

Relação Entre a Resistência a Tração Obtida via Ensaio Brasileiro, a Sucção e Índices Físicos de um Solo

Villar, L. F. S.

Dep. de Eng. de Transportes e Geotecnia da Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, lvillar@etg.ufmg.br

de Campos, T. M. P.

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

Zornberg, J. G.

University of Texas at Austin, Austin, USA, zornberg@mail.utexas.edu

Resumo: Este artigo apresenta resultados de resistência à tração de um solo obtidos usando o ensaio de compressão diametral, ou ensaio brasileiro, conforme técnica proposta por Krishnaya & Eisenstein (1974), Maciel (1991); Das *et al.* (1995) e Favaretti (1995). Estes ensaios consistem em comprimir transversalmente cilindros de solo, que se rompem à tração ao longo do diâmetro da seção transversal. Foram realizados vários destes testes a diferentes teores de umidade e os resultados de resistência à tração puderam ser correlacionados com seus índices físicos e com a sucção. As amostras foram preparadas em laboratório e saturadas com dois tipos de fluidos diferentes, soda cáustica e uma mistura desta com ácido sulfúrico. Pelas curvas características de sucção, verificou-se um elevado nível de sucção osmótica, o que permitiu analisar separadamente o efeito da sucção matricial e total no comportamento deste solo em relação à resistência a tração. Através dos resultados obtidos, verificou-se que a resistência à tração foi influenciada pelas variações de sucção total. Comparando-se os resultados obtidos com os dois diferentes tipos de fluidos, constatou-se também que a amostra que apresentava maior diferença entre sucção total e matricial também apresentava maior resistência à tração.

Abstract: This paper describes the tensile strength measurement of soil samples using the diametrical compression test or the Brazilian test as described by Krishnaya & Eisenstein (1974), Maciel (1991); Das *et al.* (1995) e Favaretti (1995). The Brazilian test is performed applying a compression load along the generatrix of cylindrical samples and assuming that they will fail as consequence of tensile stresses acting along their diameter. This test was performed using samples in different moisture content and the obtained results could be related to the samples' index properties and suction. It was used the same soil but saturated with two different kinds of fluids: one was caustic soda and the other, a mixture of this former one and sulphuric acid. It was observed a high difference between the values of total and matric suction and because of this it was possible to account separately the effect of each suction type on the soil tensile strength behavior. The results showed that the tensile strength was influenced by the changes occurred on total suction. The comparison between the tensile strength results of the two different kinds of samples revealed that the soil with the higher osmotic suction also presented the higher value of tensile strength.

Palavras-chaves: resistência a tração; ensaio brasileiro; sucção.

Keywords: tensile strength; Brazilian test; suction.

1 INTRODUÇÃO

De uma maneira geral, tem sido admitido que o solo não resiste à tração ou que este valor de resistência é muito baixo se comparado com a resistência a

compressão ou ao cisalhamento. Por causa disso, pouca atenção tem sido dada ao estudo dos mecanismos que controlam o comportamento de um solo em relação a esforços de tração. Porém, com o crescimento do estudo dos solos não saturados e a busca de um melhor entendimento do processo de secagem e fissuramento,

uma maior atenção vem sendo dada a este tipo de mecanismo, especialmente por pesquisadores da área de física de solos e de agronomia. Tem sido reconhecido que para o completo entendimento de todo o processo de secagem de um solo, que culmina invariavelmente no seu trincamento, seria necessário estudar a sua resistência à tração e sua relação com os teores de umidade e grau de saturação. O fissuramento de um solo durante a secagem ocorreria presumivelmente quando as forças atrativas entre as partículas, que surgem com o aumento da sucção à medida que o solo seca, superariam a resistência à tração do solo. Esta, por sua vez, seria uma resultante, entre outras coisas, das ligações físico-químicas agindo entre partículas. Estas ligações provavelmente irão aumentar à medida que o solo seca até um momento em que toda a estrutura esteja afetada pelo fissuramento e reduz a resistência à tração da massa de solo como um todo (Favaretti, 1995).

Este artigo apresenta os resultados de resistência à tração de um solo obtidos usando o ensaio de compressão diametral, ou ensaio brasileiro, conforme técnica proposta por Krishnayya & Eisenstein (1974), Maciel (1991); Das *et al.* (1995) e Favaretti (1995). Estes ensaios consistem em comprimir transversalmente cilindros de solo ao longo de sua geratriz, que se romperiam à tração ao longo do diâmetro da seção transversal. Foram realizados vários destes testes a diferentes teores de umidade e os resultados puderam ser correlacionados com os índices físicos. As amostras foram preparadas em laboratório e saturadas com dois tipos de fluidos diferentes e, pelas curvas características de sucção, verificou-se um elevado nível de sucção osmótica, o que permitiu analisar o efeito da sucção matricial e total separadamente no comportamento em relação à resistência a tração determinada por esta técnica de ensaio.

2 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DE SOLOS

Em uma investigação sobre o mecanismo de fissuramento de barras de argilas remoldadas, Towner (1987) afirmou que a resistência à tração de um solo é uma propriedade do material que depende, em geral, da sucção presente em sua estrutura. Para Aluko & Koolen (2000), a resistência à tração dos solos seria derivada de duas fontes: as ligações entre os agregados e aquelas internas à estes agregados. Ou seja, as ligações que mantêm partículas muito finas floculadas e aquelas que ligam os flocos entre si, sendo a resistência à tração um reflexo da força necessária para quebrar estas ligações. Estes autores afirmam que à medida que o solo vai secando, a capilaridade no interior dos flocos se diferenciaria daquela externa a eles e que os mantêm ligados a outros flocos. Por causa disso, na verdade dois valores de sucção teriam que ser

analisados. Considerando esta hipótese, Snyder & Miller (1985) sugeriram que, para um melhor cálculo da resistência à tração, deve ser considerado um “grau de saturação efetivo”, ou seja, aquele que realmente haveria no interior dos flocos e a sucção a ele associado.

Barzegar *et al.* (1995) afirmaram que a resistência à tração dos solos é influenciada pelo tipo e quantidade de mineral argila presente, o tamanho da fração argila e a quantidade de argila em estado disperso. Nos ensaios realizados por eles, a resistência à tração aumentou com o teor de argila presente, especialmente além de 20%. Rahimi *et al.* (2000) também apresentaram um estudo de alguns fatores que influenciariam na resistência à tração de solos, entre eles a condutividade elétrica e a quantidade de matéria orgânica. Assim, esta resistência dependeria da quantidade cátions, tipo e tamanho da fração argila, estabilidade dos agregados, da concentração e da composição do fluido presente nos poros, da quantidade de matéria orgânica e de números de ciclos de secagem e umedecimento que o solo experimentou (Barzegar *et al.*, 1994 e 1995).

O valor da resistência à tração também poderia ser usado como um indicador da condição física geral de um solo (Rahimi *et al.* 2000). De um ponto de vista quantitativo, a resistência à tração seria igual à tensão necessária para promover a ruptura ou a separação das partículas que constituem o solo (Hillel, 1983). Por causa disso, Utomo & Dexter (1981) afirmaram que ela poderia ser utilizada como um índice da friabilidade. Para Barzegar *et al.* (1994), a resistência a tração é um valor que indica também características dinâmicas, já que ela depende do grau de saturação, pequenas fissuras pré-existentes e das ligações entre partículas dentro ou entre estas pequenas fissuras. Evidências experimentais mostram que o efeito da sucção na resistência a tração do solo pode ser considerável, mas limitada ao padrão de trincamento que ele apresenta à medida que seca (Favaretti, 1995). Snyder & Miller (1985) afirmaram que a máxima tensão de tração desenvolvida em solos não saturados é da ordem da metade do valor da sucção matricial.

2.1 Técnicas usuais de medição da resistência a tração de solos

De uma maneira geral, os ensaios de laboratório para determinação da resistência a tração em solos se dividem em dois tipos: os diretos e os indiretos. Os diretos são aqueles que efetivamente submetem o solo a tração, medindo diretamente o valor durante o ensaio. O grande problema relacionado a esta técnica está geralmente ligado à forma de prender as amostras na extremidade para que possam ser tracionadas. Isto provoca a concentração de tensões e, para compensar

isso, muitas vezes as amostras têm as seções no centro mais estreitas para forçar a sua ruptura neste local. Para maiores informações sobre estes métodos diretos, veja, por exemplo, Heibrock *et al* (2003).

Os métodos indiretos usam da aplicação de outros tipos de esforços que não os de tração e interpretam os resultados, obtendo indiretamente o valor desejado. Neste grupo estão o ensaio de compressão diametral ou o ensaio brasileiro e o *double punch test* (DPT). No primeiro, uma amostra cilíndrica é comprimida ao longo de sua geratriz (mais detalhes serão apresentados a seguir). O segundo também é realizado em amostras cilíndricas, mas axialmente. Dois punçadores posicionados no topo e na base penetram no solo até que a ruptura por tração é atingida ao longo do plano vertical. Mais detalhes sobre este ensaio pode ser encontrado em Favaretti (1995).

2.2 O ensaio brasileiro

Em geral, independente dos mecanismos internos que a desenvolvem, a resistência à tração de solos e rochas tem sido determinada pelo *ensaio brasileiro*, que é normatizado pela ASTM (D 3967-95a). Ele foi desenvolvido inicialmente para avaliar a resistência à tração de concreto (Carneiro & Barcellos, 1953) e só mais tarde o mesmo aparato foi usado em rochas e solos cimentados ou compactos (Krishnayya & Eisenstein, 1974; Clough *et al.*, 1981; Maciel, 1991; Das *et al.*, 1995; Favaretti, 1995). Ele consiste no carregamento de amostras cilíndricas (altura h e diâmetro d), carregado ao longo de duas placas rígidas paralelas, uma oposta à outra, no sentido do seu diâmetro. A ruptura é atingida ao longo do plano vertical diametral, conectando os dois lados carregados.

Segundo Krishnayya & Eisenstein (1974), o ensaio apresenta diversas vantagens, tais como a facilidade na preparação das amostras, equipamento necessário similar ao de compressão simples, ruptura relativamente insensível às condições da superfície de contato da amostra, com um campo mais ou menos uniforme de tensões de tração perpendicular e ao longo do plano diametral contendo a carga normal aplicada provocando a ruptura. Guinea *et al.* (2000) recomendam o ensaio brasileiro para medição de resistência à tração por ter sido ele, em comparação com outros ensaios, o que apresentou os menores efeitos de escala nos estudos que realizaram.

A avaliação da resistência à tração pode ser feita de uma maneira simples, pela fórmula (Das *et al.*, 1995; Krishnayya & Eisenstein, 1974):

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dh} \quad (1)$$

onde: P = carga máxima do ensaio de compressão diametral; d é o diâmetro da amostra e h , a sua espessura ou altura. Krishnayya & Eisenstein (1974) alertam que esta não é uma relação rigorosamente adequada para materiais que tenham grande diferença entre os módulos de elasticidade na compressão e na tração, como os solos. Também afirmam que tem sido observado que condições mais favoráveis para a aceitabilidade do ensaio têm sido geralmente obtidas pela distribuição da carga aplicada sobre uma pequena área de contato. A Figura 1 mostra a solução teórica para tensões ao longo do diâmetro vertical da amostra submetida ao ensaio de compressão diametral, válida somente quando o solo ensaiado tiver as mesmas propriedades elásticas para a compressão e a tração. Nesta figura, “ a ” é a largura da faixa carregada.

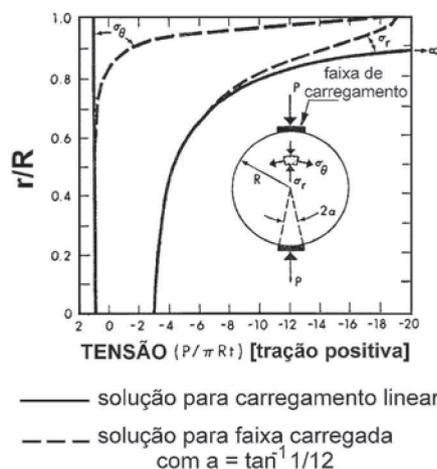


Figura 1. Soluções teóricas para o ensaio de compressão diametral (modificado de Krishnayya & Eisenstein, 1974).

Das *et al.* (1995) fizeram o uso direto da relação apresentada pela Fórmula (1) nos seus cálculos. Favaretti (1995) também aplica a expressão, com uma correção para casos de solos com elevada resistência à compressão. Ele comparou os resultados fornecidos por este ensaio com o DPT ou punção dupla, cujo cálculo é função de uma constante empírica próxima da unidade. Favaretti (1995) encontrou que quando esta constante era assumida de ser igual a 0,9 os valores obtidos eram bem similares aos do ensaio brasileiro.

3 ENSAIOS REALIZADOS

Neste trabalho, foi adotado o mesmo procedimento e metodologia de ensaio descrita em Maciel (1991). Foram usadas amostras de 76mm de diâmetro por 20mm de espessura, moldadas de solos normalmente

adensados, inicialmente saturados e secos ao ar. A velocidade de ensaio também foi a mesma usada em Maciel (1991), de 2mm/min e o motivo para isso foi poder usar os resultados previamente obtidos como uma referência e base de comparação. Favaretti (1995), por exemplo, utilizou uma velocidade de 0,5 mm/min.

As amostras eram montadas em uma prensa com velocidade controlada, sendo feita a leitura da carga por uma célula de carga acoplada a um sistema de aquisição de dados. As Figuras 2 e 3 mostram o ensaio montado e o final, com a amostra totalmente rompida ao longo de seu eixo vertical. Na extremidade da célula de carga foi adaptada uma placa de acrílico, promovendo a distribuição da carga no solo como uma estreita faixa. Para amostras mais plásticas, esta faixa foi maior, por conta da deformação da amostra.

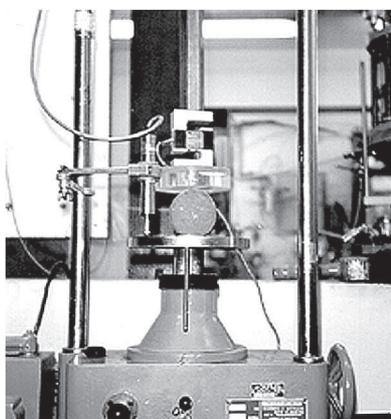


Figura 2. Ensaio de compressão diametral – início.

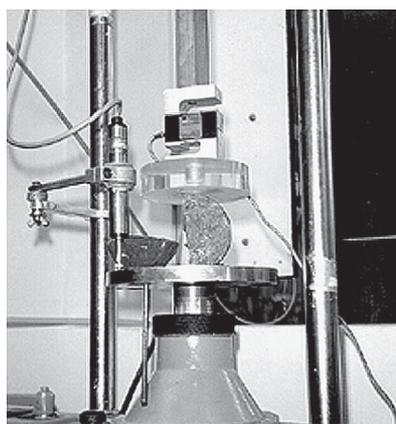


Figura 3. Ensaio de compressão diametral – ruptura da amostra ao longo do diâmetro.

3.1 Materiais ensaiados

Os ensaios foram realizados em amostras preparadas em laboratório. O solo utilizado foi inicialmente homogeneizado na forma de lama e colocado para adensar por peso próprio e, a partir daí, exposto a secagem em bandejas grandes e espessas, procurando formar uma camada única e homogênea. Uma vez atingido o teor de umidade desejado, amostras cilíndricas do tamanho a ser utilizado no ensaio brasileiro eram moldadas (76 mm de diâmetro e 20 mm de altura). Este procedimento de preparação garantiu que todas as amostras estivessem na sua condição normalmente adensada e sem influência de ligações estruturais diferenciadas que pudessem ser formadas em consequência de intemperismo e/ou história de tensões, como no caso de solos residuais. Isso certamente diminuiu o número de fatores esperados de influenciar os resultados, facilitando a sua interpretação. Curvas características de sucção e de secagem também foram obtidas para amostras formadas seguindo as mesmas condições. Os procedimentos seguidos na determinação tanto das curvas de secagem e curvas características podem ser encontrados em Villar (2002), Villar & de Campos (2001) e Villar & de Campos (2002).

Dois tipos de fluidos foram utilizados para saturar as amostras. Um deles foi soda cáustica, com pH em torno de 13, e o outro, uma mistura de soda cáustica e ácido sulfúrico, com pH em torno de 8. Portanto, foram na verdade dois tipos de amostras ensaiados, ambos com mesma granulometria e seqüência de formação, mas com diferente fluidos de preenchimento. Para que possam ser distinguidos entre si, estes dois tipos de amostras foram chamados de *solo neutralizado* e *solo não neutralizado*, respectivamente.

Pelo fato de ser o fluido de preenchimento a única distinção entre as amostras, era de se esperar que as diferenças nos resultados obtidos fossem somente devidas às diferenças provocadas pelo efeito dos mesmos no comportamento do solo. Como consequência da utilização destes líquidos, a sucção osmótica gerada ao longo do processo de secagem foi alta, o que permitiu verificar a relação entre os valores de resistência obtidos e as sucções matricial e total distintamente.

Estes dois materiais já tiveram suas características geotécnicas descritas em Villar & de Campos (2003). Por isso, apenas algumas informações básicas estão sendo aqui apresentadas de forma resumida na Tabela 1. Nesta tabela, o que está sendo chamado de “licor” se refere ao líquido de saturação específico de cada tipo de solo que

não a água (soda cáustica para o solo não neutralizado e mistura de soda cáustica com ácido sulfúrico para o solo neutralizado). Foram realizados ensaios de caracterização utilizando os procedimentos normais recomendados nas normas ABNT (usando água como fluido de saturação – as normas que serviram de referência para a execução dos ensaios estão mencionadas na tabela) e também os diferentes fluidos já mencionados. Além disso, os índices de consistência foram determinados seguindo trajetória de secagem, a mesma utilizada na determinação das curvas características de sucção, e sem secagem prévia do material. Os valores finais adotados para a densidade dos grãos e índices de consistência foram os correspondentes ao solo na sua condição integral e na trajetória de secagem utilizando os fluidos que não a água.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Antes de realizar os ensaios, as condições das amostras eram verificadas para identificar se já apresentavam fissuras decorrentes do processo de secagem. Mesmo identificando as fissuras, as amostras foram ensaiadas com o cuidado de orientar estas trincas em um sentido perpendicular ao da aplicação do esforço de compressão, o que inicialmente provocaria o seu fechamento. Este procedimento foi adotado para identificar qual seria o efeito destas fissuras durante o ensaio. Porém, os resultados das amostras com fissuras visíveis antes do ensaio não foram considerados nas análises finais.

Tabela 1: Características geotécnicas dos solos analisados.

GRANULOMETRIA (base: NBR 6502/95)						
Material	Limite superior (água) (%)			Limite inferior (licor) (%)		
	areia	silte	arg.	areia	silte	arg.
Solo neutr.	0	49	51	62	30	8
Solo não neutr.	0	78	32	57	40	3

DENSIDADE DOS GRÃOS (base: NBR 6508/84)						
Material		>#60	>#100	>#200	<#200	Integr.
		Solo água	3,66	3,65	3,65	3,57
neutr licor	3,49	3,49	3,51	3,54	3,39	
Solo água	3,56	3,59	3,58	3,62	3,59	
não neutr licor	3,53	3,60	3,54	3,54	3,55	

LIMITES DE CONSISTÊNCIA (NBR 6459 e 7180/84)							
Material		<#40			Integral (por secagem)		
		LL	LP	IP	LL	LP	IP
Solo água	41,4	32,7	8,7	-	-	-	
neutr licor	33,4	27	6,3	48,8	34	14,8	
Solo água	33,5	27,2	6,3	-	-	-	
não neutr licor	33,9	26,8	7	63,6	29,3	34,3	

A curva típica de resposta obtida dos ensaios realizados está representada na Figura 4. Solos ensaiados em um menor teor de umidade apresentaram picos mais acentuados, o que era de se esperar. Aqueles ensaiados com maiores teores de umidade apresentavam deformações grandes e, devido a isto, a trinca de tração se formou algumas vezes um pouco inclinada ao invés de totalmente na vertical. A curva força contra deslocamento de resposta para estes casos também não apresentava um pico tão acentuado, o que é típico para materiais não quebradiços. A Figura 5 mostra este padrão de resultado. Estas elevadas deformações provavelmente fazem com que a distribuição de tensão ao longo da amostra não seja mais como o previsto na teoria. Mas como era possível localizar facilmente o ponto de ruptura, resolveu-se considerar estes resultados.

Algumas outras amostras apresentaram curvas de resultados que não se encaixavam em nenhum destes dois padrões descritos anteriormente. Em todos os casos em que isto ocorreu, as amostras ensaiadas não apresentavam nenhuma fissura visível e a explicação que foi encontrada até o momento para justificar tal comportamento foi a presença de micro fissuras. Um exemplo deste tipo de resultado está representado na Figura 6. Por este tipo de curva é difícil definir a ruptura e, por isso, estes dados também não foram considerados nas análises.

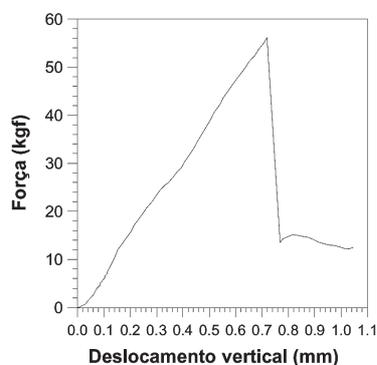


Figura 4. Exemplo de resultado padrão fornecido pelo ensaio brasileiro.

Para auxiliar na confirmação da qualidade dos resultados obtidos foram utilizados dois gráficos auxiliares. Um deles relaciona o valor da resistência à tração calculado pela Fórmula (1) e carga na ruptura. Para diminuir o efeito da variação do índice de vazios das amostras durante o processo de secagem, este gráfico foi normalizado pelo volume específico inicial das mesmas ($1 + e_0$). Os pontos fora da relação obtida eram facilmente identificados, e foram, portanto, considerados como resultados inadequados. O segundo gráfico utilizado foi o que apresentava os resultados

da resistência à tração, normalizada pelo volume específico inicial, contra a deformação na ruptura, e que também permitiu identificar pontos que estavam muito fora do comportamento geral. A deformação foi definida como sendo o deslocamento vertical no momento da ruptura dividido pelo diâmetro inicial da amostra.

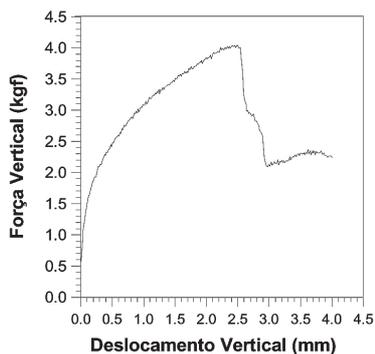


Figura 5. Exemplo de resultado fornecido pelo ensaio brasileiro para amostras com teores de umidade mais elevados.

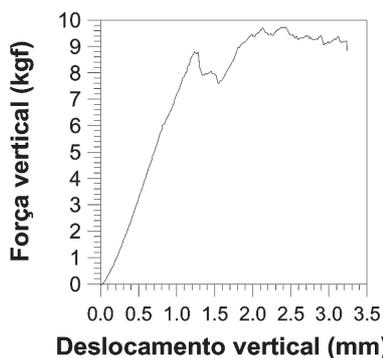


Figura 6. Exemplo de resultado fornecido pelo ensaio brasileiro considerado fora do padrão esperado.

4.1 Resultados do solo neutralizado

Os gráficos auxiliares resumindo os resultados obtidos para o solo neutralizado estão representados nas Figuras 7 e 8. No caso da Figura 7, pôde ser confirmado que os pontos correspondentes aos calculados para as amostras que apresentaram resultado fora do padrão realmente não se encaixaram na relação. As amostras com fissuras visíveis, porém, se ajustaram muito bem e isso deve ser pelo fato de terem sido posicionadas perpendicularmente ao sentido de aplicação da carga. Mesmo assim, como já dito, estes resultados de amostras fissuradas não foram considerados nas análises. A relação linear mostrada na Figura 7 apresentou coeficiente de correlação de 0,997.

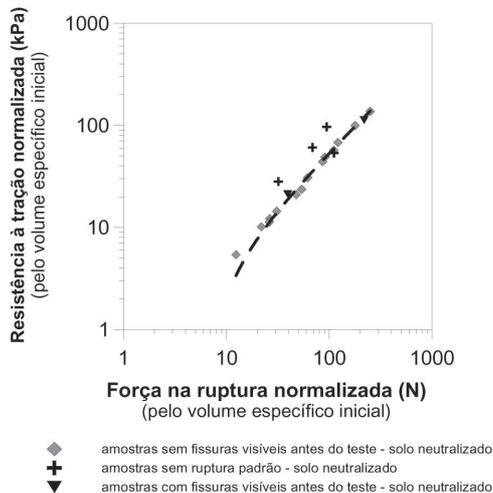


Figura 7. Resultados normalizados de resistência a tração em relação a carga na ruptura –solo neutralizado.

Na Figura 8 pode ser percebido que uma das amostras fissuradas apresentou um comportamento totalmente diferenciado do restante dos outros ensaios. Nesta mesma Figura 8, cabe ressaltar que a umidade da amostra diminuiu à medida que a resistência à tração cresceu. O deslocamento vertical também diminuiu com a diminuição do teor de umidade. Porém, para as amostras mais úmidas (até atingir o limite de plasticidade), o deslocamento vertical na ruptura foi mais ao menos constante e em torno de 2,5 mm, o que em termos de deformação correspondeu a aproximadamente de 3,3 a 3,7%. Pode ser percebido que os ensaios considerados bons se encaixaram relativamente bem nas duas relações das Figuras 7 e 8.

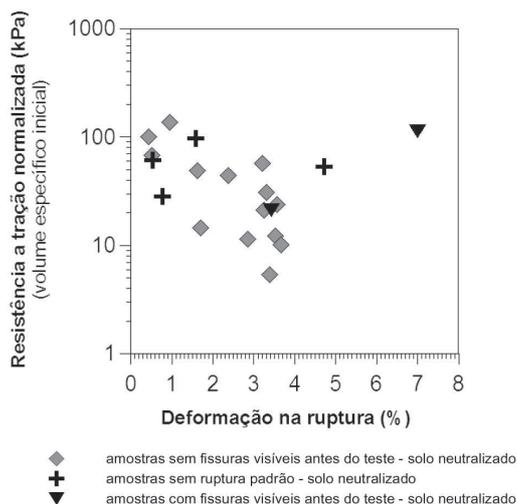


Figura 8. Resultados normalizados de resistência a tração em relação a deformação na ruptura –solo neutralizado.

Uma vez definidos os resultados considerados válidos, foram plotadas as relações entre a resistência à tração e índices físicos do solo. No caso do solo neutralizado, as relações entre a resistência à tração e o teor de umidade volumétrico, o grau de saturação e o peso específico seco são mostradas nas Figuras 9 a 11. O que se verificou foi a ocorrência de uma relação linear (coeficientes de correlação acima de 0,95) entre a resistência à tração e estes índices físicos na região em que o solo apresenta maiores teores de umidade (superiores ao limite de plasticidade). Para o solo saturado, a resistência seria aproximadamente zero, como se pode verificar pela Figura 10, o que confirma o fato de que toda a resistência apresentada ser em decorrência basicamente da sucção desenvolvida durante o processo de secagem.

Após um determinado valor destes índices físicos, que em termos de grau de saturação corresponde ao ponto de 86%, registra-se uma queda acentuada no valor da resistência. Pouco após o limite de contração, a resistência voltou a crescer em uma taxa menor até pouco após o solo atingir o seu índice de vazios mínimo. O segundo pico ocorreu para um teor de umidade gravimétrico de 4% ($S = 14\%$). A partir daí, a resistência a tração caiu novamente em uma taxa acentuada.

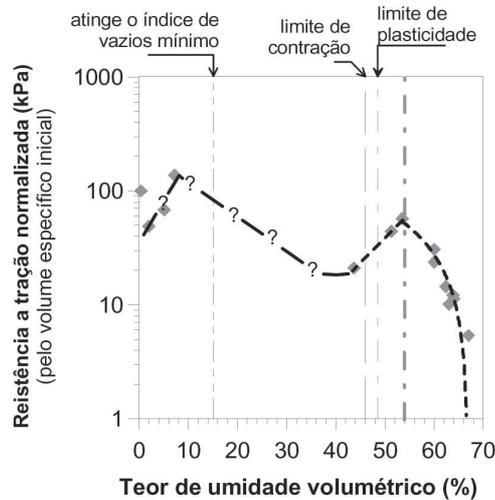


Figura 9. Resistência normalizada à tração e o teor de umidade volumétrico do solo neutralizado.

Para justificar este comportamento, foi analisada a curva característica de secagem deste solo, que está representada na Figura 12. Esta curva pode ser dividida em três regiões. A região de “contração normal” seria aquela linear, que se inicia em elevados teores de umidade e é caracterizada pelo fato do volume de solo contraído ser igual ao do volume de fluido evaporado.

Neste trecho, o solo está saturado. A faixa seguinte, chamada de “contração residual”, mostra uma redução na taxa de variação de volume do solo, implicando em um aumento de volume de ar, que iria substituindo o fluido removido. A última região do gráfico, denominada de “contração zero”, é aquela em que o solo não mais variaria de volume, tendo atingido sua densidade máxima para esta situação, mesmo havendo continuidade da perda de fluido para a atmosfera.

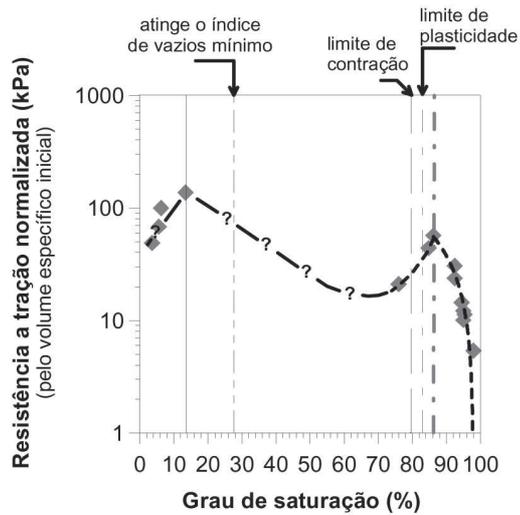


Figura 10. Resistência normalizada à tração e o grau de saturação do solo neutralizado.

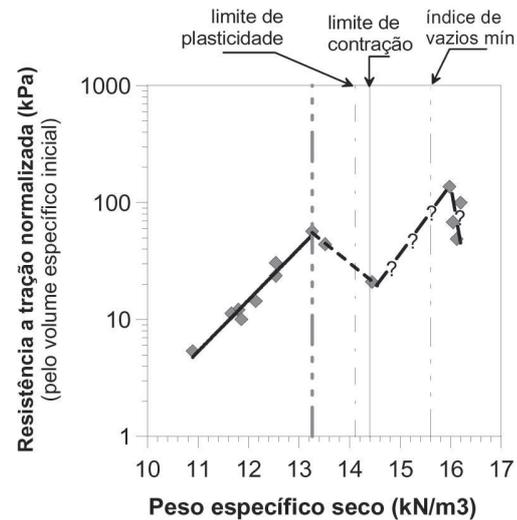


Figura 11. Resistência normalizada à tração e peso específico seco do solo neutralizado.

No caso do solo neutralizado, o trecho de contração residual estaria entre os teores de umidade gravimétrica de 10 a 70%. A variação total de índice de vazios dentro deste trecho foi 1,3 (de 2,4 a 1,1). O ponto de mudança de comportamento mostrado nas Figuras 9 a 11 corresponde a um teor de umidade gravimétrico de 40%. Um detalhe deste trecho pode ser visto na Figura 13, e nele pode ser percebido que o ponto onde há queda da resistência a tração é onde a curva de secagem começa a se distanciar mais da reta de saturação. Ou seja, a entrada de mais ar na amostra, provavelmente estabelecendo uma condição de ar contínuo no interior da mesma, seria o fator responsável pela mudança de comportamento da resistência a tração.

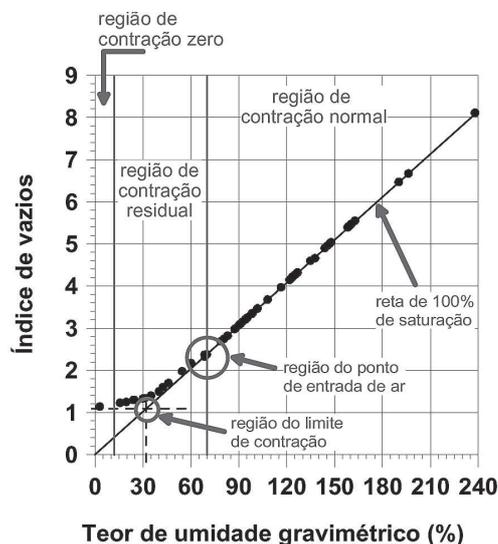


Figura 12. Curva característica de secagem do solo neutralizado.

Para obter uma confirmação desta tendência, foi traçada a relação entre a resistência a tração e a sucção. Mais uma vez, optou-se por normalizar a resistência à tração pelo volume específico inicial para reduzir a diferença nas condições iniciais das amostras, que variavam de volume em função do processo de secagem. O resultado para o solo neutralizado está na Figura 14. Foi encontrada uma relação linear entre a resistência normalizada a tração e tanto a sucção matricial quanto total até o ponto de descontinuidade equivalente a 86% de saturação. As relações obtidas foram (para grau de saturação entre 100 e 86%):

$$RT_{\text{solo neutr.}} = 1,99(\Psi_m) - 9 \quad (2)$$

$$RT_{\text{solo neutr.}} = 0,043(\Psi_t) + 17 \quad (3)$$

Nas fórmulas acima, RT é a resistência à tração; Ψ_m é a sucção matricial; Ψ_t é a sucção total. O valores estão em kPa e os coeficientes de correlação foram ambos de 0,96.

Ao se examinar a curva característica de sucção deste material (ver a Figura 15), verificou-se que o ponto correspondente a um grau de saturação de 86% equivale justamente ao ponto onde a curva de sucção total apresenta sua curvatura máxima. Ou seja, a resistência à tração do solo mostrou uma sensível mudança de comportamento ao mesmo tempo em que a sucção total do solo também mudava. E o ponto onde ocorreu o segundo pico de resistência (grau de saturação de 14%) corresponde ao ponto onde há uma nova mudança na tendência da curva característica de sucção total, que passa a entrar no trecho residual. Portanto, por estes resultados, seria a sucção total quem governaria a resposta do solo em relação à resistência à tração. Isto está de acordo com o observado por Tang *et al.* (1999), mas outros pesquisadores tais como Heibrock *et al.* (2003) e Zeh & Witt (2005) afirmam que a resistência a tração seria função da sucção matricial.

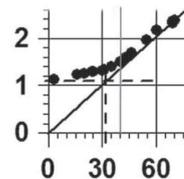


Figura 13. Detalhe da curva característica de secagem do solo neutralizado.

Como a aplicabilidade da Fórmula (1) é dependente de condições que não foram verificadas para os solos analisados (tais como diferença nos módulos de elasticidade a compressão e tração, por exemplo), resolveu-se confirmar a tendência observada anteriormente a partir de um valor que seria equivalente a “energia” necessária para romper a amostra. Por energia, está sendo chamando o valor da integral da curva *força externa por deslocamento vertical*, considerando o momento inicial do ensaio (deslocamento vertical zero) até a ruptura. Este mesmo tipo de análise foi feito por Munkholm & Kay (2002).

A Figura 16 mostra a relação entre a “energia” e o grau de saturação obtida para o solo neutralizado. Também em termos da “energia”, verifica-se a mudança de comportamento na região de curvatura máxima da curva característica de sucção total. Esta “energia” continuaria caindo até o ponto em que a sucção total começa a apresentar variação mínima. A partir daí, enquanto a sucção total continua aproximadamente constante, a “energia” também fica praticamente sem variar. Ao atingir a região onde a

curva característica de sucção total volta a mudar de curvatura, o valor da “energia” voltaria a cair. Na região inicial, quando as amostras ainda apresentam valores de teores de umidade maiores que o limite de plasticidade, a relação entre a “energia” e o grau de saturação é linear, com um coeficiente de correlação de 0,87. Já a Figura 17 mostra a relação entre a “energia” e a sucção, mostrando que a “energia” fica constante no trecho logo após o limite de contração até atingir o índice de vazios mínimo, que corresponde ao trecho de variação mínima da sucção total (ver a Figura 15).

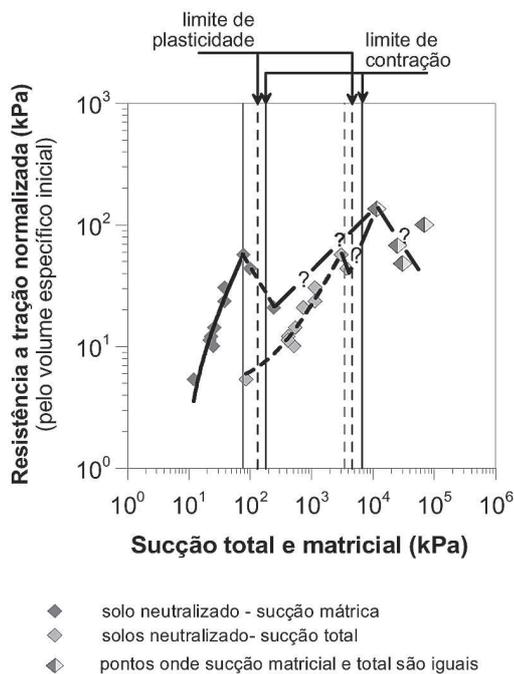


Figura 14. Resistência normalizada a tração e sucção do solo neutralizado.

4.2 Resultados do solo não neutralizado

O mesmo tipo de análise foi feito para o solo não neutralizado. A Figura 18 mostra uma comparação entre os resultados obtidos para resistência a tração do solo neutralizado e não neutralizado em relação ao teor de umidade gravimétrico. Pode ser percebido que também o solo não neutralizado apresenta uma mudança de comportamento quase no mesmo valor de resistência a tração do solo neutralizado. No trecho inicial, o melhor ajuste entre a resistência normalizada à tração e o teor de umidade gravimétrico foi exponencial, com coeficientes de correlação acima de 0,96 para ambos os solos.

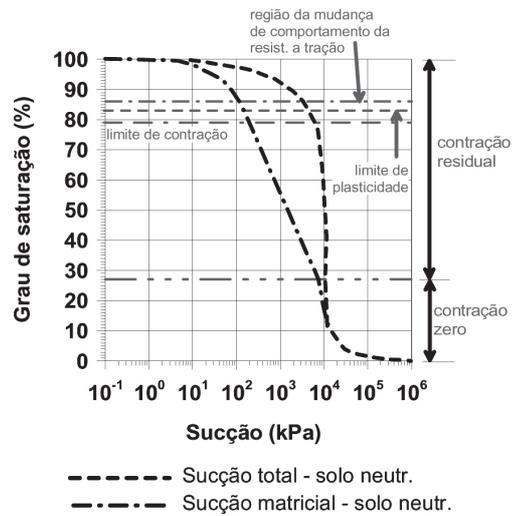


Figura 15. Curva característica de sucção do solo neutralizado.

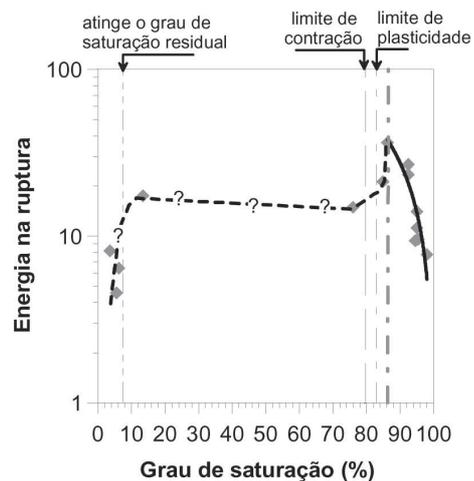


Figura 16. Relação entre a “energia” despendida na ruptura e o grau de saturação do solo neutralizado.

Para o solo não neutralizado, o trecho de contração residual ocorre aproximadamente entre os teores de umidade gravimétricos de 5% a 55%. Neste trecho, o índice de vazios variou de 1,9 até 0,7. O teor de umidade gravimétrico onde o primeiro pico ocorre é de aproximadamente 30%, correspondendo a um grau de saturação de 84%, bem próximo do valor do grau de saturação onde ocorreu a mudança de comportamento do solo neutralizado (86%). Nota-se, portanto, que os dois materiais apresentam comportamento bem semelhante em termos de variação da resistência com o teor de umidade neste trecho inicial. A diferença entre ambos começa a aparecer quando eles se dessaturam. Essa diferença aumenta quando o grau de saturação atinge um valor

em torno de 80%. Ou seja, quando se passa a ter ar contínuo nas amostras. O segundo pico ocorre em torno de 18%, o que equivale a um grau de saturação de 62%, o que neste caso é bem diferente do valor apresentado pelo solo neutralizado (14% de saturação). Para um mesmo teor de umidade, o solo neutralizado apresenta maior resistência no trecho úmido e, depois, menor em quase todo o trecho seco, voltando a ficar maior na região de contração zero.

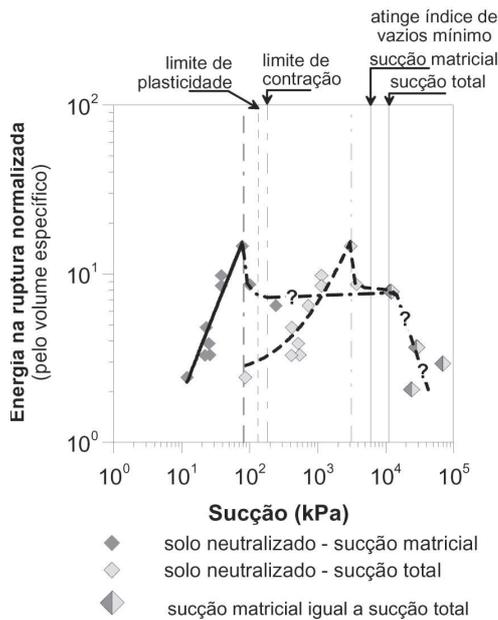


Figura 17. Relação entre a “energia” desprendida na ruptura e a sucção do solo neutralizado.

A Figura 19 mostra a curva característica de sucção do solo não neutralizado. O ponto de mudança verificado na Figura 18 ($w = 30\%$ e $S = 84\%$) também coincide com o ponto de curvatura máxima da curva característica de sucção total. O segundo pico de resistência ocorre para um grau de saturação em torno de 60% e pela curva característica, percebe-se que neste ponto a sucção total começa a mudar de curvatura.

O solo neutralizado tem sucção matricial menor que o não neutralizado para graus de saturação entre 100 e 73%, sendo maior a partir daí até o final da curva. Com relação à sucção total, o solo neutralizado tem valores aproximadamente iguais ao do não neutralizado até por volta de 90% de saturação, sendo inferior a partir daí. A diferença fica mais acentuada quando se atinge valores inferiores a um grau de saturação de 30%. Portanto, pode-se concluir que os trechos onde os solos apresentam maior resistência a tração em relação ao outro coincidem com aqueles em que a diferença entre a sucção total e matricial

também era maior que a do outro. Ou seja, considerando esta diferença como sucção osmótica, os resultados sugerem que o solo que apresentava maior a sucção osmótica, também apresentava maior resistência a tração.

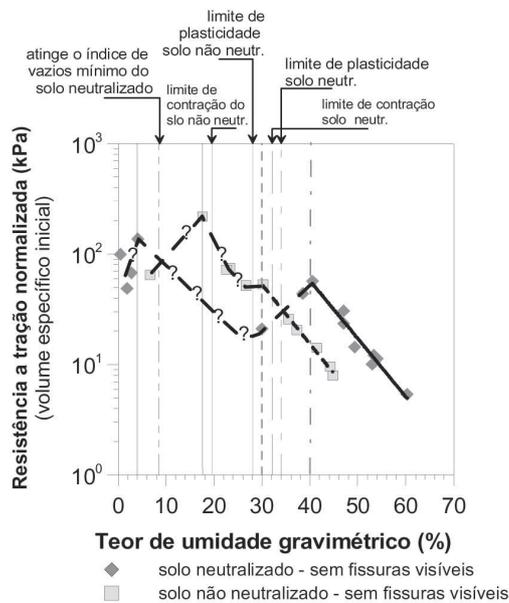


Figura 18. Resultados de resistência normalizada à tração do solo neutralizado e não neutralizado.

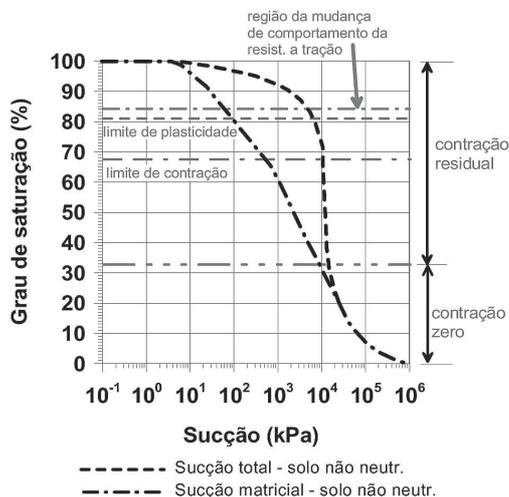


Figura 19. Curva característica de sucção do solo não neutralizado.

A relação entre a resistência à tração do solo não neutralizado com a sucção apresentou uma forma semelhante ao do solo neutralizado. As equações

encontradas para o trecho inicial (grau de saturação entre 100% e 84%) são apresentadas a seguir, sendo ambas lineares. No caso da sucção matricial, o coeficiente de correlação foi 0,995 e no caso da sucção total, 0,92.

$$RT_{\text{solo não neutr}} = 1,39(\Psi_m) + 10 \quad (4)$$

$$RT_{\text{solo não neutr.}} = 0,018(\Psi_t) + 21 \quad (5)$$

Nas fórmulas acima, RT é a resistência a tração; Ψ_m é a sucção matricial; Ψ_t é a sucção total, e os valores estão em kPa. Pelas correlações apresentadas pelas Fórmulas (2) a (5), poderia ser dito que, para o caso de sucção igual a zero (S = 100%), o solo não neutralizado apresentaria uma resistência a tração variando de 10 a 21kPa, enquanto o solo neutralizado, 0 a 17kPa.

O comportamento do solo não neutralizado em termos da “energia” na ruptura também foi semelhante ao do solo neutralizado. Ou seja, enquanto a sucção total permaneceu constante, esta “energia” também permaneceu.

5 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou valores de resistência a tração de um solo obtida usando o ensaio de compressão diametral, ou ensaio brasileiro. Vários testes foram executados a diferentes teores de umidade e os resultados de resistência à tração puderam ser correlacionados com índices físicos e com a sucção total e matricial. As amostras foram preparadas em laboratório e saturadas com dois tipos de fluidos diferentes e, pelas curvas características de sucção, verificou-se um elevado nível de sucção osmótica, o que possibilitou uma avaliação distinta do efeito da sucção total e da matricial. Dos resultados obtidos, pôde ser observado que:

1. Na relação entre a resistência à tração e índices físicos, ambos os solos mostraram uma mudança de comportamento para um grau de saturação em torno de 85%.
2. Pelas curvas características de secagem, percebeu-se que o ponto onde há esta mudança é o mesmo onde começa haver um maior distanciamento do solo de sua condição de 100% de saturação. Ou seja, é a região onde há entrada de ar em uma taxa mais acentuada nas amostras e, provavelmente, estabelecendo uma condição de ar contínuo no interior das mesmas.
3. Pelas curvas características de sucção, verificou-se que o ponto correspondente a um grau de saturação de em torno de 85% equivale ao ponto onde a curva de sucção total apresenta a sua curvatura máxima. Ou seja, para ambos os solos, a resistência à tração do solo mostrou uma sensível mudança de com-

portamento ao mesmo tempo em que a sucção total também mudava.

4. Também para ambos os solos, foi encontrada uma relação linear entre a resistência normalizada a tração e as sucções matricial e total até o ponto de descontinuidade em torno de 85% de saturação.

5. Por estas relações mencionadas no item anterior, a resistência à tração seria bem superior ao previsto por Snyder & Miller (1985), que afirmaram que a máxima tensão de tração desenvolvida em solos não saturados é da ordem da metade do valor da sucção matricial.

6. Pelas relações lineares encontradas, poderia ser dito que, para o caso de sucção igual a zero (S = 100%), o solo não neutralizado apresentaria uma resistência à tração variando de 10 a 21kPa, enquanto o neutralizado, 0 a 17kPa.

7. Nas relações entre a resistência à tração e o teor de umidade, ambos os solos apresentaram um segundo pico de resistência. Para ambos, este segundo pico ocorreu onde há a curva característica de sucção total apresentou nova mudança de curvatura. Portanto, por estes resultados, seria a sucção total quem governaria a resposta do solo em relação à resistência à tração (se muda a sucção total, muda a resistência a tração).

8. Também pela análise em termos da “energia” necessária para romper as amostras, verificou-se mudanças de comportamento nas mesmas regiões de alteração de curvatura da curva característica de sucção total.

9. Quando a sucção total ficou aproximadamente constante, a “energia” também ficou praticamente sem variar.

10. Considerando a sucção osmótica como a diferença entre a sucção total e a matricial, a comparação entre os resultados de resistência a tração dos dois solos indicam que o solo que apresentou maior sucção osmótica, apresentou maior resistência à tração.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de registrar os seus agradecimentos ao Projeto PRONEX e à CAPES, pelo auxílio fornecido para execução deste trabalho. Também agradecem a Novellis, unidade de Ouro Preto, MG, pelo fornecimento do material ensaiado.

7 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.
- Barzegar, A. R. Oades, J. M., Rengasamy, P. & Murray, R.S. (1995) – *Tensile strength of dry remoulded*

- clays as affected by the clay fraction. – Geoderma* (65), pp. 93 – 108, 1995.
- Barzegar, A. R., Murray, R. S., Churchman, G. J. & Rengasamy, P. (1994). *The strength of remoulded soils as affected by exchangeable cations and dispersible clay*. **Aust. J. Soil Res.** 32:185–199.
- Carneiro, F. L. B & Barcellos, A. (1953). *Concrete tensile strength*. Intern. Testing Res. Lab. Paris, France, Bull N° 13, pp 97 – 127.
- Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C., & Rad, N. S. (1981). "Cemented sands under static loading." *J. Geotech. Eng.*, 107(6),799–817.
- Das, B. M., Yen, S. C. & Dass, R. N. (1995) – Brazilian tensile strength test of lightly cemented sand – Technical Note – *Can. Geotec. J.*, 32, pp. 166 – 171.
- Favaretti, M. (1995). Tensile strength of compacted clays. *Proc. First Int. Conf. On Unsaturated Soils, UNSAT95*. Paris, p.p. 51 - 56.
- Guinea, G. V.; Elices, M. & Planas, J. (2000) – Assessment of the tensile strength through size effect curves. **Eng. Fracture Mechanics** 65 , pp.189 – 207.
- Heibrock, G.; Zeh, R. & Witt, K. J. - 2003- Tensile strength of compacted clays-in Schanz -ed- From experimental evidence towards numerical modelling of unsaturated soils-ICSMGE Int- Conf- 18-19 September 2003-Weimar- Springer Verlag
- Hillel, D. (1983) – *An experimental test of evaporation from bare soil under transient partial shading with analysis of advection effects*. **Soil Science**, Vol 135 (6), pp. 385 – 392, 1983.
- Krishnayya, A. V. G. & Einsenstein, Z. (1974). Brazilian tensile test for soils. *Canadian Geotech. Journal*, 11, pp. 632 – 642.
- Maciel, I. C. Q. (1991). *Aspectos microestruturais e propriedades geomecânicas de um perfil de solo residual de gnaíse facoidal*. Dissertação de mestrado, DEC-PUC-Rio, R. J., 182 pp.
- Munkholm, L. J. & Kay, B. D., 2002– Effect of water regime on aggregate-tensile strength, rupture energy and friability. **Soil Science Soc. Am. J.** 66, pp. 702–709.
- Rahimi, H.; Pazira, E. & Tajik, F.(2000) – Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. **Soil & Tillage Research** 54, 145 – 153. 2000.
- Snyder, V. A. & Miller, R. D. (1985) – Tensile strength of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 49, 58 - 65. 1985.
- Tang, G. X., Graham, J., Blatz, J., Gray, M. N. & Rajapakse, R. D. (1999) - Suctions, Stresses, and Strengths in Unsaturated Sand-Bentonite. *International Journal of Engineering Geology*
- Towner, G. D. (1987) – The mechanics of cracking of drying clay. **J. Agric. Eng. Res.** 36, 115 - 124. 1987.
- Utomo, W. H. & Dexter, A. R. (1981) - *Soil friability*. *European Journal of Soil Science* 32 (2), 203–213.
- Villar, L. F. S. (2002). *Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita*. Tese de Doutorado. DEC Puc-Rio, 511 p.p.
- Villar, L. F. S. & de Campos, T. M. P. (2003). *Caracterização geotécnica de resíduos de mineração e processamento de bauxita*. V REGEO, P. A., Brasil.
- Villar, L. F. S. & de Campos, T. M. P. (2002). Obtaining the soil moisture characteristic curve of a very compressible waste. *Proc. Second UNSAT*. Recife, Brasil, 339 – 345.
- Zeh, R.M. & Witt, K.J. (2005) - Suction-controlled tensile strength of compacted clays. 16th ICSMGE Osaka, September 2005, pp 2347-2350.