2. Limites de Consistência do Solo.

W_L (%)	W_P (%)	IP (%)
77,8	41,6	36,2

Tabela 3. Compactação e Demais Índices Físicos.

Compactação		γ_s	e	n
$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	W_{ot} (%)	(g/cm ³)		
1,334	31,8	2,704	1,03	0,51

Do ensaio de granulometria conjunta, cujos resultados são apresentados na Tabela 1 é possível observar que o granulito-gnaiss é caracterizado como um solo de predominância argilosa, com 74% passando na #200 (silte + argila), com abertura de 0,074 mm. Essa predominância da parcela fina confere ao solo elevados valores de W_L e W_P , conforme apresentado na Tabela 2. Dos resultados de granulometria e índices físicos é possível definir o Índice de Atividade de Skempton (IAS), definido por Skempton (1953), que relaciona o índice de plasticidade (IP) e a fração argila do solo através da Equação 5.

$$IAs = \frac{IP}{\% \text{ fração argila}} \quad (5)$$

Este índice classifica a atividade do solo como inativa ($IAs < 0,75$), normal ($0,75 < IAs < 1,25$) e ativa ($IAs > 1,25$). Considerando-se o percentual da fração argila e o IP das Tabelas 1 e 2, o solo do presente trabalho possui um IAs de 0,65 sendo, portanto, classificado como inativo.

3.2 Caracterização Física

Os resultados dos ensaios de medição da superfície específica (SE) e volume de poros do solo (VP) estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Superfície Específica e Volume de Poros.

Material	SE (m ² /g)	VP (cm ³ /g)
Passa na #10 e Retido na #16	44,22	0,197
Passa na #80	50,85	0,240
Passa na #200	71,99	0,342
Argila	83,74	0,420

Os resultados de superfície específica do solo, em suas diversas frações, indicam a presença de caulinita ou ilita na fração argila.

3.3 Caracterização Química

Os principais compostos químicos (base óxido) presentes no solo, obtidos utilizando-se a técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X por dispersão de energia (EDX), estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Composição Química do Solo.

Composto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
(%)	48,623	39,213	10,978

Os resultados da medição do pH base H₂O e base KCl, ΔpH, Capacidade de Troca Catiônica do solo (CTC) e atividade da fração argila (T) estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Valores de pH e CTC.

pH (H ₂ O)	pH (KCl)	ΔpH	CTC cmol _c /kg	T cmol _c /kg
5,93	5,89	-0,04	2,89	5,16

O valor de ΔpH negativo, associado a baixa CTC (2,89 cmol_c/kg) e a baixa atividade de argila (5,16 cmol_c/kg) encontrados, sugerem que o solo estudado apresenta mineralogia caulinitica. De acordo com Embrapa (2013) solos com valor T menores que 8 cmol_c/kg são classificados como de atividade muito baixa. Estes resultados encontram-se coerentes com o valor de IAs obtido anteriormente.

Os resultados do ensaio de ataque sulfúrico estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados do ensaio de Ataque Sulfúrico.

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Ki	Kr
14,10	13,76	7,56	1,74	1,29

Com base nos resultados da Tabela 7, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2013), como os valores das relações moleculares Ki e Kr são maiores que 0,75 (Equações 2 e 3), trata-se de um solo caulinitico. Como o Ki da caulinita é igual a 2, o fato do Ki encontrado estar abaixo desse valor indica que trata-se de um solo bastante intemperizado.

3.4 Curva de Retenção de Água no Solo

As curvas de retenção de água no solo, obtidas com a técnica do papel filtro, por umedecimento e secagem, juntamente com o tensiômetro e a placa de pressão estão apresentadas na Figura 3. Os pontos encontrados foram ajustados através da equação proposta por Fredlund e Xing (1994), com destaque para o fenômeno da histerese.

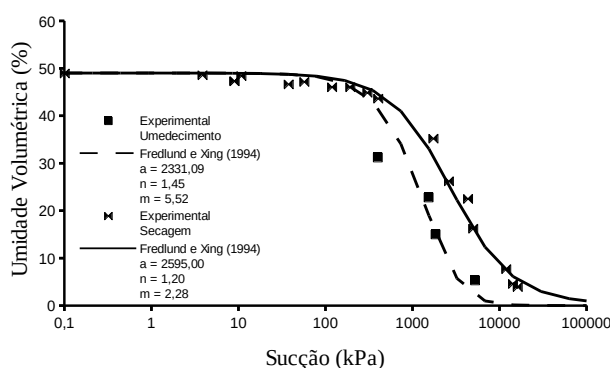


Figura 3 – Curva de retenção de água no solo com ajuste de Fredlund e Xing (1994).

3.5 Ensaios Triaxiais

3.5.1 Ensaios triaxiais saturados sem secagem prévia

Nas Figuras 4 a 7 são apresentadas as curvas tensão deformação, em triplicata, para as tensões de confinamento de 50, 100, 200 e 400 kPa, em triplicata. Na Figura 8 é apresentada a envoltória média para esses ensaios.

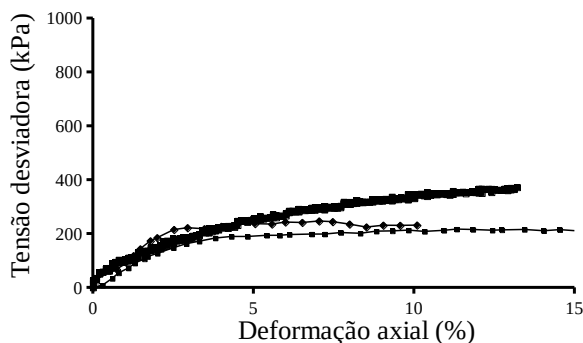


Figura 4 – Curvas tensão/deformação sem secagem prévia dos CPs e confinante de 50 kPa.

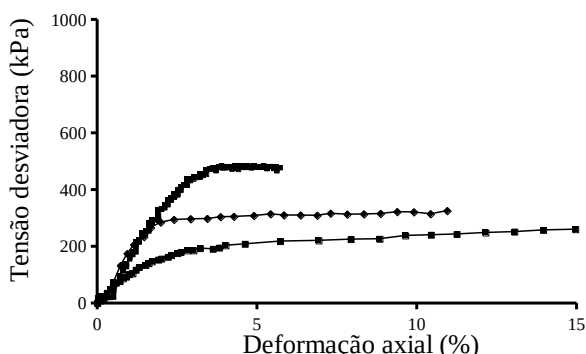


Figura 5 – Curvas tensão/deformação sem secagem prévia dos CPs e confinante de 100 kPa.

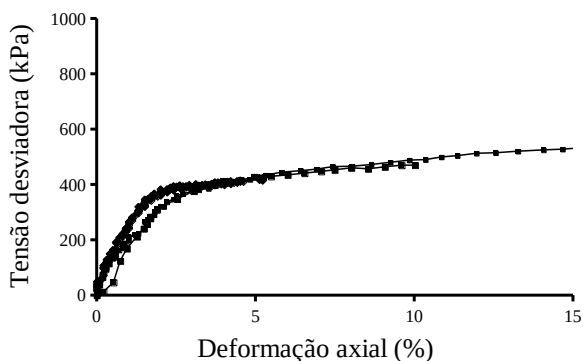


Figura 6 – Curvas tensão/deformação sem secagem prévia dos CPs e confinante de 200 kPa.

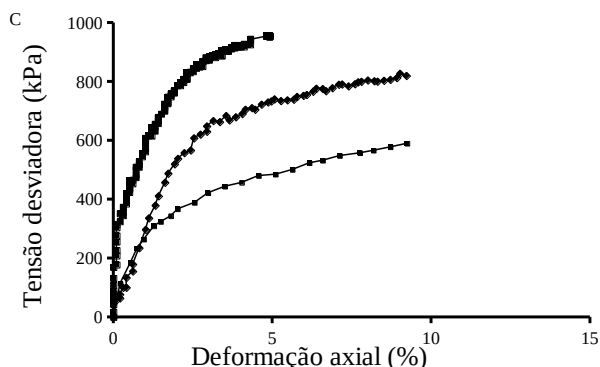


Figura 7 – Curvas tensão/deformação sem secagem prévia dos CPs e confinante de 400 kPa.

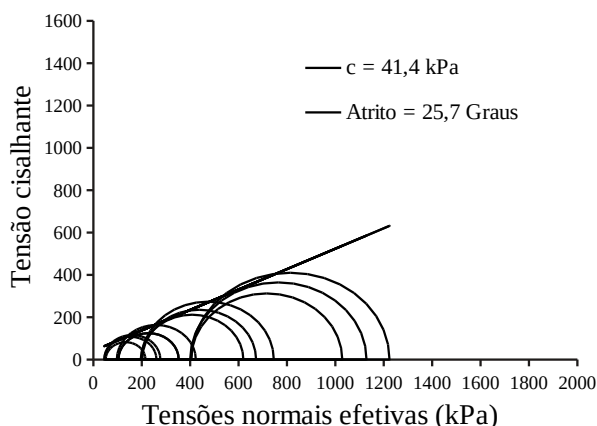


Figura 8 – Envoltória média de resistência do solo saturado sem secagem prévia dos CPs.

Na Tabela 8 são apresentados os valores médios de coesão e ângulo de atrito obtidos do ajuste da envoltória média, no tratamento sem secagem, bem como o desvio padrão da resistência ao cisalhamento do solo ($\sigma\tau$).

Tabela 8. Parâmetros de resistência do solo.

Tratamento	c_m (kPa)	ϕ_m (°)	$\sigma\tau$ (kPa)
Sem secagem	41,40	25,70	18,49

Com base nos parâmetros apresentados na Tabela 8 é possível definir, com 95% de nível de confiança, a faixa de ruptura para o solo, com os respectivos limites inferior e superior de resistência ao cisalhamento, conforme apresentado na Figura 9.

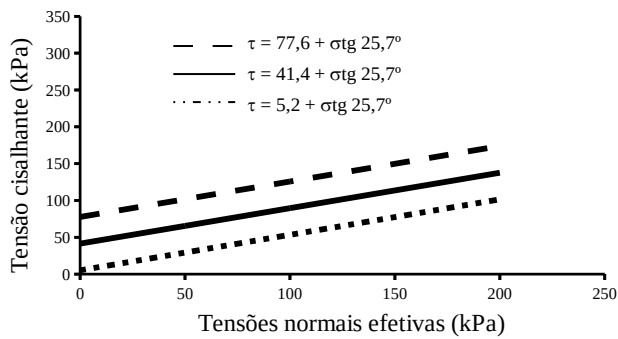


Figura 9 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo saturado sem secagem prévia dos CPs.

3.5.2 Ensaios triaxiais saturados com secagem prévia

Nas Figuras 10 a 13 são apresentadas as curvas tensão/deformação obtidas do tratamento com secagem para as tensões de confinamento de 50, 100, 200 e 400 kPa, em triplicata. Na Figura 14 é apresentada a envoltória média para esses ensaios.

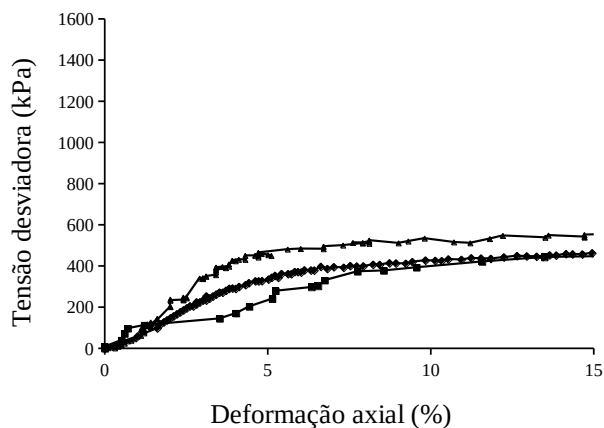


Figura 10 – Curvas tensão/deformação com secagem prévia dos CPs e confinante de 50 kPa.

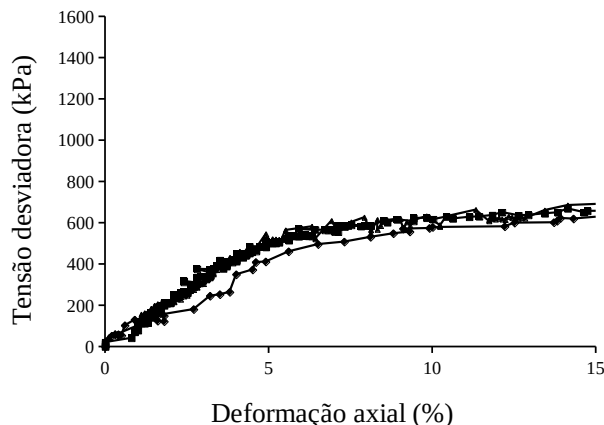


Figura 11 – Curvas tensão/deformação com secagem prévia dos CPs e confinante de 100 kPa.

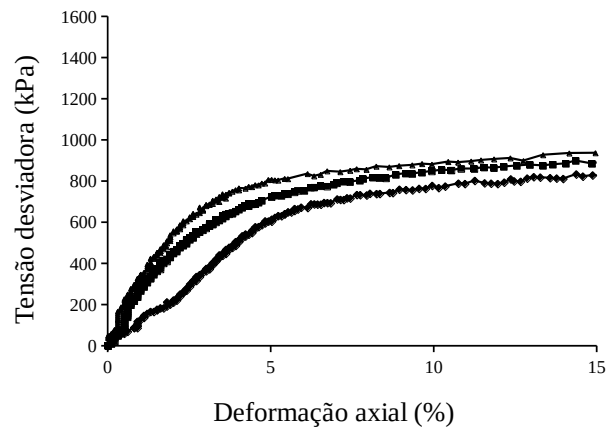


Figura 12 – Curvas tensão/deformação com secagem prévia dos CPs e confinante de 200 kPa.

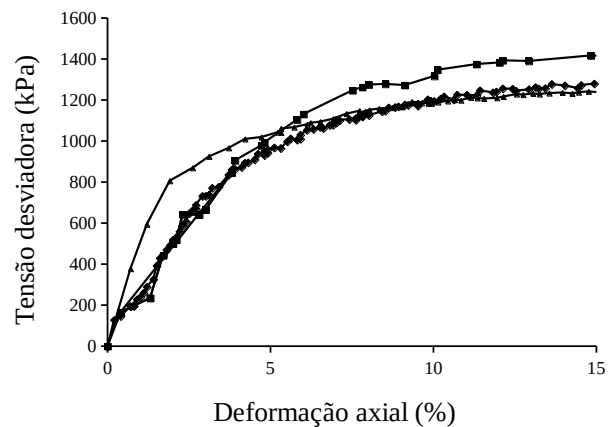


Figura 13 – Curvas tensão/deformação com secagem prévia dos CPs e confinante de 400 kPa.

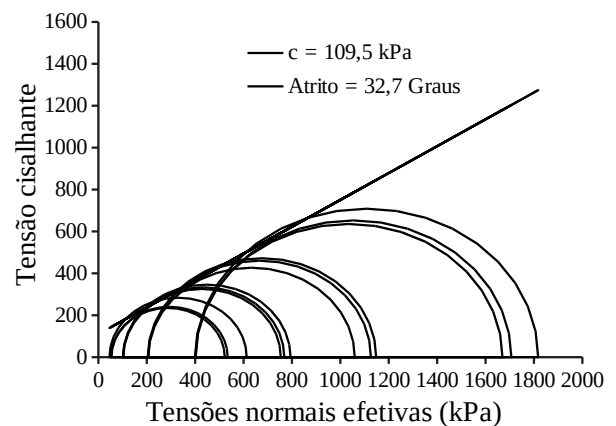


Figura 14 – Envoltória média de resistência do solo saturado com secagem prévia dos CPs.

Na Tabela 9 são apresentados os valores médios de coesão e ângulo de atrito obtidos do ajuste da envoltória média, no tratamento com secagem, bem como o desvio padrão da resistência ao cisalhamento do solo ($\sigma\tau$).

Tabela 9. Parâmetros de resistência do solo.

Tratamento	cm (kPa)	ϕ_m (°)	σ_τ (kPa)
Com secagem	109,50	32,70	12,52

De acordo com os dados da Tabela 9 é possível definir, através da Figura 15, a envoltória média de resistência ao cisalhamento do solo e sua faixa de ruptura, estabelecida considerando o nível de confiança de 95%, para o tratamento com secagem prévia dos CPs.

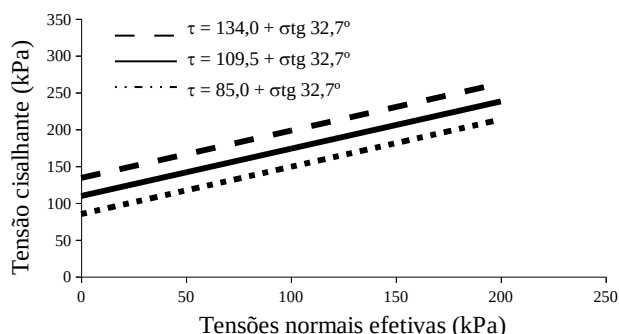


Figura 15 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo saturado com secagem prévia dos CPs.

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 9 e 15 é possível comparar, portanto, com 95% de nível de confiança, as faixas de ruptura de cada tratamento e definir a variação de resistência entre ambos através da Figura 16.

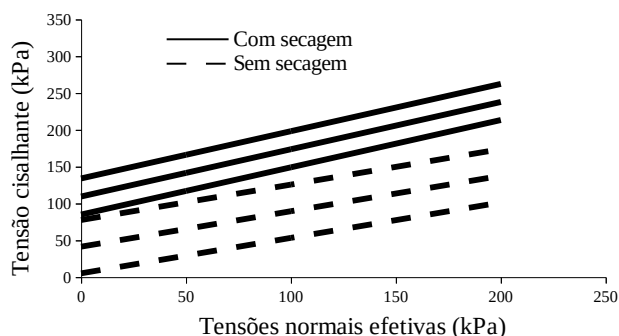


Figura 16 – Faixas de resistência ao cisalhamento do solo saturado para os dois tratamentos.

4 CONCLUSÕES

Da mesma forma que os valores da curva de retenção de água no solo são influenciados pelos processos de secagem e umedecimento do material, os resultados apresentados indicam, com 95% de nível de confiança, que a

resistência ao cisalhamento do solo também apresentou tal sensibilidade. Um dos motivos para ocorrência desse fenômeno pode estar associado ao fato das tensões (de sucção) experimentadas pelo solo no processo de secagem, descritas por Vargas (1977), imporem ao solo um pré adensamento, o qual, ao ser novamente saturado, traz consigo esse histórico, conforme relatado por Machado e Vilar (2003), apresentando um novo patamar de resistência ao cisalhamento quando novamente saturado.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *Solo – Análise granulométrica*. (NBR-7181).
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *Solo – Determinação do limite de liquidez*. (NBR-6459).
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *Solo – Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm - Determinação da massa específica*. (NBR-6508).
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. (NBR-7180).
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986) *Solo – Ensaio de compactação*. (NBR-7182).
- Andriotti, J. L. S. (2005) *Técnicas estatísticas aplicáveis a tratamento de informações oriundas de procedimentos laboratoriais*. CPRM, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 41p.
- Brunnauer, S., Emmett, P. H., Teller, E. (1938) Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, v. 60, p. 309-316.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Solos (2013) *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 3.ed. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 353p.
- Fredlund, D. G. e Xing, A. (1994) Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 15, número 3, p. 521-532.
- Skempton, A.W. (1953) The colloidal “Activity” of clays. *Proceedings of the 3rd International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. (1) 57-60.
- Vargas, M. (1977) *Introdução à Mecânica dos Solos*, McGraw Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 509 p.
- Machado, S. L. e Vilar, O. M. (2003) Geotechnical characteristics of an unsaturated soil deposit at São Carlos, Brazil, Tan et al. (eds), *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Ed. Swets & Zeitlinger Publishers, Lisse, Netherlands, vol. 2, p. 1305-1321.