

Influência da Resistência à Tração na Curva de Retenção de Umidade de dois Solos Tropicais do Rio de Janeiro

Carlos Besso

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, carlosbesso@outlook.com

Mariana Ferreira Benessiuti Motta

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, marianabenessiuti@yahoo.com.br

Tácio Mauro Pereira de Campos

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, tacio@puc-rio.br

RESUMO: Usualmente desprezada na engenharia geotécnica, a resistência à tração vem ganhando interesse no meio científico devido à sua possível correlação com o processo de fissuramento durante a secagem dos solos. Neste contexto, o presente trabalho pretende contribuir para o melhor entendimento da influência da resistência à tração no processo de secagem da curva de retenção de umidade de dois solos do Rio de Janeiro: um colúvio e um solo residual jovem. Foram realizados ensaios de resistência à tração, através do Ensaio Brasileiro, e de sucção matricial, pelo método do papel filtro, em amostras indeformadas e reconstituídas com mesmo índice de vazios da condição indeformada. Os resultados indicam que, inicialmente, a resistência à tração aumenta com o acréscimo de sucção, até atingir o valor da segunda entrada de ar, a partir do qual decresce. Tal comportamento corrobora a hipótese de que a perda de resistência à tração está associada a processos de secagem intensa e, portanto, ao desenvolvimento de fissuras.

PALAVRAS-CHAVE: Curva de retenção, secagem, fissuramento, resistência à tração, solo residual jovem, colúvio.

1 INTRODUÇÃO

Solos não saturados são aqueles que apresentam uma fase gasosa, além das fases sólida e líquida, tradicionalmente estudadas na mecânica dos solos. A presença de ar nos poros do solo decorre da sucção presente em sua estrutura, modificando seu comportamento mecânico e hidráulico em relação à condição saturada.

Segundo de Campos (1994), a sucção em solos não-saturados advém da combinação de efeitos capilares, predominante em solos granulares, de adsorção, associados à solos coesivos, e de osmose, associados à presença de sais.

A sucção resultante dos efeitos conjuntos de capilaridade e de adsorção é conhecida como sucção matricial, enquanto que a resultante dos efeitos de osmose é conhecida como sucção osmótica. A sucção total no solo é a soma das

duas parcelas supracitadas. Neste trabalho será abordada a parcela matricial da sucção.

A curva característica, também conhecida como curva de retenção de umidade, exprime a relação entre a sucção do solo e a quantidade de água retida por ele, sendo tal quantidade expressa por teor de umidade gravimétrico, ou teor de umidade volumétrico, ou grau de saturação.

A completa representação desta curva consiste em curvas de umedecimento e secagem, onde a primeira representa a adsorção de água no solo (diminuição da sucção com o aumento da umidade) e a segunda, a dessorção de água (aumento da sucção). A diferença entre as curvas é conhecida como histerese.

A interpretação da curva característica lança mão de dois pontos de destaque, sendo eles o valor de entrada de ar e a saturação residual. Sob o ponto de vista da secagem, a entrada de ar é o

valor de sucção em que se inicia a dessaturação. A saturação residual caracteriza a quantidade de água a partir da qual acréscimos de sucção causam variações insignificantes de saturação.

Na literatura geotécnica usual, encontram-se curvas características com formato do tipo “S”, ou unimodal, na qual se verifica um único valor de entrada de ar. Entretanto, solos tropicais podem apresentar curvas de retenção do tipo “duplo S”, ou bimodal, caracterizada por dois valores distintos de entrada de ar e de saturação residual.

Durante o processo de secagem de um solo observa-se o surgimento e gradual aumento de trincas em seu volume. Na tentativa de se compreender este processo de fissuramento, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos à respeito da resistência à tração dos solos (Williams & Sibley, 1992; Zeh & Witt, 2007; Villar et al., 2007; Boscowski, 2008). Tais autores apontam para a hipótese de que o fissuramento decorra da perda de capacidade do solo de resistir à esforços de tração.

Visando contribuir para o melhor entendimento da influência da resistência à tração no processo de secagem de solos, o presente trabalho apresenta resultados e interpretação de ensaios de sucção, pelo método do papel filtro, e de resistência à tração, pelo Ensaio Brasileiro, em amostras indeformadas e reconstituídas de dois solos não saturados do Rio de Janeiro.

2 CURVA CARACTERÍSTICA

A curva característica unimodal pode ser dividida em três estágios (Figura 1). O primeiro estágio, denominado zona de efeito limite, corresponde ao trecho onde a fase líquida é predominante nos poros do solo, e em que acréscimos de sucção geram pouco, ou nenhum, decréscimo de saturação. O segundo, zona de transição, se inicia no valor de entrada de ar, e corresponde ao trecho de dessaturação do solo. E o terceiro, denominado zona de saturação residual, inicia-se no grau de saturação residual, valor a partir do qual acréscimos de sucção causam variações insignificantes de saturação, e em que a água se encontra descontínua no solo, em finos filmes entre as partículas sólidas (Lu & Likos, 2004).

Diferentemente, a curva bimodal apresenta duas zonas de dessaturação, ligadas por um patamar intermediário onde ocorre pouca drenagem (Figura 2). Os primeiros e segundos valores de entrada de ar e de saturação residual, referem-se, respectivamente, à primeira e segunda zona de dessaturação.

De acordo com Feuerharmel et al. (2007), solos com curva característica bimodal possuem macro e micruestrutura bem definidas, apresentando agregados de argila do tamanho de grãos de silte ou areia. Os autores sugerem que tais solos apresentam distribuição bimodal de tamanhos dos poros, sendo elas os macroporos, presentes entre os agregados de argila, e os microporos, no interior destes agregados.

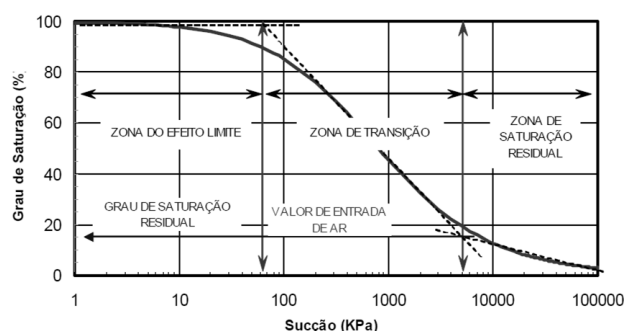


Figura 1. Curva característica unimodal, Boscowski (2008).

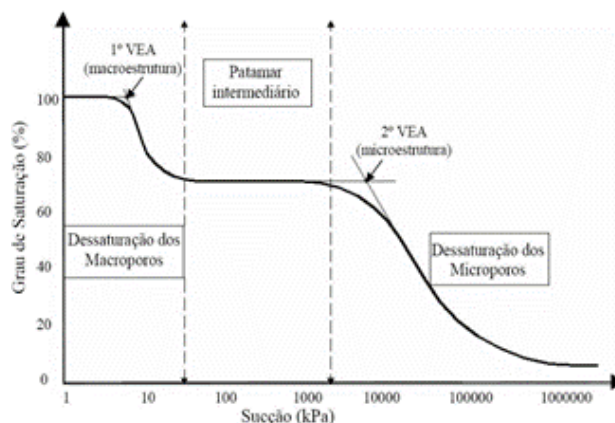


Figura 2. Curva característica bimodal, Feuerharmel (2007).

Para a obtenção de tal curva, optou-se, neste trabalho, pelo uso do método do papel filtro, por sua simplicidade de execução e capacidade de medir amplo intervalo de valores de sucção (tipicamente de 0 kPa a 30.000 kPa).

3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A resistência à tração é geralmente desconsiderada na engenharia geotécnica por ser muito inferior à resistência ao cisalhamento ou à compressão. Porém, com o crescimento dos estudos de solos não saturados e dos mecanismos de trincamento e secagem, maior importância vem sendo atribuída a esta resistência.

Para Favaretti (1995) apud Villar et al. (2007), o desenvolvimento de fissuras durante a secagem ocorre quando forças de atração entre as partículas superam a resistência à tração do solo. Tais forças atrativas decorrem do aumento de sucção, enquanto a resistência à tração está associada à ligações físico-químicas entre os agregados e internas a estes (Motta et al., 2015).

Esta resistência é influenciada por diversos fatores, podendo-se destacar número e tamanho dos poros, tipo e quantidade de argilo mineral presente, tamanho da fração de argila e quantidade de argila em estado disperso, e a sucção presente na estrutura do solo (Aluko & Koolen, 2000 apud Villar et al., 2007).

Segundo Zeh & Witt (2007), solos finos, com pequenos poros e alto teor de argila apresentam maior resistência à tração.

Os ensaios de laboratório para determinação da resistência à tração de solos se dividem em dois tipos: direto e indireto (Villar et al., 2007). Os diretos são aqueles que de fato solicitam o solo à tração, medindo a resistência durante o ensaio. Os indiretos são os que solicitam o solo a outros tipos de esforços e através de interpretação dos resultados pode-se obter a resistência à tração.

Na medição direta a forma de se prender as extremidades da amostra para que se possa tracioná-la é problemática, pois surgem concentração de tensões nestas extremidades. Como solução, utilizam-se amostras com seção transversal mais estreita no centro, de forma a induzir a ruptura nesta região, afastando-a da influência das concentrações de tensões.

Dentro as formas de medição indireta, Villar et al. (2007) destacam o *double punch test* (DPT) e o Ensaio Brasileiro, ou ensaio de compressão diametral, normatizado pela ASTM (D 3967-95a). Neste estudo utilizou-se o ensaio de compressão diametral para determinação da resistência à tração.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Solos estudados

Nos ensaios de sucção e de resistência à tração, foram utilizadas amostras indeformadas e reconstituídas de um solo residual jovem (SRJ), micáceo, e de um colúvio, ambos provenientes da Reserva Biológica de Tingüá, Nova Iguaçu, Rio de Janeiro.

A tabela 1 apresenta os resultados obtidos da caracterização física destes materiais. Com relação aos índices de consistência, o solo residual jovem é não plástico e o colúvio apresenta um Índice de Plasticidade (IP) de 28,6% e Limite de Liquidez (LL) de 64,5%.

Tabela 1. Caracterização dos solos estudados.

Solo	e	γ (kN/m ³)	W _{inicial} (%)	G _s
SRJ	1,19	15,68	26,5	2,77
Colúvio	0,94	16,68	26,6	2,66
Solo	Distribuição Granulométrica			Classificação SUCS
	areia (%)	silte (%)	argila (%)	
SRJ	63,6	29,8	6,6	ML
Colúvio	46,4	10,1	40,5	MH

A caracterização mineralógica dos solos, através da análise térmica diferencial e da difração de raio-x, mostrou que a fração fina do solo residual jovem é composta essencialmente por caulinita e do colúvio, por gibsita e caulinita.

A curva da distribuição incremental dos diâmetros dos poros (Figura 3), obtida através do ensaio de porosimetria de mercúrio, mostra duas famílias de pico, para os dois solos estudados.

Conforme citado no item 2, o comportamento bimodal da distribuição do tamanho dos poros está associado ao comportamento bimodal da curva de retenção. Logo, pode-se esperar que as curvas características dos solos estudados apresentem formato bimodal.

Através desta distribuição, é possível observar que o solo residual apresenta dois picos localizados na região de macroporos e o colúvio apresenta picos nas regiões de micro e macroporos. A partir da quantificação dos poros dos solos, verifica-se que o solo residual jovem é composto essencialmente de macroporos e o colúvio de micro e macroporos (Tabela 3).

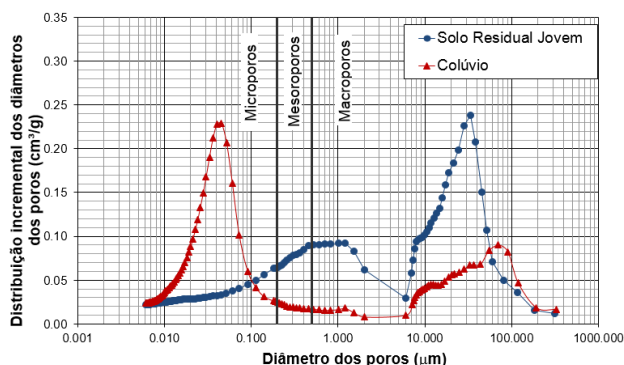


Figura 3. Curvas de distribuição incremental dos diâmetros dos poros (cm³/g) versus diâmetro dos poros (mm).

Tabela 3. Caracterização de poros dos solos estudados.

Solo	Microporos (%)	Mesoporos (%)	Macroporos (%)
	$\phi < 0,2 \mu\text{m}$	$0,2 \mu\text{m} < \phi < 0,5 \mu\text{m}$	$\phi < 0,5 \mu\text{m}$
SRJ	16,89	9,90	73,21
Colúvio	56,13	3,22	40,66

4.2 Equipamentos utilizados

A resistência à tração foi determinada em uma prensa triaxial (modelo *TRISCAN-50*) adaptada (Figura 4), na qual foi imposto um carregamento, controlado pelo *software "Clisp Studio"*, ao longo de duas superfícies rígidas paralelas, uma oposta à outra, no sentido diametral da amostra.



Figura 4. Prensa para ensaio de compressão diametral.

4.3 Metodologia dos ensaios

Os corpos de prova, indeformados e reconstituídos, foram moldados em anéis metálicos de 47 mm de diâmetro e 21 mm de altura. As amostras reconstituídas foram moldadas com o mesmo índice de vazios médio e teor de umidade natural obtido nas amostras indeformadas. As metodologias descritas a seguir foram as mesmas para os dois tipos de amostras.

Primeiramente as amostras foram saturadas por capilaridade (Figura 5a) e, em seguida, secas ao ar até umidades arbitrárias (Figura 5b). Após a secagem, foram isoladas termicamente para equalização da umidade, durante 3 dias. Ao fim deste processo, inseriu-se o papel filtro do tipo Whatman N° 42 no topo e base das amostras, para isolamento térmico de 10 dias, visando equalização da sucção matricial.

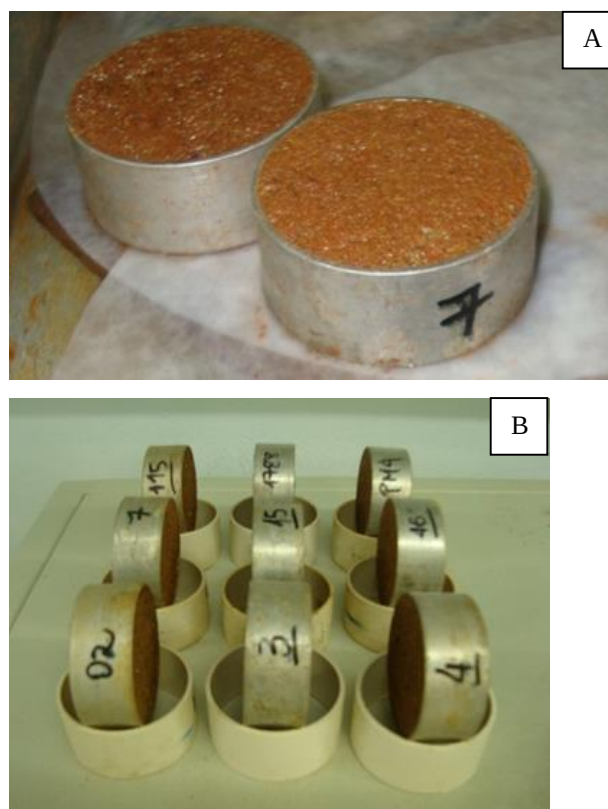


Figura 5. A) Saturação por capilaridade. B) Secagem ao ar.

Após equalização da sucção, as amostras foram abertas e as massas úmidas dos papéis filtros medidas em balança com precisão de 0,0001 gramas. Para medição da massa seca, os papéis filtro sofreram secagem por um período de duas horas, em estufa a 105° C.

A umidade do papel filtro é calculada a partir de sua massa seca e úmida. O valor da sucção do papel filtro (que pela equalização é idêntico ao das amostras) é determinado a partir de sua umidade, segundo as equações de calibração (Equações 1 e 2) propostas por Chandler et al. (1992).

$$\psi = 10^{6,05 - 2,48 \cdot \log(w_p)}, w_p > 47\% \quad (1)$$

$$\psi = 10^{4,84 - 0,0622 \cdot w_p}, w_p \leq 47\% \quad (2)$$

Onde w_p é a umidade do papel filtro e ψ é a sucção matricial.

Os ensaios de compressão diametral foram realizados nas mesmas amostras utilizadas nos ensaios de sucção. Os corpos de prova foram dispostos em uma prensa triaxial (*TRISCAN-50*) adaptada, com uma taxa de deslocamento imposta de 0,3 mm/min (Figura 6). A partir da força de ruptura, registrada pela célula de carga, e das dimensões do corpo de prova (equação 3), foram obtidos os valores de resistência à tração das amostras.

$$\sigma_t = 2 \cdot P / \pi \cdot D \cdot H \quad (3)$$

Onde σ_t é a resistência à tração; P , a força de ruptura; D , o diâmetro do corpo de prova; H , a espessura do corpo de prova.

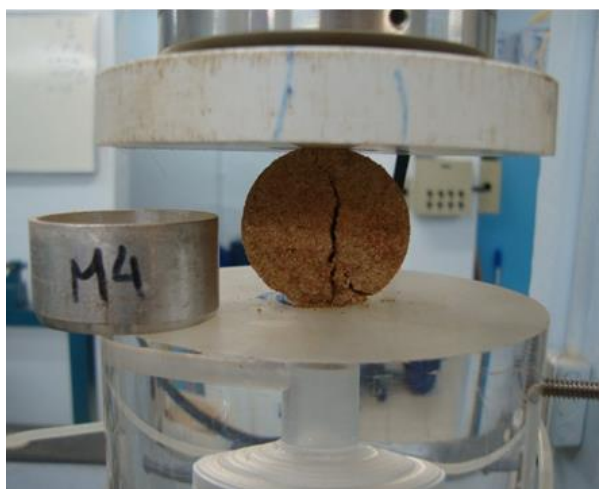


Figura 6. Ruptura da amostra por compressão diametral.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho, expressos em termos teor de umidade

gravimétrica, sucção matricial e resistência à tração estão apresentados nas figuras 7, 8, 9 e 10.

As curvas de retenção de umidade foram ajustadas segundo o modelo de Gitirana & Fredlund (2004), para curvas com quatro pontos de quebra. Os parâmetros de ajuste para as curvas obtidas para as amostras indeformadas e reconstituídas estão apresentados nas tabelas 4 e 5, respectivamente. Em todas as curvas utilizou-se o parâmetro $a = 0,045$.

Tabela 4. Parâmetros de ajuste da curva característica das amostras indeformadas.

Solo	w_{b1} (%)	w_{b2} (%)	w_{res1} (%)	w_{res2} (%)
Colúvio	36,0	27,0	24,0	5,5
SRJ	40,0	25,5	25,0	5,0
Solo	ψ_{b1} (kPa)	ψ_{b2} (kPa)	ψ_{res1} (kPa)	ψ_{res2} (kPa)
Colúvio	3,0	8,0	3.500,0	11.000,0
SRJ	15,0	40,0	500,0	4.000,0

Tabela 5. Parâmetros de ajuste da curva característica das amostras reconstituídas.

Solo	w_{b1} (%)	w_{b2} (%)	w_{res1} (%)	w_{res2} (%)
Colúvio	36,0	25,0	21,0	2,5
SRJ	41,0	21,0	21,0	5,0
Solo	ψ_{b1} (kPa)	ψ_{b2} (kPa)	ψ_{res1} (kPa)	ψ_{res2} (kPa)
Colúvio	3,0	10,0	2.500,0	30.000,0
SRJ	5,0	40,0	800,0	3.000,0

Com relação às curvas de retenção, destaca-se que a modificação da estrutura da condição indeformada para reconstituída não acarretou em alteração do tipo de formato das curvas. Comparando-se as condições indeformadas com as reconstituídas, ambos os solos apresentaram pequena variação em seus valores de entrada de ar, principalmente no segundo valor, sendo esta variação de 3500 kPa para 2500 kPa para o colúvio e de 500 kPa para 800 kPa, para o solo residual jovem.

A análise da influência da sucção na resistência à tração mostra que, com exceção do solo residual jovem reconstituído, inicialmente o aumento da sucção gera acréscimos de resistência à tração até um valor máximo, a partir do qual a resistência decresce.

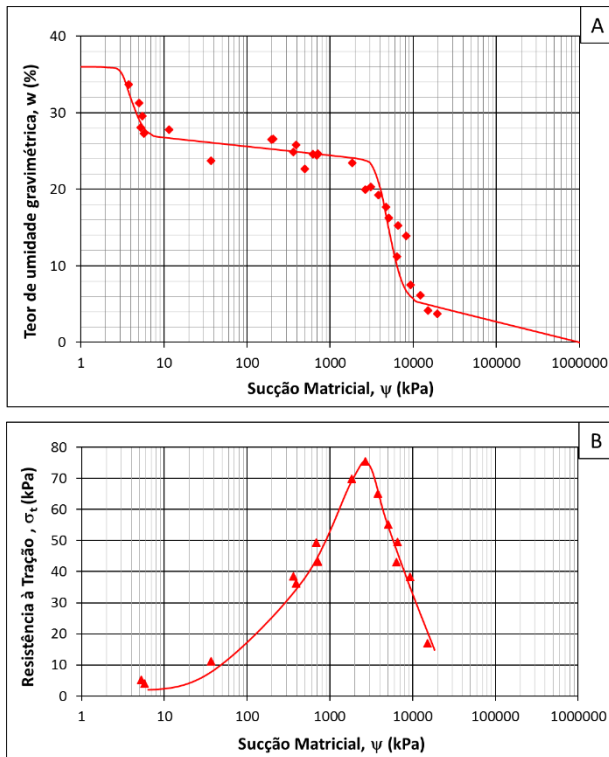


Figura 7. Resultados obtidos para o colúvio indeformado. A) Curva de retenção de umidade. B) Influência da sucção na resistência à tração.

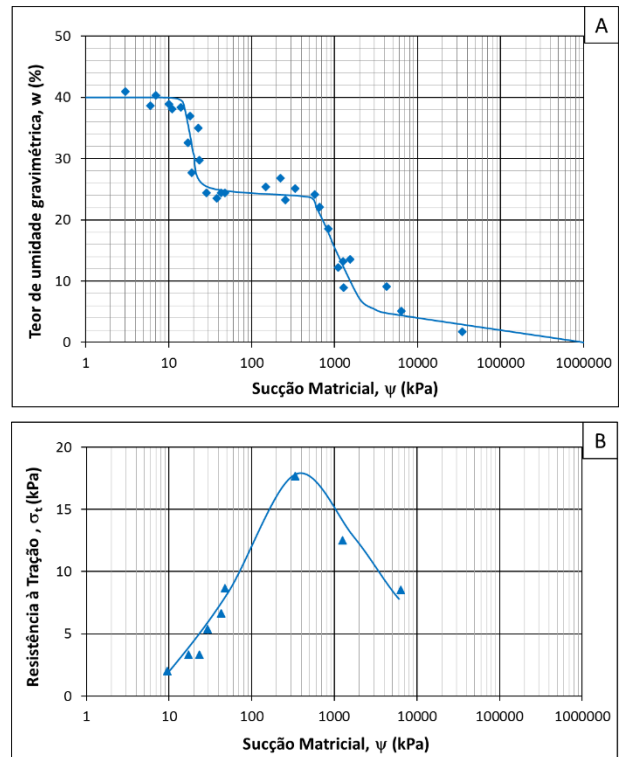


Figura 9. Resultados obtidos para o solo residual jovem indeformado. A) Curva de retenção de umidade. B) Influência da sucção na resistência à tração.

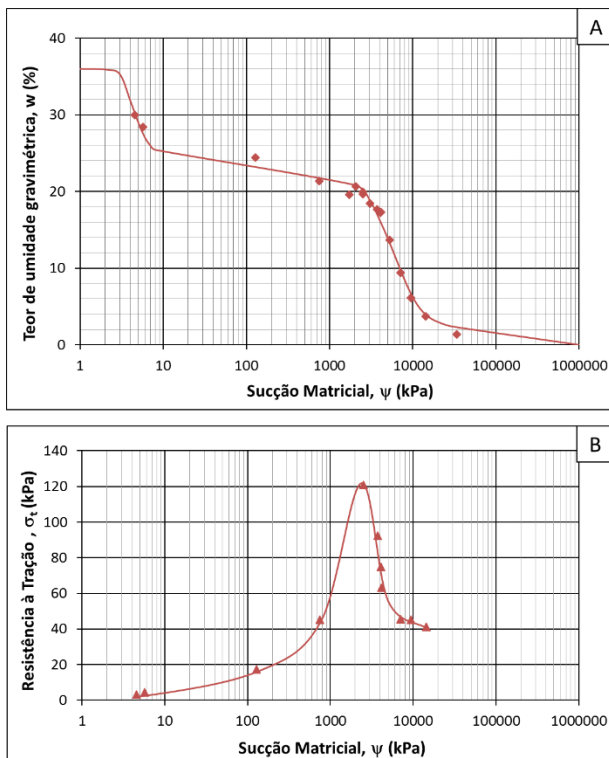


Figura 8. Resultados obtidos para o colúvio reconstituído. A) Curva de retenção de umidade. B) Influência da sucção na resistência à tração.

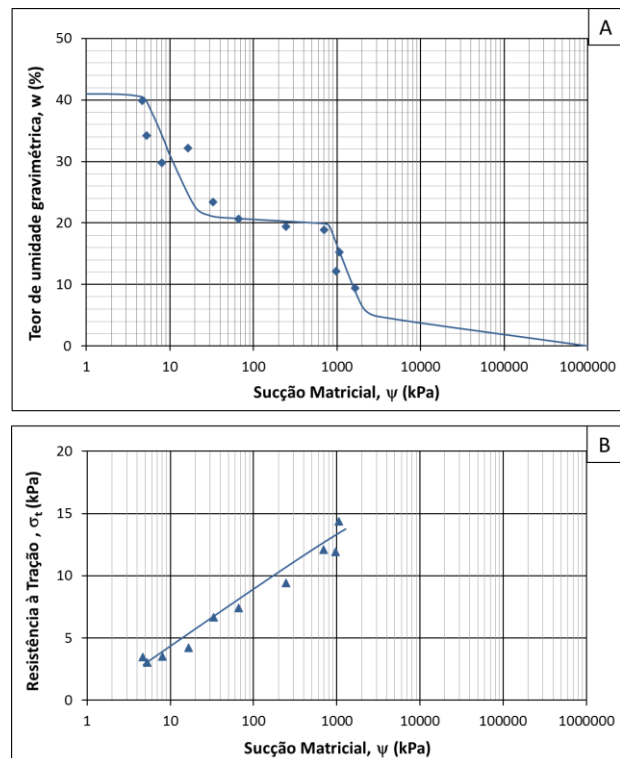


Figura 10. Resultados obtidos para o solo residual jovem reconstituído. A) Curva de retenção de umidade. B) Influência da sucção na resistência à tração.

Ao comparar as curvas de retenção e de influência da sucção na resistência à tração, nota-se que, com exceção do solo residual jovem reconstituído, as regiões de máxima resistência estão próximas a segunda entrada de ar nas curvas de retenção. Tal exposto corrobora para a hipótese de que o processo de secagem de um solo está associado à sua perda de resistência à tração.

Tanto nas condições indeformadas, quanto nas reconstituídas, pode-se observar a influência da estrutura do solo na resistência à tração. O solo residual jovem, micáceo e mais heterogêneo, apresentou valores de resistência bem menores que o colúvio, um solo mais argiloso e mais homogêneo.

Este resultado ratifica o exposto anteriormente, no item 3, que solos finos, com maior teor de argila, apresentam maior resistência à tração. Tal fato é mais evidenciado na zona de pico, para valores intermediários de sucção.

CONCLUSÕES

Este trabalho buscou avaliar a influência da resistência à tração no ciclo de secagem da curva característica de dois solos não saturados do Rio de Janeiro: um solo residual jovem e um colúvio.

As curvas de retenção de umidade foram determinadas pelo método do papel filtro e a resistência à tração, através do Ensaio Brasileiro.

As curvas de retenção de umidade foram ajustadas pelo modelo de Gitirana & Fredlund (2004) para curvas com quatro pontos de quebra. Em todos os casos, os ajustes se adequaram aos pontos obtidos no ensaios, proporcionando melhor interpretação das curvas.

O efeito da remoldagem dos solos não influenciou no tipo do formato das curvas de retenção, de maneira que estas curvas mantiveram comportamento bimodal após reconstituição com mesmo índice de vazios apresentado no estado indeformado.

As curvas de influência da sucção na resistência à tração dos materiais, com excessão do solo residual jovem reconstituído, mostram inicialmente um aumento da resistência de ambos os solos, com o aumento de sucção. A partir de um certo valor, próximo à segunda

entrada de ar, há uma tendência de queda de resistência até o último ponto analisado. Uma vez que o segundo valor de entrada de ar é o valor de sucção que caracteriza o início da fase de secagem mais severa, este comportamento concorda com a teoria de que o fissuramento observado durante intensa secagem de um solo possa estar associado à perda de capacidade de resistir à esforços de tração.

REFERÊNCIAS

- Aluko, O. B. & Koolen, A. J. (2000) - *The essential mechanics of capillary crumbling of structured agricultural soils* - Soil & Tillage Research 55, 117-126, 2000.
- Boszczowski, R. B. (2008). *Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR*, Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, PUC - Rio.
- Chandler, R.J.; Crilly, M.S.; Montgomery-Smith, G. (1992) A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. Proc. of the Institution of Civil Engineering, 92-2, 82-89.
- de Campos, T. M. P. (1994). Equipamentos e Técnicas Para a Determinação da Sucção no Campo, *II Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, Recife, PE, p. 9-17.
- Feuerharmel, C., Pereira, A., Gehling, W. Y. Y., Bica, A. V. D., Vivian, J. B. (2007). Determinação das Curvas Características de Solos Coluvionares em Diferentes Condições de Moldagem, *VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, Salvador, BA, p. 343-348.
- Gitirana Jr., G. De F.N., Fredlund, D. G. (2004). A soil-water characteristic curve equation with independent properties, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130-2, 209-213.
- Motta, M. F. B., de Campos, T. M. P., Bernardes, G. P., Fonseca, A. J. P. V., Besso, C. (2015). Módulo de Cisalhamento Máximo G_0 e sua Correlação com Sucção Máxima e Resistência à Tração de Dois Solos do Rio de Janeiro, *VIII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, Fortaleza, CE, p. 243-250.
- Villar, L.F.S., De Campos, T.M.P, Zornberg, J. G. (2007) Relação Entre a Resistência a Tração Obtida via Ensaio Brasileiro, a Sucção e Índices Físicos de um Solo, *VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, Salvador, BA, p. 421-432.
- Williams, D. J., & Sibley, J. W. (1992) The Behavior at the Shrinkage Limit of Clay Undergoing drying, *Geotechnical Testing Journal*, GTODJ, vol. 15, nº 3, pp. 217-222.
- Zeh, R. M., & Witt, K. J. (2007). The Tensile Strength of Compacted Clays As Affected by Suction and Soil Structure. In: *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, Springer proceeding in physics, v. 112, p. 219-228.