

Aplicação do modelo proposto por Khalili e Khabbaz (1998) na previsão da resistência ao cisalhamento em função da sucção de solos tropicais do Brasil

Luana Lenzi Pecapedra

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, luanalenzipecapedra@hotmail.com

Orlando Martini de Oliveira

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, oliveira.orlando@ufsc.br

RESUMO: O estudo e a aplicação da mecânica dos solos não saturados na engenharia se deparam com a complexidade para determinar experimentalmente parâmetros geotécnicos dos solos nessa condição. Em função disso, pesquisadores têm sugerido modelos matemáticos para interpretação do comportamento da resistência desses solos, sem a necessidade de realizar ensaios que demandam tempo e possuem custo elevado. Com esse propósito, é possível citar o modelo de Khalili e Khabbaz (1998), que possui como dados de entrada o valor de entrada de ar, definido a partir da curva de retenção de água dos solos, e os seus parâmetros efetivos, obtidos de ensaios triaxiais ou cisalhamento direto na condição saturada. Pesquisas já indicaram para o modelo em estudo a sua sensibilidade ao valor da sucção de entrada de ar (e.g., Oliveira e Marinho, 2003; Oliveira, 2004; Georgetti, 2010). Com o objetivo de verificar a influência da estrutura dos solos, relacionada à compactação em diferentes condições de moldagem, na relação entre a resistência ao cisalhamento e a sucção, este trabalho estuda o comportamento do solo residual de gnaiss, granito e diabásio compactados em três diferentes condições de moldagem da curva de compactação (ramo seco, umidade ótima e ramo úmido). O estudo se baseia em ensaios de compressão simples para a determinação da resistência não saturada, com a sucção inicial dos corpos de prova determinada utilizando a técnica do papel filtro. Os parâmetros efetivos dos solos na condição saturada, foram determinados em ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais. Nestes dados experimentais é aplicado o modelo de previsão da resistência proposto por Khalili e Khabbaz (1998). Diante dos resultados, é verificada a aplicabilidade desse modelo para os três diferentes solos tropicais estudados na condição compactada e a sensibilidade do parâmetro χ em relação à estrutura do solo e ao teor de umidade de compactação. Para um melhor ajuste do modelo aos dados experimentais dos três solos tropicais brasileiros compactados, é proposto uma modificação na potência da equação que relaciona o parâmetro χ à razão entre a sucção matricial e a sucção de entrada de ar.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Não Saturados, Previsão da Resistência, Resistência ao Cisalhamento, Solo Compactado, Condições de Moldagem.

1 INTRODUÇÃO

O estudo e aplicação da mecânica dos solos não saturados na engenharia se depara com a complexidade para se determinar experimentalmente os parâmetros geotécnicos dos solos nessa condição. É em função do elevado tempo necessário para a obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de

solos não saturados, que pesquisas exploram modelos que possam representar o comportamento desses solos a partir de dados de entrada facilmente obtidos em ensaios laboratoriais ou de campo.

Inúmeros autores têm proposto equações para representar a resistência ao cisalhamento do solo não saturado relacionadas a curva de retenção de água nos solos, parâmetros de

resistência na condição saturada, classificação do solo, até mesmo com base na resistência do solo na sucção residual (e.g., Vanapalli et al., 1996; Fredlund et al., 1996; Öberg e Sällfors, 1997; Khalili e Khabbaz, 1998; Bao et al., 1998, Vilar, 2006; Goh et al., 2010).

O modelo proposto por Khalili e Khabbaz (1998), foco deste artigo, se baseia apenas em dados dos parâmetros efetivos do solo e da curva de retenção. A partir desses dados, autores como Martinez (2003), Oliveira (2004) Georgetti (2010) e Pecapedra (2016), estudando solos tropicais brasileiros, identificaram a possibilidade de propor um melhor ajuste do método para esses solos.

Com essa finalidade, o comportamento do modelo de Khalili e Khabbaz (1998) para previsão da resistência de solos não saturados para solos tropicais brasileiros foi analisado neste artigo. Foram analisados os resultados obtidos por Pecapedra (2016) e Oliveira (2004) que estudaram solos residuais de diabásio, granito e gnaiss compactados em diferentes teores de umidade da curva de compactação (i.e., ramo seco, umidade ótima e ramo úmido), são estudados.

2 MODELO PROPOSTO POR KHALILI E KHABBAZ (1998)

O modelo proposto por Khalili e Khabbaz (1998), tem como base a equação de tensões efetivas em solos na condição não saturada proposta por Bishop (1959). Expressando a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado em função da sucção segundo a equação 1.

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)]. \tan \phi' \quad (1)$$

Onde, τ é a resistência ao cisalhamento, c' é a coesão efetiva, ϕ' é o ângulo de atrito efetivo, $(\sigma - u_a)$ é a tensão normal líquida, $(u_a - u_w)$ é a sucção e χ é o parâmetro de tensão efetiva. Com isso, o modelo se fundamenta em prever a resistência ao cisalhamento em função da sucção utilizando o parâmetro χ , definido em função da sucção e sucção de entrada de ar $(u_a - u_w)_b$, como indicado na equação 2.

$$\chi = \left[\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right]^{-0,55} \quad (2)$$

Para essa determinação, os autores analisaram 14 casos publicados na literatura e determinaram a relação entre a sucção e a sucção de entrada de ar (i.e., sucção normalizada), como uma potência a um expoente de -0,55, com um erro de 10% e correlação igual a 0,94.

Visando identificar o comportamento do modelo de Khalili e Khabbaz (1998) para três solos tropicais brasileiros, residual de diabásio, granito e gnaiss, uma relação entre o parâmetro χ e a sucção normalizada é determinada.

3 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS ESTUDADOS

Os solos estudados neste artigo são os solos residuais de diabásio, granito e gnaiss. Os solos residuais de diabásio e granito estão localizados no município de Florianópolis/SC e são decorrentes de um dique de diabásio encaixado no granito Ilha. O solo residual de gnaiss é de um sítio experimental da Universidade de São Paulo, localizado em São Paulo/SP. A Tabela 1 apresenta as características dos solos estudados.

Tabela 1. Caracterização do solo estudado.

Caracterização	D	GR	GN
Massa específica dos sólidos [g/cm ³]	2,87	2,71	2,71
Índice de Plasticidade [%]	20	31	13
Limite de liquidez [%]	59	68	47
Limite de plasticidade [%]	39	37	34
Areia grossa [%]	5,6	21,3	-
Areia média [%]	15,8	10,4	6,0
Areia fina [%]	23,1	9,0	28,0
Silte [%]	34,8	13,6	46,0
Argila [%]	20,6	45,8	20,0

* D – solo residual de diabásio; GR – solo residual de granito; GN – solo residual de gnaiss.

Os solos estudados são passantes na peneira #10 (i.e., com maior diâmetro da partícula igual a 2,00 mm), compactados no ramo seco, na

umidade ótima e no ramo úmido da curva de compactação, determinada com a energia Proctor Normal. A Tabela 2 apresenta os dados das condições de moldagem dos solos, também indicados na Figura 1, que apresenta as curvas de compactação.

Tabela 2. Condição de moldagem dos solos estudados

Solo	Condição de moldagem	w [%]	ρ_d [g/cm ³]
Diabásio	ramo seco	23,5	1,46
	ótima	28,5	1,49
	ramo úmido	31,5	1,46
Granito	ramo seco	19,3	1,60
	ótima	22,5	1,67
	ramo úmido	24,5	1,60
Gnaisse	ramo seco	17,0	1,48
	ótima	25,3	1,53
	ramo úmido	28,2	1,48

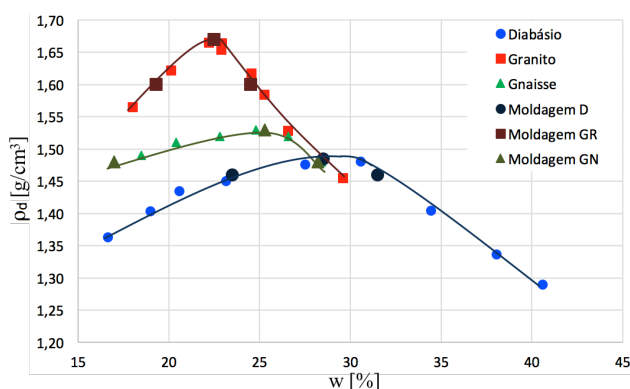


Figura 1. Curvas de compactação e condição de moldagem no ramo seco, umidade ótima e ramo úmido para os solos estudados.

Três aspectos podem ser observados em relação à forma das curvas de compactação: a declividade dos ramos secos e úmidos, o teor de umidade ótima e a máxima densidade seca.

Os solos siltsosos apresentam valores baixos de densidades, teor de umidade ótimo alto e curvas bem abatidas, como é o caso observado nos solos residuais de gnaisse e diabásio estudados.

Por outro lado, solos argilosos apresentam teor de umidade alto e máxima densidade seca superior aos solos mais siltsosos. A declividade dos ramos seco e úmido mais íngreme indica um comportamento mais laterítico, como observado pelo solo residual de granito estudado.

4 CURVA DE RETENÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS

As curvas de retenção dos solos estudados foram obtidas utilizando o método do papel filtro. Os solos estudados foram moldados, posteriormente foram saturados por aspersão de água, e então, utilizada a técnica do papel filtro para a determinação do grau de saturação em função da sucção.

A técnica consiste em colocar o papel filtro em contato com o solo e aguardar que a sucção entre os dois (solo e papel filtro) entre em equilíbrio. Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), o período para que o equilíbrio ocorra é de no mínimo 7 dias.

Para a determinação das curvas de retenção do solo residual de gnaisse, foi utilizado a placa de sucção para valores de sucções entre 1 kPa e 30 kPa, seguindo placa de pressão para valores de sucções entre 30 kPa e 400 kPa e o método do papel filtro para valores de sucções acima de 400 kPa. A determinação das curvas de retenção dos solos residuais de granito e diabásio utilizou-se apenas o método do papel filtro.

As Figuras 2, 3 e 4, apresentam os dados experimentais da curva de retenção para os solos residuais de diabásio, granito e gnaisse, respectivamente.

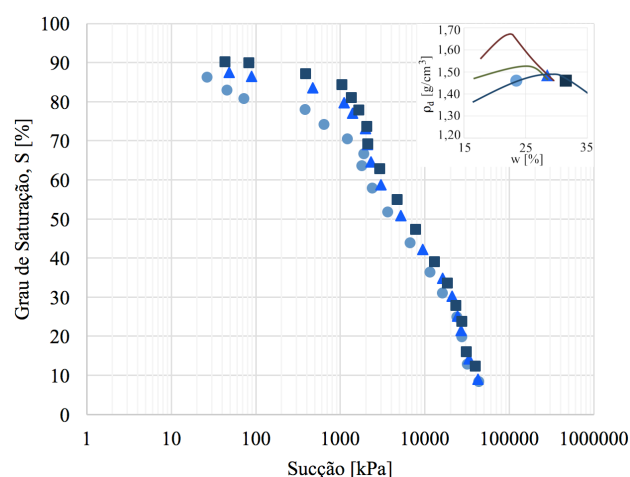


Figura 2. Curvas de retenção do solo residual de diabásio moldado no ramo seco, umidade ótima e ramo úmido.

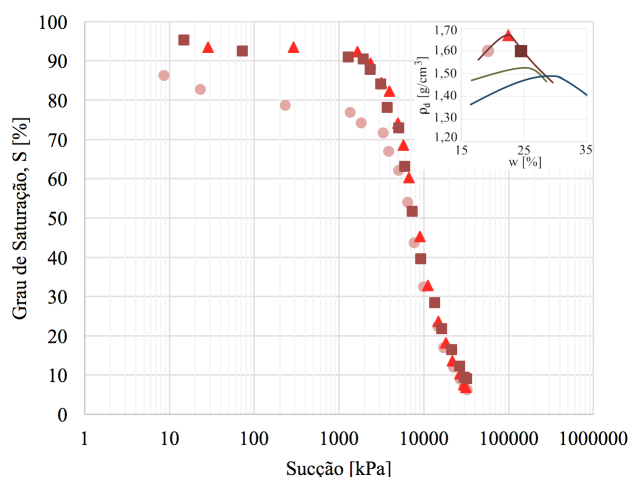


Figura 3. Curvas de retenção do solo residual de granito moldado no ramo seco, umidade ótima e ramo úmido.

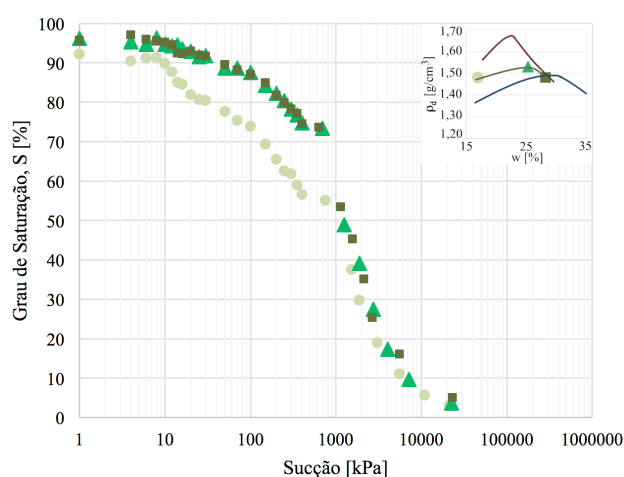


Figura 4. Curvas de retenção do solo residual de gnaiss moldado no ramo seco, umidade ótima e ramo úmido.

Das curvas de retenção, foi obtido o parâmetro da sucção de entrada de ar no início da dessaturação do corpo de prova, para aplicação do modelo de Khalili e Khabbaz (1998). A Tabela 3 apresenta esses valores para os solos residuais de diabásio, granito e gnaiss nas diferentes condições de moldagem estudadas. Cabe salientar que não se trata da sucção generalizada de entrada de ar obtida graficamente conforme os procedimentos propostos por Fredlund e Xing (1994), mas de uma observação do momento em que os pontos experimentais da curva de retenção indicam que está ocorrendo o início da entrada de ar na estrutura do solo, que pode ser aqui definido como ponto de início da dessaturação.

Tabela 3. Valores de sucção de entrada de ar no início da dessaturação do corpo de prova

Solo	Condição de moldagem	$(u_a - u_w)_b$
Diabásio	ramo seco	20
	ótima	25
	ramo úmido	30
Granito	ramo seco	15
	ótima	35
	ramo úmido	40
Gnaiss	ramo seco	14
	ótima	56
	ramo úmido	63

5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Com a finalidade de estudar o comportamento da resistência ao cisalhamento e a sucção, aplicando o modelo de previsão da resistência ao cisalhamento proposto por Khalili e Khabbaz (1998), esta pesquisa tem como base os resultados de ensaios de compressão simples realizados com corpos de prova na condição não saturada, e ensaios de cisalhamento direto, para os solos residuais de granito e diabásio, e ensaios triaxiais, para o solo residual de gnaiss, para a determinação dos parâmetros efetivos do solo.

Os corpos de prova para os ensaios de compressão simples, foram moldados nas diferentes condições, submetidos ao umedecimento, por aspersão de água, ou secagem, expondo-os ao ar. Após esta etapa de preparação, a sucção inicial dos corpos de prova foi determinada com o emprego da técnica do papel filtro.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros efetivos dos solos residuais de diabásio, granito e gnaiss, moldados no ramo seco, na umidade ótima e no ramo úmido.

Tabela 4. Parâmetros efetivos dos solos estudados.

Solo	Condição de moldagem	c' [kPa]	ϕ' [°]
Diabásio	ramo seco	12	35
	ótima	10	35
	ramo úmido	7	35
Granito	ramo seco	11	32
	ótima	13	33
	ramo úmido	11	32
Gnaiss	ramo seco	5	34
	ótima	12	32
	ramo úmido	9	32

6 APLICAÇÃO DO MODELO DE KHALILI E KHABBAZ (1998)

O modelo de Khalili e Khabbaz (1998) foi aplicado para os interceptos de coesão obtidos pela projeção dos pontos experimentais no plano dado pela resistência ao cisalhamento em função da sucção, supondo que o ângulo de atrito não varia com o aumento da sucção. O estudo se baseia em valores de sucção até 1.000 kPa.

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam o comportamento do modelo de previsão da resistência para os solos residuais de diabásio, granito e gnaiss, respectivamente.

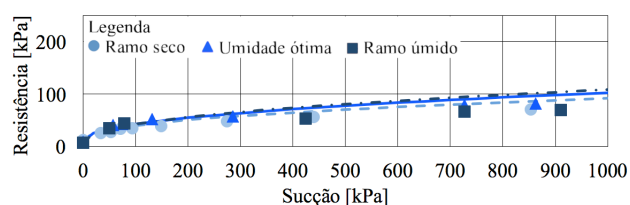


Figura 5. Intercepto de coesão e previsão da resistência do solo residual de diabásio moldado no ramo seco, na umidade ótima e no ramo úmido.

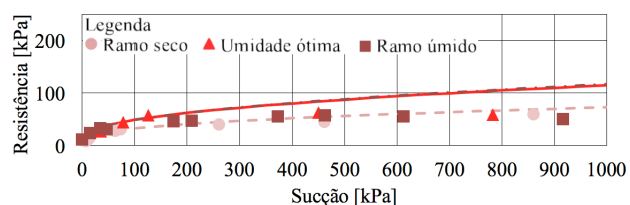


Figura 6. Intercepto de coesão e previsão da resistência do solo residual de granito moldado no ramo seco, na umidade ótima e no ramo úmido.

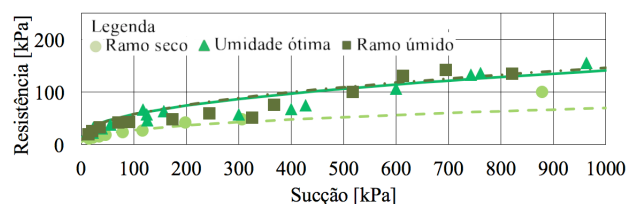


Figura 7. Intercepto de coesão e previsão da resistência do solo residual de gnaiss moldado no ramo seco, na umidade ótima e no ramo úmido.

É possível verificar que a aplicação do modelo de previsão proposto por Khalili e Khabbaz (1998) não se ajusta bem a todos os pontos experimentais. Para verificar a aderências dos dados experimentais com os esperados pela equação proposta por Khalili e Khabbaz (1998), fez-se a análise utilizando a fórmula do chi-quadrado, que consiste no somatório do desvio (valor observado - valor

esperado) ao quadrado dividido pelo valor esperado para cada ponto experimental, dividido pelo número de pontos experimentais de cada solo e condição de moldagem analisados. Com essa análise observou-se a seguinte sequência de melhores ajustes: solo residual de diabásio moldado no ramo ótimo (0,91), seguido dos solos residuais de diabásio (0,97), granito (1,23) e gnaiss (2,08) moldados no ramo seco e solo residual de gnaiss moldado na umidade ótima (2,75). Os solos residuais de gnaiss (3,54), diabásio (4,43) e granito (7,54) moldados no ramo úmido e granito (4,02) moldado na umidade ótima apresentaram uma maior divergência dos dados experimentais com o ajuste proposto por Khalili e Khabbaz (1998). É identificado que a aderência dos pontos experimentais à equação proposta por Khalili e Khabbaz (1998) reduz para valores de sucção superiores a aproximadamente 500 kPa.

Utilizando os dados experimentais, apresentados nas Figuras 5, 6 e 7, e os respectivos parâmetros efetivos, foram obtidas as variações do parâmetro χ em função da sucção normalizada. A Figura 8 apresenta esse comportamento.

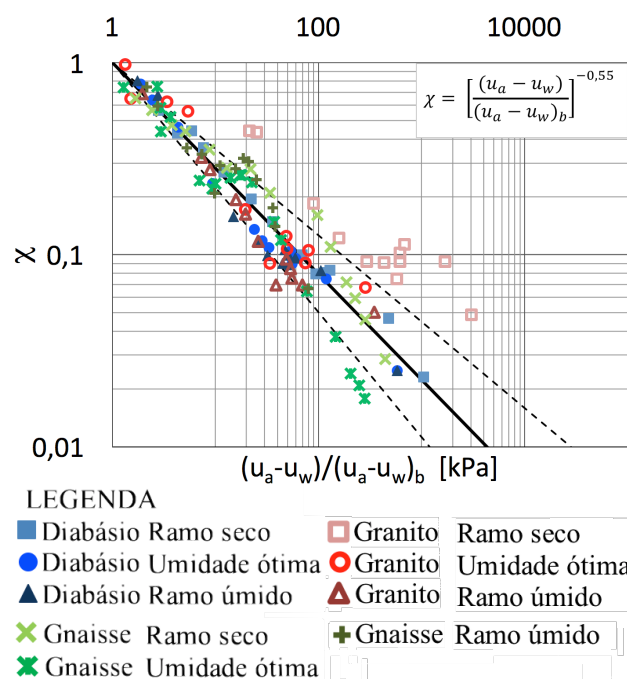


Figura 8. Relação entre o parâmetro χ e a sucção normalizada em relação ao limite de confiança de Khalili e Khabbaz (1998).

Com o gráfico apresentado na Figura 8, é possível verificar que o solo residual de granito moldado no ramo seco se apresenta fora do intervalo de confiança de 10% proposto por Khalili e Khabbaz (1998). Além disso, outros pontos experimentais também se encontram fora desse limite proposto pelos autores.

Com isso, é analisado individualmente e determinada a equação que melhor ajusta os dados experimentais deste trabalho.

7 DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO χ PARA OS SOLOS ESTUDADOS

Diante do comportamento dos solos estudados, é constatada uma sensibilidade da relação do parâmetro χ e a sucção normalizada para a estrutura do solo.

A determinação da equação do parâmetro χ que melhor ajusta aos dados experimentais é determinada para cada solo estudado. Essa determinação é realizada interpolando os pontos experimentais numa equação de potência $y = x^n$, utilizando o *software* Grapher.

As Figuras 9, 10 e 11 apresentam os pontos experimentais de cada tipo de solo estudado e o melhor ajuste obtido pela equação que relaciona o valor de χ com a sucção normalizada (Equação 2). Os pontos experimentais foram determinados dividindo-se a sucção inicial do corpo de prova, determinada com a técnica do papel filtro, pelo valor da sucção correspondente ao início da dessaturação da curva de retenção de água.

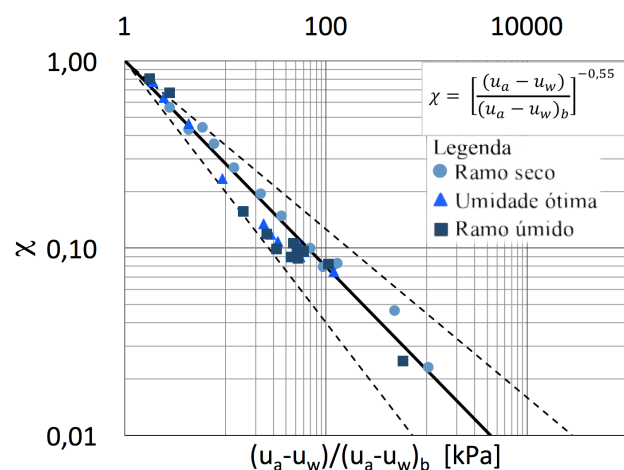


Figura 9. Relação entre o parâmetro χ e a sucção normalizada para os pontos experimentais do solo residual de diabásio.

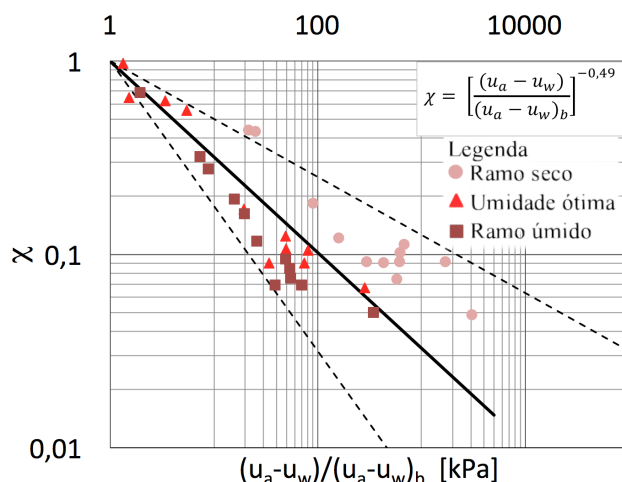


Figura 10. Relação entre o parâmetro χ e a sucção normalizada para os pontos experimentais do solo residual de granito.

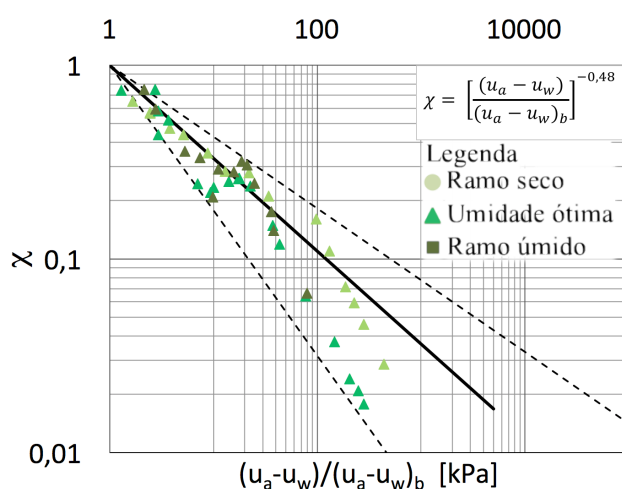


Figura 11. Relação entre o parâmetro χ e a sucção normalizada para os pontos experimentais do solo residual de gnaíse.

Essa análise individual para cada solo, indicou um comportamento diferenciado, em relação ao proposto por Khalili e Khabbaz (1998), para o parâmetro χ em função da sucção normalizada para os solos residuais de granito e gnaíse estudados. Esse comportamento resultou em um expoente para a equação igual a -0,49 e -0,48 para os solos residuais de granito e gnaíse respectivamente.

Analisando o melhor ajuste para os dados experimentais dos diferentes solos estudados juntos, obtêm-se um expoente igual a -0,50, como apresentado na Figura 12.

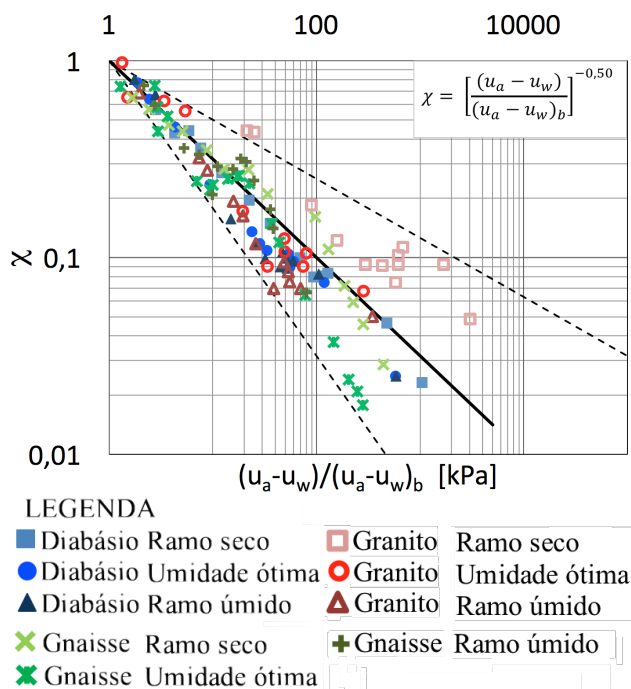


Figura 12. Relação entre o parâmetro χ e a sucção normalizada para os pontos experimentais dos solos estudados.

A relação entre o parâmetro χ e a sucção normalizada que melhor ajusta os dados experimentais dos solos estudados é definida como uma potência de expoente igual a -0,50. Desta forma é possível afirmar que, levando em consideração a sucção inicial dos corpos de prova de três solos tropicais compactados do Brasil, há necessidade de se fazer um pequeno ajuste no modelo proposto por Khalili e Khabbaz (1998).

8 CONCLUSÕES

A análise da relação entre a resistência ao cisalhamento e a sucção inicial, obtida com o papel filtro, de três solos residuais tropicais brasileiros compactados em diferentes condições de moldagem da curva de compactação (ramo seco, umidade ótima e ramo úmido), permitiu identificar:

- o modelo de Khalili e Khabbaz (1998) é aplicável aos solos estudados, apresentado uma razoável previsão da resistência em função da sucção para valores de sucção até 1.000 kPa;
- o parâmetro χ em relação a sucção normalizada para os solos residuais

estudados sugere um comportamento diferente para a equação que o determina;

- a análise permitiu identificar que, para as limitações da pesquisa apresentada neste artigo, que leva em consideração que a sucção não varia durante a etapa de cisalhamento dos corpos de prova e que o ângulo de atrito efetivo não varia em função da sucção, há necessidade de se fazer um ajuste no modelo proposto por Khalili e Khabbaz (1998). A sucção normalizada em função da sucção de entrada de ar deve ser elevada a uma potência igual a -0,50 e não -0,55.
- Deve-se utilizar como valor representativo da sucção de entrada de ar a sucção correspondente ao início da dessaturação e não a sucção de entrada de ar generalizada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da CAPES e CNPq.

REFERÊNCIAS

- BAO, C.; GONG, B.; ZHAN, L. Properties of unsaturated soils and slope stability of expansive soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 1998, Beijing. *Proceedings...* Beijing, 1998, v. 2, p. 71-98.
- BISHOP, A. W. The principle of effective stress. *Teknisk Uke-blad, Norwegian Geotechnical Institute*, 1959, v. 106, n. 39, p. 859-863.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soil*. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, p. 521-532, 1994.
- FREDLUND, D. G.; XING, A.; FREDLUND, M. D.; BARBOUR, S. L. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, n. 33, p. 440-448, 1996.
- GEORGETTI, G. B. *Resistência de um solo não saturado a partir de ensaios com teor de umidade constante (CW)*. 2010, 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

- GOH, S. G.; RAHARDJO, H.; LEONG, E. C. Shear Strength Equations for Unsaturated Soil under Drying and Wetting. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, v. 136, n. 4, p. 594-606.
- KHALILI, N.; KHABBAZ, M. H. A Unique Relationship for χ for the Determination of the Shear Strength of Unsaturated Soils. *Géotechnique*, 1998. v. 48, n. 5, p. 681-687.
- MARTINEZ, G. S. e S. *Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Lateríticos da Formação Barreiras*. 2003. 291 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- ÖBERG, A. L.; SÄLLFORS, G. Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sands based on the water retention curve. *Geotechnical Testing Journal*, v. 20, n. 1, p. 40-48, 1997.
- OLIVEIRA, O. M. *Estudo sobre a Resistência ao Cisalhamento de um Solo Residual Compactado Não Saturado*. 2004. 361 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- OLIVEIRA, O. M.; MARINHO, F. A. M. Unsaturated Shear Strength Behavior of a Compacted Residual Soil. In: ASIA CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 2., 2003, Osaka. *Proceedings...* Osaka, 2003.
- PECAPEDRA, L. L. *Estudo da Resistência ao Cisalhamento Não Saturada de Solos Residuais de Granito e Diabásio de Florianópolis/SC*. 2016, 201 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E. The Relationship Between the Soil-Water Characteristic Curve and the Unsaturated Shear Strength of a Compacted Glacial Till. *Geotechnical Testing Journal*, 1996, v. 19, n. 3, p. 259-268.
- VILAR, O. M. A simplified procedure to estimate the shear strength envelope of saturated soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, v. 43, p. 1088-1095.